

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias



*Modelo hidrológico de la cuenca del Río San Juan y el
Área Metropolitana de Monterrey incorporando una nueva
fuente de suministro de agua*

Tesis presentada por

Daniel Alejandro Gómez Martínez

sometida a la

Escuela de Ingeniería y Ciencias

como un requisito parcial para obtener el grado académico de

Maestro en Ciencias

En

Sistemas Ambientales

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias

Los miembros del comité aquí citados certificamos que hemos leído la tesis presentada por Daniel Alejandro Gómez Martínez y consideramos que es adecuada en alcance y calidad como un requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Sistemas Ambientales

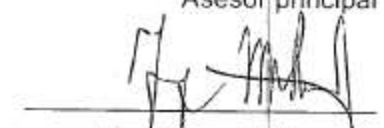


Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey

Escuela de Ingeniería y Ciencias

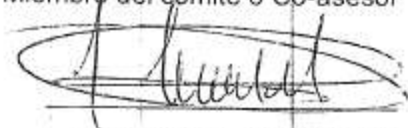
Asesor principal



Dr. Jürgen Mahlke

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey

Miembro del comité o Co-asesor



Dr. Héctor A. Barrios Piña

Tecnológico de Monterrey, Campus Guadalajara

Miembro del comité



Dr. Jorge Welti Chanes

Director de Posgrado

Escuela de Ingeniería y Ciencias


Monterrey, Nuevo León

Diciembre de 2015

Declaración de autoría

Yo, Daniel Alejandro Gómez Martínez, declaro que esta tesis titulada, "*Modelo hidrológico de la cuenca del Río San Juan y el Área Metropolitana de Monterrey incorporando una nueva fuente de suministro de agua*", y el trabajo que se presenta en ella es de mi autoría. Adicionalmente, confirmo que:

- Realicé este trabajo en su totalidad durante mi candidatura al grado de doctor en esta universidad.
- He dado crédito a cualquier parte de esta tesis que haya sido previamente sometida para obtener un grado académico o cualquier otro tipo de titulación en esta o cualquier otra universidad.
- He dado crédito a cualquier trabajo previamente publicado que se haya consultado en esta tesis.
- He citado el trabajo consultado de otros autores, y la fuente de donde los obtuve.
- He dado crédito a todas las fuentes de ayuda utilizadas.
- He dado crédito a las contribuciones de mis coautores, cuando los resultados corresponden a un trabajo colaborativo.
- Esta tesis es enteramente mía, con excepción de las citas indicadas.



Daniel Alejandro Gómez Martínez
Monterrey Nuevo León, 04 de diciembre de 2015

@2015 por Daniel Alejandro Gómez Martínez

Todos los derechos reservados

DEDICATORIA

A mi madre María Guadalupe Martínez García, por apoyarme en todo momento y guiarme por el camino del bien y la honestidad.

A mi padre Agustín Gómez López, por compartirme su sabiduría y enseñarme a nunca rendirme ante las adversidades de la vida.

A mi hermana Marian Lucine Gómez Martínez, porque una hermana es una de las mejores bendiciones que se pueden tener en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de la vida.

Agradezco también al Dr. Aldo Ramírez Orozco por creer en mí y apoyarme a realizar este proyecto de investigación.

Al Dr. Samuel Sandoval Solís, por abrirme las puertas hacia otros horizontes, pues sin su asesoría no habría sido posible realizar este proyecto.

A mi familia, porque al final de todo son los únicos que siempre estarán ahí.

A mis grandes amigos, en especial a los formaron parte de esta gran aventura del posgrado.

Y por último al Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, por abrirme las puertas de esta gran universidad y al CONACyT por apoyarme con sus becas de manutención.

RESUMEN

En el presente trabajo se implementa un modelo de simulación del Área Metropolitana de Monterrey (AMM) y de una parte de la cuenca del Río San Juan. Esto se logra mediante el uso de la herramienta computacional RiverWare, plataforma de modelación que permite realizar evaluaciones en la planificación integrada de recursos hídricos a través de la modelación de los sistemas de suministro y demanda. El principal objetivo es ver el balance futuro entre la oferta y demanda en el AMM mediante su modelación en la herramienta RiverWare bajo distintos escenarios. En uno de estos escenarios alternos, se planea simular la incorporación del proyecto Monterrey VI (MTY VI), que tiene como objetivo transportar agua mediante un acueducto desde la cuenca el Río Pánuco hasta el AMM, para satisfacer la demanda de la ciudad en futuros años. Otros escenarios probables que se proponen, son esquemas de operación de los sistemas de abastecimiento ante diferentes alternativas de transferencia de agua como la modificación en la dotación de agua per cápita y la limitación en la extracción de los acuíferos, considerando la media de la climatología normal y datos climatológicos históricos repetidos.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río San Juan. Elaborado por el autor.	17
Figura 2. Ciclo hidrológico. Fuente: Valdez, 1990	20
Figura 3. Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable. Fuente: Valdez, 1990.....	21
Figura 4. Esquema de las fuentes de suministro en el Área Metropolitana de Monterrey. Fuente: Aguilar et al., 2015.	23
Figura 5. Trayecto del acueducto Monterrey VI. Fuente: SADM, 2011.	32
Figura 6. Ubicación de la cuenca del Río Pánuco. Elaborado por el autor.....	34
Figura 7 Modelo esquemático de la cuenca del Río San Juan en la herramienta RiverWare.....	45
Figura 8 Regla creada en RiverWare para resolver el elemento Área Metropolitana de Monterrey.	54
Figura 9. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control Icamole empleado en la validación.	58
Figura 10. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control El Cuchillo en la validación.	59
Figura 11. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control Los Herrera en la validación.	59
Figura 12 Metodología para la simulación de futuros escenarios con la hidrología histórica repetida.....	63
Figura 13. Metodología para la simulación de futuros escenarios con la media de la hidrología....	64
Figura 14. Demanda mensual de agua potable (Mm3) para el Área Metropolitana de Monterrey 2015-2050. Elaborado por el autor con datos de CONAPO (2014), SADM (2014) y Danner et al., (2009)	67
Figura 15. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario Base evaluado con y sin el MTY VI.	75
Figura 16. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) en el Escenario Base evaluado con y sin MTY VI.....	76
Figura 17. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario Base evaluado con y sin MTY VI.	77
Figura 18. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 1 evaluado con y sin MTY VI.	78
Figura 19. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 1 evaluado con y sin MTY VI.	79
Figura 20. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 1 evaluado con y sin MTY VI	80
Figura 21. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI.	81
Figura 22. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI.	82
Figura 23. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI	83
Figura 24. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.	84

Figura 25.Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.	85
Figura 26.Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.	86
Figura 27.Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.	87
Figura 28.Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.	88
Figura 29.Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.	89
Figura 30.Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.	90
Figura 31.Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.	91
Figura 32.Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.	92
Figura 33.Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.	93
Figura 34.Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.	94
Figura 35.Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyección de la serie de crecimiento de la población de los 16 municipios del Área Metropolitana de Monterrey 2010-2030. Fuente: CONAPO, 2014	24
Tabla 2. Indicadores de impactos ambientales del proyecto MTY VI. Fuente: SADM, 2012	35
Tabla 3. Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego Salinas. Fuente: Danner et al., 2009	47
Tabla 4. Variación mensual en porcentajes de los consumos de los distritos de riego Ayancual y Pesquería. Fuente: Danner et al., 2009.....	49
Tabla 5.Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego Ramos Pilón. Fuente: Danner et al., 2009.....	51
Tabla 6.Tabla X. Variación mensual en porcentajes de los consumos del AMM. Fuente: Danner et al., 2009.....	51
Tabla 7.Recargas naturales de los acuíferos en el AMM. Fuente: SEMARNAT, 2011.....	53
Tabla 8. Porcentajes anuales promedio de los flujos de retorno de agua producidos por las PTARs en el AMM. Elaborado por el autor con datos del Anuario Estadístico SADM, 2014 y Danner et al., 2009.....	54
Tabla 9.Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego San Juan aguas abajo de El Cuchillo. Fuente: Danner et al., 2009.	55
Tabla 10.Resultados de la validación obtenida para los tres puntos de control.	60
Tabla 11.Población y volumen de demanda de agua para el Área Metropolitana de Monterrey 2015-2050. Elaborado por el autor con datos de CONAPO (2014) y SADM (2014).....	66
Tabla 12.Volúmenes concesionados (derechos de agua) para los tres sistemas de agua subterránea en el Área Metropolitana de Monterrey. Fuente: SEMARNAT, 2011.	68
. Tabla 13.Almacenamiento muerto para las tres presas en el Área Metropolitana de Monterrey. Fuente: Danner et al., 2009.....	69
Tabla 14. Presas asociadas a los sitios de demanda en la cuenca del Río San Juan. Fuente: Danner et al., 2009 y CONAGUA, 2014.	70
Tabla 15.Volúmenes mensuales concesionados y recargas naturales de los acuíferos en el AMM. Fuente: SEMARNAT, 2011	70
Tabla 16.Escenarios evaluados en el estudio.....	74

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	1
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE CONTENIDOS	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del problema	3
1.2 Objetivo general.....	4
1.2.1 Objetivos específicos.....	4
1.3 Antecedentes	4
1.3.1 Trabajos relacionados	5
1.4 Modelos hidrológicos.....	6
1.4.1 Clasificación de modelos.....	8
1.4.2 Modelos matemáticos.....	9
1.4.3 Modelos dinámicos	11
1.5 Sistemas computacionales para la toma de decisiones en el manejo de recursos hídricos... 12	
1.6 RiverWare.....	15
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	16
2.1 Generalidades y clima de la cuenca del río San Juan	16
2.2 Uso de suelo de la cuenca del río San Juan.....	18
2.3 Descripción general de los sistemas de abastecimiento de agua potable.....	19
2.4 Infraestructura hidráulica en la cuenca del Rio San Juan.....	21
2.4.1 Distritos de riego	21
2.4.2 Fuentes de suministro en el AMM	22
2.5 Crecimiento poblacional	23
2.6 Conflictos sociales y competencia de los recursos hídricos.....	25
2.7 Sequías en Nuevo León	26
2.8 Proyectos Monterrey I al V.....	27
2.9 Proyecto Monterrey VI.....	29
2.10 Cuenca del río Pánuco.....	33
2.11 Impactos ambientales asociados con el proyecto MTY VI	35

2.12 Medidas de mitigación	36
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	42
3.1 Balance de masas en Excel	43
3.3.1 Series de tiempo.....	43
3.2 Construcción del modelo esquemático.....	44
3.2.1 Definición de la zona de estudio	46
3.3 Modelado en RiverWare	46
3.3.2 Subcuenca Icamole.....	46
3.3.3 Subcuenca Los Herrera.....	48
3.3.4 Subcuenca El Cuchillo.....	49
3.3.5 Subcuenca Los Aldama.....	54
3.4 Calibración y validación del modelo.....	55
3.4.1 Validación	57
3.5 Restricciones del modelo	60
CAPÍTULO 4: PROYECCIÓN Y SIMULACIÓN DE FUTUROS ESCENARIOS	62
4.1 Simulación de futuros escenarios	62
4.2 Factor de crecimiento poblacional.....	64
4.3 Demanda futura de agua potable para el AMM	65
4.4 Escenario base.....	67
4.5 Escenario 1	70
4.6 Escenario 2	71
4.7 Escenario 3	71
4.8 Escenario 4	72
4.9 Escenario 5	72
4.10 Escenario 6	72
4.11 Escenario Monterrey VI.....	72
CAPÍTULO 5: RESULTADOS	74
5.1 Resultados del Escenario Base	75
5.2 Resultados del Escenario 1.....	78
5.3 Resultados del Escenario 2.....	81
5.4 Resultados del Escenario 3.....	84
5.5 Resultados del Escenario 4.....	87
5.6 Resultados del Escenario 5.....	90

5.7 Resultados del Escenario 6.....	93
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES.....	96
CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES.....	99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

México es uno de los países que enfrentará más problemas de falta de agua para el año 2020. Una de las causas de este problema fue la sequía de los 90's, pues esta redujo la disponibilidad del agua para satisfacer los usos tradicionales en el norte de México, incluyendo la cuenca del Río San Juan (Návar, 2001). Aunado a esto, el organismo operador Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, ha enfrentado el problema de abastecimiento de agua para usos domésticos e industriales desde el año 1972 hasta la fecha, originada por la industrialización y la actividad socioeconómica, pues estos factores provocaron la migración de varios pueblos hacia el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) convirtiéndola en la tercer ciudad con mayor cantidad de habitantes a nivel nacional (De León et al., 1998). Esto genera una sobrepoblación que tiende a incrementar la demanda de los recursos hídricos de esta región.

El Área Metropolitana de Monterrey se encuentra ubicada dentro de la cuenca hidrológica del Río San Juan, en una región semidesértica, de transición entre el sub-trópico y el desierto, con períodos cíclicos de sequías prolongadas y recurrentes, y por contraste, de lluvias torrenciales esporádicas (SADM, 2015).

Como ya se mencionó anteriormente, el AMM se caracteriza por una gran escasez de recursos hídricos a la que su población se ha enfrentado a lo largo de los años. A pesar de la suma de las acciones realizadas a lo largo de los años para disminuir la demanda promedio por habitante de 330 litros al día en el año 1985 (ANEAS, 2002) a 188.2 litros al día para el año 2012 en el AMM (Cedillo, 2012), la región está a punto de atravesar de nuevo una crisis en cuanto a reservas de agua potable se refiere. Además, a partir del año 2015 la extracción

por tipo de fuente para abastecer el uso público urbano del AMM pasaría del porcentaje actual de 40% aguas subterráneas y 60% aguas superficiales, a un 30% y 70% respectivamente; esto debido a la disminución en la disponibilidad del recurso generado por el crecimiento poblacional y la industria, aunado a la variabilidad climática que afecta a la región (Cedillo, 2012).

Por lo anterior, se han planteado y propuesto diferentes proyectos para hacer frente a este problema. Se cree que la solución más factible para enfrentar la crisis de los recursos hídricos del AMM es el proyecto Monterrey VI, que tiene como objetivo realizar un transvase de la cuenca del Río Pánuco en Veracruz hasta la presa Cerro Prieto en Linares, N.L. El proyecto Monterrey VI fue propuesto por el organismo operador Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) y avalado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Este garantizará el abasto de agua potable al área metropolitana de Monterrey y su zona conurbada para los próximos 30 años (SADM, 2014).

Por otro lado, es fundamental complementar y respaldar estos proyectos civiles con estudios técnicos desarrollados desde el punto de vista de sostenibilidad, con el objetivo de asegurar la construcción de esquemas de manejo integral del recurso. Por tanto, se realiza la exploración de posibles escenarios con la herramienta RiverWare. Esta herramienta ha sido utilizada en distintos proyectos para la gestión de recursos hídricos en Estados Unidos. Se eligió esta herramienta por ser un software amigable, aunado a que tiene una gran gama de aplicaciones.

En las siguientes secciones, se discutirá la definición del problema, los objetivos de este trabajo (general y específico), la hipótesis y el marco teórico.

1.1 Definición del problema

Se tiene contemplado en un futuro que la demanda de los recursos hídricos en el AMM siga incrementando y la disponibilidad siga decreciendo, pues las sequías y el crecimiento poblacional seguirán afectando a la región (Návar, 2001). Por lo tanto, se requiere una pronta implementación de un manejo sostenible de recursos hídricos en la cuenca del río San Juan.

La combinación de sequías y el crecimiento poblacional en áreas con problemas de disponibilidad de recursos hídricos, ha motivado la búsqueda de un suministro adicional de agua y de mejores operaciones en las grandes ciudades. Esto ha generado que el ser humano recurra a obras civiles como los vasos de almacenamiento, canales de diversión y esquemas de transferencia de agua para poder llevar agua potable a las personas más fácilmente. Muchas ciudades han tomado ventaja de esto (Smith, 2011). Un ejemplo de estas obras civiles es el acueducto del proyecto Monterrey VI, que consiste fundamentalmente en realizar un transvase de la cuenca del río Pánuco hasta la presa Cerro Prieto, junto con todas sus implicaciones financieras, ecológicas y socioculturales (Esparza et al., 2014). Aunado a esto, se deben realizar los respectivos estudios técnicos que permitan crear modelos esquemáticos con diferentes escenarios para lograr un manejo sostenible del recurso hídrico. El objetivo de este estudio es realizar este último punto.

Se contempla que los resultados de este estudio serán una contribución importante para evaluar medidas de adaptación ante escenarios a enfrentar en la región a mediano y largo plazo bajo la influencia de tendencias de crecimiento poblacional.

1.2 Objetivo general

Crear un modelo del esquema del manejo integral del agua superficial y subterránea de la cuenca del Río San Juan, enfocándose mayormente en el Área Metropolitana de Monterrey, incorporando el escenario de una nueva fuente utilizando la herramienta RiverWare.

1.2.1 Objetivos específicos

- Estimar la futura oferta y demanda de agua en el Área Metropolitana de Monterrey.
- Estimar la cantidad de agua que necesitará el Área Metropolitana de Monterrey en años futuros.
- Analizar los posibles escenarios de las fuentes de suministro para la cuenca del Río San Juan para el año 2050, considerando la estabilización y disminución de la dotación de agua per cápita.

1.3 Antecedentes

En esta sección se introducen algunos trabajos anteriores que están relacionados con la cuenca del Río San Juan y el AMM, que es nuestra área de estudio. Algunos de ellos utilizan herramientas y softwares diferentes para obtener sus respectivos resultados. Todos los estudios son de gran ayuda para obtener indicadores del estado y condiciones de la disponibilidad de agua en las que se encontraba esta región. Sin embargo, los estudios realizados en esta área de estudio bajo el enfoque de manejo de los recursos hídricos siguen siendo escasos.

1.3.1 Trabajos relacionados

En 1999, el International Water Management Institute (IWMI) realizó el trabajo de simulación de alternativas de manejo del agua en la cuenca del río San Juan. El objetivo fue observar el funcionamiento del sistema hidrológico del río San Juan con el fin de estudiar el impacto de la presa El Cuchillo en el Distrito de Riego 026 Bajo Río San Juan, mediante la comparación de escenarios antes y después de la construcción de dicha presa. Esta obra de infraestructura que surgió a raíz de la necesidad de complementar el abastecimiento al Área Metropolitana de Monterrey debido al crecimiento poblacional y la baja disponibilidad del recurso en la cuenca. Como resultado de estas simulaciones se encontraron variaciones de alrededor de un 20% para la satisfacción de demanda en el uso agrícola para Distrito de Riego 026 entre los escenarios de mayor y menor necesidad de suministro. La importancia de este estudio con respecto al tema tratado en el presente radica en que la presa denominada “El Cuchillo” es parte de las tres fuentes principales de suministro superficial para la región (Flores-López & Scott, 1999).

En el año 2009, se desarrolló un modelo de la Cuenca del Río Grande/Bravo (Danner et al., 2009) en colaboración con el Physical Assessment Project en el software Water Evaluation and Planning System (WEAP). El objetivo de este trabajo era promover la cooperación regional entre Estados Unidos y México para realizar un manejo de recursos hídricos más eficiente en la cuenca. El modelo incluye políticas de operación los diferentes países y formas de asignación de demandas.

En el mismo año, se realizó un estudio sobre la cuenca del Río Grande/Bravo (Sandoval-Solís & McKinney, 2009), que también abarca la zona de este estudio. El objetivo

de este trabajo era un análisis de la disponibilidad del agua para determinar el caudal ambiental en la Cuenca Grande/Bravo. Los resultados mostraron que las condiciones ambientales no eran sostenibles. Por lo tanto, se deben proponer acciones para solventar los problemas en esta área.

En el año 2012 se realizó un estudio para la evaluación de las fuentes abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Monterrey (Cedillo, 2012). El objetivo de este trabajo era generar un modelo para la simulación de escenarios de oferta y demanda de agua para el Área Metropolitana de Monterrey con la herramienta WEAP. Los resultados fueron que a partir del año 2015 la extracción por tipo de fuente para abastecer el uso público urbano del AMM pasaría del porcentaje actual de 40% aguas subterráneas 60% aguas superficiales a un 30% y 70% respectivamente; esto debido a la disminución en la disponibilidad del recurso.

The Nature Conservancy (2015) publicó un reporte sobre la seguridad hídrica del Área Metropolitana de Monterrey y de la cuenca del Río Pánuco. Este reporte consideraba el Proyecto Monterrey VI y tenía como objetivo aportar elementos científicos y técnicos que contribuyeran a la toma de decisiones respecto a la gestión de los recursos hídricos en el AMM y la cuenca del Río Pánuco. Las conclusiones fueron que se debe tener una visión regional para encontrar nuevas soluciones para el problema de déficit de agua. Aunado a que la agricultura juega un papel importante para solucionar este problema y lograr la seguridad hídrica en la región.

1.4 Modelos hidrológicos

Los sistemas hidrológicos son generalmente analizados usando modelos matemáticos. Estos pueden ser usados para propósitos simples como para determinar el

caudal que debería usarse en el diseño de una rejilla de carretera, o también pueden ser usados para tomar las mejores decisiones al desarrollar una cuenca hidrológica para múltiples objetivos. La decisión y el tipo de modelo deberían adaptarse al propósito por el cual se está utilizando (Viessman & Lewis, 2013).

De la misma manera, la gestión del agua tiene una variedad de objetivos. Los proveedores de agua tienen como objetivo minimizar el desperdicio de recursos y optimizar los plazos de entrega de agua. Los planificadores intentan predecir con precisión las demandas de agua de varios consumidores. Los gobiernos tratan de controlar el déficit entre la oferta y la demanda de agua. Por lo general, la gestión del agua es un proceso complicado que busca equilibrar la oferta y la demanda, o disminuir las brechas entre estas. Así, se han desarrollado modelos de gestión del agua para apoyar las decisiones de gestión (Wang, 2013).

Sin embargo, la mayoría de los problemas reales relacionados al agua tienen dimensiones físicas, sociales, políticas, ambientales y legales, lo que muchas veces vuelve difícil su descripción en términos matemáticos (Viessman & Lewis, 2013).

A pesar de que el enfoque general de modelado de la gestión integral de los recursos hídricos es el mismo, cada cuenca puede ser diferente en términos de patrones, tales como el suministro, demanda, calidad, legalidad, etc. Los modelos que se mencionarán más adelante no están diseñados para resolver tales ambigüedades o problemas legales, pero están diseñados para encontrar una solución óptima de manejo integral de recursos hídricos para una cuenca bien definida con limitaciones físicas y sociales (Ejet, 2000).

1.4.1 Clasificación de modelos

Hay varias formas de clasificar los modelos usados en sistemas hidrológicos. A continuación se describen algunos de ellos:

- Modelos estáticos. Los modelos estáticos están basados en variables que tienen valores medios durante un determinado tiempo (Ratnawati, 2000). Las ecuaciones 1, 2 y 3 que se describieron anteriormente son un ejemplo de este tipo de modelos.
- Modelos dinámicos. La dinámica natural de un cambio en el almacenamiento en un tramo de río durante un lapso es un ejemplo de este tipo de modelos, pues toman en cuenta este proceso utilizando diversas aproximaciones del proceso de flujo, que se describen por ecuaciones diferenciales (Ratnawati, 2000). Además, estos permiten observar el comportamiento de un sistema y su respuesta a las intervenciones en el tiempo (Beltrán, 2012).
- Modelos determinísticos. Los modelos determinísticos son aquellos que se basan en variables conocidas de entrada (Ratnawati, 2000).
- Modelos estocásticos. Los modelos estocásticos suelen utilizar funciones aleatorias para describir algún proceso. Los modelos estocásticos se pueden dividir en explícitos o implícitos, esto depende del uso de las funciones estocásticas en el modelo, pues muchas veces las series de datos desarrolladas por los modelos estocásticos, son posteriormente utilizadas para análisis de modelos deterministas (Ratnawati, 2000).

- Modelos de calidad de agua. Estos modelos se refieren a la concentración de varias sustancias en el agua (Ratnawati, 2000).
- Modelos de cantidad de agua. Estos modelos se enfocan en el análisis de balance de masas para conocer el estado en el que se encuentra la oferta y la demanda de agua (Ratnawati, 2000).
- Modelos de simulación. En estos modelos, los datos de entrada son transformados en datos de salida usando una función que usualmente necesita pocos parámetros para calibrarse (Ratnawati, 2000). Los modelos de simulación se fundamentan en ecuaciones que describen el cambio dinámico entre las variables relacionadas. Esta simulación nos ayuda a mostrar las predicciones. El modelo describe la realidad con una precisión determinada (Beltrán, 2012).
- Modelos de optimización. En estos modelos se busca la mejor alternativa de varias opciones disponibles usando un criterio específico (función objetivo) y restricciones físicas o de operación. Los modelos de optimización no son tan populares como los de simulación. Yeh (1985) menciona que esto puede deberse a la falta de conocimiento matemático por parte de los operadores de los vasos de almacenamiento, así como a las complejidades y a la falta de información asociada con los modelos de optimización (Ratnawati, 2000).

1.4.2 Modelos matemáticos

Para conocer la disponibilidad de agua en una cuenca hidrológica, se tiene que hacer un conteo de los flujos de entrada y de salida del sistema, junto con otros componentes del

ciclo hidrológico. A continuación se muestran las ecuaciones para el presupuesto de agua de una determinada región hidrológica.

Flujo superficial:

$$P + R_1 - R_2 + R_g - E_s - T_s - I = \Delta S_s \quad (1)$$

Donde, P es la precipitación, R_1 es el escurrimiento superficial de entrada y R_g es el agua subterránea apareciendo como agua superficial. Estos son considerados como flujos de entrada a la cuenca. El escurrimiento superficial de salida está representado por R_2 , la E_s es la evaporación, T_s es la transpiración y la I es la infiltración. Estos últimos son considerados como flujos de salida de la cuenca (todas las variables son volúmenes por unidad de tiempo). La variable ΔS es el cambio en el almacenamiento. Los subíndices "s" y "g" en las ecuaciones, indican componentes superficiales y subterráneos respectivamente. Por un designado periodo de tiempo, la ecuación provee un balance de ganancias y pérdidas de agua de una región hidrológica con las cantidades de agua almacenada en una región (una ecuación de continuidad) (Viessman & Lewis, 2013).

Flujo subterráneo:

$$I + G_1 - G_2 - R_g - E_g - T_g = \Delta S_g \quad (2)$$

Donde, G_1 es el flujo subterráneo de entrada, que junto con la infiltración (I), son considerados los flujos de entrada al acuífero. El flujo subterráneo de salida (G_2), el agua subterránea apareciendo como agua superficial (R_g), la evaporación (E_g) y la transpiración (T_g), son flujos de salida del acuífero (Viessman & Lewis, 2013).

El presupuesto combinado de una región es la suma de las ecuaciones 1 y 2:

$$P - (R_2 - R_1) - (E_s + E_g) - (T_s + T_g) - (G_2 - G_1) = \Delta(S_g + S_s) \quad (3)$$

1.4.3 Modelos dinámicos

La dinámica de sistemas fue originalmente desarrollada por J.W. Forrester en 1950 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) (Wang, 2013). El enfoque de los modelos de simulación dinámica está basado en el entendimiento de las relaciones complejas que existen entre los diferentes elementos del sistema. Los sistemas dinámicos pueden ser definidos como una forma de pensar sobre un sistema como una red de caminos interconectados que afectan las cantidades de un sistema a través del tiempo (Jutla, 2006). Forrester (1980) menciona que los sistemas dinámicos pueden ser definidos como: “una teoría de la estructura del sistema y un conjunto de herramientas para representar sistemas complejos y para analizar su comportamiento dinámico”. Ford (1999) define a estos modelos como un método para analizar problemas en donde el tiempo es un factor muy importante (Keshta et al., 2009).

Los modelos dinámicos se pueden desarrollar en dos formas: cualitativa / conceptuales y cuantitativos / numérico (Dolado, 1992). Los modelos cualitativos mejoran nuestra comprensión de la estructura del sistema y de las relaciones entre cada componente utilizando "diagramas de circuitos". Por el contrario, los modelos cuantitativos son numéricos; permiten la investigación y la visualización de los efectos de las "políticas" de gestión (Winz et al., 2009). Para construir un modelo cuantitativo, se requieren declaraciones matemáticas de las relaciones entre cada componente o variable (Wang, 2013).

Ecuaciones en un modelo dinámico

Las ecuaciones en un modelo dinámico son diferentes a las de los modelos estáticos, pues las primeras utilizan ecuaciones diferenciales. A continuación se mostrará un ejemplo de cómo se representan este tipo de modelos en una ecuación, para describir el cambio en el almacenamiento del agua superficial.

Cambio en el almacenamiento del agua superficial (SW):

$$\frac{d(SW)}{dt} = P - f_{L1} - O_F \quad (4)$$

Donde, P (mm/día) representa la precipitación, f_{L1} es la tasa de infiltración a la capa de suelo (mm/día), y O_F representa el flujo sobre la tierra en mm/día (Keshta et al., 2009).

1.5 Sistemas computacionales para la toma de decisiones en el manejo de recursos hídricos

En los 70's y 80's, las limitaciones del software y hardware llevaron al desarrollo de modelos de cuencas hidrológicas en donde los sistemas físicos y realidades políticas fueron conectados al software al momento de su desarrollo (Zagona et al. 2001), lo que resultó en los "Decision Support Systems" (DSS). Los DSS o Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones, son sistemas interactivos computacionales que ayudan a los tomadores de decisiones a utilizar datos y modelos para resolver problemas que no están estructurados (Sprague and Carlson, 1982). Los DSS dan información, y algunas veces información en tiempo real, que ayuda a tomar mejores decisiones (Ejet, 2000). A continuación se presentarán algunos de los DSS más usados en el manejo de recursos hídricos.

Uno de los modelos de gestión de las cuencas hidrográficas o DSS es WaterWare. Este incluye un modelo de simulación detallada, optimización para la gestión y el análisis multicriterio para definir y examinar las compensaciones entre objetivos en conflicto (Jamieson y Fedra, 1996). También es integral en su representación de los componentes naturales y humanos de la cuenca y en las opciones de manejo. Las opciones de gestión representadas incluyen cambios estructurales como la capacidad adicional de los vasos de almacenamiento, la reutilización del agua y la recarga artificial de acuíferos, gestión de la demanda como la gestión humana de la demanda y la reducción de las pérdidas de distribución y recogida en las tuberías, la gestión de la oferta como la capacidad de bombeo adicional, la desalinización y la recolección de agua, la gestión de la calidad a través de nodos de tratamiento y las asignaciones alternativas al cambiar la prioridad de o beneficios obtenidos de un usuario de agua (Zoltay, 2007).

Otro DSS muy usado en el manejo de los recursos hídricos es el WEAP (SEI, 2015). Este software integra el sistema biofísico o los componentes naturales de la cuenca y el sistema socioeconómico o el sistema de agua humano. WEAP vincula el uso del suelo, las aguas superficiales y subterráneas en la dinámica de un modelo hidrológico simplificado. Es lo suficientemente detallada para mantener la representación de importantes procesos hidrológicos pero lo suficientemente simple para la eficiencia computacional (Yates et al., 2005).

Por otro lado, el TVA Environment and River Resource Aid (TERRA) es un modelo desarrollado por la Tennessee Valley Authority (TVA) y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) (Reitsma, et al., 1996). TERRA fue creado para la gestión de los ríos, embalses y los recursos de energía de TVA. TERRA tiene las siguientes características:

1) Se compone de una base de datos geo-relacional; 2) sirve como el almacenamiento de datos central y sistema de recuperación; 3) registra el flujo de información TERRA; 4) soporta la interfaz de software especializado de gestión de datos; 5) tiene diversas herramientas de visualización; 6) verifica los datos de entrar en la base de datos o los datos de los modelos no residentes contra varios conjuntos de restricciones operativas (ambientales, recreativos, especial / de emergencia, navegación, etc.) (Ejet, 2000).

PRYSM es un modelo que se utiliza para los sistemas de ríos, embalses y energía. Es un DSS que proporciona una herramienta para la planificación, previsión y planificación de las operaciones de depósito. Integra los múltiples efectos de sistemas de depósito, tales como el control de inundaciones, la navegación, la recreación, suministro de agua y la calidad del agua, con la economía del sistema de energía por la solución del problema basado en la simulación pura, una simulación basada en reglas o una optimización de programación por objetivo (Karcher, 1988).

1.6 RiverWare

Los modelos de planificación y operación de cuencas fluviales desarrollados en las décadas anteriores no han sido lo suficientemente buenos para representar los cambios de múltiples objetivos de los proyectos que las agencias de manejo de recursos hídricos necesitan. Por lo tanto, la “U.S. Bureau of Reclamation” (USBR) y la “Tennessee Valley Authority” (TVA) invirtieron en un proyecto con el “Center for Advanced Decision Support for Water and Environment Systems” (CADSWES) en la Universidad de Colorado en Boulder para desarrollar una herramienta de modelado de cuencas que puede ser utilizado para una amplia gama de aplicaciones (E. Zagona, Fulp, Goranflo, & Shane, 1998).

Este es un software con orientación a objetos, el cual facilita la creación y representación de ríos y reservorios con la información requerida, o con los algoritmos para mostrar los propósitos específicos en el sistema (Gastélum, et al., 2013)

Dispone de tres métodos de solución fundamentales: simulación simple, simulación basada en reglas y optimización. Para disminuir los problemas de las políticas del agua, una programación con un lenguaje diferente (de los lenguajes de programación habituales, tales como FORTRAN y C / C ++) llama RiverWare Rule Language (RWRL) es usada. Las descripciones políticas pueden ser diseñadas como un set de reglas en RWRL. Una vez que estas descripciones de las políticas se guardan como archivos de conjuntos de reglas, una simulación puede ser guiada por el conjunto de reglas (Dumont y Lynn, inédito en el momento de referencia). Por otra parte, las políticas pueden ser modificadas entre ejecuciones, sin que el simulador se cambie o sea reconstruido (Wehrends y Reitsma, 1995). Este software será el que se utilizará para llevar a cabo el presente estudio.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Esta sección presenta el marco teórico de este proyecto. En las secciones 2.1 y 2.2 se presentarán generalidades sobre la cuenca del río San Juan, como su clima y el uso de suelo. Las secciones 2.3 y 2.4 intentan hacer una introducción de las fuentes de suministro del AMM. La sección 2.5 se enfoca en cómo el crecimiento poblacional va a incrementar hacia el año 2030 y cómo ha impactado en la disponibilidad de los recursos hídricos. La sección 2.6 presenta los conflictos sociales que ha tenido la región a lo largo de los años. La sección 2.7 menciona los daños que han sido generados por las sequías en Nuevo León. En la sección 2.8 se presentan antecedentes de proyectos anteriores que han sido implementados para solucionar el problema de la crisis del agua en el AMM. En la sección 2.9 se describen las características del proyecto MTY VI. La sección 2.10 describe la cuenca del Río Pánuco. Y por último, la sección 2.11 y 2.12 menciona los impactos ambientales y las medidas de mitigación respectivamente, que se generarán al construir el acueducto del proyecto MTY VI.

2.1 Generalidades y clima de la cuenca del río San Juan

La cuenca del río San Juan es el segundo afluente en importancia de los aportadores mexicanos al río Bravo y tiene una superficie de 32,972 km². Su confluencia con el río Bravo ocurre a 58 km aguas abajo de la cortina de la presa Internacional Falcón y 383 km aguas arriba de la desembocadura en el golfo de México (Flores, Francisco; Scott, C., 1999). La cuenca se localiza entre los paralelos 24"50' y 26"25' de latitud Norte y los meridianos 98"45' y 101"59' de longitud Oeste. Este río es uno de los más importantes de la región Noreste del

país, abarcando territorio de tres estados que son Coahuila con 13,123 km², Nuevo León con 18,860 km² y Tamaulipas con 989 km² (Flores, Francisco; Scott, C., 1999). El agua de la Cuenca del Río San Juan también es usada para irrigación del Distrito de riego 026 (con 76,939 ha), el cual se alimenta de la presa Marte R. Gómez, construida para tal propósito en 1944 y con una capacidad de almacenamiento de 1,000 Mm³ (Aranda et al., 1998).

La cuenca pertenece a la Región Hidrológica El Bravo Conchos. Esta se divide para su manejo en ocho subcuencas, S. P. Marte R. Gómez, S. R. San Juan, S. R. Pesquería, S. R. Salinas, S. R. San Miguel, S. R. Monterrey, S. R. Ramos y S. R. Pilon (Aranda et al., 1998). En la figura 1 se muestra la ubicación de la cuenca del Río San Juan.



Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río San Juan. Elaborado por el autor con datos del INEGI.

Todos los ríos se originan en la parte suroeste del río San Juan, en la cordillera de la Sierra Madre Oriental y drenan en dirección hacia el este, hacia la parte baja del Río Bravo en Camargo en el Estado de Tamaulipas. La cuenca del río San Juan limita con la cuenca del Río Bravo hacia el noreste, el río Álamo cuenca al norte, el río San Fernando cuenca hacia el sudoeste y el río Salado cuenca al suroeste y al noroeste (Návar, 2001).

El clima de la cuenca del río San Juan puede ser descrito como semiárido a árido con la mayoría de las precipitaciones anuales durante los meses de verano. El promedio de la precipitación anual pluvial es de 590 mm con una temperatura media de 20° C (CONAGUA, 2011)

2.2 Uso de suelo de la cuenca del río San Juan

El uso de suelo en la cuenca del río San Juan está dominada por bosques de matorrales nativos (vegetación árida y semiárida incluyendo matorral espinoso tamaulipeco y matorral montano). Este exfoliante tipo de vegetación forestal cubre aproximadamente el 71,5% de la cuenca. Los bosques templados (roble, mezclado de pino-encino y pino), ubicado en la Sierra Madre Oriental representan aproximadamente el 6,4% de la cubierta, mientras que las tierras agrícolas de riego regadío y no regadío, representan aproximadamente el 18,2% de la superficie total. Otros usos de la tierra, como los cuerpos de agua y zonas urbanas representan la cubierta restante dentro de la cuenca (Aranda et al., 1998). Los suelos de la cuenca son variadas. Yermosoles y xerosoles, situados en la parte occidental y noroccidental más árida de la cuenca, cubren un área de 32%. Los vertisoles, ubicados en las tierras semiáridas a subhúmedas de la cuenca, se encuentran en las proximidades de la Sierra Madre (Návar,

2001). Los litosoles, regosoles y rendzins, están ubicadas en la Sierra Madre y en las mesetas montañosas de las llanuras y, cubren un área del 47% (Aranda et al., 1998). La geología de los llanos desarrollados durante el Pleistoceno, puede ser caracterizada por un sistema de terrazas formadas por arenas gruesas, arenas y limos de las formaciones de Beaumont y Lissle. La Sierra Madre se desarrolló durante el período Cretácico baja y se caracteriza por calizas de la formación Méndez (SOP, 1975).

2.3 Descripción general de los sistemas de abastecimiento de agua potable

El origen de las fuentes de que se sirve el hombre para su desenvolvimiento cotidiano es el ciclo hidrológico. En la figura 2 se muestra la circulación del agua a través de distintos medios. Así, gracias al ciclo hidrológico, se encuentran disponibles en la naturaleza las siguientes fuentes de abastecimiento: agua superficial, agua subterránea, agua atmosférica y agua salada. Se recurre a las aguas atmosféricas y a las saladas solo cuando no existe otra posibilidad ya sea por escasez o mala calidad de agua de las aguas subterráneas y superficiales (Valdez, 1990).

Por lo tanto, hay dos fuentes de abastecimiento de agua potable: las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Las aguas superficiales incluyen ríos y lagos. Las aguas subterráneas son principalmente los acuíferos. Las ventajas de las aguas superficiales son su disponibilidad y que están visibles; además son fácilmente alcanzadas para el abastecimiento. Las fuentes subterráneas, por otro lado, están mejor protegidas de la contaminación relativamente a las superficiales. Sin embargo, una vez que los acuíferos se contaminan, no existe un método totalmente eficaz que los pueda limpiar, a diferencia con las superficiales que puedes sanearse con mayor facilidad (Valdez, 1990).



Figura 2. Ciclo hidrológico. Fuente: Valdez, 1990

Un sistema hidráulico urbano tiene como objeto garantizar el suministro de agua en una ciudad. Además de evitar la propagación de enfermedades infecciosas mediante el adecuado tratamiento y disposición de los desechos humanos y con la potabilización de los suministros de agua (Valdez, 1990).

Un sistema de abastecimiento de agua potable es un subsistema del sistema hidráulico urbano y está integrado por los siguientes elementos: fuente, captación, conducción, tratamiento de potabilización, regularización y distribución. En la figura 3 se muestra un esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable (Valdez, 1990).

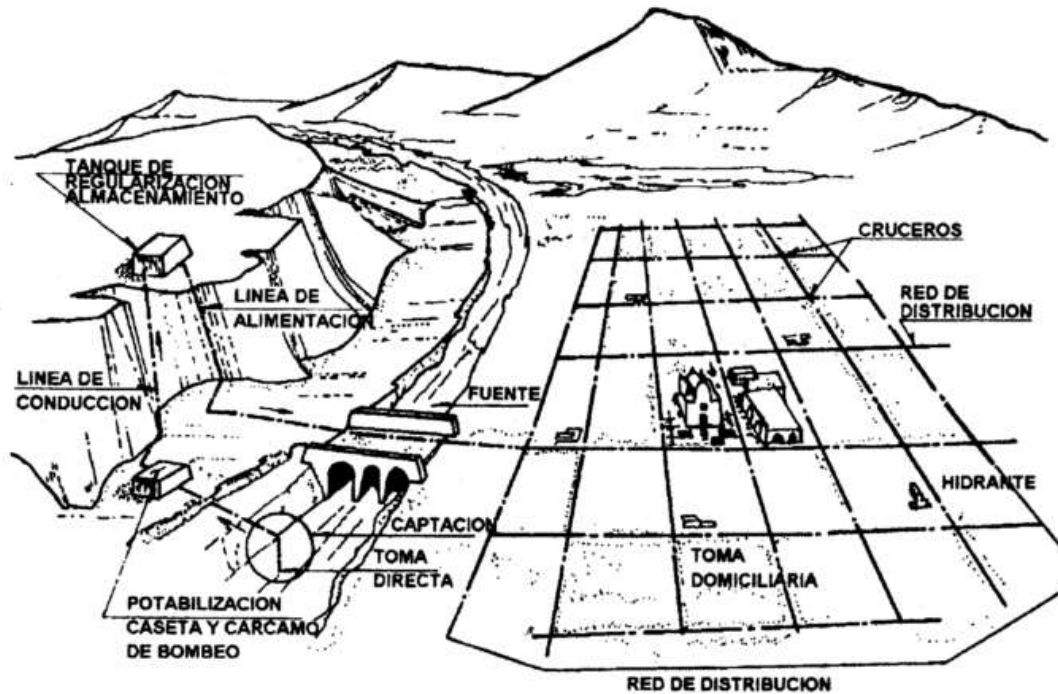


Figura 3. Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable. Fuente: Valdez, 1990.

2.4 Infraestructura hidráulica en la cuenca del Rio San Juan

Referente a infraestructura hidráulica, se tienen cinco presas en la región: Marte R. Gómez; Rodrigo Gómez (La Boca); Cerro Prieto; Las Blancas y El Cuchillo-Solidaridad. La presa Marte R. Gómez fue construida en el año 1946 para suministrar de agua al Distrito de Riego 026 y tiene una capacidad máxima de 3336 Mm^3 (Danner et al., 2008). Esta tiene una importación de agua de 40 Mm^3 en promedio, proveniente de la presa Las Blancas (Sandoval, 2005).

2.4.1 Distritos de riego

Además de la extracción con fines de abastecimiento público urbano para el AMM, existen otras extracciones de agua superficial en la cuenca para uso agrícola, entre estas

destacan los distritos de riego 026 Bajo San Juan (422.84 Mm³/año) y 031 Las Lajas (24.00 Mm³/año) (Sandoval, 2005). Las presas Marte R. Gómez y últimamente El Cuchillo han suministrado un promedio de 540 Mm³ al año al distrito de riego 026, mientras que El Cuchillo suministra un promedio de 15 Mm³ al año al distrito 031 Las Lajas (Návar, 2010).

2.4.2 Fuentes de suministro en el AMM

El Área Metropolitana de Monterrey es una región de alta relevancia económica constituida por 16 municipios conurbados que presentan una alta densidad de población y cuentan con una de los mayores índices de actividad industrial en el país (Cedillo, 2012). Esto ha generado mayores retos para el abastecimiento de los recursos hídricos.

El Área Metropolitana de Monterrey tiene fuentes de suministro superficiales y subterráneas de agua potable. Actualmente, las fuentes superficiales son las presas El Cuchillo, Cerro Prieto y La Boca, que abastecen el área metropolitana. Estas aportan en promedio, el 60 % (6,900 litros por segundo) del agua potable suministrada. La presa El Cuchillo fue construida en 1990 e inicio su operación en 1994; tiene una capacidad de nivel de aguas máximas ordinaria (NAMO) de 1123 Mm³. La presa Cerro Prieto fue construida en 1981 e inicio su operación en 1983; tiene una capacidad al NAMO de 300 Mm³. Por último, la presa La Boca empezó su construcción en 1958 e inicio su operación en 1961; tiene una capacidad al NAMO de 39.5 Mm³ (SADM, 2014).

Por otro lado, las fuentes subterráneas están compuestas de una serie de pozos y galerías ubicadas en distintos sistemas. Los más destacados son los sistemas Mina, Buenos Aires y pozos profundos del AMM. Estos sistemas se componen de 44 pozos profundos de entre 600 y 1200 mts., y 50 pozos someros de no más de 100 mts. Además de estos sistemas,

se cuenta con el manantial (La Estanzuela), tres túneles (Cola de Caballo I y II, y San Francisco) y una galería filtrante (La Huasteca). Esto compone al 40% restante (4600 litros por segundo) de las fuentes de suministro para el AMM (SADM, 2014).

En la figura 4 se muestra el esquema de cómo están compuestas las fuentes en el Área Metropolitana de Monterrey.

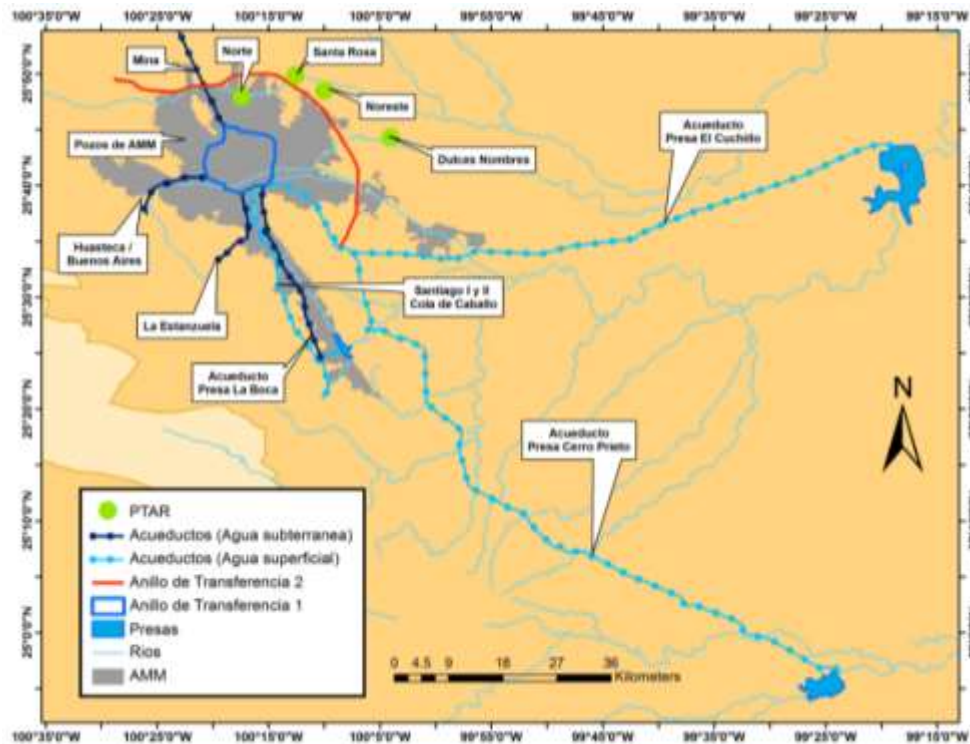


Figura 4. Esquema de las fuentes de suministro en el Área Metropolitana de Monterrey. Fuente: Aguilar et al., 2015.

2.5 Crecimiento poblacional

El aumento poblacional y su consumo per cápita tienen influencia directa sobre la presión de los recursos hídricos, dado que el aprovechamiento y extracción por parte de los usuarios pudiera llegar a sobrepasar la capacidad del medio natural para regenerar estos recursos, lo que conduce eventualmente a una escasez. Cuando se rebasan las capacidades

del sistema para suministrar los recursos hídricos, es necesario recurrir al uso de tecnología, como es el caso de la transferencia de agua (Cedillo, 2012). En la tabla 1 se muestra una proyección del crecimiento poblacional del AMM obtenida del Consejo Nacional de Población.

Año	Población del AMM (hab)
2016	4,680,421
2017	4,747,337
2018	4,813,527
2019	4,878,726
2020	4,943,031
2021	5,006,606
2022	5,069,613
2023	5,131,948
2024	5,193,574
2025	5,254,431
2026	5,314,486
2027	5,373,731
2028	5,432,139
2029	5,489,668
2030	5,546,218

Tabla 1. Proyección de la serie de crecimiento de la población de los 16 municipios del Área Metropolitana de Monterrey 2010-2030. Fuente: CONAPO, 2014

Cabe destacar que a partir de marzo de 2014, el Área Metropolitana de Monterrey incluye los municipios de: Monterrey, San Pedro Garza García, Santa Catarina, San Nicolás de los Garza, General Escobedo, Apodaca, Guadalupe, Juárez, García y Cadereyta, Carmen, Ciénega de Flores, Gral. Zuazua, Pesquería, Salinas Victoria, Santiago (SADM, 2014).

2.6 Conflictos sociales y competencia de los recursos hídricos

En 1952, en coordinación con el Gobierno Federal, se firmó un tratado sobre el uso de los escurrimientos del Río San Juan y se acordó conceder los derechos de agua para abastecer la agricultura de cultivo para el Distrito de Riego 026 a través de la presa Marte R. Gómez. El tratado fue revisado a finales de 1980 y dio lugar a la construcción de El Cuchillo a principios de los 90, con el objetivo principal de suministrar de agua potable al AMM. Un arreglo se hizo entre los agricultores del Distrito de Riego 026 y la ciudad de Monterrey, en el que los agricultores conceden uso de sus derechos de agua a la presa El Cuchillo si es que SADM regresaba el agua usada y tratada a los agricultores para el riego. Este acuerdo beneficia a ambas partes, puesto que SADM garantiza una buena cantidad de agua. Debido a la falta de agua para el cumplimiento de las obligaciones para el riego y el uso doméstico durante la década de 1990, el tratado y sus posteriores modificaciones crearon conflictos sociales entre los usuarios del agua (agricultores en los DR 026 y funcionarios del SADM) y la tensión entre los límites políticos (Nuevo León y Tamaulipas), que alcanzó su punto máximo durante e inmediatamente después de que la presa El Cuchillo se cerrara (Návar, 2010). El pronóstico a largo plazo es que la urbanización continuará y la disponibilidad de agua disminuirá, sobre todo para el riego. Por lo tanto, nuevas estrategias de gestión del agua tendrá que crearse (Návar, 2010).

2.7 Sequías en Nuevo León

Además del crecimiento poblacional y socioeconómico, existe otro factor determinante que genera la escasez y la falta de agua de la región: la sequía. La sequía es un fenómeno hidrometeorológico que genera innumerables daños en el ámbito económico, social y ambiental (Roldán, 2014). A lo largo del siglo XX hubo una tendencia creciente a la ocurrencia de sequías en México y en el mundo, y desde finales del siglo pasado y principios del actual han sucedido varios años deficitarios de lluvias, principalmente en el norte del país (Ortega-Gaucín, 2013).

Además, la región es propensa a episodios de sequía con varias dimensiones temporales y espaciales; el episodio de sequía de la década de 1990 es un buen ejemplo de estas variaciones hidroclimáticas (Návar, 2010).

Nuevo León ha sido históricamente afectado por las sequías recurrentes, con el agravante de que, por ubicarse geográficamente en la zona norte del país (que se caracteriza por ser eminentemente árida), su población es altamente vulnerable ante la escasez y la falta de agua, dado que en la mayor parte del territorio estatal predominan los climas secos y semisecos extremosos (Ortega-Gaucín, 2013).

El último evento de sequía registrado en Nuevo León (2011-2012) se ha considerado como el más severo de los últimos 50 años. Tan sólo en 2011 se perdieron más de 40 mil hectáreas de cultivos de temporal, maíz, trigo, frijol y sorgo, principalmente, y ante la falta de lluvias se dejaron de sembrar alrededor de 50 mil hectáreas de maíz y frijol (Ortega-Gaucín, 2013).

Los municipios que resultaron más afectados en la sequía del 2011-2012 fueron: Galeana, Mier y Noriega, Zaragoza y Doctor Arroyo. La sequía en estos municipios del estado era tan grave que ya comenzaban a darse los primeros síntomas de hambruna entre los pobladores por el desabasto, falta de agua y alimentos para el consumo diario. Además, los pozos de la región se estaban secando por la falta de lluvias, por lo que cada vez era más difícil alcanzar la profundidad hasta donde se encontraba el agua (Ortega-Gaucín, 2013).

2.8 Proyectos Monterrey I al V

Pero la crisis de los recursos hídricos en esta región no es algo nuevo, este problema data desde años anteriores, afectando también al Área Metropolitana de Monterrey. Históricamente se reconocen dos etapas en las crisis del agua en el AMM: una previa a la construcción de las grandes presas (1597- 1955) y otra posterior (1956-2013).

La primera etapa (1597-1955) está relacionada con la ubicación, degradación y agotamiento de los recursos hídricos superficiales. Luis Esparza menciona que las inundaciones del AMM han tenido su origen debido a su ubicación; que la contaminación del agua se inició por el mal uso de los habitantes, pues estos vertían toda su basura y sus desechos orgánicos e industriales a los ríos, generando insalubridad. También se cree que la crisis se agudizó con el crecimiento y la intensificación de la industria, y ocasionó un ineficiente abasto de agua, que obligó a construir sistemas de transporte de agua desde fuentes cada vez más distantes del AMM para abastecer sus requerimientos (Esparza et al. 2014).

La segunda etapa (1956-2013) se centra en las grandes presas y obras civiles que se construyeron para hacer frente a la crisis de agua. A continuación se presentan los proyectos civiles que se han ido desarrollando a lo largo de la historia para solucionar este problema.

Proyecto Monterrey I (1971-1973). Se creó una planta potabilizadora con tres estaciones de bombeo de 8000 H.P. Sus tanques principales son: Obispado Alto, Loma Larga I, La Silla I, entre otros. Se instalaron redes primarias de agua y drenaje para el AMM(SADM, 2014).

Proyecto Monterrey II (1976-1979). Se ampliaron los tanques Topo Chico, Loma Larga y Altamira. Se perforaron e interconectaron los pozos en los sistemas de acueductos Mina y Buenos Aires. Se instalaron diversos tanques secundarios y redes primarias de agua y drenaje(SADM, 2014).

Proyecto Monterrey III (1980-1984). Se construyó la presa Cerro Prieto y un acueducto de 133 km de Linares a Monterrey. Se instaló la planta potabilizadora San Roque. Comenzó la primera etapa del primer anillo de transferencia del AMM. Se construyeron 14 tanques de almacenamiento y 20 estaciones de bombeo. Además, se amplió la planta potabilizadora La Boca y 27 km de colectores y redes secundarias(SADM, 2014).

Proyecto Monterrey IV (1990-1994). Se construyó la presa el Cuchillo y un acueducto Cuchillo-Monterrey de 108 km. Se instalaron cinco estaciones de bombeo. Comenzó la segunda etapa del primer anillo de transferencia del AMM. Se amplió el tanque San Roque. Se instalaron 19 estaciones de bombeo, 145 km de redes de distribución y reposición de ramales. Se prolongaron 130 km de colectores. Se construyeron tres plantas de tratamiento de aguas residuales (Norte, Dulces Nombres y Noreste) (SADM, 2014).

Proyecto Monterrey V (2010). Se construyó el segundo anillo de transferencia de agua potable para el Área Metropolitana de Monterrey con 73 km de tubería de 24,48 y 60 pulgadas de diámetro. Se amplió la red de distribución de agua potable mediante la

construcción de siete tanques de almacenamiento para $25,000 m^3$, seis estaciones de bombeo con un total de 8,600 H.P., 28 km de tuberías de 18 a 36 pulgadas de diámetro. También se fortaleció el sistema de drenaje o alcantarillado mediante la introducción de 28 km de emisores, colectores y subcolectores de 18 a 36 pulgadas de diámetro (SADM, 2014). Por último, se amplió la capacidad de tratamiento de 9000 a 13,500 litros por segundo mediante las siguientes acciones: (1) ampliación de la PTAR Dulces Nombres de 5,000 a 7,500 litros por segundo (l/s.); (2) ampliación de la PTAR Norte de 2,500 a 3,000 l/s; (3) ampliación de la PTAR Noreste de 1,250 a 2,500 l/s; (4) ampliación de la PTAR Pesquería de 25 a 125 l/s; (5) construcción de la PTAR Cadereyta II de 100 l/s y (6) construcción de la PTAR Zuazua de 100 litros por segundo (SADM, 2014).

2.9 Proyecto Monterrey VI

En la búsqueda de una nueva fuente de suministro para enfrentar el problema de la disminución en la disponibilidad de los recursos hídricos en el Área Metropolitana de Monterrey, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey realizó un análisis de fuentes de abasto para la ciudad tomando en cuenta factores como: (1) la situación actual; (2) proyección de la demanda; (3) fuentes de abastecimiento de proyectos existentes y nuevos proyectos; (4) evaluación de costos y (5) la evaluación del impacto (SADM, 2012).

La información resultante del estudio realizado por SADM permite sustentar el orden en el cual habrán de tenerse en cuenta para los planes y proyectos específicos ya que aunque la mayoría presentan la factibilidad necesaria, el orden que a continuación se establece denota la mayor conveniencia para su realización, disminuyendo conforme se avanza en el orden planteado: (1) Proyecto Monterrey VI (Acueducto Río Pánuco-Presa Cerro Prieto, $5 m^3/s$)

con un costo de 9.17 \$/m³; (2) Acueducto Presa Falcón (Río Bravo, 5 m³/s) con un costo de 9.29 \$/m³ ; (3) Presa Vicente Guerrero (4.25 m³/s) con un costo de 9.37 \$/m³; (4) Presa El Cuchillo II (4.60 m³/s) con un costo de 9.45 \$/m³; (5) Desaladora Matamoros (5 m³/s).

Por otro lado, la alternativa de la presa Falcón se abastece de la cuenca del Río Bravo con un caudal de 40 m³/s (IWBC, 2015) y el Cuchillo se abastece de la cuenca del San Juan, por lo que estos escenarios mencionados se verán afectados en periodos de sequía, lo que las vuelve alternativas poco factibles. Adicionalmente, las tres presentan problemas de disponibilidad y, viabilidad social y política (SADM, 2011). De igual forma, el proyecto de la Desaladora Matamoros no representa una opción conveniente, en primer término porque se cuenta opciones viables mejor evaluadas, aunado a que su elevado costo de operación no le favorece (SADM, 2011).

La opción del acueducto Monterrey VI propuesto en el proyecto de SADM es el más favorable debido a cuatro factores:

- Representa la opción con menor costo unitario por metro cúbico.
- Implica los menores impactos adversos, tanto socioeconómicos como ambientales.
- Representa, por sí misma, una fuente con capacidad para resolver el déficit actual y previsible para los próximos veinte años.
- Representa el menor riesgo respecto a la factibilidad de adquisición de derechos, así como menor riesgo en el cumplimiento de entregas debido a contar con un régimen pluviométrico más estable.

Además, ya que en la alternativa del proyecto Monterrey VI (Río Pánuco–Cerro Prieto) se planea transferir agua de una cuenca diferente, esta se convierte en la opción más viable al contar con suficiente disponibilidad de recurso hídrico. Para el objetivo fundamental de este proyecto se planea transferir agua de la cuenca del río Pánuco a la presa Cerro Prieto mediante un acueducto para darle certidumbre al abastecimiento de agua en el AMM en un futuro. En la figura 5 se muestra el trayecto del acueducto MTY VI.

El proyecto inicia en la Obra de Toma, en la margen izquierda del río Pánuco, en el municipio de Ébano, San Luis Potosí, aguas abajo de la estación hidrométrica 26255, denominada Las Adjuntas, su ubicación se encuentra en las coordenadas geográficas 21°57'49.27" de latitud N y 98°33'14.27" de longitud O (SADM, 2012).

En el estado de San Luis Potosí el acueducto pasará por los municipios de Tamuín y Ébano; en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave el acueducto pasará por el municipio de Pánuco; en el estado de Tamaulipas el acueducto pasará por los municipios de El Mante, González, Xicoténcatl, Llera de Canales, Casas, Victoria, Güémez, Padilla, Hidalgo y Villagrán; el acueducto finalizará su trayecto en el estado de Nuevo León, en el municipio de Linares (SADM, 2012)

Las principales características del Proyecto Monterrey VI son: una longitud total de 502 km (un acueducto existente de 130 km de Cerro Prieto a Monterrey y un acueducto a construir de 372 km del Río Pánuco a Cerro Prieto). El caudal de diseño es de 5 m³/s y un diámetro de la tubería de 84 pulgadas (2.13 metros). Tiene un régimen combinado de bombeo y gravedad. Vencerá 320 metros de desnivel topográfico desde la obra de toma en el Río Pánuco, hasta la EB00 en la Presa Cerro Prieto (SADM, 2012). Tendrá una obra de captación

en el Río Pánuco y 6 estaciones de bombeo(SADM, 2014). Cada estación de bombeo contará con 6 bombas de carcasa bipartida que manejan c/u un flujo de 1000 litros por segundo contra una carga dinámica total de 110 metros de columna de agua, con una eficiencia de bombeo de 84.95 % y motor de 2000 HP (1491.39 kW) (SADM, 2012). El proyecto costará 17,684 millones de pesos y endeudará a Nuevo León por 27 años (324 meses) (Armenta, 2014).

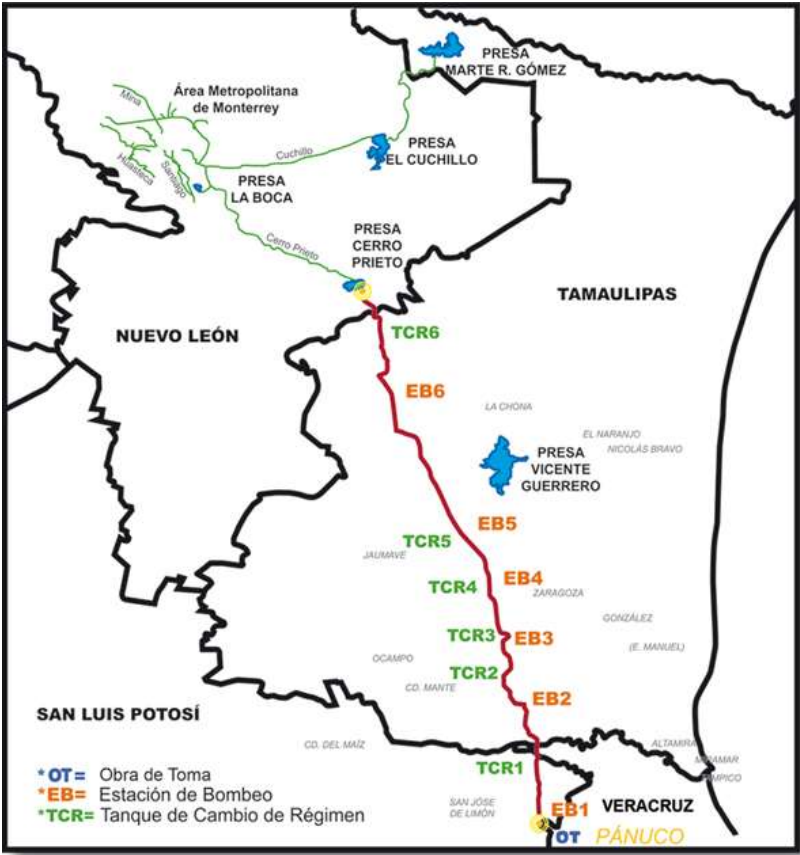


Figura 5. Trayecto del acueducto Monterrey VI. Fuente: SADM, 2011.

2.10 Cuenca del río Pánuco

La cuenca del río Pánuco es una de las regiones hidrográficas más importantes del País, tanto por la superficie que ocupa 84,956 km², que la sitúa en cuarto lugar en la República, como por el volumen de sus escurrimientos, que le confieren el quinto lugar a nivel nacional con 73,549 Mm³ al año. Pertenece a la vertiente del Golfo de México y se localiza entre los 19° y 24° de latitud norte y los 97°45' y 101°20' de longitud oeste(CSVA,2002).

Se encuentra limitada por las siguientes cuencas hidrográficas: al norte, la del río Soto la Marina y la región de El Salado; al oeste, la del Lerma; al sur, la del río Balsas y al este las de los ríos Tuxpan, Cazones y Tecolutla (CSVA, 2002). En la figura 6 se muestra la cuenca del río Pánuco.

El organismo operador SADM solicitó a la CONAGUA una asignación de 15 m³/s de la cuenca del río Pánuco. Esta cuenca tiene una disponibilidad de 442 m³/s (CONAGUA, 2011).



Figura 6. Ubicación de la cuenca del Río Pánuco. Elaborado por el autor con datos del INEGI.

2.11 Impactos ambientales asociados con el proyecto MTY VI

Además, la SADM evaluó los impactos ambientales asociados al MTY VI. La identificación de los impactos ambientales potenciales se basó en la experiencia multidisciplinaria del equipo de trabajo, la información aportada por los involucrados y visitas de verificación de campo. Se realizó una lista de las acciones relevantes del proyecto, así como de los factores y componentes en el medio ambiente, para después identificar sus interacciones ambientales. En la tabla 2 se muestran algunos indicadores de impactos ambientales asociados con el proyecto.

Factor Ambiental	Atributo	Indicador ambiental
Agua	Cantidad	Volumen de extracción
	Superficie de absorción	Modificación de superficie de absorción
Suelo	Drenaje	Modificación de patrón de drenaje
	Cantidad	Riesgo de erosión
Aire	Calidad	Concentración de partículas
	Nivel sonoro	Generación de ruido
Vegetación	Pérdida de cobertura vegetal	Superficie total a desmontar
Fauna	Pérdida de fauno	Tipo de especies de distribución probable
Paisaje	Modificador del paisaje natural	Valor de la vista

Tabla 2. Indicadores de impactos ambientales del proyecto MTY VI. Fuente: SADM, 2012

2.12 Medidas de mitigación

De manera descriptiva, se describen las medidas de mitigación a implementar para los distintos rubros que son afectados por las distintas actividades asociadas a las obras del Proyecto MTY VI de acuerdo a la Manifestación de Impacto Ambiental (MIA).

Flora:

Se requiere de la aplicación de medidas de prevención y mitigación, tal es el caso de la instalación de señalamientos (información o difusión a los trabajadores), la aplicación de un Programa de Restauración de la Vegetación (remediación y compensación), el cual será propuesto en los Estudios Técnicos Justificativos, para que los pagos de compensación que se realizan por el Cambio de Uso de Suelo en Terrenos Forestales se aplique directamente a las áreas del Proyecto donde se realizará la remoción de la vegetación.

A continuación se describen las siguientes medidas de prevención y mitigación a causa de la afectación a las comunidades vegetales: no rebasar la franja de afectación; señalar debidamente la franja de afectación para evitar la introducción del personal y/o maquinaria, fuera de esos límites; implementar un Programa de Información y Difusión dirigido a los trabajadores, mediante un manual en el que se les manifieste la importancia del respeto a las comunidades vegetales; se establecerán reglas a las personas que sean contratadas a efecto de prohibir la tala, afectación y/o maltrato de los ejemplares de flora; Programa de Protección y Rescate de especies de Flora y Fauna incluidas en la NOM- 059-SEMARNAT-2010, según lo marque la autoridad.

Fauna:

Durante las obras y actividades de preparación del sitio, la fauna en la franja de afectación y en sus inmediaciones emigrará a otros sitios más seguros y una vez concluidas las obras, éstos regresarán a los sitios que normalmente recorren o podrán permanecer en las cercanías de la franja de afectación ya que en ningún caso las instalaciones del Proyecto destruirán unidades ambientales sino que las afectarán parcialmente.

Sin embargo, se tiene contemplado el implementar un Programa de Protección y Rescate de especies incluidas en la NOM-059-SEMARNAT-2010. Así mismo se difundirá a los trabajadores el respeto a la fauna, prohibiendo que no se capture, comercialice o se moleste a la fauna local.

Agua:

La operación del proyecto MTY VI implica la extracción de agua del río Pánuco, lo que ocasionará un impacto en la cantidad del caudal del mismo.

Por lo anterior, y para garantizar que se cumplen con los criterios ambientales se deberá respetar en todo momento el volumen de extracción concesionado, verificando que se respeten los criterios de caudal ecológico y en lo establecido en el acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Arroyo Zarco, Río Ñadó, Río Galindo, Río San Juan 1, Río Tecozautla, Río San Juan 2, Río Grande de Tulancingo, Río Metztlán 1, Río Metzquitlán, Río Metztlán 2, Río Amajaque, Río Claro, Río Amajac, Río Calabozo, Río Los Hules, Río Tempoal 1, Río San Pedro, Río Tempoal 2, Río Verde 1, Río Verde 2, Río Verde 3, Arroyo El Puerquito o San Bartolo,

Arroyo Altamira, Río Santa María 1, Río Santa María 2, Río Santa María 3, Río Tamasopo 1, Río Tamasopo 2, Río Gallinas, Río El Salto, Río Valles, Río Tampaón 1, Río Choy, Río Coy 1, Río Coy 2, Río Tampaón 2, Río Victoria, Río Tolimán, Río Extoraz, Embalse Zimapán, Río Moctezuma 1, Río Moctezuma 2, Río Tancuilín, Río Huchihuayán, Río Moctezuma 3, Río Moctezuma 4, Río Juamave-Chihue, Río Guayalejo 1, Río Guayalejo 2, Río Sabinas, Río Comandante 1, Río Comandante 2, Río Mante, Río Guayalejo 3, Arroyo El Cojo, Río Tantoán, Río Guayalejo 4, Río Tamesí, Río Moctezuma 5, Río Chicayán 1, Río Chicayán 2, Río Pánuco 1, Arroyo Tamacuil o La Llave y Río Pánuco 2, mismas que forman parte de la Subregión Hidrológica Río Pánuco de la Región Hidrológica número 26 Pánuco.

Aire:

Debido a la utilización de maquinaria pesada y a la actividad vehicular que se realizarán en las etapas de preparación del sitio, durante las actividades de despalme, limpieza del sitio y zanjeo en la franja de afectación, se ocasionarán emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, provocado por la combustión interna de los motores.

Se requiere la implementación de medidas normativas, no rebasando los niveles máximos permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas.

Además, para reducir la generación de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera, producto de la combustión interna de los motores de las unidades de transporte de materiales y de maquinaria pesada, se solicitará a los propietarios de las unidades que se someta la maquinaria a un programa de mantenimiento para que su uso sea en óptimas condiciones de operación (medida de prevención).

Durante la etapa de preparación del sitio, en las actividades de despalme y limpieza del sitio, se removerá la capa edáfica (capa fértil de suelo), generándose emisiones de partículas de polvos.

Como medida de mitigación, para evitar la alteración de la calidad de la atmósfera por emisión de polvos, en las áreas de maniobra de maquinaria y vehículos, se deberá rociar con agua cruda, para de esta forma, mitigar la emisión de polvo y partículas a la atmósfera.

Ruido:

Por el manejo de maquinaria pesada y vehículos automotores, de no realizar el mantenimiento correspondiente, se podrían incrementar los niveles de ruido, sobrepasando en algunos casos los niveles permitidos.

Además, para reducir el incremento en los niveles de ruido, ocasionado por el empleo de maquinaria pesada, se solicitará a los contratistas de la obra, que indiquen a los conductores de sus camiones la obligatoriedad para que cierren sus escapes de las unidades, cuando se encuentren circulando cerca de las poblaciones aledañas.

Suelo:

Durante la etapa de preparación del sitio, en las actividades de despalme, limpieza del sitio y zanjeo, se verá afectada la capa edáfica o capa fértil de suelo.

Para evitar la contaminación del suelo por residuos sólidos, como basura generada por los trabajadores, se deberá implementar como medida el manejo, recolección y depósito de basura doméstica en tambos de 200 litros, que deberá contar con letreros alusivos a su

contenido, el cual de manera periódica será transportado a los basureros municipales o donde indique la autoridad competente, previa autorización local.

Respecto al agua, el cual será un medio directamente impactado por el proyecto MTY VI, con la información disponible se ha demostrado que la ejecución y operación de la obras no ocasionará un desequilibrio en cuanto a su disponibilidad y calidad.

El mayor impacto adverso producido por el MTY VI, es la disminución de vegetación arbustiva y arbórea en las áreas de afectación del mismo, que no podrá ser mitigada a través de las medidas propuestas.

Por la anterior se ha decidido proponer el empleo de indicadores ambientales para la estimación del impacto y de la medida de mitigación propuesta.

Para el caso específico de la vegetación en las áreas afectadas, se propone (como indicador de presión) la medición de la densidad de especies con status en las áreas de afectación del proyecto. Este dato arrojará información objetiva sobre la real afectación producida por el proyecto sobre la vegetación en dichas áreas. Como indicador de respuesta se propone la medición de la densidad de especies con status en las áreas destinadas al rescate de las mismas. Con esta información será posible estimar cuantitativamente la diferencia de densidad de las especies con status antes y después de las etapas de preparación del sitio y construcción.

Cabe mencionar que las áreas a afectar tienen una extensión baja, respecto a la superficie total del proyecto, por lo cual la disminución de densidad de especies vegetales de

los estratos arbustivo y arbóreo será muy localizada y no perjudicará en lo absoluto la estabilidad de las comunidades vegetales interesadas.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

En esta sección, se describe la metodología aplicada para la implementación del modelo de la cuenca del Río San Juan en el software RiverWare. La metodología general se compone de cuatro pasos generales:



El proceso de modelación de gestión de agua se compone de varios elementos antropogénicos y naturales con sus respectivos elementos y datos. Estos datos fueron proporcionados por el Consejo Nacional del Agua (CONAGUA), Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) y por el modelo de WEAP del Río Grande/Bravo elaborado por Danner, Mckinney, Teasley & Sandoval-Solís (2009). Esta última fuente de información, fue proporcionada por el Dr. Samuel Sandoval Solís de la Universidad de California en Davis. Una vez que se cuenta con datos suficientes para cada elemento, se puede proceder a realizar el balance de masas y la construcción del modelo esquemático.

El modelo incluye las fuentes superficiales (presas Cerro Prieto, El Cuchillo y La Boca) y subterráneas (campos Buenos Aires, Mina y pozos del Área Metropolitana) que suministran al AMM. También incluye los ríos Pablillo Camacho, San Juan, Salinas, Pesquería y las entradas a la presa La Boca. De la misma manera, incluye las estaciones o hidrométricas (puntos de control) Icamole, Los Herrera, El Cuchillo y Los Aldama que se

encuentran en la cuenca del Río San Juan. Además, se incluyeron los distritos de riego existentes en la cuenca hasta la estación Los Aldama.

Por otro lado, se excluyeron las presas Marte R. Gómez y Las Blancas, como también los Distritos de Riego 031 y 026 que existen cuenca abajo.

3.1 Balance de masas en Excel

El balance de masas en Microsoft Excel consistió en la estimación de los flujos de cabecera de los ríos San Juan, Los Álamos, Salinas, Pesquería, Pablillos y Camacho, y los flujos de entrada de la presa La Boca, todos pertenecientes a la cuenca del Río San Juan. Esto se logró con datos de las estaciones hidrométricas de la cuenca, demandas de los distritos de riego y del AMM, el almacenamiento y la evaporación de cada una de las presas. Algunos de estos datos fueron proporcionados por la CONAGUA y otros obtenidos del modelo de WEAP del Río Grande/Bravo. Se utilizó la ecuación del balance de masas para calcular los flujos de cabecera de los ríos de la cuenca:

$$\begin{aligned} Entradas_t = \sum Salidas + \Delta_t Almacenamiento (Almacenamiento_t - \\ Almacenamiento_{t-1}) + Evaporación \end{aligned} \quad (5)$$

3.3.1 Series de tiempo

El software RiverWare realiza el análisis con series de tiempo anuales, mensuales, diarias y por hora. Para este caso de estudio, se eligió la serie de tiempo mensual para tener una mejor certidumbre en los resultados y por el tipo de información que se tenía disponible. Para la modelación es necesario ingresar una serie de años base con información razonablemente confiable y completa, a partir de la cual se puedan realizar proyecciones futuras. Para las estaciones hidrométricas, se cuenta con una serie de datos de años base de

1941 al 2014. En algunos elementos como el almacenamiento en las presas y los sitios de demanda del AMM, se cuenta con una serie de datos de años base de 1954 hasta el 2014. Una vez que se definen los años que se utilizarán para la serie histórica, se puede proceder a realizar la simulación del modelo histórico mensual de la cuenca del Río San Juan en RiverWare. Para este caso de estudio, se decidió tomar la serie histórica del año 1964 hasta el 2014 porque es el año en que empezaron a operar las presas.

3.2 Construcción del modelo esquemático

Para la construcción del modelo de la cuenca del Río San Juan en RiverWare, se utilizan objetos que representan las características de la cuenca de un río. Los objetos están representados por iconos en el espacio de trabajo que se puede abrir para mostrar la lista de *slots*, que son las variables asociadas con las ecuaciones de los procesos físicos (Zagona et al., 1998). Por ejemplo, todos los embalses tienen *slots* para insertar los datos de entrada y salida de flujo, capacidad de almacenamiento, elevación de la superficie de agua, etc. Posteriormente, el usuario construye el modelo en el espacio de trabajo de gráfica mediante la selección de objetos de una paleta, arrastrando los objetos con el ratón sobre el área de trabajo, nombra a los objetos, y posteriormente los une. Los objetos están unidos entre sí para formar la topología de la cuenca del río utilizando el editor gráfico de enlace. Específicamente, un objeto está vinculado a uno u otros objetos. Durante la simulación, el proceso de solución implica la propagación de la información entre los objetos a través de los enlaces (CADSWES, 2014). En la figura 7 se muestra el modelo esquemático de la cuenca del Río San Juan en el software RiverWare.

El modelo esquemático muestra como los tramos de río están conectados a las presas para que los datos de entrada de los flujos puedan transferirse. Se puede observar también

que las presas y los acuíferos están conectadas al usuario de agua Área Metropolitana de Monterrey y esta se conecta al Río Pesquería. De la misma manera, se puede apreciar como los usuarios de agua (distritos de riego) están conectados a los tramos de río y estos se conectan a los distintos puntos de control. El modelo esquemático de la cuenca tiene un flujo con dirección aguas abajo.

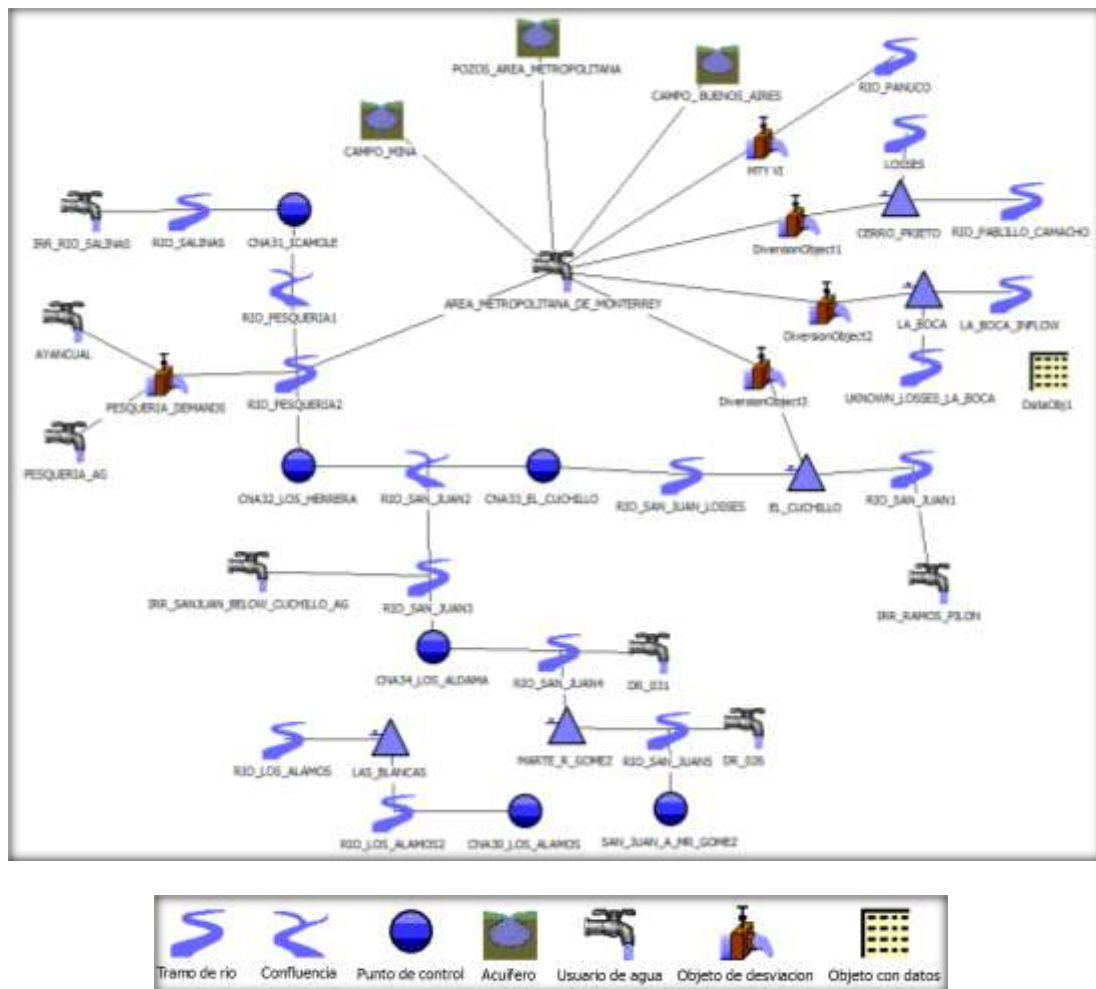


Figura 7. Modelo esquemático de la cuenca del Río San Juan en la herramienta RiverWare.

3.2.1 Definición de la zona de estudio

Para la modelación en RiverWare, la cuenca del Río San Juan se dividió en 4 secciones o subcuencas, que son:

- CNA31: Icamole
- CNA32: Los Herrera
- CNA33: El Cuchillo
- CNA34: Los Aldama

Se definieron los nombres de las subcuencas de acuerdo con las estaciones hidrométricas existentes en la cuenca del Río San Juan y que en el modelo se representan como puntos de control.

3.3 Modelado en RiverWare

El software RiverWare utiliza el enfoque del balance de masas para la modelación de una cuenca hidrológica. La ecuación general del balance de masas para una cuenca es:

$$\begin{aligned} \text{Almacenamiento}_t = & \text{Almacenamiento}_{t-1} + \sum \text{Entradas} - \\ & \sum \text{Salidas} + \text{Ganancias} - \text{Pérdidas} \quad (6) \end{aligned}$$

Fuente: CADSWES, 2014

3.3.2 Subcuenca Icamole

En esta subcuenca, se trataron de determinar los flujos de salida históricos aguas abajo del Río Salinas hacia el punto de control (estación hidrométrica) CNA31: Icamole. Para

calcular las salidas, la ecuación del balance de masas se resuelve de la siguiente manera en RiverWare:

$$Salidas_t = Entradas_t - Pérdidas_t \quad (7)$$

En donde, las *Entradas* son los flujos de cabecera del Río Salinas, calculados de la forma descrita en el punto 3.1.

Las *Pérdidas* son las demandas del distrito de riego Río Salinas, calculadas a partir de la misma fuente de información que de las *Entradas*. Estas demandas se calcularon multiplicando las demandas anuales del distrito de riego por la variación mensual en porcentajes. Este último dato fue calculado mediante un análisis de los datos históricos de uso mensual de los diferentes distritos de riego y del AMM. (Danner et al., 2009). Los datos de la variación mensual en porcentajes se muestran en la tabla 3.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variación mensual (%)	14.52	11.02	3.09	19.36	23.94	12.16	2.71	5.52	2.83	3.01	0.46	1.33

Tabla 3. Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego Salinas. Fuente: Danner et al., 2009

Después de haber introducido los datos de entrada anteriormente mencionados, el software RiverWare realiza el balance de masas por medio de su *Dispatch Method* al correr la simulación del modelo. La función del *Dispatch Method* es verificar que todos los datos necesarios para simular el modelo estén correctos y con la misma serie de tiempo.

3.3.3 Subcuenca Los Herrera

En la subcuenca Los Herrera, se determinaron los flujos de salida históricos aguas abajo del Río Pesquería hacia el punto de control (estación hidrométrica) CNA32: Los Herrera. Para calcular las salidas en RiverWare, la ecuación del balance de masas se resuelve en el software de la siguiente manera:

$$Salidas_t = \sum Entradas_t + Ganancias_t - \sum Pérdidas_t \quad (8)$$

En donde, las *Entradas* son los flujos de cabecera del Río Pesquería y las salidas del punto de control (estación hidrométrica) CNA31: Icamole, que posteriormente el software sumará para generar los flujos de salida de una confluencia. Los datos de los flujos de cabecera del Río Pesquería fueron calculados de la forma descrita en el punto 3.1.

Las *Ganancias* están definidas como los flujos de retorno que el AMM aporta mediante las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales hacia el Río Pesquería.

Los datos de las *Pérdidas*, son las demandas de los distritos de riego Ayancual y Pesquería, tomados del modelo WEAP del Río Grande/Bravo (Danner et al., 2009) multiplicando la variación mensual en porcentajes por las demandas anuales del mismo modelo. En la tabla 4 se muestran los datos de la variación mensual en porcentajes de los consumos de los distritos de riego Ayancual y Pesquería.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variación Mensual (%)	8.49	7.67	8.49	8.21	8.49	8.21	8.49	8.49	8.21	8.49	8.21	8.49

Tabla 4. Variación mensual en porcentajes de los consumos de los distritos de riego Ayancual y Pesquería. Fuente: Danner et al., 2009

Además de las demandas de los distritos de riego, existen otras Perdidas que serán definidas como pérdidas desconocidas, las cuales fueron calculadas por medio del balance de masas realizado en Microsoft Excel descrito al inicio de la metodología. Las pérdidas desconocidas serían los valores negativos de las *Entradas* en la ecuación 1. Estas pérdidas desconocidas son pequeñas y funcionan para cerrar el balance de masas de una forma más precisa.

Una vez que se introducen los datos de entrada anteriormente mencionados, el software RiverWare resuelve el balance de masas con su *Dispatch Method* al correr la simulación del modelo.

3.3.4 Subcuenca El Cuchillo

En la subcuenca El Cuchillo se determinaron los flujos de salida históricos aguas abajo del Río San Juan hacia el punto de control (estación hidrométrica) CNA33: El Cuchillo. Para calcular las salidas en RiverWare por medio del “Dispatch Method”, el software resuelve la ecuación del balance de masas de la siguiente manera:

$$Salidas_t = \sum Entradas_t - \Delta_t Almacenamiento (Almacenamiento_t - Almacenamiento_{t-1}) - \sum Pérdidas_t \quad (9)$$

En donde, las *Entradas* son los flujos de cabecera del Río San Juan calculados de la forma descrita en el punto 3.1.

El Δ *Almacenamiento* es calculado por RiverWare una vez que se introduce la serie de tiempo del almacenamiento histórico de la presa El Cuchillo.

Las *Pérdidas* están definidas como la evaporación de la presa El Cuchillo, las demandas del distrito de riego Ramos Pilón y por las demandas del AMM provenientes de El Cuchillo. La evaporación de El Cuchillo fue tomada del modelo WEAP del Río Grande/Bravo (Danner et al., 2009). Las demandas del distrito de riego Ramos Pilón fueron calculadas multiplicando las demandas anuales del modelo WEAP del Río Grande/Bravo por la variación mensual en porcentajes del mismo modelo. En la tabla 5 se muestran los datos de la variación mensual en porcentajes de las demandas de los distritos de riego Ramos Pilón. Las demandas anuales del AMM provenientes de El Cuchillo fueron proporcionadas por la CONAGUA. Sin embargo, se necesitaba la serie de tiempo mensual para introducirla al software. Por lo tanto, se tuvo que multiplicar la variación mensual en porcentajes de las demandas del AMM por las demandas anuales de la CONAGUA. En la tabla 6 se muestran los datos de la variación mensual en porcentajes de los consumos del AMM obtenidos del modelo WEAP del Río Grande/Bravo (Danner et al., 2009). Aunado a las *Pérdidas* antes mencionadas, existen otras que serán definidas como pérdidas desconocidas, las cuales fueron calculadas por medio del balance de masas realizado en Microsoft Excel descrito al inicio de la metodología para cerrar el balance de una forma más precisa. Las pérdidas desconocidas serían los valores negativos de las *Entradas* de la ecuación 1.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variación Mensual (%)	8.49	7.67	8.49	8.22	8.49	8.22	8.49	8.49	8.22	8.49	8.22	8.49

Tabla 5. Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego Ramos Pilón. Fuente: Danner et al., 2009

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variación Mensual (%)	7.55	6.97	7.21	8.45	9.27	9.71	10.28	9.91	7.25	7.71	7.28	8.42

Tabla 6. Tabla X. Variación mensual en porcentajes de los consumos del AMM. Fuente: Danner et al., 2009

Además del balance de masas de esta subcuenca, se introdujeron otros elementos en el modelo de RiverWare para que estos fueran calculados por el software, estos son: presa La Boca, presa Cerro Prieto, Campo Buenos Aires, Campo Mina y Pozos Área Metropolitana. Estos cinco elementos suministran de agua potable al AMM. Los primeros dos son fuentes de agua superficial y los últimos tres son fuentes de agua subterránea.

3.3.4.1 Presas La Boca y Cerro Prieto

En estos elementos de agua superficial se determinaron las salidas de las presas con el “Dispatch Method” del software RiverWare. Para resolver estos elementos, se necesitaron los siguientes datos de entrada: (1) flujos de cabecera a la entrada de las presas (*Entradas*); (2) almacenamiento histórico de las presas; (3) demandas del AMM provenientes de la presa La Boca y Cerro Prieto; (4) curva elevación-volumen-área de ambas presas; (5) descargas máximas de extracción de ambas presas y, (6) evaporación de ambas presas. Algunos de estos datos fueron proporcionados por la CONAGUA y otros fueron tomados del modelo WEAP del Río Grande/Bravo. Otros calculados por el balance de masas realizado en Excel descrito

en el punto 3.1. Para resolver estos elementos por medio del “Dispatch Method” en RiverWare, se utilizó la siguiente ecuación:

$$Salidas_t = Entradas_t - \Delta_t Almacenamiento - Evaporación_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

3.3.4.2 Campo Buenos Aires, Mina y Pozos Área Metropolitana

En estos elementos de agua subterránea se determinaron las salidas y los almacenamientos de los acuíferos con el “Dispatch Method” del software RiverWare. Para resolver estos elementos, se necesitaron los siguientes datos de entrada: (1) las recargas naturales mensuales de los tres acuíferos usadas constantemente desde 1964-2014 (estos datos fueron tomados de un informe hecho por la SEMARNAT y se muestran en la tabla 7); (2) serie histórica mensual de los flujos bombeados hacia el AMM (estos datos fueron proporcionados por la CONAGUA). Los datos de los flujos bombeados del manantial La Estanzuela, los tres túneles Cola de Caballo I y II, y San Francisco y la galería filtrante La Huasteca, fueron sumados al sistema Pozos Área Metropolitana para una mayor practicidad en el modelo. Cabe resaltar que se debe definir un *Almacenamiento Inicial* para que RiverWare resuelva estos elementos de agua subterránea en la simulación. Las ecuaciones utilizadas por el “Dispatch Method” en RiverWare, fueron las siguientes:

$$Almacenamiento_t = Almacenamiento_{t-1} + Recargas naturales_t - \text{Flujos bombeados (Extracciones)} \quad (10)$$

Recargas naturales de los acuíferos en el AMM		
Acuífero	Recarga media anual(Mm ³)	Recarga media mensual(Mm ³)
Pozos Área Metropolitana	68.2	5.68
Campo Mina	24	2
Campo Buenos Aires	57	4.75

Tabla 7. Recargas naturales de los acuíferos en el AMM. Fuente: SEMARNAT, 2011.

3.3.4.3 Área Metropolitana de Monterrey

Este elemento representa las demandas totales del Área Metropolitana de Monterrey, que en el modelo serían la suma de las demandas provenientes de los elementos El Cuchillo, La Boca, Cerro Prieto, Campo Buenos Aires, Campo Mina y Pozos Área Metropolitana hacia el AMM. Para resolver este elemento, se creó una regla de simulación predeterminada por el software usando el modo “Rulebased Simulation”. En la figura 8, se muestran los comandos utilizados para correr esta regla en el modelo. Además, se calcularon los porcentajes promedio de los flujos de retorno de agua que el AMM divierte al Río Pesquería por medio de sus plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs), con información de SADM y del modelo WEAP del Río Grande/Bravo. Esto se logró al dividir los datos históricos del volumen de agua tratada en el AMM entre sus consumos anuales. Posteriormente, se calcularon los promedios de los años para obtener un mismo dato desde 1964 hasta el 2014. En la tabla 8, se muestra anual promedio de los flujos de retorno producidos por las PTARs.

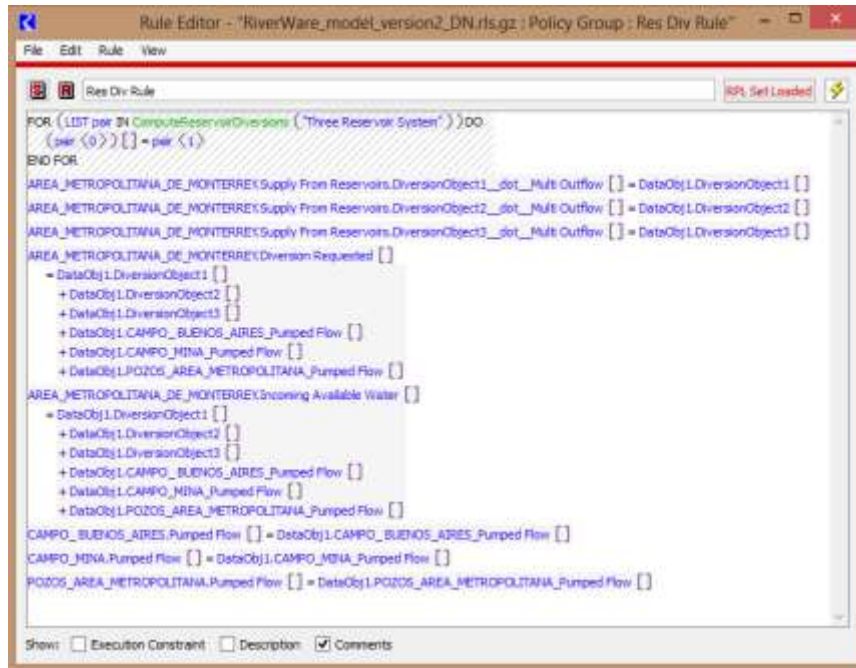


Figura 8. Regla creada en RiverWare para resolver el elemento Área Metropolitana de Monterrey.

Flujos de retorno generados por las PTARs en el AMM	
Años	Porcentaje promedio de los flujos de retorno por PTARs
1964-2014	75%

Tabla 8. Porcentajes anuales promedio de los flujos de retorno de agua producidos por las PTARs en el AMM. Elaborado por el autor con datos del Anuario Estadístico SADM, 2014 y Danner et al., 2009.

3.3.5 Subcuenca Los Aldama

En esta subcuenca, se determinaron los flujos de salida históricos aguas abajo (*Salidas*) hacia al punto de control CNA34: Los Aldama. RiverWare calcula las salidas por medio del “Dispatch Method” de la siguiente manera:

$$Salidas_t = \sum Entradas_t - Pérdidas_t + Ganancias_t \quad (11)$$

En donde, las *Entradas* serían los flujos de salida de los puntos de control CNA32: Los Herrera y CNA33: El Cuchillo. Posteriormente, el software RiverWare sumará estas *Entradas* por medio de su “Dispatch Method” para formar una confluencia.

Las *Pérdidas* están definidas como las demandas del distrito de riego San Juan debajo de El Cuchillo. Estas demandas fueron calculadas multiplicando la demanda anual del distrito de riego por la variación mensual en porcentajes del modelo WEAP del Río Grande/Bravo. Los datos de la variación mensual en porcentajes se muestran en la tabla 9.

Las *Ganancias* fueron calculadas por medio del balance de masas realizado en Microsoft Excel descrito al inicio de la metodología. Se utilizó la siguiente ecuación: $Salidas_t = Entradas_t - Pérdidas_t$. Las *Ganancias* serían los valores negativos resultantes de las *Salidas*.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Variación mensual (%)	14.53	11.02	3.09	19.37	23.94	12.17	2.71	5.53	2.83	3.02	0.46	1.33

Tabla 9. Variación mensual en porcentajes de los consumos del distrito de riego San Juan aguas abajo de El Cuchillo. Fuente: Danner et al., 2009.

3.4 Calibración y validación del modelo

La calibración y validación del modelo se puede definir como las pruebas para conocer si los datos modelados concuerdan o empatan con los datos observados (McCabe et al., 1999). La estimación de las diferencias entre estos datos permite medir el grado de confiabilidad en los resultados del modelo. La modificación de ciertas condiciones en el sistema permite ajustar los valores del modelo a los reales. Regularmente estos valores son los de parámetros en donde la incertidumbre es mayor. En el presente estudio se emplearon como referencia para la calibración y validación los siguientes parámetros:

Coefficiente de determinación. El coeficiente de determinación es muy comúnmente usado en la medición del grado de asociación entre los flujos observados y estimados (Aitken, 1973). Este es el cuadrado de la correlación de Pearson, y describe la proporción de la variación total de los datos observados que pueden ser explicados en el modelo. Tiene un rango de 0 a 1.0, en donde los valores más altos indican una mejor concordancia (McCabe et al., 1999). El coeficiente de determinación está descrito en la siguiente ecuación:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2$$

Ecuación 12. Coeficiente de determinación. Fuente: McCabe et al, 1999.

En donde, R^2 es el coeficiente de determinación; la O son los datos observados y la P son los datos modelados. La N es el número de datos de la serie de tiempo.

Coefficiente de eficiencia. El coeficiente de eficiencia (E) ha sido ampliamente usado para evaluar el funcionamiento de los modelos hidrológicos (McCabe et al., 1999). Nash & Sutcliffe (1970) definieron el coeficiente de eficiencia con los rangos de $-\infty$ a 1.0, siendo la unidad el valor óptimo. La ecuación del coeficiente de eficiencia está descrita de la siguiente manera:

$$E = 1.0 - \frac{(O - P)^2}{(O - \bar{O})^2}$$

Ecuación 13. Coeficiente de eficiencia. Fuente: McCabe et al, 1999.

En donde, E es el coeficiente de eficiencia; la O son los datos observados y la P son los datos modelados. La \bar{O} es el promedio de los datos observados.

Índice de concordancia. Willmott (1981) siempre buscó superar la insensibilidad de la correlación basada en las diferencias de los datos observados y modelados, lo que lo llevó a desarrollar el índice de concordancia (ecuación 14). Este índice varía de 0 a 1.0, siendo la unidad el valor óptimo (McCabe et al., 1999).

$$d = 1.0 - \frac{(O - P)^2}{(|P - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2}$$

Ecuación 14. Índice de concordancia. Fuente: McCabe et al, 1999.

En donde, d es el índice de concordancia; la O son los datos observados y la P son los datos modelados. La \bar{O} es el promedio de los datos observados.

3.4.1 Validación

Como muchos de los datos usados en este modelo, provienen del modelo WEAP del Río Grande/Bravo (Danner et al., 2009), no se realizó un proceso de calibración como tal, pues este ya se había realizado anteriormente. Para este trabajo solo se realizó un proceso de validación del modelo en RiverWare, que consistió en iterar los valores obtenidos de los puntos de control (estaciones hidrométricas) Icamole, Los Herrera y El Cuchillo con los datos observados. Los años que se tomaron para realizar este proceso, fue desde 1964 al 2014. A través del proceso de iteración se calcularon los parámetros que fueron mencionados anteriormente (coeficiente de determinación, coeficiente de eficiencia e índice de concordancia) para medir la confiabilidad del modelo.

En las figuras 9, 10 y 11 se pueden apreciar las comparaciones entre los valores modelados y los valores históricos observados para cada punto de control. Los valores históricos observados fueron proporcionados por la CONAGUA.

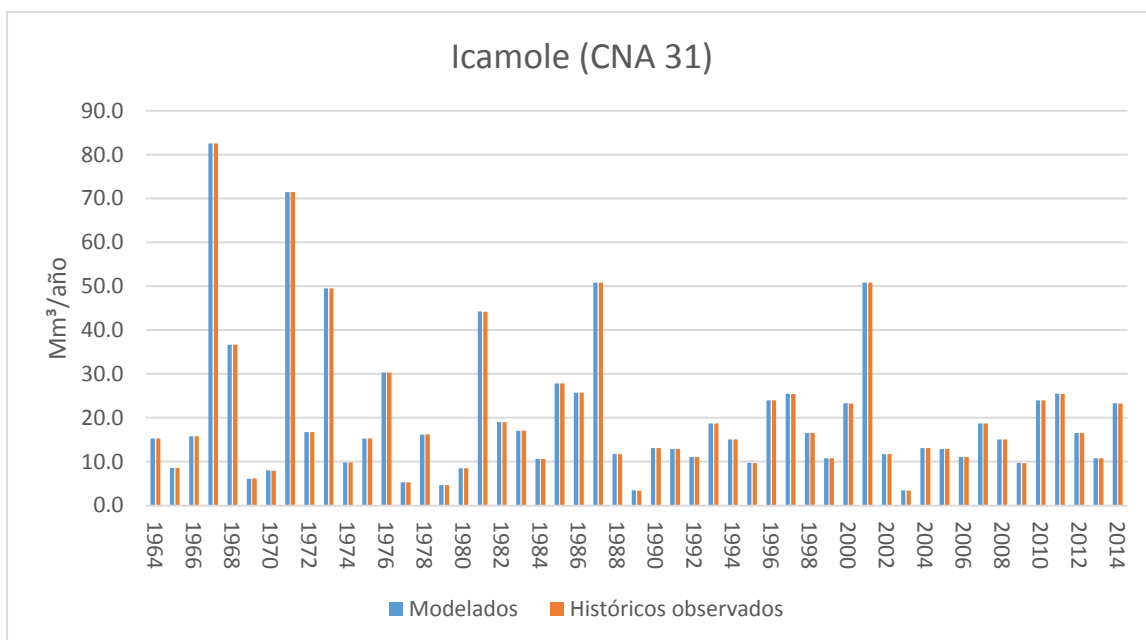


Figura 9. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control Icamole empleado en la validación.

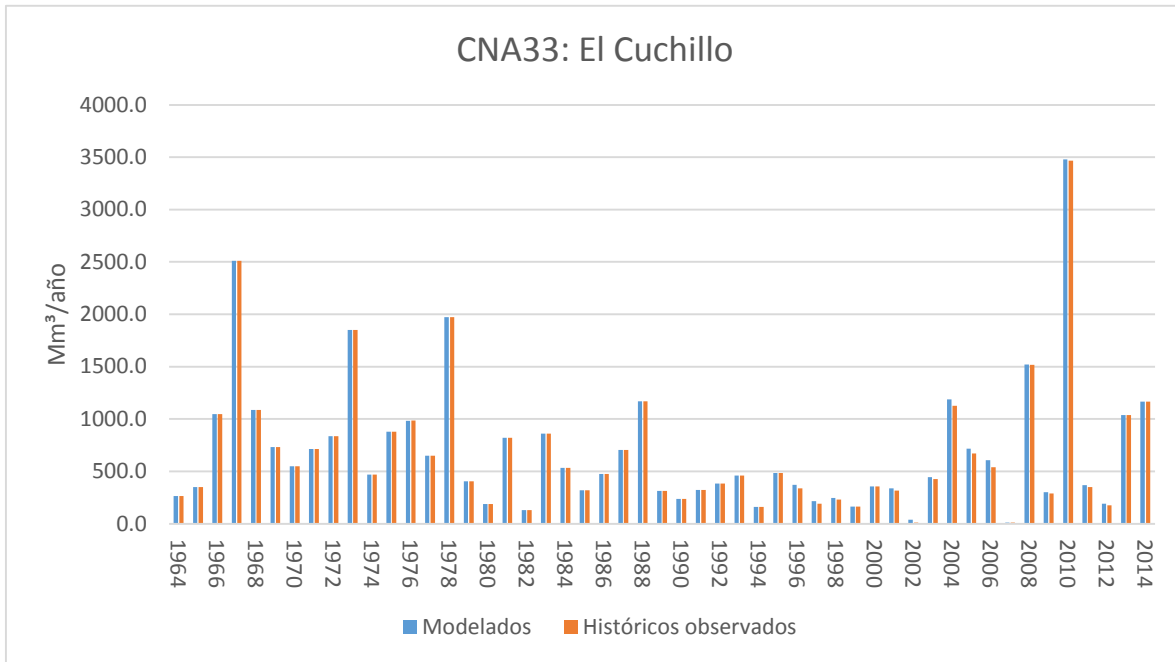


Figura 10. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control El Cuchillo en la validación.

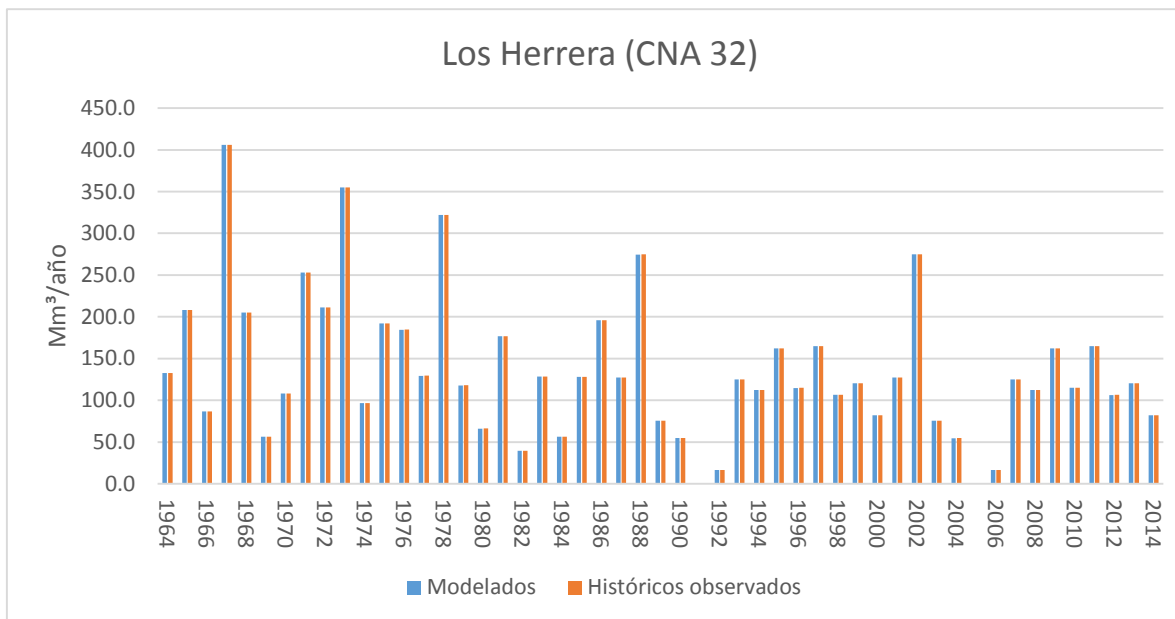


Figura 11. Resultados de la simulación de flujo para el punto de control Los Herrera en la validación.

Los resultados obtenidos de los cálculos de los parámetros para las tres series se pueden observar en la tabla 10.

	Icamole	Los Herrera	El Cuchillo
Promedio(Mm ³)	16.213	138.424	634.695
Media(Mm ³)	12.303	120.329	472.561
Desviación Estándar (Mm ³)	16.773	103.885	580.110
Correlación de Pearson	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de Determinación	1.000	1.000	0.999
Índice de Concordancia (Willmott)	1.000	1.000	1.000
Coefficiente de Eficiencia (Nash)	1.000	1.000	0.999

Tabla 10. Resultados de la validación obtenida para los tres puntos de control.

3.5 Restricciones del modelo

El objetivo de un modelo es realizar una representación de un sistema con el mayor apego a las condiciones actuales para reproducir y conseguir resultados cercanos a la realidad, sin embargo, existen ciertos elementos que aportan cierto grado de incertidumbre al modelo. Entre ellos se encuentran la carencia de información actualizada o específica para el cálculo de determinados parámetros. En el caso de estudio, estas incertidumbres se deben principalmente a la carencia de algunos datos actuales para los siguientes elementos del sistema:

- Modelación de agua subterránea a detalle.
- Capacidad de almacenamiento de acuíferos.
- Aportación de drenaje pluvial a entradas de plantas de tratamiento de aguas residuales de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

- No se consideran en el modelo las pérdidas a causa de fugas en el sistema de abastecimiento.
- No se incluye en el modelo la zona aguas abajo de la estación hidrométrica (punto de control) Los Aldama.
- No hay una desagregación del agua tratada entre los usuarios industriales, los del público urbano y los agricultores, por lo tanto no se tiene la información de que cantidad de agua se reparte entre estos tres usuarios.
- No se consideran escenarios de cambio climático en el modelo.

CAPÍTULO 4: PROYECCIÓN Y SIMULACIÓN DE FUTUROS ESCENARIOS

4.1 Simulación de futuros escenarios

Una de las bondades de los modelos hidrológicos es que pueden ser empleados para evaluar la respuesta de un sistema bajo distintos escenarios en donde una o varias variables son modificadas para representar las condiciones que se podrían presentar en la realidad.

Para modelar los distintos escenarios en la cuenca y sistema de estudio se utilizó el software RiverWare, el cual permite modificar parámetros y generar resultados de cambios en el comportamiento del sistema. Los escenarios en RiverWare se estructuran a partir de las condiciones simuladas en el escenario base (baseline). Una vez que se tiene dicho escenario, se puede proceder a modificar dichos parámetros que representarán los escenarios del sistema bajo estas nuevas condiciones. También se pueden conservar las condiciones de los años base a lo largo de la modelación con el objetivo de observar el comportamiento del sistema a futuro bajo tendencias basadas en información histórica.

La construcción de escenarios para este modelo se realizó generando la serie histórica del año 1964 al año 2014, y otro escenario base proyectado del año 2015 hasta el año 2050 en el cual se tomaron los datos de los flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años de la serie histórica mensual (ver figura 12). Además, se calculó la media de los datos de flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años para construir otros escenarios alternos a los mencionados anteriormente (ver figura 13). Las demandas de los distritos de riego y las fuentes de agua subterránea alrededor de la cuenca permanecieron constantes para el

escenario base. Los datos de las fuentes de suministro de agua superficial para el AMM, que en este caso son las presas Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo, fueron estimados por medio de reglas de operación. Aunado a esto, se proyectó la serie de crecimiento poblacional hasta el año 2050 con base en información del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2014) y al consumo de agua per cápita, para calcular la demanda futura en el Área Metropolitana de Monterrey. Se decidió proyectar la serie hasta el año 2050, pues se cree que para años posteriores, se tendrían que considerar escenarios de cambio climático.

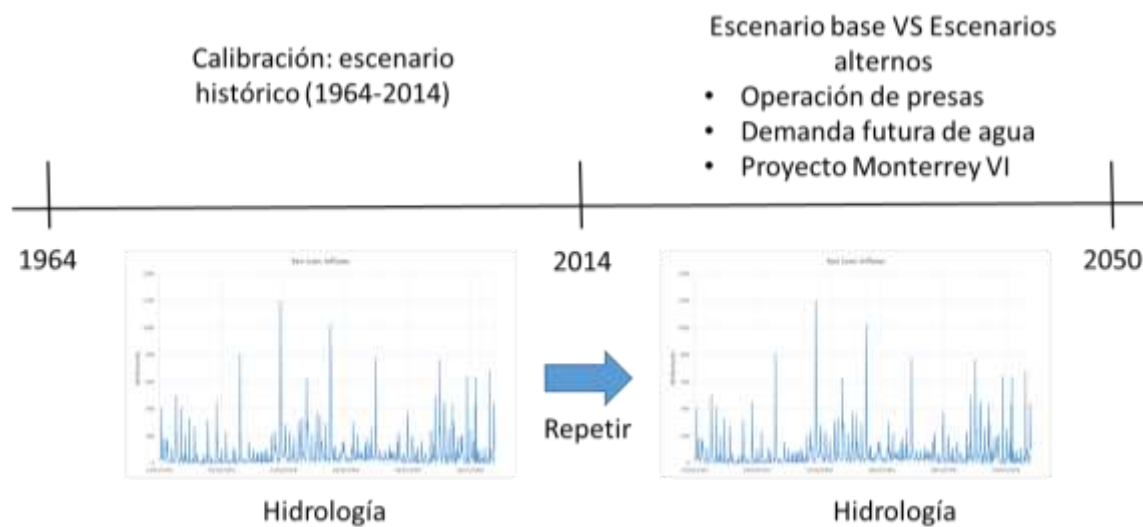


Figura 12. Metodología para la simulación de futuros escenarios con la hidrología histórica repetida.

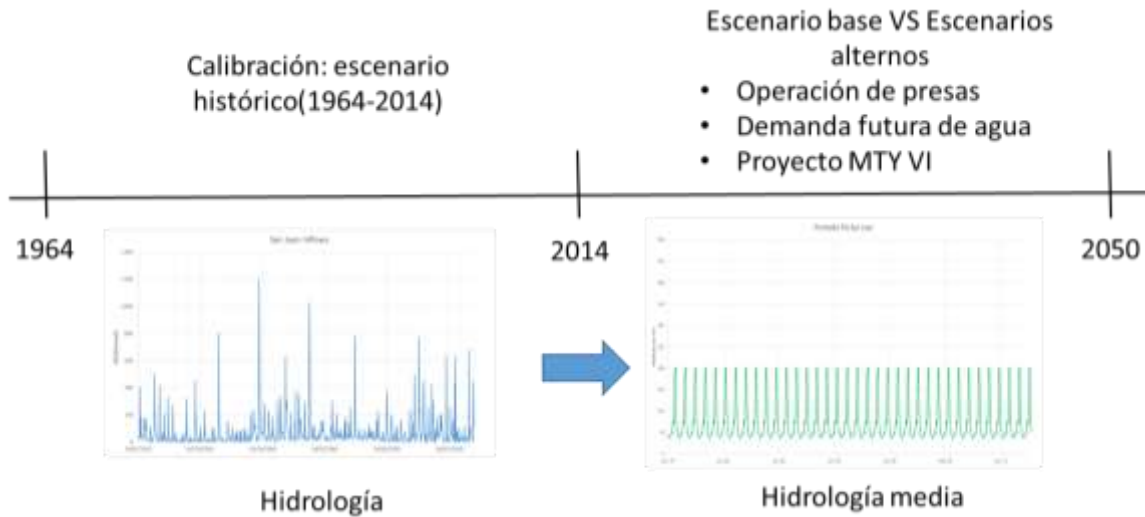


Figura 13. Metodología para la simulación de futuros escenarios con la media de la hidrología.

4.2 Crecimiento poblacional

A partir del siglo pasado México ha experimentado un crecimiento demográfico hacia zonas urbanas en forma acelerada. Aunado al aumento poblacional, factores como el nivel de consumo per cápita, patrones de consumo y tecnología disponible, tienen influencia directa sobre el uso de recursos y servicios naturales. Esto causa que el aprovechamiento y extracción por parte de los usuarios tienda a sobrepasar la capacidad de resiliencia del medio natural, lo cual eventualmente conduce a la escasez (Cedillo, 2012). Cuando se alcanza un nivel que rebasa las capacidades del sistema para suministrar cualquiera de los bienes o servicios, es necesario recurrir al uso de tecnología y gestiones diversas para solventar estas necesidades, lo cual conlleva a afectaciones ambientales de manera indirecta, como es el caso de la extracción y transferencia de agua entre cuencas (Bedolla Ruiz, 2009).

Por lo tanto, se ha incluido el crecimiento poblacional como una variable a considerar en la proyección de la demanda a futuro para evaluar su impacto sobre el sistema de

suministro en el AMM. Para el caso de estudio, se usaron datos basados en información de CONAPO (ver tabla 2) con valores anuales de crecimiento del año 2010 al 2030, los que posteriormente se proyectaron hasta el 2050 al multiplicar la pendiente de la regresión lineal de la serie por el año deseado (x), menos la distancia de la recta al origen (ver ecuación 15).

$$y = 58560x - 1.14E + 08 \quad (15)$$

4.3 Demanda futura de agua potable para el AMM

Una vez que se tiene la serie de tiempo de la población futura hacia el año 2050, se puede estimar la demanda de agua futura de la ciudad (ver tabla 11) al multiplicar el consumo de agua per cápita del último año, que en este caso fue 236 litros por habitante/día para el año 2014, por el número de habitantes de cada año en el futuro. El consumo de agua per cápita del 2014 fue calculada al dividir los 12.425 m³/s (391.83 Mm³/año) de acuerdo a la Síntesis Ejecutiva, (SADM, 2014) entre el número de habitantes del 2014, que en este caso fueron 4, 545,222 según los datos de CONAPO (2014).

Año	Población del AMM(habitantes)	Volumen de demanda del AMM (Mm³/año)	Gasto(m³/s)
2015	4,378,771	397.7	12.6
2016	4,439,867	403.5	12.8
2017	4,501,025	409.3	13.0
2018	4,561,845	415.0	13.2
2019	4,621,985	420.6	13.3
2020	4,681,466	426.1	13.5
2021	4,740,382	431.6	13.7
2022	4,798,838	437.0	13.9
2023	4,856,698	442.4	14.0
2024	4,913,894	447.7	14.2
2025	4,970,343	453.0	14.4
2026	5,026,015	458.2	14.5
2027	5,080,903	463.3	14.7
2028	5,134,971	468.3	14.8
2029	5,188,172	473.3	15.0
2030	5,240,403	478.1	15.2
2031	5,313,492	480.5	15.2
2032	5,371,577	485.6	15.4
2033	5,429,662	490.6	15.6
2034	5,487,747	495.7	15.7
2035	5,545,832	500.7	15.9
2036	5,603,917	505.8	16.0
2037	5,662,002	510.8	16.2
2038	5,720,087	515.9	16.4
2039	5,778,172	520.9	16.5
2040	5,836,257	526.0	16.7
2041	5,894,342	531.0	16.8
2042	5,952,427	536.1	17.0
2043	6,010,512	541.1	17.2
2044	6,068,597	546.2	17.3
2045	6,126,682	551.2	17.5
2046	6,184,767	556.3	17.6
2047	6,242,852	561.3	17.8
2048	6,300,937	566.4	18.0
2049	6,359,022	571.4	18.1
2050	6,417,106	576.5	18.3

Tabla 11. Población y volumen de demanda de agua para el Área Metropolitana de Monterrey 2015-2050. Consumo per cápita constante (236 L/hab/día). Elaborado por el autor con datos de CONAPO (2014) y SADM (2014)

Con las demandas anuales, se pueden estimar las demandas mensuales (ver figura 14) al multiplicar la serie anual por la variación mensual en porcentajes de los consumos del AMM tomadas del modelo de WEAP del Rio Grande/Bravo (Danner et al., 2009) (ver tabla 6).

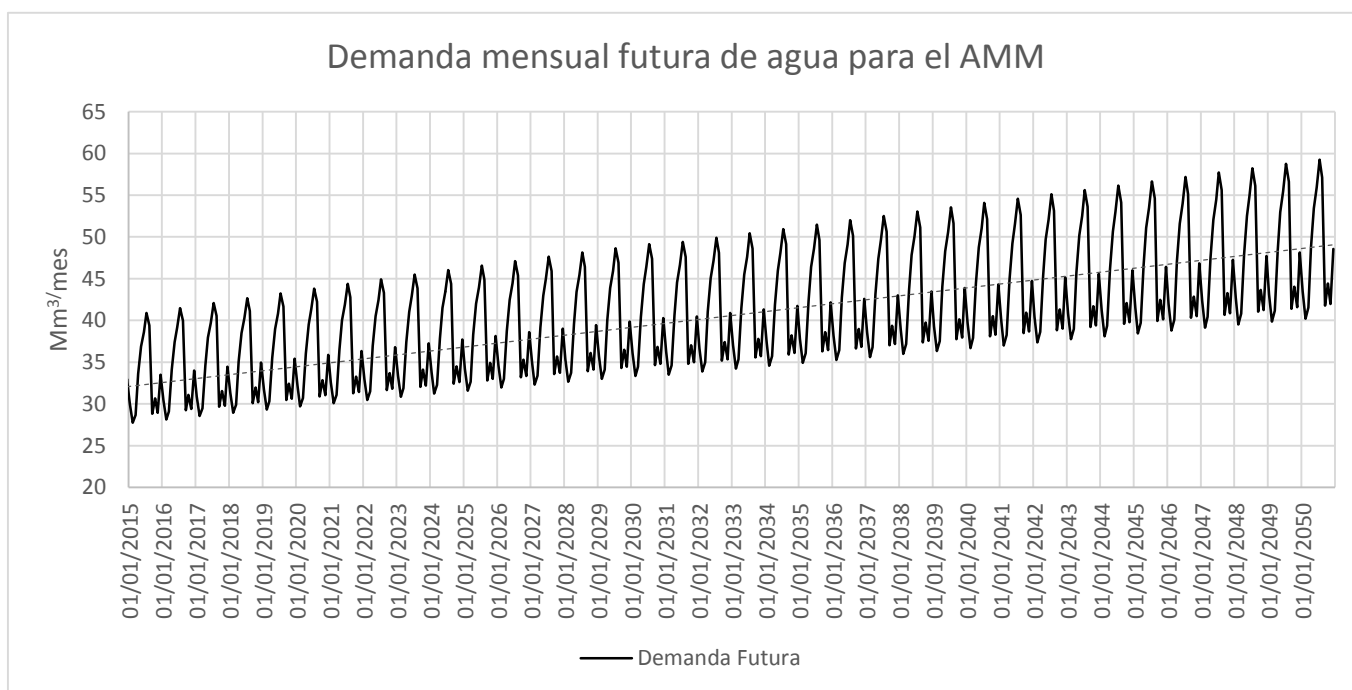


Figura 14. Demanda mensual de agua potable (Mm³) para el Área Metropolitana de Monterrey 2015-2050. Elaborado por el autor con datos de CONAPO (2014), SADM (2014) y Danner et al., (2009)

4.4 Escenario base

En el escenario base se ingresaron los datos de los flujos de cabecera de los ríos correspondientes a los últimos 36 años de la serie histórica mensual como entradas a las fuentes superficiales que suministran el AMM. Las demandas de los distritos de riego se repitieron con base en las tendencias históricas, es decir, se siguieron usando los mismos consumos de los últimos 36 años.

De la misma manera, las recargas naturales mensuales de los tres acuíferos permanecieron constantes, y los datos del informe hecho por la SEMARNAT (2011). Para las extracciones mensuales de los acuíferos, se ingresaron los datos de los volúmenes concesionados (ver tabla 12) para cada respectivo sistema de agua subterránea.

Volúmenes concesionados de los acuíferos en el AMM		
Acuífero	Volumen anual concesionado (Mm ³)	Volumen mensual concesionado (Mm ³)
Pozos Área Metropolitana	106.33	8.86
Campo Mina	30.65	2.55
Campo Buenos Aires	62.71	5.23

Tabla 12. Volúmenes concesionados (derechos de agua) para los tres sistemas de agua subterránea en el Área Metropolitana de Monterrey. Fuente: SEMARNAT, 2011.

Por otro lado, los datos de las fuentes de suministro de agua superficial para abastecer el AMM, que en este caso son las presas Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo, fueron estimados por medio de las siguientes reglas:

1. El almacenamiento disponible para cada presa se calcula restando el almacenamiento muerto (ver tabla 13) al almacenamiento del paso de tiempo anterior (Storage_{t-1}).
2. Si el almacenamiento disponible es superior que los derechos de agua concesionados para cada sitio de demanda o usuario de agua, se pueden tomar todos los derechos de agua; de lo contrario, simplemente se puede tomar el almacenamiento disponible.

La filosofía de esta decisión es que si hay suficiente agua en las presas para abastecer adecuadamente a todos los sitios de demanda, se puede en su totalidad usar los volúmenes

concesionados; de lo contrario, sólo se puede usar el almacenamiento disponible para abastecer a los usuarios.

Presas	Almacenamiento muerto (Mm ³)
La Boca	5.58
Cerro Prieto	51.667
El Cuchillo	202.32

. *Tabla 13. Almacenamiento muerto para las tres presas en el Área Metropolitana de Monterrey.*
Fuente: Danner et al., 2009.

Como la presa El Cuchillo tiene tres diferentes usuarios de agua, que en este caso son el Área Metropolitana de Monterrey, el distrito de riego 031 Las Lajas (DR 031) y los trasvases a la presa Marte R. Gómez, los derechos de agua se distribuyen en el siguiente orden: (1) el AMM es la primera prioridad; (2) el DR 031 es la segunda prioridad y por último, (3) Marte R. Gómez.

Los trasvases de la presa El Cuchillo a la presa Marte R. Gómez se estimaron con la regla de operación establecida en el artículo 9° en el Reglamento para la Extracción y Utilización de las Aguas del Sistema Hidráulico del Río San Juan (CONAGUA, 1996). El artículo 9° menciona lo siguiente: el día primero de noviembre, si la presa El Cuchillo tenga un almacenamiento superior a 315 millones de m³ y en la presa Marte R. Gómez se tenga un almacenamiento inferior a 700 millones de m³ el excedente del volumen en El Cuchillo se transferirá a la presa Marte R. Gómez, de lo contrario, no se transferirá agua de una presa a otra (CONAGUA, 1996).

Sitios de demanda	Fuente (Presas)	Volumen mensual concesionado (Mm ³)
DR 031 Las Lajas	El Cuchillo	2.00
Área Metropolitana de Monterrey	El Cuchillo	12.96
Área Metropolitana de Monterrey	La Boca	4.14
Área Metropolitana de Monterrey	Cerro Prieto	13.99

Tabla 14. Presas asociadas con los sitios de demanda en la cuenca del Río San Juan. Fuente: Danner et al., 2009 y CONAGUA, 2014.

4.5 Escenario 1

En este primer escenario alterno, se usaron las mismas condiciones que en el escenario base, excepto por las extracciones de los acuíferos.

Los tres principales sistemas de agua subterránea en el Área Metropolitana de Monterrey están siendo sobreexplotados, pues de acuerdo con informes de la SEMARNAT, los derechos de agua son mayores a sus recargas naturales (ver tabla 15). Por lo tanto, en este escenario se sustituyeron los volúmenes mensuales concesionados de agua para cada acuífero por su respectiva recarga media mensual para lograr un manejo sustentable de los acuíferos de la región.

Recargas naturales y volúmenes concesionados de los acuíferos en el AMM		
Sistemas de acuíferos	Volumen mensual concesionado (Mm ³)	Recarga media mensual (Mm ³)
Pozos Área Metropolitana	8.86	5.68
Campo Mina	2.55	2
Campo Buenos Aires	5.23	4.75

Tabla 15. Volúmenes mensuales concesionados y recargas naturales de los acuíferos en el AMM. Fuente: SEMARNAT, 2011

4.6 Escenario 2

En el segundo escenario se usaron las mismas condiciones que en el escenario base, excepto porque la demanda futura de agua del AMM se modificó al disminuir la dotación per cápita de agua de 236 litros por habitante/día a 199 litros por habitante/día, pues de acuerdo a informes de The Nature Conservancy (2015), la segunda dotación per cápita es la deseada para la ciudad, pues retrasaría más años el déficit de agua en la ciudad. Este escenario implicaría promover la conservación del agua mediante la información y la educación pública. Sin embargo, a veces eso no es muy eficaz para lograr los objetivos deseados. También se debería de hacer una imposición de aumentos de precios significativos para proporcionar un incentivo financiero para de esta manera conservar el agua (Martin y Kulakowski, 1991). Los clientes utilizan menos agua cuando tienen que pagar más por ello y utilizan más cuando saben que pueden permitírselo (EPA, 2012)

4.7 Escenario 3

En este tercer escenario alternativo, se usaron las mismas condiciones que en el escenario base; sin embargo, las entradas que se usaron para las fuentes superficiales en el AMM, fueron la media aritmética de cada mes de los últimos 35 años en lugar de repetir los datos de la serie histórica mensual. Calcular la media aritmética de los datos, elimina los eventos extraordinarios (sequías e inundaciones en este caso) de la serie histórica, logrando así unas entradas constantes a las fuentes superficiales. Probabilísticamente este escenario es tan improbable como el de repetir la hidrología histórica, pues inundaciones y sequías siempre existirán.

4.8 Escenario 4

En este cuarto escenario, se usaron las mismas condiciones que en el escenario 1, es decir, se limitó la extracción de los acuíferos a solo su recarga natural. Por otro lado, se ingresaron los datos medios de cada mes para las entradas a las fuentes superficiales al AMM como se mencionó en el escenario anterior.

4.9 Escenario 5

En este quinto escenario, se disminuyó dotación per cápita de agua de 236 litros por habitante/día a 199 litros por habitante/día en el AMM así como en el escenario 2. Sin embargo, se ingresaron los datos medios de cada mes para las entradas a las fuentes superficiales del AMM de la misma manera que en los escenarios 3 y 4.

4.10 Escenario 6

Este último escenario es una combinación de los escenarios 4 y 5. Por lo tanto, se limitaron las demandas de los acuíferos a sus recargas naturales, la dotación de agua per cápita que se usó para proyectar la demanda futura del AMM fue de 199 litros por habitante/día, y se ingresaron los datos medios de cada mes para los flujos de cabecera de los ríos.

4.11 Escenario incorporando una nueva fuente

En este escenario se estimó la cantidad de agua que se necesitará en un futuro para abastecer la demanda del AMM. Ya que se ha hablado de transferir agua del Río Pánuco al Área Metropolitana de Monterrey por medio del acueducto del proyecto MTY VI. Se considerará este proyecto como una posible nueva fuente para satisfacer al 100% la demanda futura de la ciudad hasta el año 2050; sin embargo, se podría considerar alguna otra fuente

para abastecer la ciudad. Este escenario se calculó al restar las demandas mensuales futuras menos el suministro de agua de las fuentes de abastecimiento que existen en el escenario base. La capacidad máxima que se tomó para el acueducto en este escenario, fue de 5 m³/s.

Todos los escenarios anteriores fueron evaluados con y sin esta consideración

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelo de la cuenca del Río San Juan para los escenarios anteriormente planteados. El análisis se ha centrado en la comparación de la demanda por parte del uso público urbano según tendencias de crecimiento poblacional, la implicación que tendría sobre las fuentes ante diversas tendencias de extracción y el suministro de agua que se tendría si es que se llevara a cabo la incorporación de una nueva fuente.

Los resultados analizados corresponden a la simulación del modelo en RiverWare para el sistema de demanda y sus fuentes de abastecimiento en el Área Metropolitana de Monterrey. Se aborda principalmente el comportamiento de las fuentes superficiales, subterráneas y la variación de la demanda con respecto a los escenarios planteados. La identificación de los escenarios se puede ver en la tabla 16 y todos fueron evaluados con y sin el escenario Monterrey VI.

Escenario Base	El modelo no presenta modificaciones
Escenario 1	Disminución de la extracción de los acuíferos a solo la recarga natural
Escenario 2	Disminución de la dotación per cápita de agua de 236 a 199 litros por habitante/día
Escenario 3	Media de los flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años. El modelo no presenta modificaciones.
Escenario 4	Media de los flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años. Disminución de la extracción de los acuíferos a solo la recarga natural.
Escenario 5	Media de los flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años. Disminución de la dotación per cápita de agua de 236 a 199 litros por habitante/día
Escenario 6	Media de los flujos de cabecera de los ríos de los últimos 36 años. Combinación de los escenarios 5 y 6.

Tabla 16. Escenarios evaluados en el estudio.

5.1 Resultados del Escenario Base

El análisis de confiabilidad se realizó al dividir el déficit de agua en el AMM entre la demanda de agua de los futuros años. En este análisis del escenario base (figura 15) se puede apreciar que para el año 2017 la confiabilidad del sistema sin el escenario MTY VI bajaría a un 97%, por lo que se necesitaría de una nueva fuente de 2 m³/s (MTY VI) hasta el año 2020 y hasta 5 m³/s para que el sistema permanezca al 100% hasta el año 2048, de lo contrario, el sistema bajaría su confiabilidad hasta un 77%. Esto ocasionaría cortes en el suministro de agua en el AMM.

Por otro lado, las fluctuaciones que se aprecian en la figura 15 se deben a los años secos y húmedos de la serie histórica mensual. De la misma manera, se puede apreciar cómo la sequía del 2012-2013 impactó en los años 2048 y 2049, disminuyendo notablemente la oferta de agua en esos años.

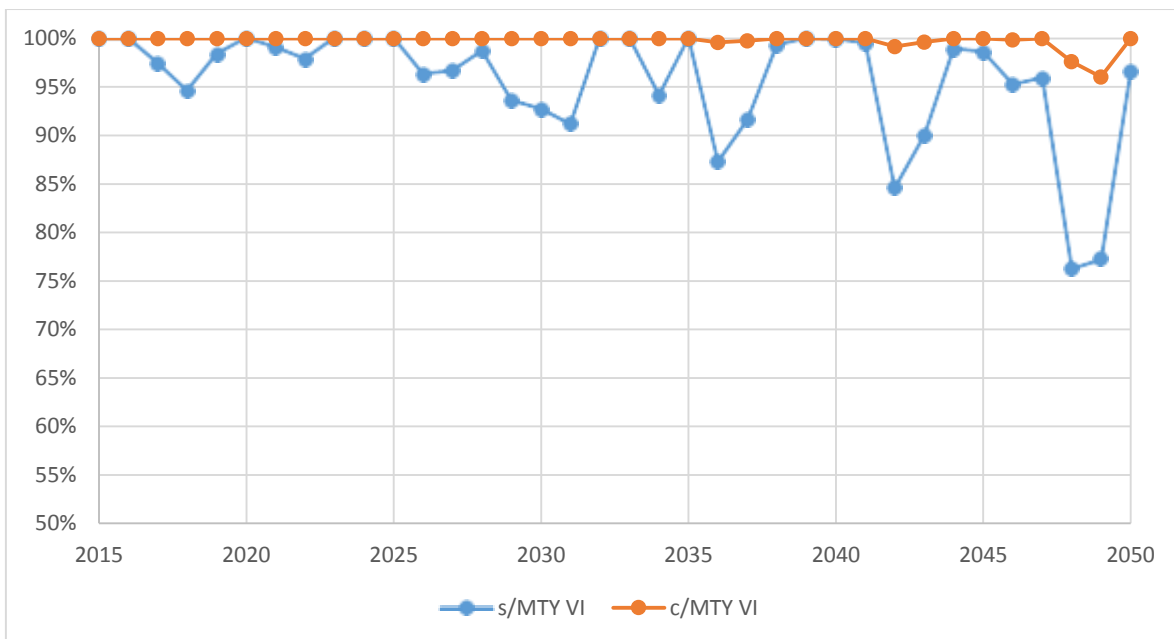


Figura 15. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario Base evaluado con y sin el MTY VI.

Además del análisis de confiabilidad, se estimó el volumen de agua que se necesitaría anualmente en un futuro para el escenario base (figura 16), y puede apreciarse que hasta el año 2030 se requerirían menos de 40 Mm³/año. Posteriormente, se necesitarían hasta 134 Mm³ en el año 2048, por lo que es imprescindible una nueva fuente que suministre de agua el AMM. Aún con la incorporación de una nueva fuente, se necesitarían hasta 22 Mm³ en el año 2049 para cubrir al 100% la demanda de la ciudad.

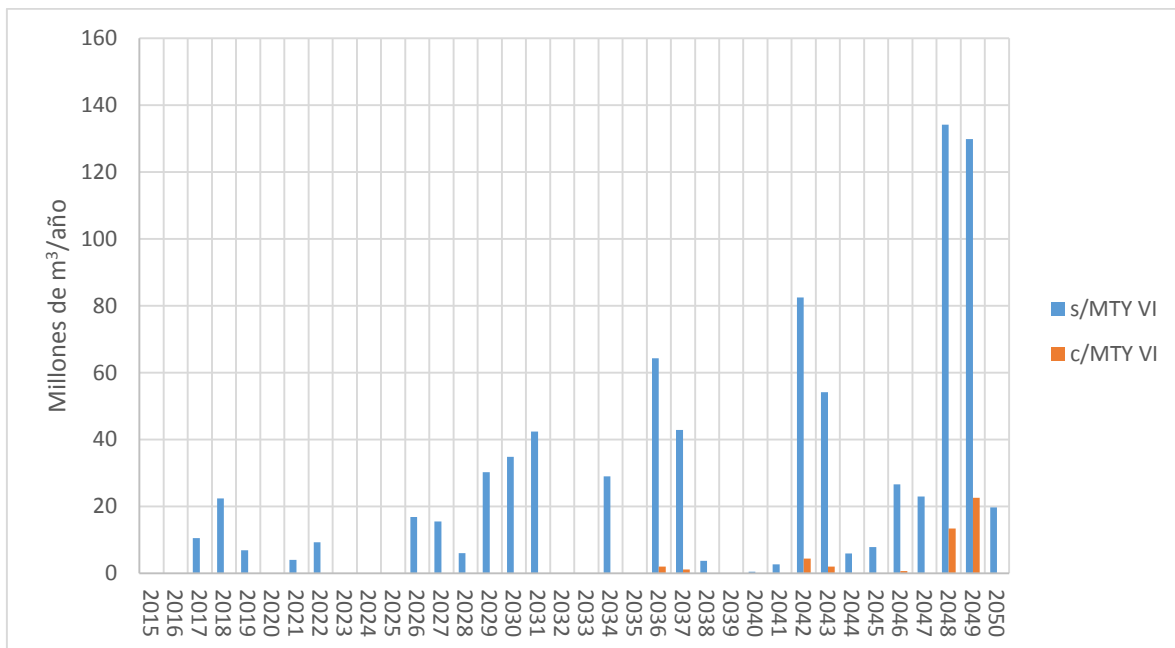


Figura 16. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm³) en el Escenario Base evaluado con y sin MTY VI.

La figura 17 muestra una comparación de la oferta con la demanda de agua en el AMM del escenario base para futuros años. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario MTY VI. Se puede apreciar en los años 2048 y 2049 que incluso con una nueva fuente de 5 m³/s, no se podrá abastecer al 100% la demanda de agua en caso de que ocurriese una sequía, por lo que es necesario implementar medidas para lograr un manejo sostenible de los recursos hídricos de la región.

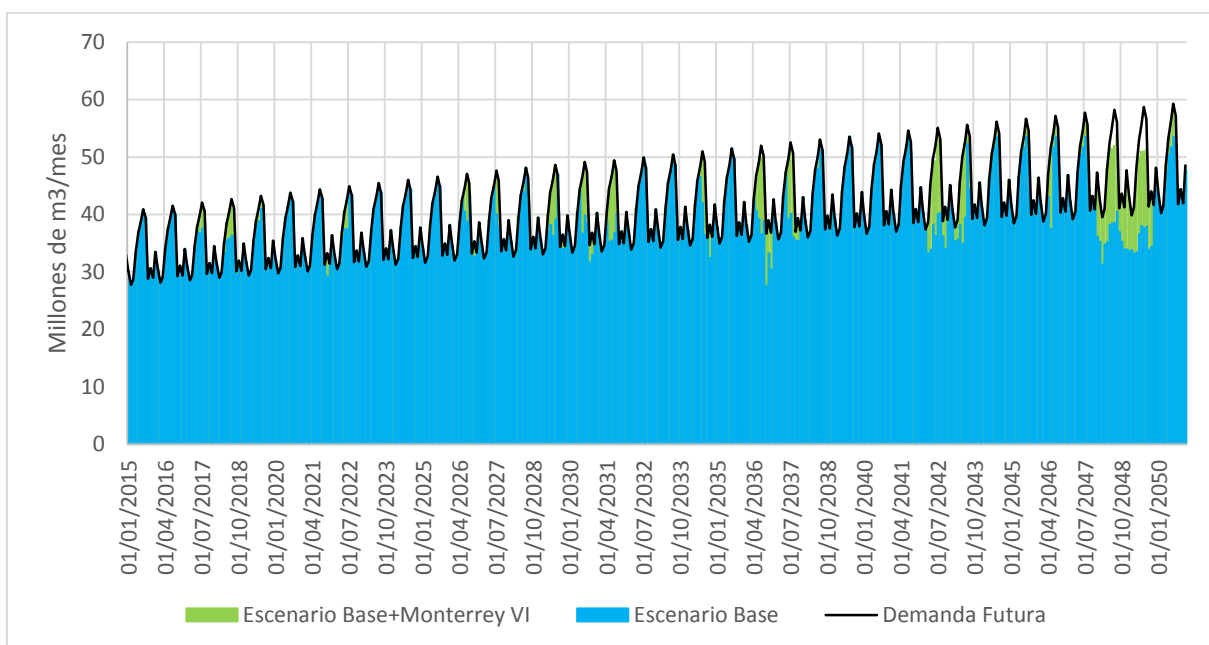


Figura 17. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario Base evaluado con y sin MTY VI.

5.2 Resultados del Escenario 1

En el análisis de confiabilidad del escenario 1 (figura 18) se puede apreciar que para el año 2017 la confiabilidad del sistema sin el escenario MTY VI bajaría a un 90%, por lo que se necesitaría de una nueva fuente de 2 m³/s (MTY VI) en un corto lapso, y 5 m³/s para que el sistema permanezca al 100% hasta el año 2030, de lo contrario, el sistema bajaría su confiabilidad hasta un 67% en el año 2048. Esto ocasionaría cortes en el suministro de agua en el AMM. La disminución de la confiabilidad de este escenario 1 comparado al escenario base, se debe a que la extracción de agua de los acuíferos se limitó a solo la recarga natural, por lo que la oferta de agua se vería reducida.

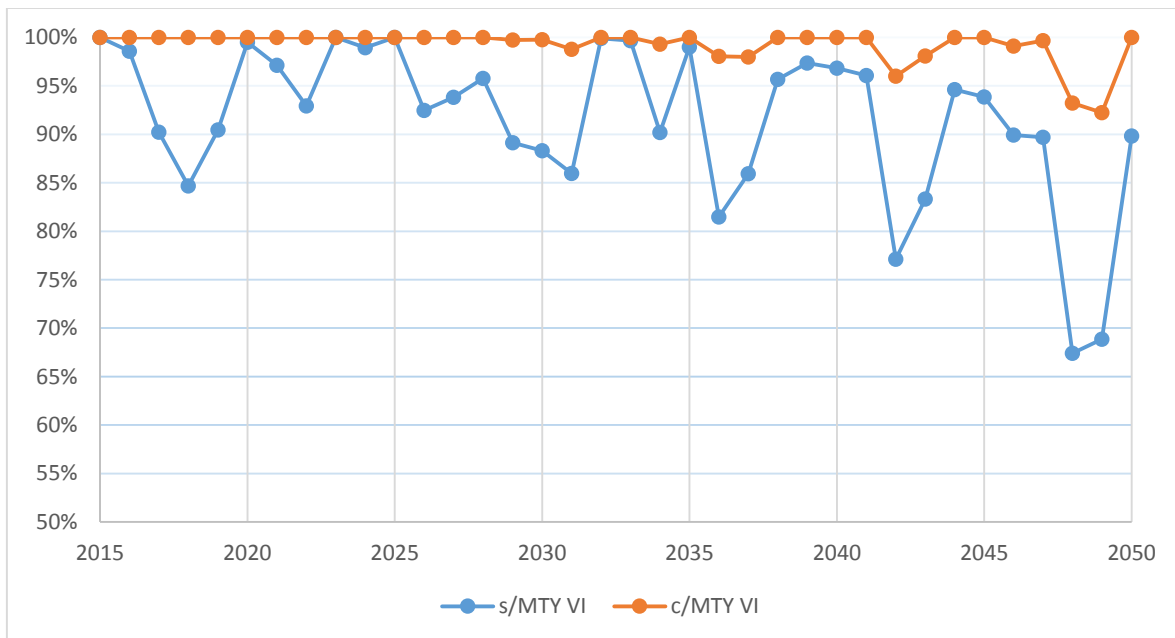


Figura 18. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 1 evaluado con y sin MTY VI.

Sin embargo, es necesario implementar medidas para manejar sosteniblemente los acuíferos de la región y que no sean sobreexplotados. De esta manera se podrá extraer más agua de ellos cuando de verdad se necesiten, como en una posible sequía.

Se estimó también la cantidad de agua que va a necesitarse anualmente en un futuro en el escenario 1 (figura 19); puede apreciarse que en del año 2018 se necesitarían 63 Mm³/año, reduciéndose este volumen en los años siguientes hasta alcanzar un volumen de 67 Mm³/año en el 2031. Posteriormente, se necesitarían hasta 184 Mm³ en el año 2048, por lo que es imprescindible una nueva fuente que suministre al AMM. En este caso, se necesitarían hasta 44 Mm³ en el año 2049 para cubrir al 100% la demanda de la ciudad incluso con la nueva fuente de 5 m³/s.

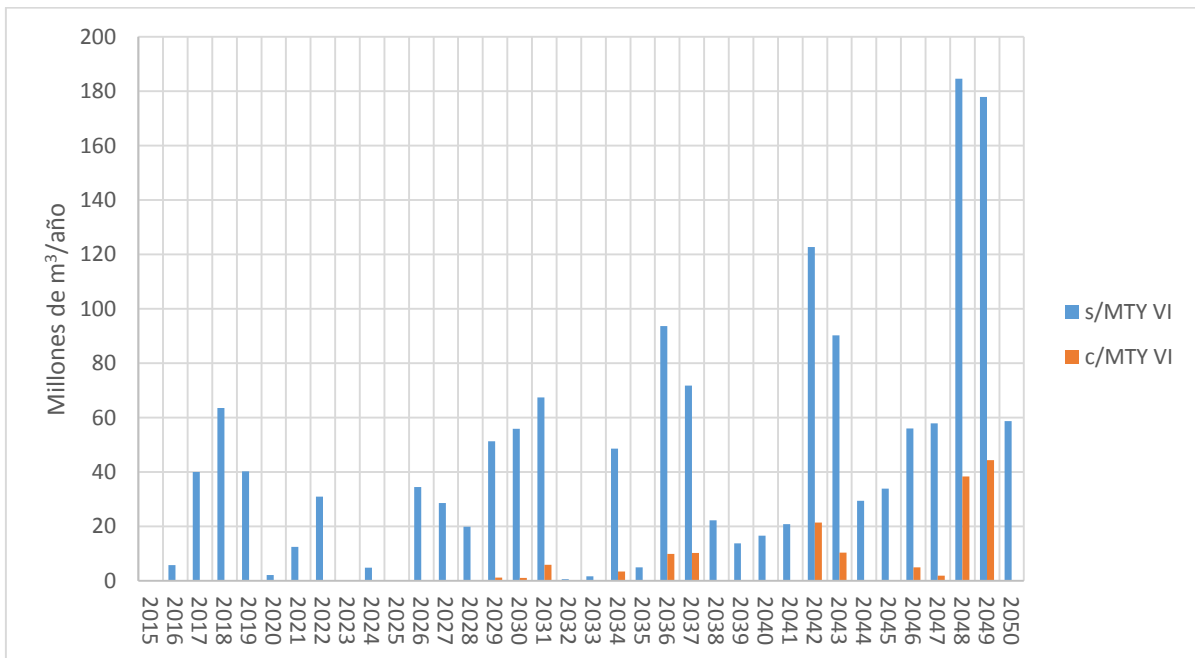


Figura 19. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm³) para el Escenario 1 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 20 se hace una comparación de la oferta con la demanda de agua en el AMM del escenario 1 para futuros años. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario MTY VI. Se puede apreciar que en el año 2031 existirá un déficit de agua de 6 Mm³/año, que incluso con una nueva fuente de 5 m³/s no se dará abasto para cubrir al 100% la demanda de agua. En los años 2048 y 2049 se puede apreciar más acentuadamente el impacto de una sequía como la del 2012-2013 en la oferta de agua

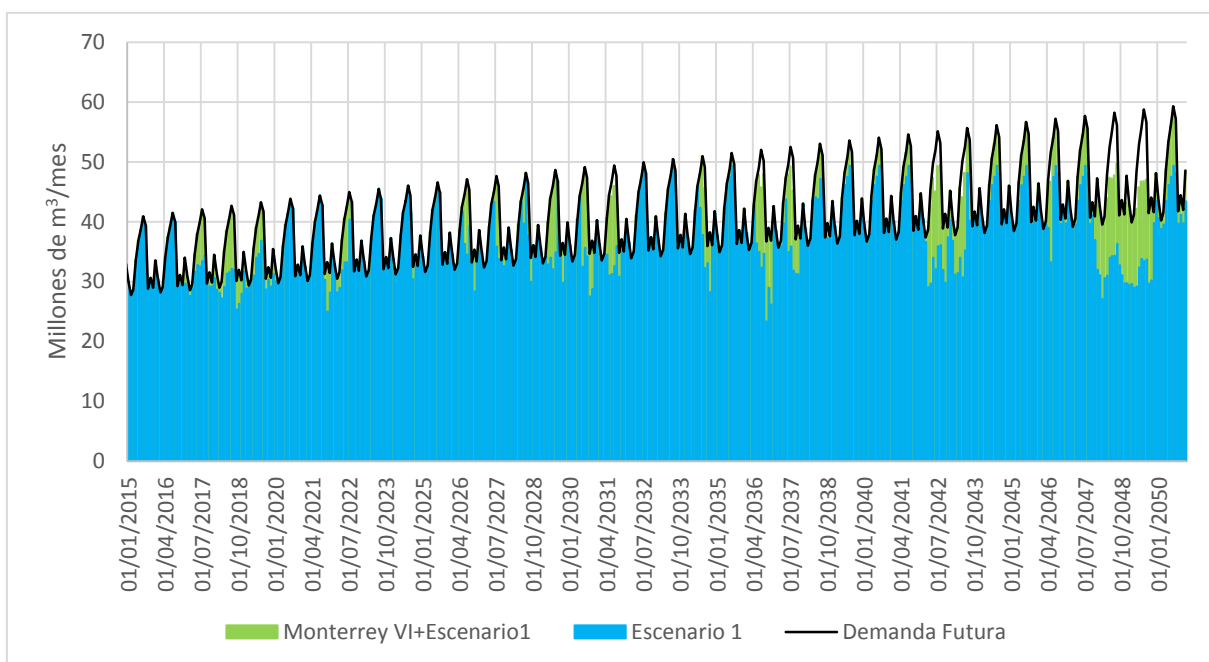


Figura 20. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 1 evaluado con y sin MTY

5.3 Resultados del Escenario 2

En este análisis (figura 21) se puede apreciar que hasta el año 2028 la confiabilidad del sistema sin el escenario MTY VI permanecería con un 100%. Posteriormente se aprecian caídas en la confiabilidad en los años 2031, en los episodios de los años 2036-2037 y 2043-2044. Para que el sistema no presente una disminución en su confiabilidad, se necesitaría de una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), de lo contrario, el sistema podría bajar hasta un 89% en el año 2049. Esto ocasionaría cortes en el suministro de agua en el AMM. El sistema no presenta una disminución del porcentaje de confiabilidad tan pronunciada como en los escenarios anteriores, pues se redujo la dotación de agua per cápita de 236 litros por habitante por día a 199 litros por habitante por día (16%); esto genera que la demanda se vea disminuida.

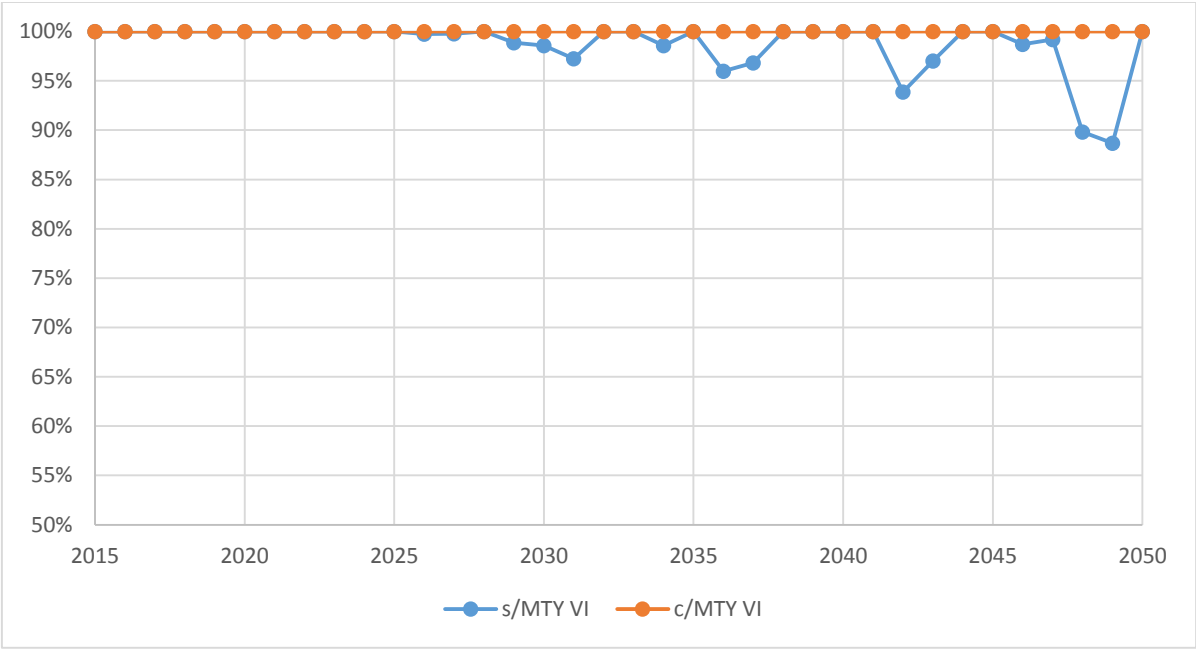


Figura 21. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI.

Se estimó el volumen de agua que se necesitaría anualmente en un futuro en el escenario 2 (figura 22), y puede apreciarse que en el año 2036 se necesitarían al menos de 17 Mm³/año para abastecer al 100% la demanda del AMM. Posteriormente, se van a necesitar hasta 54 Mm³ en el año 2049, por lo que es imprescindible una nueva fuente que suministre de agua el AMM. En este caso, el sistema quedaría abastecido al 100% con una fuente de 5 Mm³/s (MTY VI) hasta el año 2050.

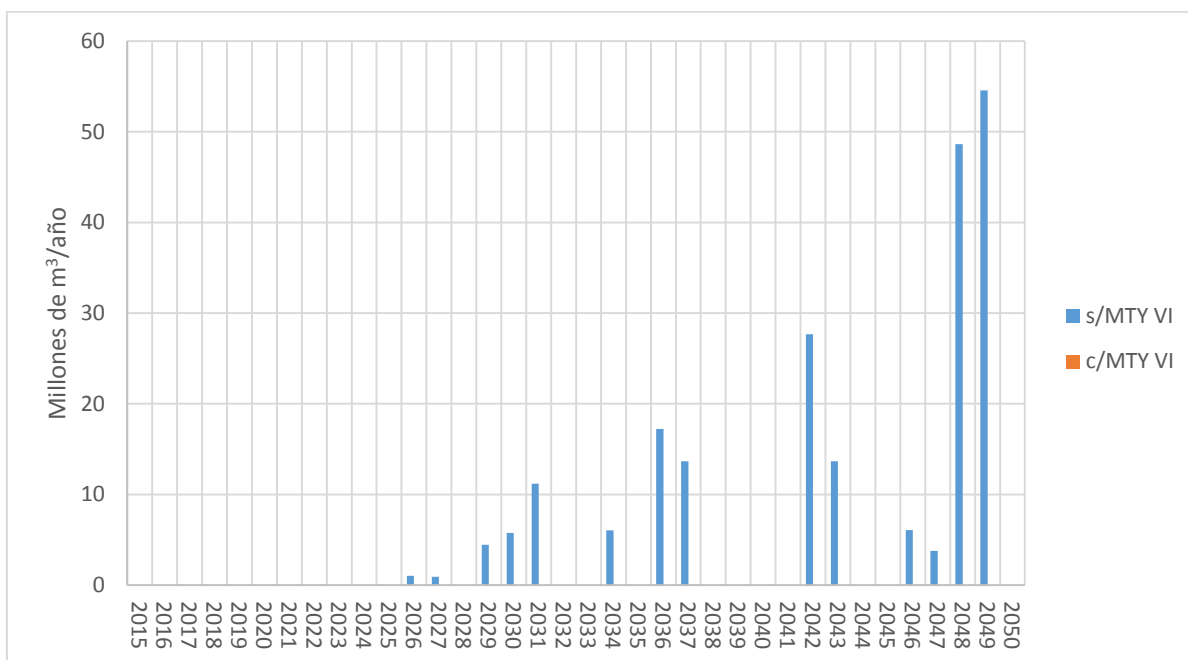


Figura 22. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 23 se observan los volúmenes de la oferta con la demanda de agua en el AMM del escenario 2 para el futuro. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario MTY VI. Se puede apreciar que a partir del año 2026 existirá un pequeño déficit de agua de 1 Mm³/año, acentuándose mayormente hasta el año 2031 con un déficit de 11 Mm³/año. Sin embargo, con una nueva fuente de 5 m³/s se dará abasto para cubrir al 100% la demanda de agua. En los años 2048 y 2049 se puede apreciar más acentuadamente el impacto de la sequía de los años 2012-2013 en la oferta de agua.

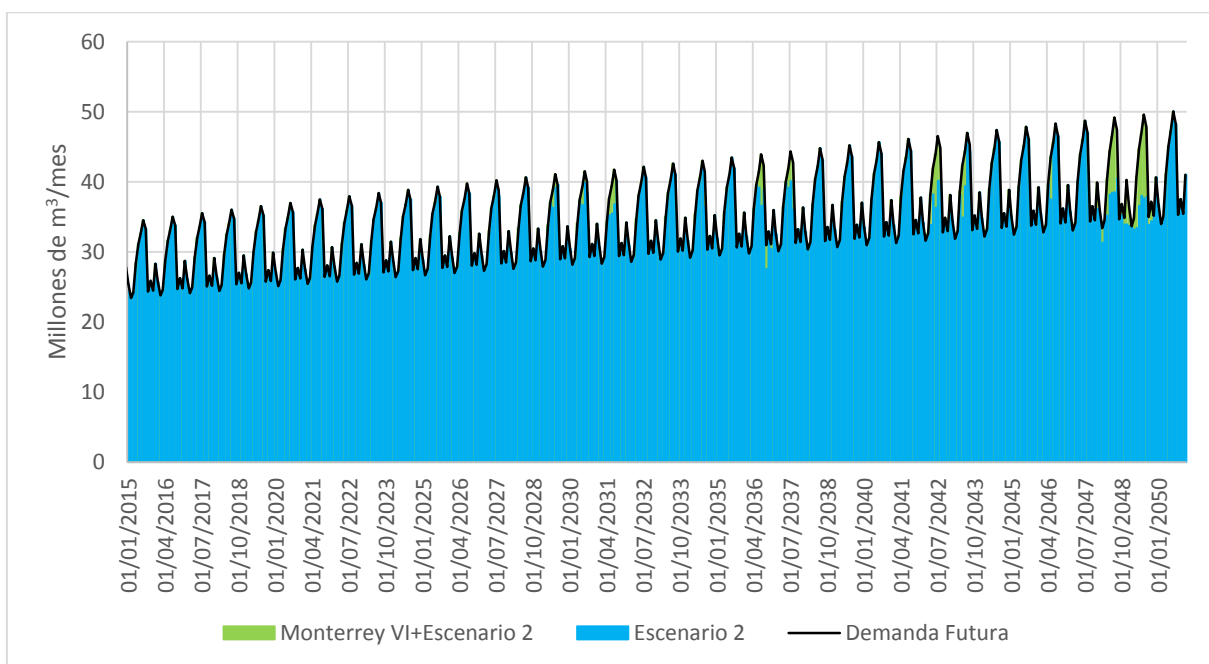


Figura 23. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 2 evaluado con y sin MTY VI

5.4 Resultados del Escenario 3

En el análisis de confiabilidad del escenario 3 (figura 24) se puede apreciar que la confiabilidad del sistema sin el escenario MTY VI decrecerá gradualmente a partir del año 2020 hasta alcanzar una confiabilidad del 89% en el 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), el sistema soportará el 100% de confiabilidad hasta el año 2045, a partir de este año la confiabilidad decrecerá gradualmente hasta alcanzar un 98% en el año 2050. Esta gráfica no presenta fluctuaciones, pues las entradas al sistema que se utilizaron para este escenario fueron la media aritmética de la serie histórica mensual de los flujos de cabecera de los ríos; de esta manera los eventos extraordinarios (sequías e inundaciones) fueron atenuados.

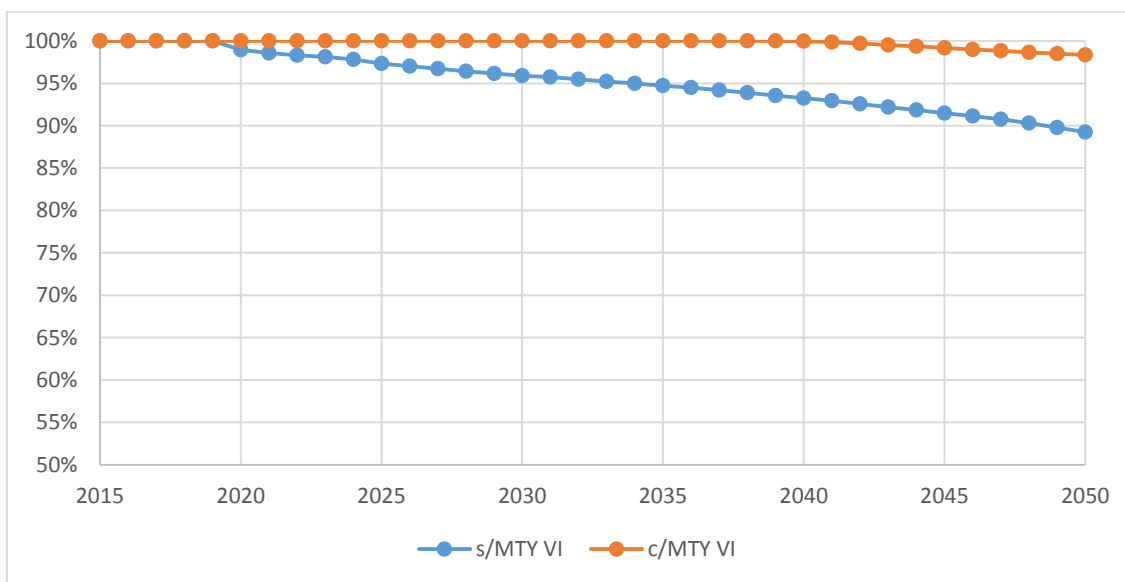


Figura 24. Análisis de confiabilidad del sistema en el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.

Se estimó también la cantidad de agua que va a necesitarse anualmente en el futuro del escenario 3 (ver figura 25). Si no se incorpora una nueva fuente (MTY VI), el déficit tendría un incremento anual promedio de 60 litros por segundo (1.8 Mm³/año). Esta empezaría con 4.5 Mm³ en el año 2020 hasta alcanzar gradualmente la cantidad de 62 Mm³ en el año 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), el volumen máximo de agua que se necesitaría sería 9.6 Mm³ para el año 2050.

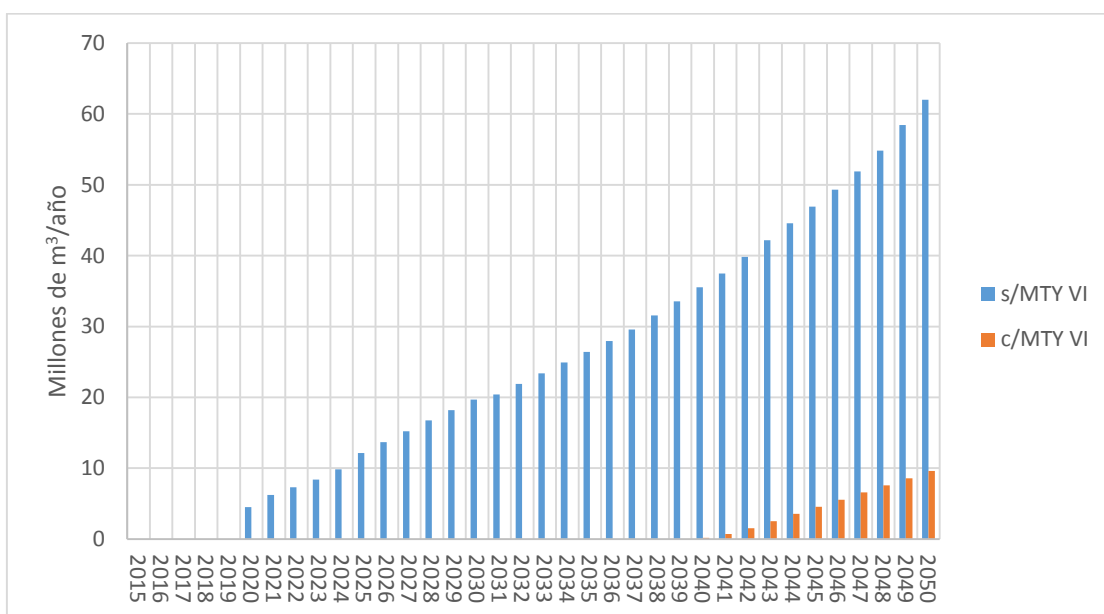


Figura 25. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm³) para el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 26 se hace una comparación de la oferta con la demanda de agua en el AMM del escenario 3 para futuros años. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario MTY VI. Se puede apreciar que a partir del año 2020 existiría un déficit de agua de 4.5 Mm³/año, incrementando gradualmente a una tasa promedio de 0.3%. Los picos que se aprecian en la gráfica, corresponden a los veranos de cada año (junio, julio y agosto); interpretándose en que se necesitaría más agua en esos meses. Sin embargo, una nueva fuente de 5 m³/s sería suficiente para cubrir al 100% la demanda de agua al menos hasta el año 2040.

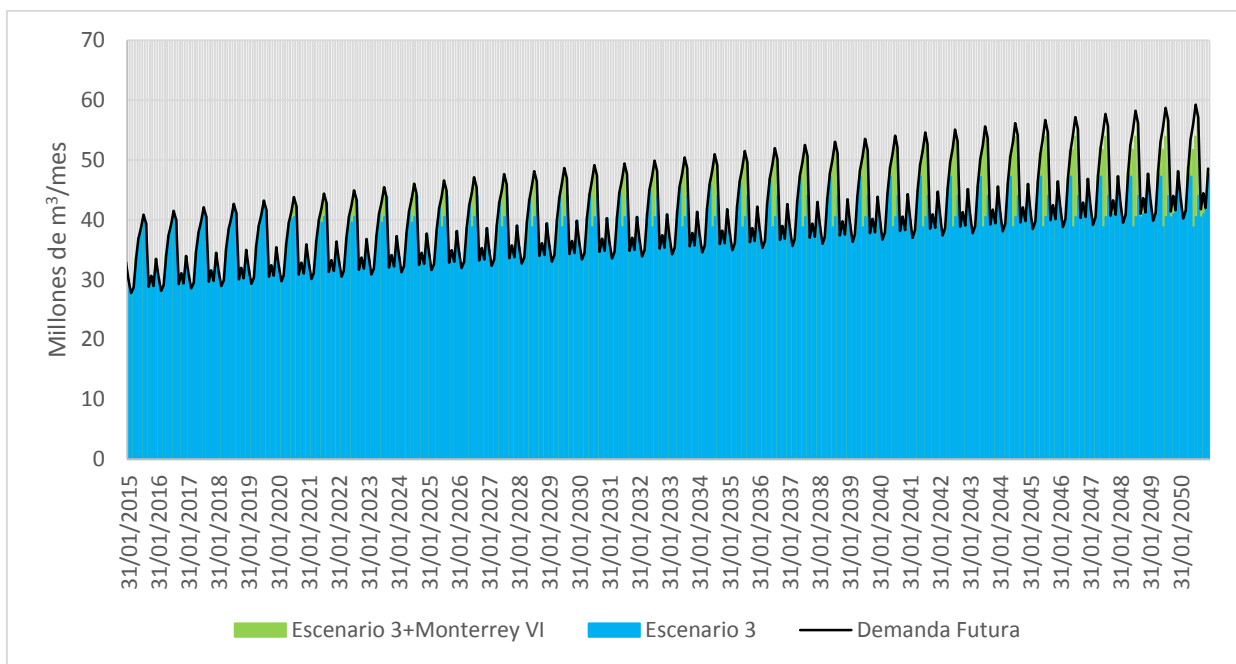


Figura 26. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 3 evaluado con y sin MTY VI.

5.5 Resultados del Escenario 4

En este análisis del escenario 4 (figura 27) se puede apreciar que la confiabilidad del sistema sin el escenario de una nueva fuente (MTY VI) sufriría un déficit del 4% para el año 2020. Posteriormente iría decreciendo gradualmente hasta alcanzar una confiabilidad del 82% para el año 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), la confiabilidad del sistema permanecería al 100% hasta el año 2043; a partir de este año la confiabilidad decrecería gradualmente hasta alcanzar un 96% para el año 2050. Se aprecia una menor confiabilidad del sistema relativamente al escenario 3, pues las extracciones de los acuíferos fueron limitados a solo su recarga natural en este escenario.

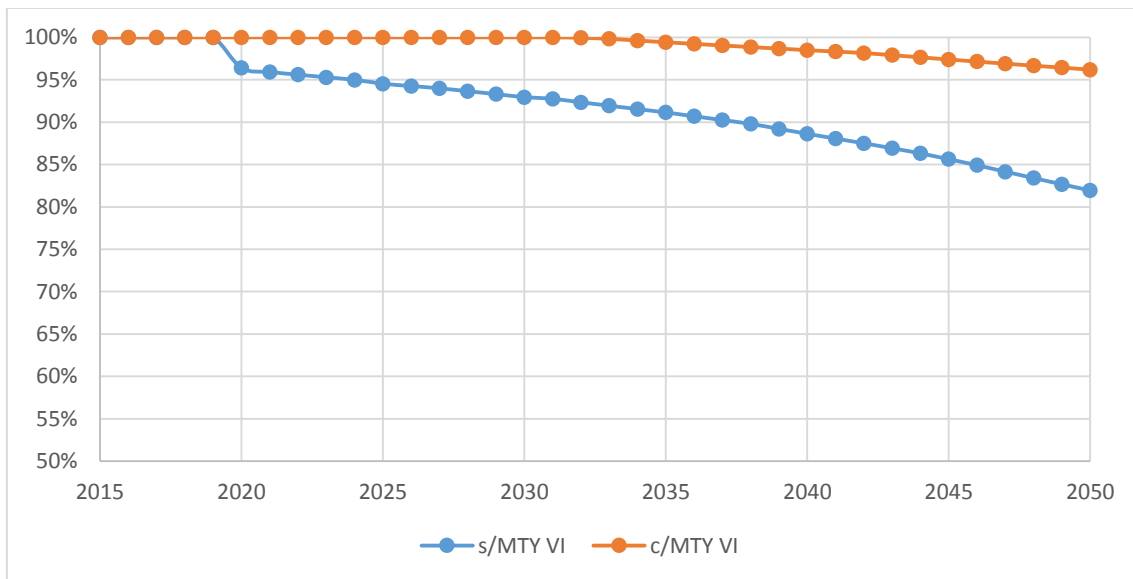


Figura 27. Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.

De no incorporarse una nueva fuente (MTY VI), existiría un déficit con un incremento anual promedio de 90 litros por segundo (3 Mm³/año). Este comenzaría con 15 Mm³ en el año 2020 hasta alcanzar gradualmente la cantidad de 104 Mm³ en el año 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), la máxima cantidad de agua que se necesitaría sería de 22 Mm³ para el año 2050 (ver figura 28).

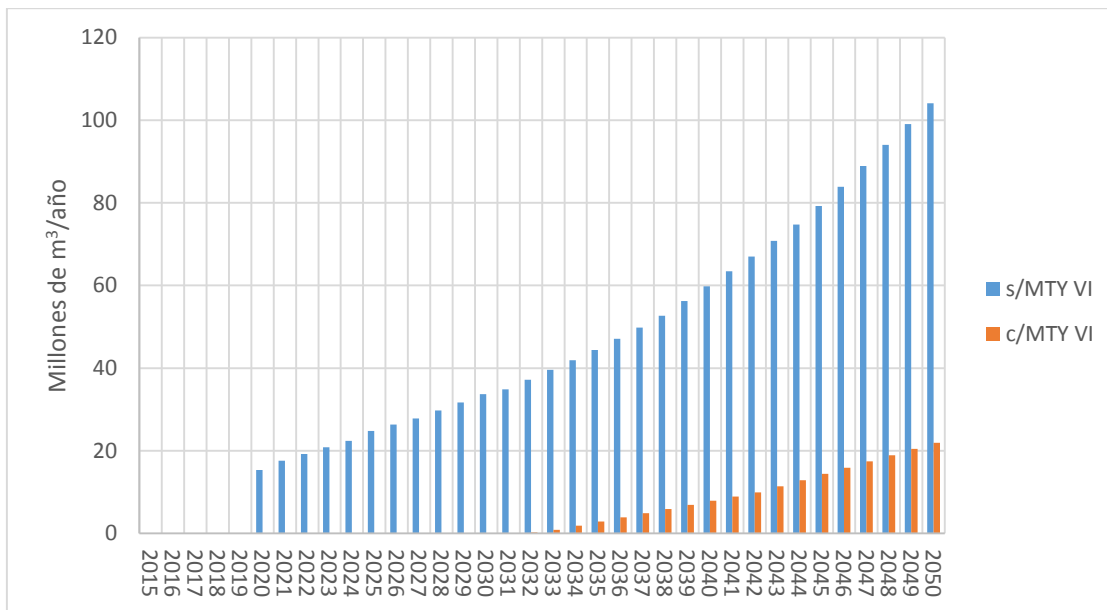


Figura 28. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm3) para el Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 29 se hace una comparación de los volúmenes de la oferta con la demanda de agua en el AMM para el escenario 4 en futuros años. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario de una nueva fuente (MTY VI). Se puede apreciar que a partir del año 2020 existiría un déficit de agua de 15 Mm³/año, incrementando gradualmente a una tasa promedio de 1%. Los picos que se aprecian en la gráfica, corresponden a los veranos de cada año (junio, julio y agosto); esto quiere decir que se necesitaría más agua en esos meses. Una nueva fuente de 5 m³/s, sería suficiente para cubrir al 100% la demanda de agua al menos hasta el año 2034.

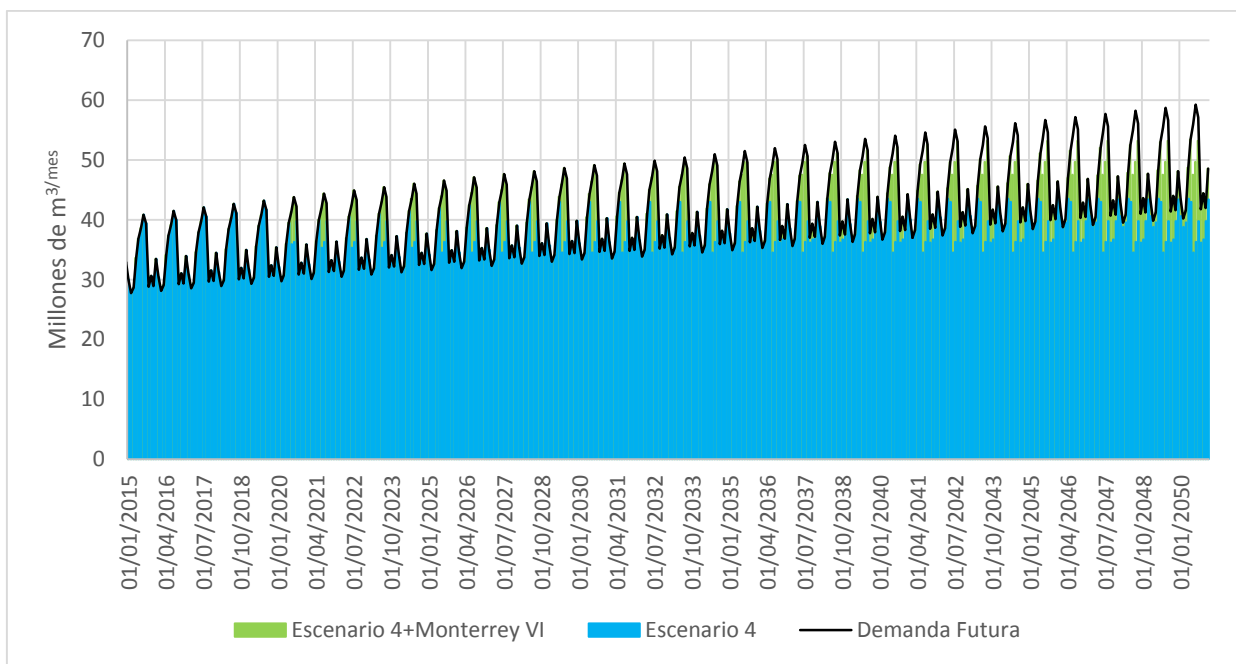


Figura 29. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para Escenario 4 evaluado con y sin MTY VI.

5.6 Resultados del Escenario 5

En el análisis de confiabilidad (ver figura 30) se puede apreciar que el sistema sin el escenario de una nueva fuente (MTY VI) decrecería gradualmente a partir del año 2031, hasta alcanzar una confiabilidad del 95% para el año 2050. Esto sucede porque se redujo la dotación de agua per cápita de 236 litros por habitante por día a 199 litros por habitante por día (16%), lo que genera que la demanda se vea reducida. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), el sistema tendría una confiabilidad del 100 % al menos hasta el año 2050.

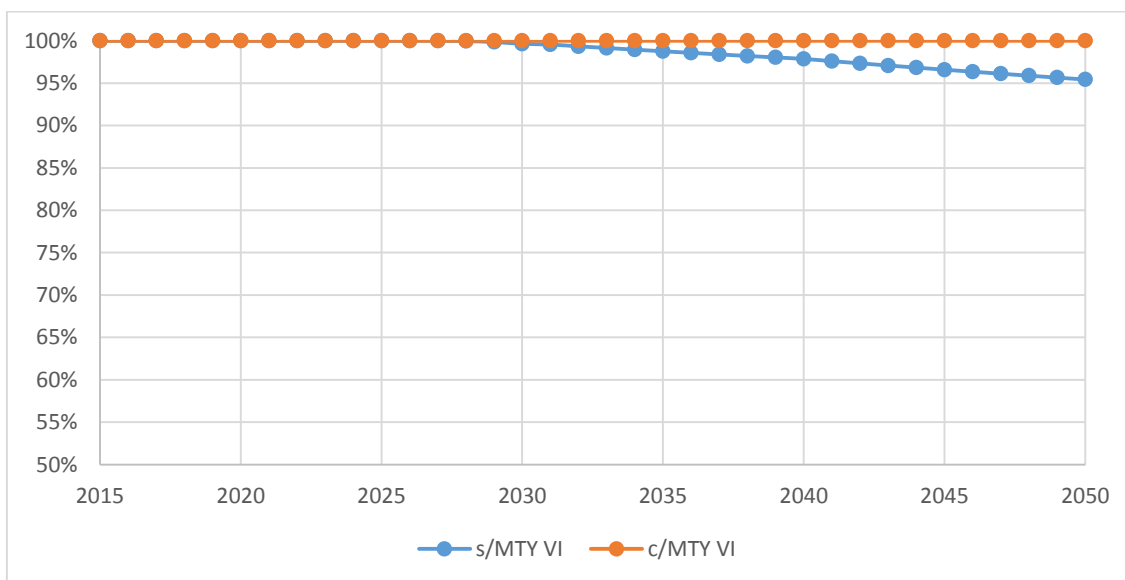


Figura 30. Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.

El volumen de agua que se necesitaría en un futuro si no se llegara a incorporar una nueva fuente (MTY VI), tendría un incremento anual promedio de 20 litros por segundo (0.6 Mm³/año). Esta empezaría con 0.15 Mm³ en el año 2028 hasta alcanzar gradualmente la cantidad de 22 Mm³ en el año 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI) se abastecería al 100% la demanda de agua potable en el AMM (ver figura 31).

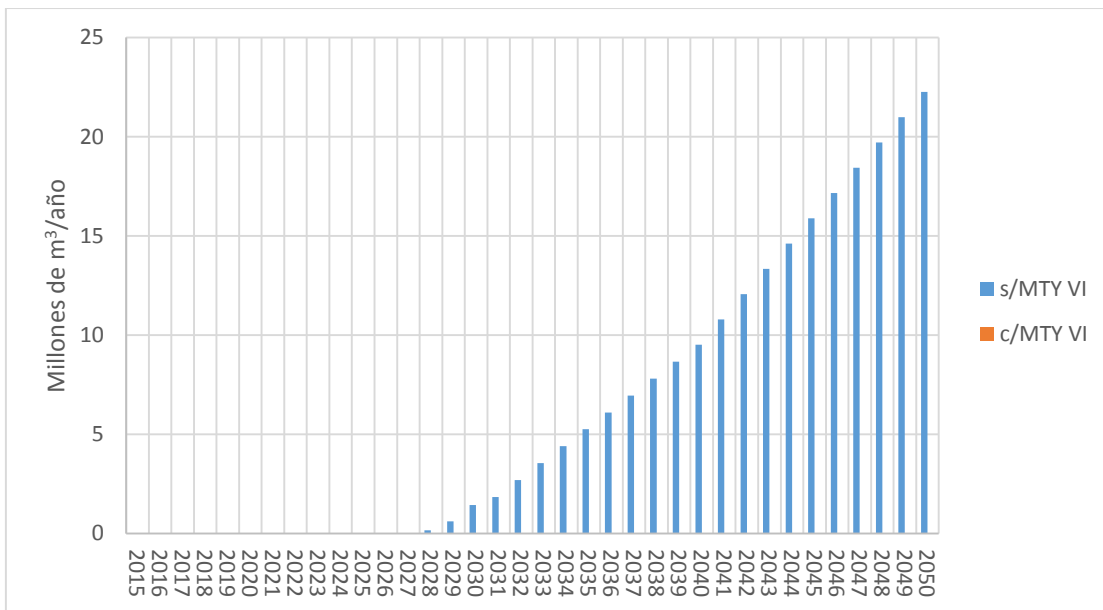


Figura 31. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm³) para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 32 se hace una comparación de los volúmenes de la oferta con la demanda de agua en el AMM para el escenario 5 en futuros años. Aunado a que se compara la oferta de agua junto con el escenario de una nueva fuente (MTY VI). Se puede apreciar que a partir del año 2028 existiría un pequeño déficit de agua que iría incrementando gradualmente a una tasa promedio de 0.13%. Los picos que se aprecian en la gráfica, corresponden a los veranos de cada año (junio, julio y agosto); interpretándose en que se necesitaría más agua en esos meses. Sin embargo, con una nueva fuente de 5 m³/s se daría abasto para cubrir al 100% la demanda de agua hasta el año 2050.

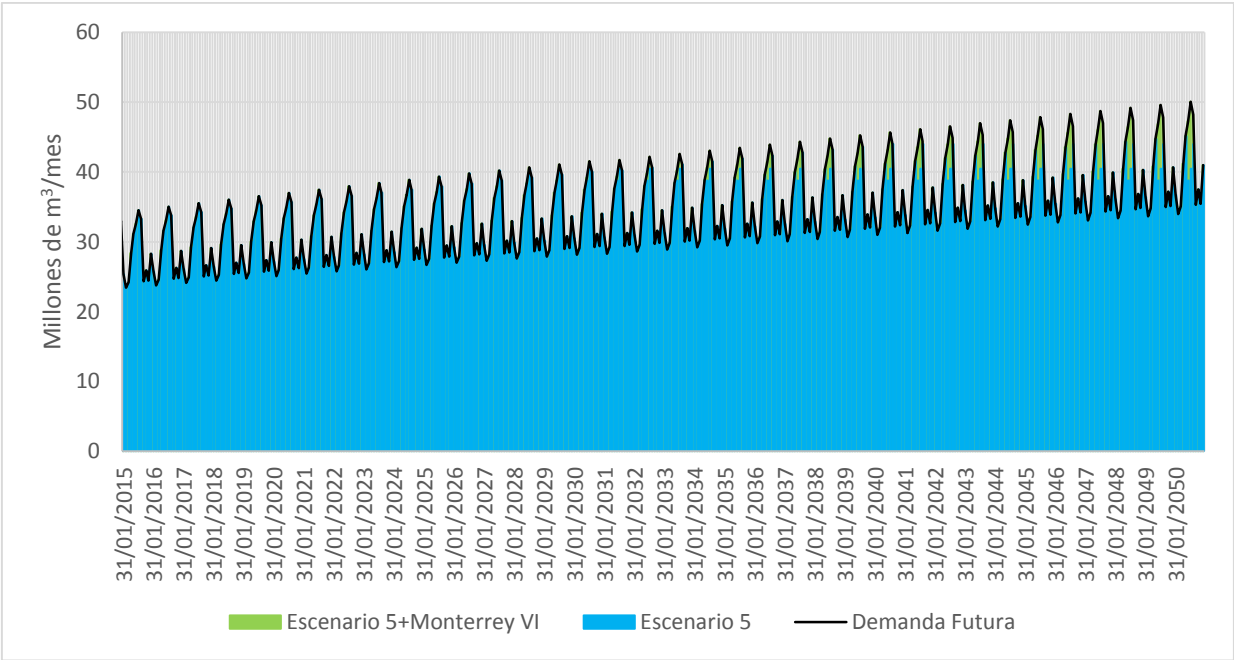


Figura 32. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 5 evaluado con y sin MTY VI.

5.7 Resultados del Escenario 6

En el análisis de confiabilidad (ver figura 33), se puede apreciar que la confiabilidad del sistema sin el escenario de una nueva fuente (MTY VI) decrecería gradualmente a partir del año 2021, hasta alcanzar una confiabilidad del 92% para el año 2050. Esto sucede porque se redujo la dotación de agua per cápita de 236 litros por habitante por día a 199 litros por habitante por día (16%) y porque se limitó la extracción de agua de los acuíferos a solo su recarga natural. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI), el sistema soportaría el 100% de confiabilidad hasta el año 2050, aunado a que se manejarían sosteniblemente las fuentes de agua subterránea.

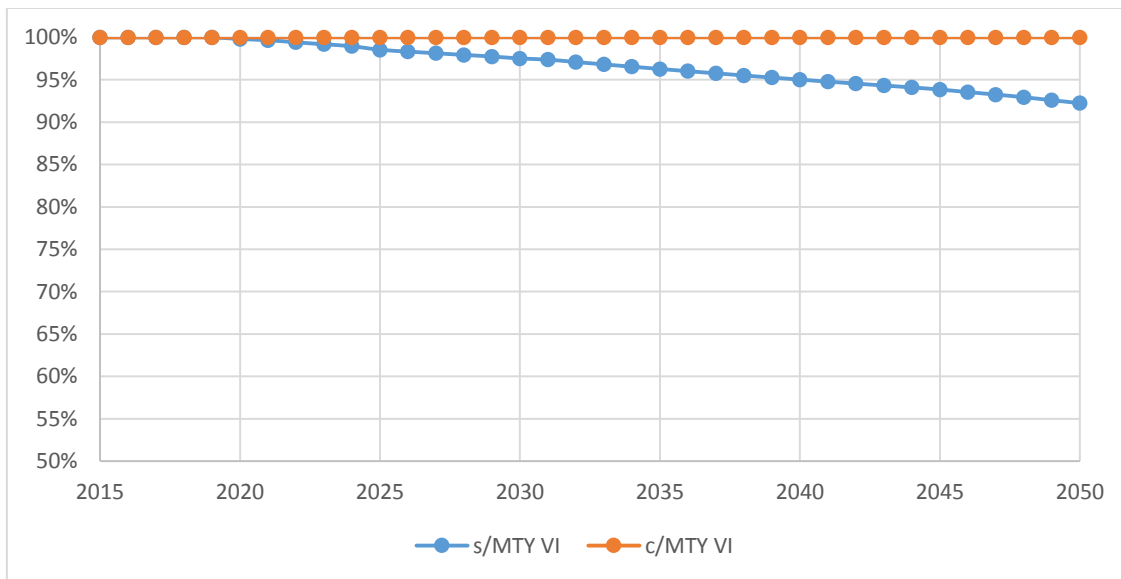


Figura 33. Análisis de confiabilidad del sistema para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.

El volumen de agua que se necesitaría para el futuro del escenario 6, tendría un incremento anual promedio de 30 litros por segundo (1 Mm³/año) si no se llegara a incorporar una nueva fuente de agua. Esta empezaría con 0.7 Mm³ en el año 2020 hasta alcanzar gradualmente la cantidad de 38 Mm³ para el año 2050. Al implementar una nueva fuente de 5 m³/s (MTY VI) se abastecería al 100% la demanda de agua potable en el AMM (ver figura 34).

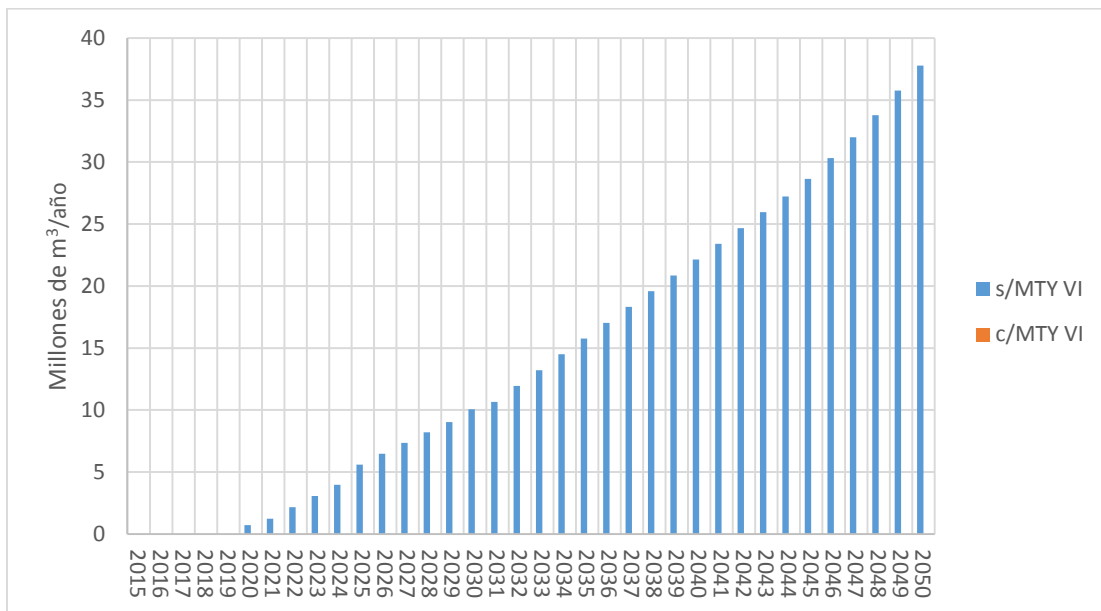


Figura 34. Volúmenes de agua que se necesitarían anualmente en futuros años (Mm³) para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.

En la figura 35 se puede apreciar que a partir del año 2020 existiría un pequeño déficit de agua que iría incrementando gradualmente a una tasa promedio de 0.22%. Los picos que se aprecian en la gráfica, corresponden a los veranos de cada año (junio, julio y agosto); esto quiere decir que se necesitaría más agua en esos meses. Sin embargo, con una nueva fuente de 5 m³/s se daría abasto para cubrir al 100% la demanda de agua hasta el año 2050.

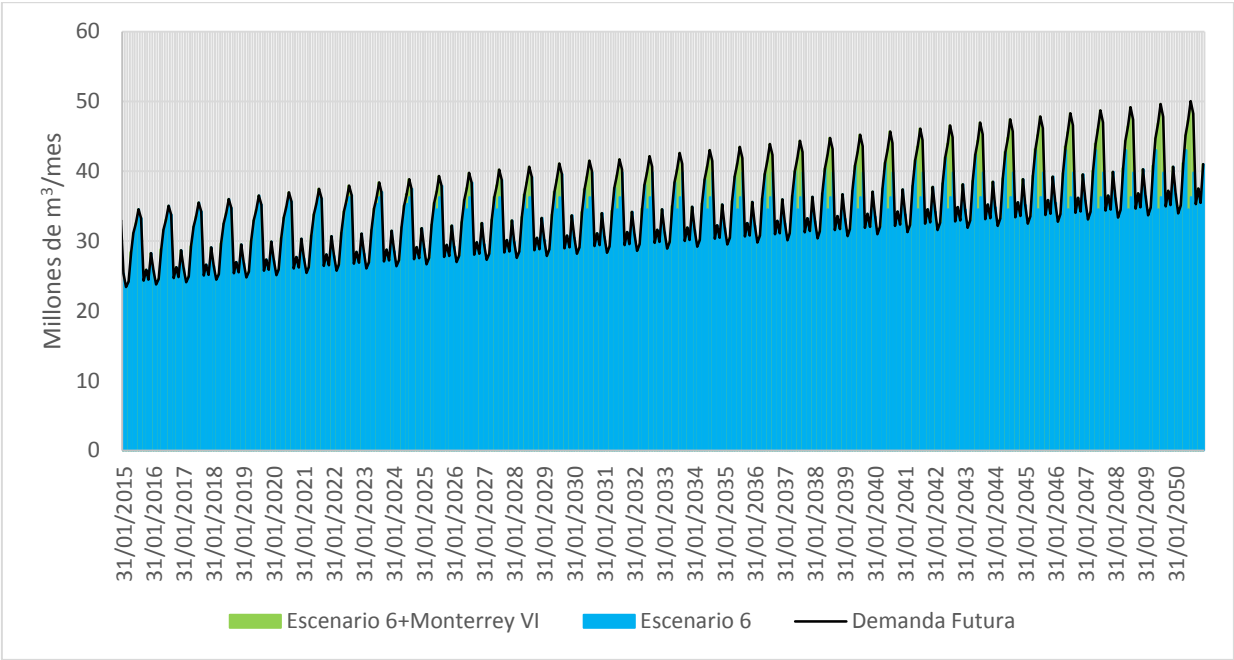


Figura 35. Volúmenes de oferta y demanda en el AMM para el Escenario 6 evaluado con y sin MTY VI.

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación realizada ofrecen una base para la discusión de posibilidades en el manejo de la demanda y del sistema de abastecimiento del Área Metropolitana de Monterrey, es decir, se deben considerar como aproximaciones a una situación que podría experimentar la ciudad en futuros años.

Los resultados también pueden ser utilizados para analizar la gestión de los recursos hídricos de la región y que los tomadores de decisiones tengan información más tangible para que puedan hacer una mejor planificación y poder decidir más asertivamente. Los principales hallazgos en los escenarios simulados son los siguientes:

- La demanda de agua en el Área Metropolitana de Monterrey se incrementa debido al crecimiento poblacional. Sin embargo es posible reducir la demanda de la ciudad si se toman medidas de control sobre la dotación de agua per cápita.
- Si no se incorpora una nueva fuente de agua, existiría un déficit de agua a más tardar en el año 2020 de acuerdo con los escenarios de la hidrología media.
- Si no se incorpora una nueva fuente de agua, existiría un déficit de agua a más tardar en el año 2017 de acuerdo con los escenarios de la hidrología histórica.
- Es imprescindible una nueva fuente de al menos 5 m³/s incluso implementando un manejo sostenible de los recursos hídricos en la región para años posteriores al 2025.
- El escenario 6 es el más deseable, pues en él se implementan algunas acciones de manejo sostenible de los recursos hídricos con los escenarios 4 y 5.

- De no implementar un manejo sostenible de los recursos hídricos y/o de presentarse una sequía, incluso una nueva fuente de 5 m³/s no será suficiente para abastecer al 100% la demanda.

Es importante señalar que el modelo fue creado con algunas suposiciones por la falta de información, por lo tanto se deben considerar estas limitantes para entender cuáles podrían ser las implicaciones de estas en un escenario real. Además se recomienda abordar estas limitantes y seguir realizando estudios y modelos más precisos para tomar mejores decisiones. Las limitaciones son:

- No se hace una desagregación del agua tratada entre los usuarios industriales, los del público urbano y los agricultores, por lo tanto no se tiene la información de que cantidad de agua se reparte entre estos tres usuarios.
- No se modelaron escenarios con la variable de cambio climático, por lo tanto la oferta de agua podría verse afectada en un futuro para todos los escenarios realizados en este estudio.
- No se conoce la capacidad de almacenamiento de los tres sistemas de agua subterránea, por lo tanto no se puede saber con precisión en qué año se podrían agotar estas fuentes.
- No se consideraron fugas en este modelo, por lo tanto la oferta de agua podría verse disminuida en un escenario real.
- De querer reducirse la demanda de agua, se debe estar consciente que la disminución va a ocurrir gradualmente y podría tardar años en llegar a la dotación per cápita deseada.

- Ambos escenarios de la hidrología histórica e hidrología media son improbables. Sin embargo, los escenarios con la hidrología histórica consideran eventos extraordinarios (sequías e inundaciones), variables que siempre existirán en la realidad. Por otro lado, la hidrología media no considera estas variables.

CAPÍTULO 7: RECOMENDACIONES

Se ha argumentado que no solo se debería enfocar en el aumento de la oferta de agua mediante nueva infraestructura y tecnología, también se debería reducir la demanda de agua (Christian-Smith et al., 2011). Por lo tanto, el escenario 6 sería la mejor opción para lograr y aplicar la idea antes mencionada.

Se investigó sobre mejores prácticas para cambiar los hábitos de uso del agua y reducir la dotación de agua per cápita, para de esta forma poder implementarlas. Disminuir la demanda de agua y lograr un manejo más sostenible sobre los recursos hídricos de la región.

La compra de accesorios para preservar el agua como los WC eficientes, es muy útil para disminuir el consumo de agua per cápita. Sin embargo, son algunas de las acciones que menos se implementan. Esto sucede porque las personas creen que en la ducha se consume más agua por el tiempo que implica hacerlo, y esto hace que las descargas de agua en los WC parezcan insignificantes y no se utilicen accesorios más eficientes (Attari, 2014).

Además, de acuerdo con la organización Seattle Public Utilities (2015), las siguientes son las mejores prácticas que pueden aplicarse en casa para disminuir la dotación de agua per cápita, lo que ayudaría para pasar de 235 litros por habitante por día a 199 litros por habitante por día:

- Limitar el riego de las plantas a dos veces por semana
- Reducir el tiempo de ducharse
- Revisar y arreglar fugas en el hogar
- Lavar cargas completas de ropa y platos

- Cerrar el grifo mientras se cepilla los dientes o se afeita
- En la compra de accesorios o equipos, elegir los modelos ahorradores de agua

También existen otras formas de ahorrar agua al aire libre:

- Minimizar el relleno de piscinas y jacuzzis
- Añadir una capa de 2 pulgadas de abono a las camas de siembra y alrededor de los árboles
- Optimizar los sistemas de riego automático
- Nunca dejar una manguera funcionando cuando no se use
- Lavar el vehículo en lugares que cuenten con agua reciclada
- Utilizar una escoba en lugar de una manguera para limpiar las aceras, calzadas y patios
- Utilizar cubiertas en piscinas y jacuzzis cuando no estén en uso

The Nature Conservancy (2015) concluyó en uno de sus estudios que una de las soluciones para hacer frente al problema del déficit de agua en el AMM en futuros años, es mediante nuevas prácticas para que los distritos de riego que se encuentran alrededor de la ciudad no utilicen tanta agua. Por lo tanto, se mencionan tres estrategias que la EPA (2012) recomienda para minimizar el uso de agua en la agricultura:

- Las prácticas de campo son técnicas que mantienen el agua en el campo, distribuyen el agua de manera más eficiente a través del campo, o fomentan la retención de humedad del suelo. Ejemplos de estas prácticas incluyen el cincelado de los suelos muy compactados, diques en surcos para evitar la escorrentía, y la nivelación del

terreno para distribuir el agua de manera más uniforme. Típicamente, las prácticas de campo no son muy costosas.

- Las estrategias de manejo del suelo implican el seguimiento y las condiciones del agua y la recopilación de información sobre el uso y la eficiencia del agua. La información ayuda en la toma de decisiones sobre la programación de aplicaciones o la mejora de la eficiencia del sistema de riego. Los métodos incluyen la medición de las precipitaciones, la determinación de la humedad del suelo, comprobando eficiencia de la planta de bombeo, y la programación de riego.
- Las modificaciones del sistema requieren hacer cambios en un sistema de riego existente o la sustitución de un sistema existente por uno nuevo. Debido a las modificaciones del sistema requieren la compra de equipos, por lo general son más caros que las prácticas de campo y las estrategias de gestión. Las modificaciones típicas del sistema incluyen la adición de tubos de caída a un sistema de pivote central, instalación de un pozo con una bomba más pequeña, la instalación de riego por oleada, o la construcción de un sistema de recuperación de aguas abajo.

Por otro lado, se recomienda hacer una evaluación de la presa El Cuchillo-Solidaridad para estimar si se podrían aumentar las concesiones de agua al AMM sin comprometer a sus actuales usuarios cuenca abajo.

Se recomienda usar métodos geofísicos para hacer nuevos estudios en la región y de esta forma obtener información más precisa sobre los acuíferos y encontrar nuevas fuentes de agua subterránea.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Barajas, I., Sisto, N., & Ramirez Orozco, A. (2015). *Agua para Monterrey. Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México*. Monterrey. Editorial APP:
- Aitken, A. (1973). *Assesing systematic errors in rainfall-runoff models*. *Journal of Hidrology*, 121-136.
- ANEAS. (2002). *Agua y Saneamiento*. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036\(342\)497](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036(342)497)
- Andreu, J., Capilla, J. and Sanchis, E. (1996), *AQUATOOL A Generalized Decision Support System for Water-Resources Planning and Operational Management*, *Journal of Hydrology* 177, pp. 269 - 291.
- Aranda, R., Zamarripa, R., Rojas, L., Navarro, G., y Navar, J. (1998). *Ordenamiento Hidrológico de la Cuenca del Río San Juan*. *USDA Forest Service Proceedings*, 139–147.
- Armenta, H. (2014). *FORBES*. Retrieved from www.forbes.com.mx: <http://www.forbes.com.mx/acueducto-monterrey-vi-mitos-y-realidades/>
- Attari, S. Z. (2014). *Perceptions of water use*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(14), 5129–5134. <http://doi.org/10.1073/pnas.1316402111>
- Bedolla Ruiz, K. (2009). *Población por cuenca y zona funcional*. INE.
- Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems (2014). *Technical Documentation Version 6.5 of RiverWare Objects*. The University of Colorado.
- Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems (2014). *RiverWare Technical Documentation: Simulation*. The University of Colorado.
- Cedillo, L. (2012). *Evaluación de las fuentes abastecimiento de agua para la Zona Metropolitana de Monterrey*. Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey.
- Christian-Smith J, Gleick PH, Cooley H (2011) *U.S. water policy reform*. *The World's Water Volume 7: The Biennial Report on Freshwater Resources*, ed Gleick P (Island Press, Washington), Chap 7.
- CONAGUA. (1996). *Acuerdo de Coordinación. Reglamento para la Extracción y Utilización de las Aguas del Sistema Hidráulico del Río San Juan*. Monterrey, N.L.
- CONAGUA y SADM. (2011). *Reunión Nacional de Organismos Operadores. Acueducto Tampaón-Cerro Prieto "Monterrey VI"*. (p. 17). Puebla.
- CONAPO.(2012). *México en cifras. Proyecciones de la población de México 2005-2050*. México,D.F.: Consejo Nacional de Población

- Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. (2002). *Análisis integral de los recursos hidráulicos en la cuenca del río Pánuco. Uso público en comunidades urbanas y rurales* (p. 21). Veracruz.
- Danner, C., Mckinney, D. C., Teasley, R. L., & Sandoval-Solis, S. (2009). *Documentation and Testing of the WEAP Model for the Rio Grande/Bravo Basin*, (August 2006).
- EPA. (2012, Marzo 06). *United States Environmental Protection Agency*. Retrieved from <http://water.epa.gov/polwaste/nps/chap3.cfm>
- Esparza, L., Valdés, C., Cantú, P., & De la Mora, G. (2014). *Historia de las crisis del agua en el área metropolitana de Monterrey (AMM)*. CIENCIA UANL.
- Gastélum, J. R., & Cullom, C. (2013). *Application of the Colorado River Simulation System Model to Evaluate Water Shortage Conditions in the Central Arizona Project*. *Water Resources Management*, 27(7), 2369–2389. doi:10.1007/s11269-013-0292-5
- H. De Leon-Gomez, D. Masuch-Oesterreich, F. Medina-Barrera & F. Hellweg (1998): *Investigaciones hidrogeológicas en el cañón de la Huasteca como contribución al abastecimiento de agua potable de Monterrey, Nuevo León, NE- México*. *GEOGACETA*, 23., Pags. 87-90.
- IBWC. (2015). *International Boundary and Water Commission*. Retrieved from http://www.ibwc.state.gov/water_data/Reports/RG_Flow_data.html
- Jamieson, D.G. and Fedra, K (1996), *The 'WaterWare' Decision-support System for River-basin Planning*. 1. *Conceptual Design*, *Journal of Hydrology* 177, pp. 163-175.
- Ejet, M. Z. (2000). *Optimal integrated water resources planning in watersheds with limited water resources*. *Spectral Atlas of Polycyclic Aromatic Compounds*. Arizona State University.
- Martin, W., & Kulakowski, S. (1991). *Water Price as a Policy Variable in Managing Urban Water Use: Tucson, Arizona*. *Water Resources Research*, 157-166.
- Mccabe, G. J., & Legates, D. R. (1999). *Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models*.
- Návar, J. (2001). *Water supply and demand scenarios in the San Juan watershed*, 1, 121–134.
- Návar, J. (2010). *Water Scarcity and Degradation in the Rio San Juan Watershed of Northeastern Mexico*. *Frontera Norte*, 23, 125–150.
- Ortega-Gaucin, D. (2013). *Impacto de las sequías en Nuevo León*. *CIENCIA UANL*, (63), 8–14.
- Reitsma, R. F., et al. (1996), *Decision Support Systems (DSS) for Water Resources Management*, *Water Resources Handbook*, L. W. Mays (editor-in-chief), McGraw- Hill, Inc., New York.

- Roldán, U. E. T. (2014). *Análisis Regional de Frecuencias de Sequías en el Norte de México*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Sandoval-Solis, S. (2005). *Modelo de disponibilidad de agua superficial(WAM) en la cuenca del Río San Juan*. University of Texas at Austin.
- Sandoval-Solis, S., & McKinney, D. (2009). *Hydrological feasibility of environmental flows in the Rio Grande/Bravo basin*. *World Environmental and Water Resources Congress*, 4927–4937. Retrieved from [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036\(342\)497](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41036(342)497)
- Seattle Public Utilities. (2015). *Seattle.gov*. Retrieved October 1st, 2015, from http://www.seattle.gov/util/MyServices/Water/Reduce_Water_Use/index.htm
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. (2012). *Resúmen Ejecutivo de la Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional para el proyecto "Monterrey VI."*
- Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. (2014). *Sintesis ejecutiva SADM (p. 119)*. Monterrey.
- SEMARNAT. (2011). *Diario Oficial (p. 30)*. Retrieved from <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/diario-oficial>
- SOP. (1975). *Mapa geológico de México*. Secretaría de Obras Públicas. México, D.F.
- Smith, R. (2011). *Many Objective Analysis to Optimize Pumping and Releases in a Multi-Reservoir Water Supply Network*. University of Colorado.
- Sprague, R.H. and Carlson, E. D. (1982), *Building Effective Decision Support Systems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs: NJ.
- The Nature Conservancy. (2015). *Seguridad Hídrica del Área Metropolitana de Monterrey y la Cuenca del Río Pánuco. Consideraciones para una toma de decisiones informada que incorpore el manejo integral de los recursos hídricos*.
- Valdez, E. C. (1990). *Abastecimiento de agua potable (p. 264)*. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Wehrends, S. C. and Reitsma, R. F. (1995), *A Rule Language to Express Policy in a River Basin Simulator in Computing in Civil Engineering, Proceedings of the Second Congress, Vol. I, pp. 392 - 395, ASCE, June 5-8, Atlanta, GA*.
- Willmott, C. J.(1981). *On the validation of models. Phys. Geogr. 2, 184-194*.
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D. and Huber-Lee, A. (2005). *"WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model Part 1: Model characteristics."* *Water Int.*, 30(4), 487-500.

Zagona, E. A., Fulp, T. J., Shane, R., Magee, T., & Morgan, H. (2001). *Riverware: A Generalized Tool For Complex Reservoir System Modeling*. *Journal Of The American Water Resources Association*, 37(4).

Zagona, E., Fulp, T., Goranflo, H., & Shane, R. (1998). *RiverWare: A general river and reservoir modeling environment*. *Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, 115–120. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>

Zoltay, V. (2007). *Integrated Watershed Management Modeling: Optimal Decision Making for Natural and Human Components*. Tufts University.