



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**POLÍTICAS DE OPERACIÓN CON Y SIN CURVAS GUÍA OPTIMIZADAS DE
LAS PRINCIPALES PRESAS DEL SISTEMA CUTZAMALA. APLICACIÓN DE
PROGRAMACIÓN EVOLUTIVA**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
EDUARDO JUAN DIEGO

TUTORES PRINCIPALES

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, SEPTIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo
Secretario: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo
1 er. Vocal: Dr. Domínguez Mora Ramón
2 do. Vocal: Dr. Mendoza Reséndiz Alejandro
3 er. Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, CAMPUS C.U

TUTOR DE TESIS:

Dr. Ramón Domínguez Mora



FIRMA

Dedicatoria

A la memoria de mi madre, Eva Diego Bautista, gracias por los años de felicidad que me regalaste, por consentirme, por esos recuerdos y enseñanzas que me han formado hasta hoy, por ser mi ejemplo de vida y aunque hoy, ya no te encuentras en este mundo, tu recuerdo seguirá dentro de mi corazón continuando con tu legado, y por ello tu siempre seguirás viviendo.

Agradecimientos

A mi padre, Eduardo Juan, gracias por todo el cariño, amor, por sacarme adelante y enseñarme lo importante de la vida.

A mis hermanos, por estar siempre conmigo en todos los momentos, por alentarme a seguir adelante y siempre cuidarme, por su apoyo y cariño incondicional, Fernando, Edgar y Marlen Juan Diego.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su tiempo, por sus enseñanzas, atenciones brindadas para la elaboración de esta tesis, por la oportunidad de colaborar con él y aprender de su vasta experiencia.

Al M. en I. Eliseo Carrizosa Elizondo, por su tiempo y ayuda en momentos difíciles de mi vida, por transmitirme su conocimiento y experiencia, que han sido de gran importancia en mi crecimiento personal y profesional, gracias.

A la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, por su apoyo, dedicación, tiempo, que hicieron posible esta tesis. Además, gracias por la oportunidad de colaborar con ella y así seguir creciendo profesionalmente.

Al Dr. Alejandro Reséndiz Mendoza, al Dr. Rafael Carmona Paredes y al Dr. Oscar Fuentes Mariles por su apoyo y revisión de esta tesis.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería, Guillermo Ramirez, Mario Ponce, Olaf Santana, Magaly Fragoso, Roberto Vázquez, Adam Hernández, Guadalupe González, Carolina Quiroz, Juan Juárez, Silvia González, Patricia Labrada y Mauricio Becerril, a ustedes por convertirse en familia y extenderme la mano en vivencias buenas y malas, gracias por todo su apoyo.

A Enrique Palacios, por ser un gran amigo, por su apoyo moral y por sus sabios consejos que sin duda han atribuido a mi persona.

A mis tíos Angela Juan y Emilio Santiago, prima Evelyn y a la nueva integrante Citlalli por su cariño y apoyo incondicional.

A mi tía Hortensia Diego, primos Bianca, Francisco y mis sobrinos Josue, Miguel por su apoyo y cariño.

A la familia Cortes Reyes, por la confianza, apoyo y amistad brindada hacia mi persona, pero en especial a Erika Cortes Reyes por compartir vivencias que sin duda marcaron nuestros corazones.

A Mariana González, por su confianza, amistad y por compartir el mismo significado de vida.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme cursar y concluir mis estudios de maestría para alcanzar una meta más en mi vida.

Al CONACYT, por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un algoritmo genético capaz de establecer políticas de operación óptimas para las extracciones mensuales de los tres embalses principales del Sistema Cutzamala, que abastecen de agua potable a la zona metropolitana de la Ciudad de México. El algoritmo genético aplicado a la simulación de la operación de los embalses fue alimentado con los últimos 20 años de datos hidrológicos sobre las entradas de agua a los tres embalses principales, incluyendo las aportaciones netas de cinco presas derivadoras. Además de los flujos de entrada, se tuvo en cuenta la demanda de agua potable, la capacidad de suministro de agua a través del sistema y los límites mínimo y máximo del volumen de almacenamiento de los embalses. La función objetivo buscaba maximizar la entrega de agua a la planta de tratamiento, al tiempo que penalizaba los posibles vertidos y déficits en el sistema. Por ello, la extracción mensual de agua se ajustaba si el nivel de agua caía fuera de los límites superior o inferior de las curvas guía de cada embalse. A partir del almacenamiento total de agua en los embalses el 1 de noviembre, se optimizó la extracción anual de agua con el algoritmo genético y se definió con una curva Z. El algoritmo genético asignó a cada embalse un porcentaje de la extracción total anual y determinó el nivel de almacenamiento mensual de cada embalse. Se establecieron los parámetros de las ecuaciones lineales para modificar el volumen de extracción en función de la diferencia entre el nivel de almacenamiento al principio de cada mes y los límites fijados por las curvas guía. De este modo, el algoritmo genético proporciona las decisiones de funcionamiento mensuales necesarias para cada embalse.

Abstract

The objective of the present study was to develop a genetic algorithm capable of establishing optimal operating policies for monthly extractions from the three main reservoirs of the Cutzamala System, which supply drinking water to the Mexico City metropolitan area. The genetic algorithm applied to the simulation of reservoir operation was fed with the last 20 years of hydrological data on the inflow of water to the three main reservoirs, including the net contributions of five diversion dams. Besides inflow, consideration was given to the demand for drinking water, the capacity of water delivery through the system, and minimum and maximum limits on reservoir storage volume. The objective function sought to maximize water delivery to the treatment plant, while penalizing possible spills and deficits in the system. Hence, monthly water extraction was adjusted if the water level fell outside the upper or lower limits of the guide curves for each reservoir. Based on total water storage in the reservoirs on November 1st, annual water extraction was optimized with the genetic algorithm and defined with a Z curve. The genetic algorithm assigned a percentage of total annual extraction to each dam and determined the monthly storage level for each reservoir. Parameters were established for linear equations to modify the extraction volume as a function of the difference between the storage level at the beginning of each month and the limits set by the guide curves. Hence, the required monthly operating decisions for each reservoir are furnished by the genetic algorithm.

Índice

1.	Introducción.....	14
1.1.	El agua en el mundo y su disponibilidad	15
1.2.	Balance hidrológico de la cuenca del Valle de México.....	15
1.3.	Delimitación de la Cuenca del Valle de México.....	17
1.4.	Sistema Cutzamala	18
1.4.1.	Antecedentes.....	18
1.4.1.1.	Primera etapa.....	19
1.4.1.2.	Segunda etapa	19
1.4.1.3.	Tercera etapa	19
1.5.	Planteamiento del Problema, Justificación y Alcances.....	24
1.6.	Objetivo general.	25
1.6.1.	Objetivos específicos.	25
2.	Estado del Arte.....	26
2.1.	Política de Operación	26
2.1.1.	Función Objetivo.....	27
2.1.2.	Estudios realizados de políticas de operación en el extranjero.....	27
2.1.3.	Estudios realizados en México.	27
3.	Descripción de las principales presas del Sistema Cutzamala	29
3.1.	Presa Valle de Bravo.....	29
3.2.	Presa Villa Victoria	29
3.3.	Presa El Bosque.....	29
3.4.	Funcionamiento del sistema Cutzamala.....	31
3.5.	Recopilación y análisis de la información	32
3.5.1.	Presas derivadoras.....	32
3.5.2.	Verificación 1	33
3.5.3.	Verificación 2.....	35
3.6.	Ingresos diarios a las presas de almacenamiento.....	36
3.7.	Resultados del análisis de datos	36
3.7.1.	Aportaciones netas de las derivadoras.....	36
3.7.2.	Aportaciones por cuenca propia de las derivadoras Chilesdo más El Barraje	38
3.8.	Ingresos a las presas de almacenamiento	39
3.9.	Datos generales considerados en la simulación	42
4.	Metodología	45
4.1.	Métodos de optimización.....	45
4.1.1.	El problema de programación dinámica	45

4.1.1.1. Ecuación de transformación de estados.....	46
4.1.1.2. Función de costo	46
4.1.1.3. Políticas de selección	48
4.1.1.4. El problema básico	48
4.2. Algoritmo de programación dinámica	49
4.2.1. Principio de optimalidad	49
4.3. Algoritmos evolutivos.....	50
4.3.1. Antecedentes de algoritmos genéticos.....	50
4.3.2. Conceptos básicos	51
4.3.3. Funcionamiento de los algoritmos genéticos.....	52
4.3.3.1. ¿Cómo funcionan los algoritmos genéticos?.....	52
4.3.3.2. Población inicial.....	53
4.3.3.3. Condiciones de terminación en un AG	53
4.3.3.4. Codificación	53
4.4. Operadores genéticos	54
4.4.1. Función objetivo o aptitud.....	54
4.5. Selección.....	55
4.5.1. Ruleta.....	55
4.5.2. Torneo	58
4.5.3. Elitismo.....	58
4.5.4. Crossover o Cruza.....	58
4.5.1. Un punto de cruce.	59
4.5.2. En dos puntos de cruce.....	61
4.5.3. Multipunto.....	61
4.6. Mutación.....	61
4.7. Programación dinámica.....	62
4.7.1. Programación dinámica aplicada a la operación de una presa	64
4.8. Curva Z.....	66
4.8.1. Curva guía.....	67
4.9. Volumen de aportación de las presas derivadoras.....	68
4.10. Simulación hidrológica conjunta de las 3 presas principales del sistema Cutzamala (sin curvas guía).	68
4.11. Simulación conjunta de las 3 presas principales del río Cutzamala (considerando curvas guía y restricciones).....	72
4.12. Simulación conjunta de las 3 presas principales del río Cutzamala (considerando curvas guía y limitaciones en la capacidad de conducción)	73
4.13. Algoritmo de simulación con curvas guía, considerando por un lado la aportación de las derivadoras Colorines e Ixtapan del Oro, para restar las entregas requeridas de El Bosque y Valle de Bravo, y por otro	

las correspondientes a Chilesdo y El Barraje, para restarlas a Villa Victoria	75
4.14. Algoritmo de simulación considerando aportaciones negativas en Valle de Bravo	75
4.15. Algoritmo de simulación añadiendo la contabilidad de los volúmenes que superan 180 hm ³ en la presa El Bosque	75
4.16. Nuevas limitaciones para el ajuste del volumen que se obtiene cuando el volumen almacenado en alguna o algunas de las presas sale del rango definido por las curvas guía.....	75
4.17. Programa SIMCUT.FOR	79
4.17.1. Descripción de los archivos de entrada y salida del programa SIMCUT.FOR	80
4.18. Descripción del algoritmo genético aplicado a la optimización de curvas z	82
4.18.1. Generalidades del programa AG.....	82
4.19. Estimación de la curva z optimizada con algoritmo genético y simulación del funcionamiento de vaso de las tres presas principales del sistema con aportaciones de las presas derivadoras y sin curvas guía (algoritmo del apartado 4.10).	85
4.20. Estimación de la curva z de extracciones optimizada con algoritmo genético combinando la simulación del funcionamiento de vaso de las tres presas principales del sistema con aportaciones de las presas derivadoras y con curvas guía (aplicables a los algoritmos de simulación de los apartados 4.10 a 4.16).	88
4.21. Algoritmo genético con modificaciones para optimizar la curva z de extracciones, los porcentajes de asignación anual para las 3 presas y los parámetros de ajuste a la extracción debido a las curvas guía. ..	88
4.22. Algoritmo genético del apartado 4.21 modificando la función objetivo.....	89
5. Aplicación y resultados	91
5.1. Obtención de políticas de extracción total anual de las presas de regulación en función del almacenamiento el 1° de noviembre.....	91
5.1.1. Introducción.....	91
5.2. Política AG1. Análisis de la extracción de las 3 presas y la distribución porcentual correspondiente a cada una, suponiendo una extracción mensual uniforme en los 12 meses del año.....	91
5.3. Política AG2. Anexa curvas guías propuestas y optimiza ecuaciones de ajuste.....	93
5.4. Política AG3. Optimización de los valores correspondientes a las curvas guía alta y baja	94
5.5. Política AG4. Analiza la sensibilidad de los coeficientes de penalización y considera la posibilidad de que las extracciones netas en Valle de Bravo sean negativas.....	96
5.6. Política AG5. Penaliza almacenamientos altos en la presa El Bosque.	102
5.7. Política AG6. Analiza el NAMINO original de Valle de Bravo y los almacenamientos iniciales al NAMO.	104
5.8. Política AG7. Analiza el NAMINO de Valle de Bravo modificado y Vol. inicial al NAMO).....	113
5.9. Simulaciones de políticas óptimas con elevación inicial histórica al 1° de Noviembre.	121
5.9.1. Política AG8. Simulación con la política AG6 y considerando los volúmenes iniciales históricos del 1 noviembre de 1999.....	122
5.9.2. Política AG9. Simulación con la política AG7 y considerando los volúmenes iniciales históricos del 1 noviembre de 1999.....	125
5.10. Resumen de resultados	130
6. Conclusiones y Recomendaciones	136

7.	Referencias	139
8.	Anexo A. Simulación con curva Z de la política AG1	141
9.	Anexo B. Simulación con curva Z de la política AG4	156
10.	Anexo C. Simulación con curva Z de la política AG6	171
11.	Anexo D. Simulación con curva Z de la política AG7	186

Índice de tablas

Tabla 1.1. Volúmenes y caudales suministrados por el Sistema Cutzamala, serie anual (1991 - 2018).....	20
Tabla 1.2. Características de componentes del Sistema Cutzamala (Fuente CONAGUA)	23
Tabla 1.3. Longitud de conducción en las estructuras del Sistema Cutzamala (Fuente CONAGUA)	23
Tabla 3.1. Almacenamiento de las presas del Sistema Cutzamala (Fuente: CONAGUA)	30
Tabla 3.2. Niveles y capacidades presas principales del Sistema Cutzamala (Acuña,2014)	42
Tabla 3.3. Lámina de evaporación mensual neta, en mm en las presas principales del Sistema Cutzamala (Acuña,2014)	42
Tabla 3.4. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa El Bosque, (Acuña,2014).....	43
Tabla 3.5. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa Valle de Bravo, (Acuña,2014).....	44
Tabla 3.6. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa Villa Victoria, (Acuña,2014)	44
Tabla 4.1. Resultado de la codificación del problema.....	54
Tabla 4.2. Fitness correspondiente a cada individuo.....	54
Tabla 4.3. Probabilidad de selección a cada individuo	56
Tabla 4.4. Probabilidad de selección a cada individuo	56
Tabla 4.5. Número de selecciones y nueva posición de los individuos (método de la ruleta)	57
Tabla 4.6. Individuos que forman parte de la nueva generación obtenida mediante la ruleta	57
Tabla 4.7. Individuos que forman parte de la nueva generación obtenida mediante la ruleta	62
Tabla 4.8. Curva Z con almacenamientos y extracciones históricos en hm ³	66
Tabla 4.9. Coeficientes para cada presa y ecuaciones de ajuste	76
Tabla 5.1. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG1	91
Tabla 5.2. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.	92
Tabla 5.3. Resumen de resultados de la simulación (AG1).....	92
Tabla 5.4. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.	93
Tabla 5.5. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	93
Tabla 5.6. Resumen de resultados de la simulación (AG2).....	94
Tabla 5.7. Curva Z política AG3 con extracciones en hm ³ y en m ³ /s.....	95
Tabla 5.8. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.	95
Tabla 5.9. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	95
Tabla 5.10. Resumen de resultados de la simulación (AG3).....	96
Tabla 5.11. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG4	96
Tabla 5.12. Curva Z política AG4 con extracciones en hm ³ y en m ³ /s.....	97
Tabla 5.13. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.	97
Tabla 5.14. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	97
Tabla 5.15. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG 4. Sistema Cutzamala.....	98
Tabla 5.16. Resumen de resultados de la simulación (AG4).....	99
Tabla 5.17. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG5	102
Tabla 5.18. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.	102
Tabla 5.19. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	103
Tabla 5.20. Resumen de resultados de la simulación (AG5).....	103
Tabla 5.21. Curva Z política AG6 con extracciones en hm ³ y en m ³ /s.....	105
Tabla 5.22. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Política AG6	105
Tabla 5.23. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	105
Tabla 5.24. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG 6. Sistema Cutzamala.....	106
Tabla 5.25. Resumen de resultados de la simulación (AG6).....	107
Tabla 5.26. Resumen anual. Pol. AG6. El Bosque	108
Tabla 5.27. Resumen anual. Pol. AG6. Valle de Bravo	108
Tabla 5.28. Resumen anual. Pol. AG6. Villa Victoria.....	109
Tabla 5.29. Curva Z política AG7 con extracciones en hm ³ y en m ³ /s.....	113

Tabla 5.30. Entregas a Berros en m ³ /s	114
Tabla 5.31. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Política AG7	114
Tabla 5.32. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13	114
Tabla 5.33. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG7. Sistema Cutzamala	115
Tabla 5.34. Resumen de resultados de la simulación (AG7)	116
Tabla 5.35. Resumen anual. Pol. AG7. El Bosque	117
Tabla 5.36. Resumen anual. Pol. AG7. Valle de Bravo	117
Tabla 5.37. Resumen anual. Pol. AG7. Villa Victoria	118
Tabla 5.38. Resumen de resultados de la simulación (AG8)	122
Tabla 5.39. Resumen anual. Pol. AG8. El Bosque	122
Tabla 5.40. Resumen anual. Pol. AG8. Valle de Bravo	123
Tabla 5.41. Resumen anual. Pol. AG8. Villa Victoria	123
Tabla 5.42. Resumen de resultados de la simulación (AG9)	125
Tabla 5.43. Resumen anual. Pol. AG9. El Bosque	126
Tabla 5.44. Resumen anual. Pol. AG9. Valle de Bravo	126
Tabla 5.45. Resumen anual. Pol. AG9. Villa Victoria	127
Tabla 5.46. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Sistema Cutzamala	130
Tabla 5.47. Entregas a Berros en m ³ /s	131
Tabla 5.48. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.3 y 4.4. Política AG6	132
Tabla 5.49. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.3 y 4.4. Política AG7	132
Tabla 5.50. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG6. Sistema Cutzamala	133
Tabla 5.51. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG7. Sistema Cutzamala	133
Tabla 5.52. Resumen de resultados de la simulación (AG6)	135
Tabla 5.53. Resumen de resultados de la simulación (AG7)	135

Índice de Figuras

Figura 1.1. Balance hídrico en la cuenca del Valle de México (promedio anual, en m ³ /s).....	17
Figura 1.2. Cuenca del Valle de México, área geográfica	18
Figura 1.3. Evolución temporal de los volúmenes entregados.	21
Figura 1.4. Elementos y perfil del Sistema Cutzamala	22
Figura 3.1. Gráfico de los almacenamientos del Sistema Cutzamala.....	30
Figura 3.2. Verificación 1 de gastos medios mensuales y medio anual 1999.....	34
Figura 3.3. Verificación de los valores diarios de noviembre de 1999. Presas derivadoras. Sistema Cutzamala.	34
Figura 3.4. Verificación 1 de gastos medios mensuales y medio anual 1999.....	35
Figura 3.5. Verificación segunda muestra	36
Figura 3.6. Valores estimados de aportaciones netas de presas derivadoras.....	37
Figura 3.7. Efectos en Chilesdo más el Barraje al limitar aportaciones en Villa Victoria 2003 y 2004.....	37
Figura 3.8. Efectos en Chilesdo más el Barraje al limitar aportaciones en Villa Victoria todo el periodo.....	38
Figura 3.9. Ingresos mensuales deducidos para las presas de almacenamiento.....	40
Figura 3.10. Ingresos mensuales deducidos para la presa El Bosque	40
Figura 3.11. Ingresos mensuales deducidos para la presa Valle de Bravo.	41
Figura 3.12. Ingresos mensuales deducidos para la presa Villa Victoria.....	41
Figura 3.13. Lamina de evaporación de las presas del Sistema Cutzamala	43
Figura 4.1. Representación gráfica del planteamiento del problema.	47
Figura 4.2. Representación de un cromosoma y sus componentes.	52
Figura 4.3. Método de la ruleta representando en una recta	56
Figura 4.4. Método de la ruleta representando con un puntero y un círculo que girara.....	57
Figura 4.5. Elección de un punto de corte mediante un numero aleatorio.....	60
Figura 4.6. Individuos creados mediante la cruza en 1 punto (Hijo 1 e Hijo 2).....	60
Figura 4.7. Individuos creados mediante la cruza en 2 puntos (Hijo 1 e Hijo 2)	61
Figura 4.8. Ampliación de la mutación	62
Figura 4.9. Variables discretizadas en un embalse	65
Figura 4.10. Condiciones por evitar de una presa	66
Figura 4.11. Ejemplo forma de la curva Z.....	67
Figura 4.12. Ejemplo de curvas guía alta y baja	68
Figura 4.13. Diagrama de flujo de la simulación sin curvas guía	71
Figura 4.14. Diagrama de flujo de la simulación con curvas guía y restricciones.....	74
Figura 4.15. Limitante por capacidad de la planta potabilizadora	77
Figura 4.16. Limitante adicional sobre la capacidad de conducción.....	78
Figura 4.17. Líneas agregadas al código de la subrutina de corrección de una presa.....	78
Figura 4.18. Diagrama de flujo del algoritmo AG acoplado con la simulación del vaso.....	83
Figura 4.19. Diagrama de flujo del algoritmo genético acoplado a simulación del sistema Cutzamala	87
Figura 4.20. Diagrama de flujo del algoritmo genético acoplado a simulación del sistema Cutzamala modificando la función objetivo	90
Figura 5.1. Curva Z optimizada con AG1. Sin curva guía.....	92
Figura 5.2. Curva Z optimizada con AG2.....	93
Figura 5.3. Curva Z optimizada con AG3 considerando 91 variables de búsqueda	95
Figura 5.4. Curva Z optimizada con AG4 considerando nuevos coeficientes de penalización.....	97
Figura 5.5. Curvas guía política AG4 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en la experiencia histórica	99
Figura 5.6. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros, política AG4.....	100
Figura 5.7. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Política AG4.....	100
Figura 5.8. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Política AG4.....	101

Figura 5.9. Almacenamiento de la Presa Villa Victoria. Política AG4	101
Figura 5.10. Curva Z optimizada con AG5.....	102
Figura 5.11. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros, política AG5.....	103
Figura 5.12. Almacenamiento inicial AG4 vs AG5	104
Figura 5.13. Curva Z optimizada con AG6.....	105
Figura 5.14. Curvas guía política AG6 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en operación histórica	107
Figura 5.15. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros	110
Figura 5.16. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Pol AG6	110
Figura 5.17. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Pol AG6	111
Figura 5.18. Almacenamiento inicial de la Presa Villa Victoria. Pol AG6	111
Figura 5.19. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico.	112
Figura 5.20. Comparación de entregas a la planta de Los Berros.....	112
Figura 5.21. Curva Z optimizada con AG7.....	113
Figura 5.22. Curvas guía política AG7 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en la operación histórica	116
Figura 5.23. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros	119
Figura 5.24. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Pol AG7	119
Figura 5.25. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Pol AG7	120
Figura 5.26. Almacenamiento inicial de la Presa Valle Victoria. Pol AG7.....	120
Figura 5.27. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico	121
Figura 5.28. Comparación de entregas a la planta Los Berros.....	121
Figura 5.29. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros	124
Figura 5.30. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico.	125
Figura 5.31. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros	128
Figura 5.32. Almacenamiento inicial en Valle de Bravo vs almacenamiento inicial histórico.....	128
Figura 5.33. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico	129
Figura 5.34. Entrega a Berros simuladas vs históricas.....	129
Figura 5.35. Curva Z optimizada de los diferentes AG´s simulados	131
Figura 5.36. Curvas Guía para Valle de Bravo, para las políticas AG6 (Izquierda) y AG7 (Derecha)	132
Figura 5.37. Gastos medios mensuales que se entregarían a la planta de Los Berros al aplicar la política AG6.	134
Figura 5.38. Gastos medios mensuales que se entregarían a la planta de Los Berros al aplicar la política AG 9.....	134
Figura 6.1. Extracciones de noviembre a octubre.....	137

1. Introducción

En la ingeniería se presentan dos conceptos fundamentales de factibilidad para la realización de un proyecto, uno se refiere a los aspectos técnicos, mientras que el otro se refiere a los aspectos económicos, esta última suele ser la causa más común de las dificultades de un proyecto; por lo que es necesario revisar el funcionamiento de las obras ya construidas, antes de emprender la construcción de nueva infraestructura lo cual representa una inversión considerable.

Por otra parte, dentro de las diferentes etapas de los estudios de ingeniería, que van desde el anteproyecto hasta el mantenimiento, se encuentra una que ha sido poco atendida, dicha etapa es la de operación. Una obra, aunque esté diseñada de manera adecuada, si no es operada correctamente perderá gran parte de su eficiencia, por dicho motivo la política de operación es factor de suma importancia en la vida útil de la obra; en ocasiones tiene mayor trascendencia que el costo inicial.

Las ideas anteriores dan pauta para abordar un problema que se ha acentuado con el paso del tiempo en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, el aumento exponencial en la urbanización ha provocado mayor demanda de agua. El agua ha sido un tema crítico para la sustentabilidad de la Ciudad de México. El incremento en la demanda de agua ha impactado de manera negativa y creciente en el balance de las cuencas y acuíferos locales y vecinos, generando dramáticos daños económicos y ambientales. Las tradicionales prácticas de importación de agua para satisfacer la demanda urbana aunada al déficit regional, ha llevado a conflictos sociales y políticos en torno a la distribución y gestión del recurso agua. Los problemas de abastecimiento a la Ciudad de México van más allá de sus fuentes e incluyen un complejo sistema de captación y conducción que enfrenta fuertes limitaciones. El envejecimiento de la infraestructura, los costos de operación, la falta de inversión en mantenimiento y rehabilitación, así como el deterioro de las fuentes de agua en cantidad y calidad, ha llevado al sistema de abastecimiento al límite de la operatividad física y económica.

El Sistema Cutzamala aporta agua en bloque a la Ciudad de Toluca y a 21 delegaciones y municipios de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, beneficiando a 4.11 millones de habitantes. Cabe mencionar que la entrega de agua no es constante durante el año, sino muestra variaciones significativas en tiempos de lluvia y sequía respectivamente. Esto debido a la alta sensibilidad al régimen de precipitación del sistema de abastecimiento de agua superficial.

Todo esto ha afectado el funcionamiento del sistema, por lo que se requiere conocer el estado actual y conocer su funcionamiento; por lo antes mencionado surge la necesidad de encontrar políticas de operación óptimas que permitan satisfacer las demandas solicitadas las cuales proporcionarán valiosa información para determinar el estado en que se encuentran las presas; y así definir una nueva política de operación del sistema.

En este trabajo se presenta un método de optimización con ayuda de programación evolutiva, con el cual se pretende obtener una política de operación óptima para las principales presas del Sistema Cutzamala. Para cumplir con tal objetivo es necesario realizar la revisión del funcionamiento histórico del sistema, con el cual se pretende investigar deficiencias en las políticas de operación que podrían ser superadas por derrames o déficits.

1.1. El agua en el mundo y su disponibilidad

El cambio climático afectará a la disponibilidad, calidad y cantidad de agua para las necesidades humanas básicas, poniendo en peligro el disfrute efectivo de los derechos humanos al agua y al saneamiento de millones de personas. Los cambios hidrológicos inducidos por el cambio climático dificultarán aún más la gestión sostenible de los recursos hídricos, que ya de por sí se encuentra bajo presión en muchas partes del mundo.

La seguridad alimentaria, la salud humana, los asentamientos urbanos y rurales, la producción de energía, el desarrollo industrial, el crecimiento económico y los ecosistemas dependen del agua y, por consiguiente, son vulnerables a las consecuencias del cambio climático. Adaptarse y mitigar el cambio climático por medio de una gestión hídrica es fundamental para el desarrollo sostenible.

De acuerdo con CONAGUA (2015), en México 84,960 hm³ de agua son utilizados en usos consuntivos, de los cuales el 77% corresponden a la agricultura, 14% al abastecimiento público, 5% a la producción de energía eléctrica (no incluye hidroelectricidad) y 4% a la industria.

De acuerdo con Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (United Nations World Water Assessment Programme [WWAP]) (2020), el uso global de agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante de un 1% cada año debido al crecimiento demográfico, al desarrollo económico y al cambio de los patrones de consumo. El cambio climático y un suministro más errático e incierto agravarán la situación de las regiones en las que falta más el agua y crearán escasez en las regiones en las que todavía abunda el agua hoy. La escasez material de agua suele ser un fenómeno más estacional que crónico y es probable que el cambio climático altere la disponibilidad estacional de agua a lo largo del año en varios lugares (WWAP, 2020).

En 2050 la agricultura deberá producir 60% más alimentos a nivel mundial, la industria manufacturera aumentará en 400 % (a partir del año 2000) y la población mundial será de 9.1 millardos (9 mil millones) de habitantes (WWAP, 2015). Además, se prevé que para el 2030 un déficit mundial de agua del 40% bajo un escenario climático donde todo se mantiene igual (WWAP, 2015).

1.2. Balance hidrológico de la cuenca del Valle de México

La Cuenca del Valle de México (CVM) se localiza en el extremo sur del altiplano mexicano, a una altura media de 2240 msnm, tiene una superficie de 9,647 km² y en ella se localiza la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2005).

La figura 1.1 muestra esquemáticamente el balance hídrico del Valle de México. Como se puede observar, las primeras dos fuentes de abastecimiento son externas al Valle de México y contribuyen con 20 m³/s, equivalentes a aproximadamente un 32% del abastecimiento total al Valle de México (63 m³/s). Los acuíferos del Valle de México aportan el resto, es decir, 43 m³/s. Más adelante, en el apartado de Balances Hídricos, se presenta un análisis detallado de los distintos componentes del ciclo hidrológico y de los usos del agua en el Sistema.

Precipitación. De los 214 m³/s de precipitación media anual, 177 m³/s regresan a la atmósfera por evapotranspiración, 12 m³/s escurren superficialmente e ingresan al sistema de drenaje, y 25 m³/s recargan al acuífero.

Agua potable. Hay tres fuentes principales de abastecimiento de agua potable:

- Los pozos del Sistema Lerma (5 m³/s).
- El agua proveniente del Sistema Cutzamala (15 m³/s).
- Los pozos dentro del área metropolitana (43 m³/s), que extraen el agua de los tres acuíferos mencionados (incluido el sistema de pozos denominado Plan de Acción Inmediata (PAI), que abastece 7.5 m³/s), además de otros sistemas, entre los que se encuentran Barrientos, Chiconautla, la Caldera y manantiales dentro de la zona metropolitana (SACMEX, 2012).

Fugas. Las fugas de agua en la región son muy significativas. De los 63 m³/s que abastecen al Valle de México, cerca del 34% se pierde en las redes de distribución de agua potable, y el 56% del volumen de las fugas ingresa directamente a la red de drenaje sin uso previo. El drenaje transporta, entonces, tanto aguas negras como las provenientes de las fugas. Cabe notar que los 21.5 m³/s que se fugan de las redes de agua potable equivalen a un gasto 43% mayor a las aportaciones del Sistema Cutzamala.

Consumo. La población urbana del Valle de México consume 41.5 m³/s, de los cuales 37.4 m³/s se devuelven al sistema de drenaje. El volumen de drenaje combinado residual/pluvial se usa básicamente para el riego, tanto en el Valle de México como en el vecino estado de Hidalgo.

Sobreexplotación de los acuíferos. Los acuíferos cumplen un papel primordial en el abastecimiento de agua al Valle de México. Además de aportar el 68% del suministro total para agua potable, contribuyen con 11 m³/s para los distritos de riego en el Valle de México; esta cantidad equivale, en magnitud, al aporte del Sistema Cutzamala. Considerando que una proporción significativa de la irrigación en el Valle de México se destina a cultivos forrajeros —principalmente alfalfa—, ese volumen podría sustituirse por aguas residuales tratadas que pueden emplearse para riego; no obstante, esta sustitución no se ha logrado. Actualmente los acuíferos Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y de la zona metropolitana de la Ciudad de México están sobreexplotados. La recarga natural asciende a aproximadamente 25 m³/s y la sobreexplotación es del orden de 19 m³/s.

Salidas del Valle de México. El sistema de drenaje conduce 50.9 m³/s hacia afuera del Valle a la cuenca del río Pánuco en el estado de Hidalgo. Esta cifra es muy significativa, pues representa el 81% del suministro total (Banco mundial, 2015).

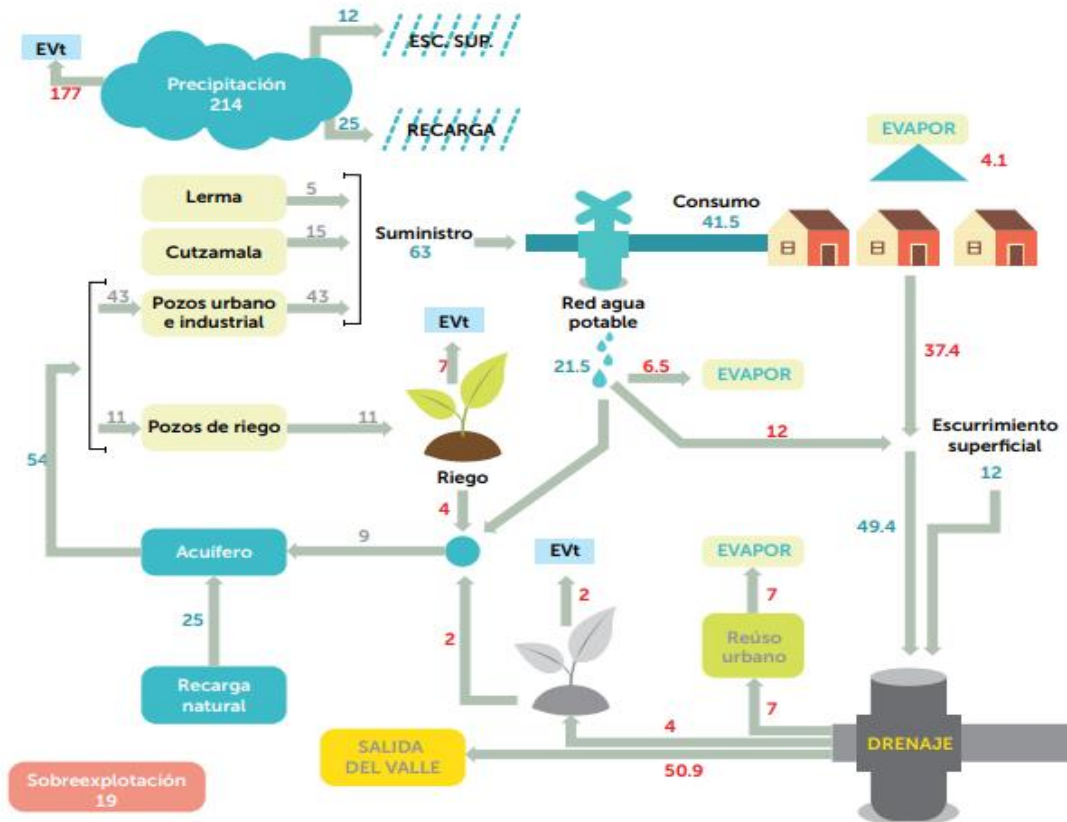


Figura 1.1. Balance hídrico en la cuenca del Valle de México (promedio anual, en m³/s)

Fuente: (Banco mundial, 2015)

1.3. Delimitación de la Cuenca del Valle de México

La cuenca del Valle de México es limitada al norte, por las sierras de Tepetzotlán, Tezontlalpa y Pachuca; al este, los llanos de Apan y la sierra Nevada; al sur, las sierras de Chichinautzin y del Ajusco, y al oeste Las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo (CONAGUA, 2005), su territorio se distribuye de la forma siguiente, ver figura 1.2:

- CDMX 9.04%
- Estado de México 39.50%
- Hidalgo 48.46%
- Tlaxcala 3.00%

En la cuenca del Valle de México se localiza una de las concentraciones urbano-industriales más grandes del mundo: la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) que, en las últimas tres décadas, ha triplicado su población (CONAGUA, 2005).

En esta megalópolis, cuestiones como el abastecimiento y la distribución del agua para el consumo urbano e industrial, el desalojo de las aguas pluviales y el tratamiento de las aguas residuales, configuran grandes desafíos para la política hidráulica y la acción concertada de instituciones y sociedad.

El desafío sigue latente. La urbe metropolitana continúa su expansión y demanda mayores volúmenes del

recurso. Ante esta situación, el abastecimiento de agua potable representa una prioridad indiscutible. Por un lado, se deben atender las nuevas demandas y, por otro, reducir gradualmente la severa sobreexplotación a que se ha sometido al acuífero del Valle de México.

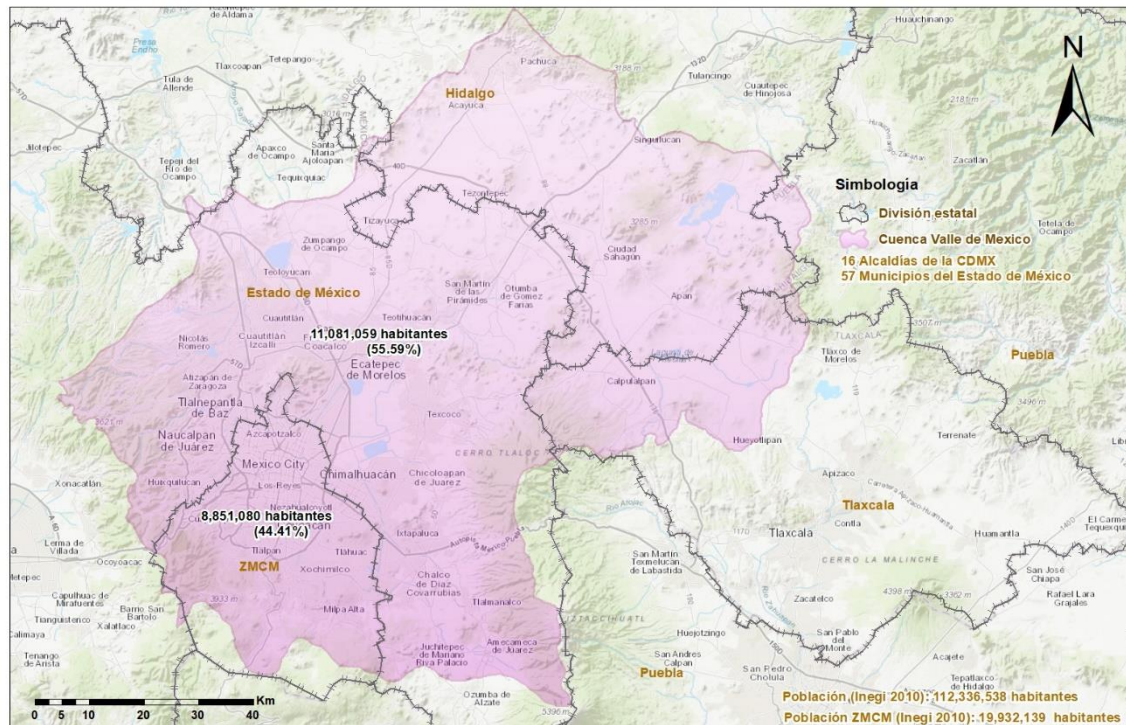


Figura 1.2. Cuenca del Valle de México, área geográfica

Fuente: Elaboración propia

Por estar asentada en la parte más baja del valle, en un continuo urbano de 1800 km² que obstaculiza la recarga del acuífero, la ZMVM no cuenta con sitios adecuados para regularizar y almacenar el agua de lluvia. Esta situación propicia que, de la lluvia media anual de 6828 Mm³ que se precipitan dentro de la cuenca, el 72% se evapotranspira y el 11% restante, se infiltra en el subsuelo. El 17 % restante que escurre de manera superficial, un pequeño parte es regulada para su aprovechamiento; el resto es conducida al Sistema General de Drenaje para evitar inundaciones.

1.4. Sistema Cutzamala

1.4.1. Antecedentes

Parte del agua que requiere la principal megalópolis del país es trasladada desde el municipio de Ciudad Hidalgo, en el estado de Michoacán; recorre 272 km entra canales, túneles y plantas de bombeo; se potabiliza y nuevamente se entuba para ser entregada a la Zona Metropolitana del Valle de México, donde se junta con las demás fuentes para su uso. Posteriormente se envía hacia la red de drenaje de la Ciudad de México y es transportada al estado de Hidalgo para su utilización en el riego.

1.4.1.1. Primera etapa

Entró en operación en 1982 aportando 4,000 l/s de la presa Villa Victoria, en el Estado de México. Estas aguas se conducen por el canal Ing. Héctor Martínez de Meza (con longitud de 13 km), a la planta potabilizadora Los Berros, localizada cerca de Valle de Bravo a una altitud de 2,540 msnm, y a partir de ahí el agua se conduciría por gravedad a la Zona Metropolitana del Valle de México (CONAGUA, 2005).

1.4.1.2. Segunda etapa

Esta entró en operación en 1985, y consistió en el aprovechamiento del agua de la presa Valle de Bravo (ubicada a 1768 msnm) en el Estado de México y aportando un gasto de 6,000 l/s; hasta la planta potabilizadora Los Berros por medio de tres plantas de bombeo (2, 3, 4).

La infraestructura para la conducción del agua desde la presa Valle de Bravo hasta la planta potabilizadora Los Berros, tiene una longitud de 29 km, la caja repartidora y el canal Donato Guerra; este último tiene una longitud de 7.50 km.

Para introducir los 6000 l/s de esta etapa al Valle de México, se construyó el túnel Analco-San José (de 16 km de longitud), en su construcción se aprovecharon dos lumbreras del túnel del Sistema Lerma y se excavo una tercera en Dos Ríos, con profundidades de 210 m las dos primeras y de 30 metros la última; en esta se alojó la estructura de bifurcación para la conducción del agua hacia los municipios conurbados del Estado de México, mediante el Ramal Norte-Macro circuito y hacia la CDMX por el Ramal Sur-Acuaférico (CONAGUA, 2005).

1.4.1.3. Tercera etapa

Esta etapa está integrada por los subsistemas Chilesdo y Colorines para un aprovechamiento total de 9 m³/s. El subsistema Chilesdo (localizado a 2395 msnm), se encuentra en operación desde 1993, aporta 1 m³/s en promedio y hasta 5 m³/s en épocas de avenidas; el sistema capta las aguas del río Malacatepec en la presa Chilesdo y eleva el líquido más de 300 m hasta la planta potabilizadora a través de una planta de bombeo (número 6).

En tanto, Colorines (localizado a 1600 msnm), aprovecha las aguas de las presas Tuxpan y el Bosque, en el Estado de Michoacán, e Ixtapan del Oro, en el Estado de México mediante la presa derivadora Colorines, para un suministro de 8 m³/s en promedio. Con la operación de este subsistema se pudo atender los incrementos anuales en la demanda hasta 1999, además de que permitirá abatir los rezagos existentes y reducir la sobreexplotación del acuífero hasta en 2.4 m³/s, mediante la cancelación de pozos en el Valle de México.

Se construyó la planta de bombeo 1 para elevar el agua a 1100 msnm hasta la planta potabilizadora (ubicada 2 700 msnm). Con la terminación de la tercera etapa, 19 m³/s de agua (gasto de diseño) se entregarían en total para abastecer a diez municipios conurbados del Estado de México y al poniente de la Ciudad de México, (CONAGUA, 2005).

Sin embargo, de acuerdo con los datos de las “Estadísticas del Agua en México, editadas por la CONAGUA, el sistema entregó en promedio 14.6 m³/s en el periodo 1991-2018, de los cuales 5.08 m³/s corresponden al Estado de México (0.8 m³/s para a la ciudad de Toluca) y 9.27 m³/s a la Ciudad de México. En la tabla 1 se

muestran los volúmenes y caudales suministrados por el Sistema Cutzamala en el periodo antes mencionado y en la figura 1.3 sólo se muestra la evolución temporal de los volúmenes entregados.

Tabla 1.1. Volúmenes y caudales suministrados por el Sistema Cutzamala, serie anual (1991 - 2018)

(Fuente CONAGUA)

Año	CDMX	CDMX	EDO. DE MÉXICO	EDO. DE MÉXICO	TOTAL	TOTAL
	Volumen entregado	Gasto medio	Volumen entregado	Gasto medio	Volumen entregado	Gasto medio
	(hm ³ /año)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)	(m ³ /s)	(hm ³ /año)	(m ³ /s)
1991	238.92	7.59	78.11	2.49	317.03	10.08
1992	224.89	7.05	89.66	2.81	314.55	9.86
1993	251.79	8.10	90.44	2.91	342.23	11.01
1994	304.34	9.67	106.31	3.38	410.65	13.05
1995	309.12	9.80	121.39	3.85	430.51	13.65
1996	305.63	9.62	145.66	4.57	451.29	14.19
1997	320.71	10.16	159.17	5.05	479.88	15.21
1998	313.07	9.93	141.64	4.49	454.71	14.42
1999	319.30	10.21	159.45	5.10	478.75	15.31
2000	306.70	9.68	176.55	5.57	483.25	15.25
2001	303.14	9.64	173.35	5.51	476.49	15.15
2002	303.66	9.65	175.99	5.60	479.65	15.25
2003	310.70	9.77	185.23	5.83	495.93	15.60
2004	310.67	9.84	177.73	5.64	488.40	15.48
2005	310.39	9.84	182.80	5.64	493.19	15.48
2006	303.53	9.61	177.26	5.61	480.79	15.22
2007	303.90	9.72	174.56	5.58	478.46	15.30
2008	306.25	9.58	179.47	5.61	485.72	15.19
2009	244.60	7.74	155.38	4.92	399.98	12.66
2010	266.85	8.45	165.84	5.25	432.69	13.70
2011	296.46	9.09	182.17	5.80	478.63	14.89
2012	272.54	8.62	190.96	5.79	463.50	14.41
2013	255.05	8.09	165.19	5.24	420.24	13.33
2014	294.86	9.35	181.85	5.77	476.71	15.12
2015	303.26	9.62	194.15	6.16	497.41	15.78
2016	308.66	9.76	195.57	6.18	504.23	15.94
2017	311.81	9.89	194.55	6.17	506.36	16.06
2018	306.60	9.72	188.74	5.99	495.34	15.71

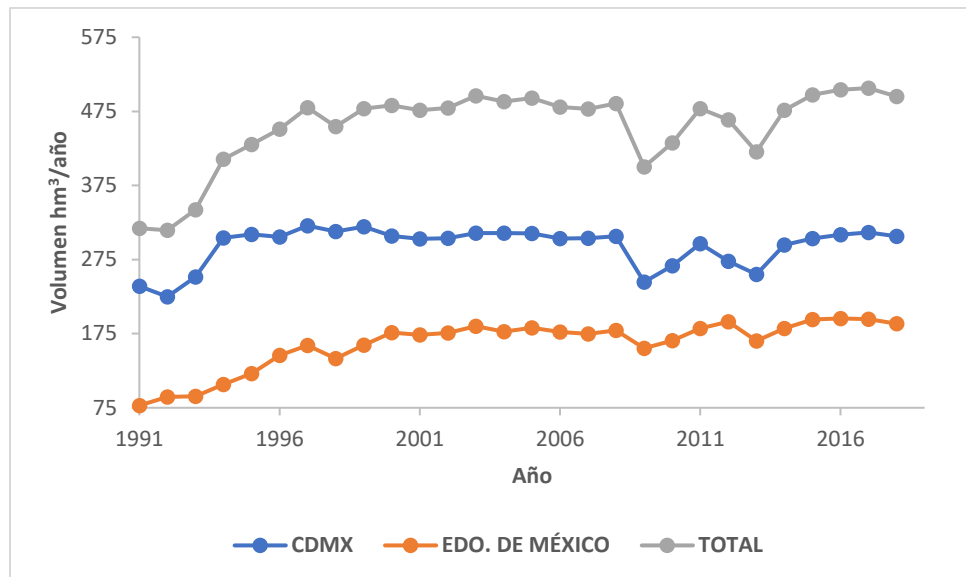


Figura 1.3. Evolución temporal de los volúmenes entregados.

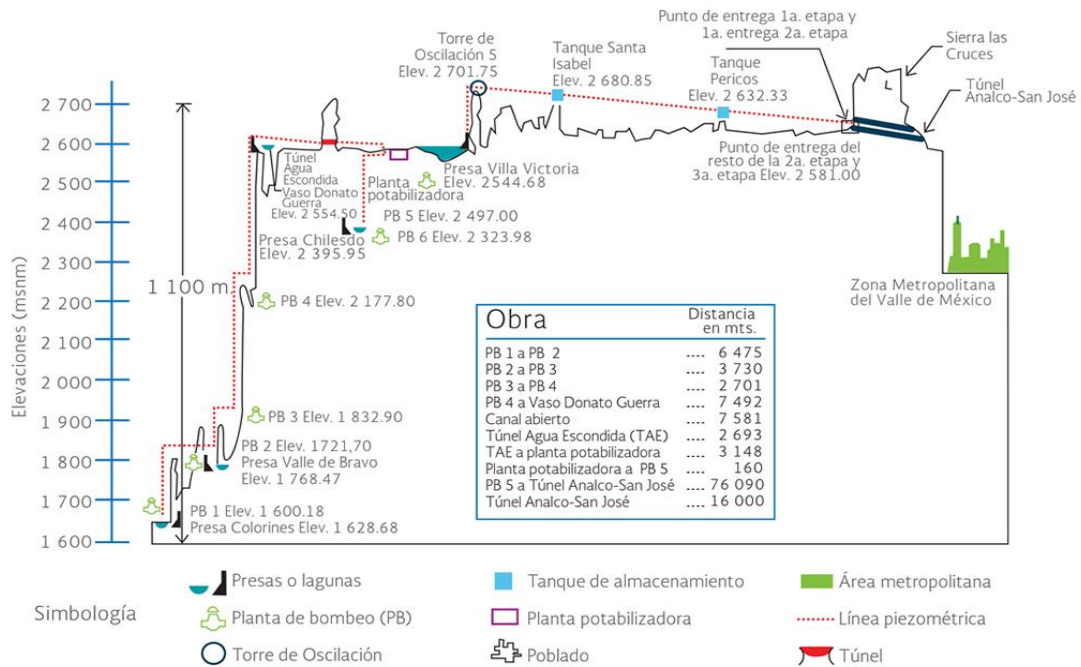
Fuente: Elaboración propia

El sistema Cutzamala es un sistema hidráulico de almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua potable para la población e industria del CDMX y el Estado de México, se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 18 denominada Río Balsas, siendo uno de los principales afluentes del río del mismo nombre.

Consta de 7 presas principales, 6 plantas de bombeo y la planta potabilizadora Los Berros, como se puede observar en la figura 1.4, al igual que su perfil topográfico, en los vasos de las presas Villa Victoria, Valle de Bravo, Chilesdo, Colorines, Ixtapan, Del Bosque y Tuxpan, se capta el agua que se genera en la cuenca del río Cutzamala, los gastos aprovechables en Villa Victoria y Valle de Bravo son debidos a cuencas propias, y en lo que respecta a Colorines, recibe agua proveniente de la presa El Bosque y de la presa Tuxpan.

Actualmente, para ZMVM se dispone, en promedio, de un abastecimiento de agua potable de 61 000 l/s, de los cuales 39 700 l/s provienen del subsuelo del Valle de México, 14700 l/s del Sistema Cutzamala, 5100 l/s del Sistema Lerma y 1100 l/s de aprovechamientos superficiales, como la presa Madín y los manantiales del propio valle (CONAGUA, 2005). Además de dotar de agua en bloque a la ZMVM, el Sistema Cutzamala suministra 817 l/s a la ciudad de Toluca.

PERFIL DEL SISTEMA CUTZAMALA



ELEMENTOS DEL SISTEMA CUTZAMALA

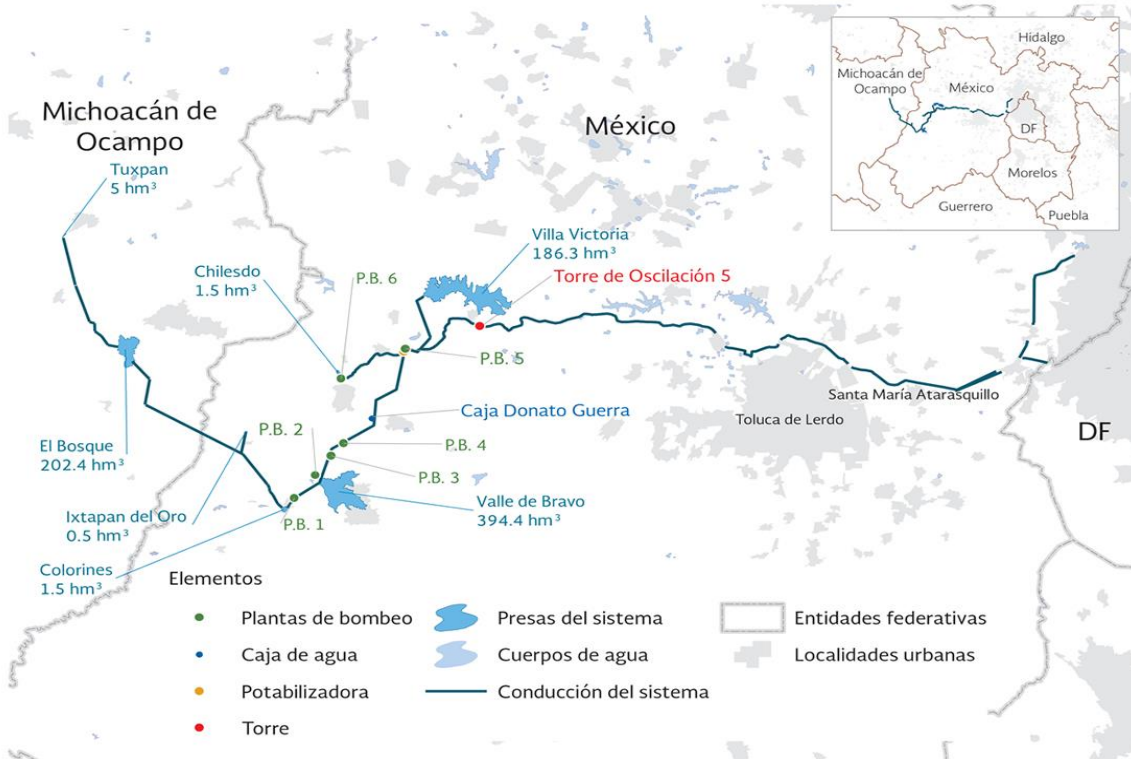


Figura 1.4. Elementos y perfil del Sistema Cutzamala

Fuente: CONAGUA

En la tabla 1.2 se describe los componentes principales del Sistema Cutzamala y en la tabla 1.3 se presenta la longitud de conducción en las estructuras que compone el sistema.

Tabla 1.2. Características de componentes del Sistema Cutzamala (Fuente CONAGUA)

Elemento	Tipo	Capacidad	Unidad	Elevación (msnm)
Tuxpan	Presa derivadora	5.00	Hm ³	1762.00
El Bosque	Presa de almacenamiento	202.40	Hm ³	1741.40
Ixtapan del Oro	Presa derivadora	0.50	Hm ³	1635.00
Colorines	Presa derivadora	1.50	Hm ³	1629.40
Valle de Bravo	Presa de almacenamiento	394.40	Hm ³	1830.00
Villa Victoria	Presa de almacenamiento	185.70	Hm ³	2605.50
Chilesdo	Presa derivadora	1.50	Hm ³	2359.00
Planta de bombeo 1	Bombas	20.00	m ³ /s	1571.30
Planta de bombeo 2	Bombas	24.00	m ³ /s	1723.00
Planta de bombeo 3	Bombas	24.00	m ³ /s	1834.00
Planta de bombeo 4	Bombas	24.00	m ³ /s	2177.80
Planta de bombeo 5	Bombas	29.10	m ³ /s	2497.00
Planta de bombeo 6	Bombas	5.10	m ³ /s	2323.10
Planta potabilizadora	Planta potabilizadora	20.00	m ³ /s	2540.00

Tabla 1.3. Longitud de conducción en las estructuras del Sistema Cutzamala (Fuente CONAGUA)

Tramo	Tipo de conducción						Etapa de construcción del Sistema Cutzamala	
	Tuberías				Canal	Túnel		Longitud total (km)
	Acero		Concreto					
	Longitud (km)	Diámetro (m)	Longitud (km)	Diámetro (m)	Longitud (km)	Longitud (km)		
Presa Villa Victoria - planta potabilizadora					13		13	1
Planta potabilizadora - portal de entrada túnel Analco	1.88	2.5 a 3.5	76	2.5			93.68	
Presa Valle de Bravo - planta potabilizadora	4	1.83 a 3.17	14.5	2.5	7.5	3.1	29.1	2
Presa Colorines - presa Valle de Bravo	1.92	2.5 a 2.9	2.28	2.5		2.24	6.44	
Presa Chilesdo - planta potabilizadora	2.5	1.73	9.3	1.07 a 1.37			11.8	3
Presa Tuxpan-presas El Bosque					14.95	7.05	22	
Presa El Bosque-presas Colorines					1.2		1.2	
Segunda línea (de Valle de Bravo a túnel Analco)	2.9	1.83 a 3.17	90.5	2.5			93.4	
Totales	13.2		192.58		72.55	28.19	322.32	

1.5. Planteamiento del Problema, Justificación y Alcances

En nuestro país, como en todo el mundo, el agua se percibe como un recurso de valor ilimitado, debido a la estrecha relación que guarda con los procesos vitales y con el desarrollo de toda actividad humana. Su adecuado aprovechamiento es condición básica para superar los desafíos y preservar las posibilidades del futuro.

México conoce la problemática relacionada con el uso y el control del vital elemento. Nuestra historia es testimonio de un esfuerzo creador dirigido a enfrentar los retos de una orografía accidentada y difícil para la actividad del hombre, quien no solo se ha esforzado por conseguir y aprovechar el agua para cubrir sus necesidades, proteger su salud y producir alimentos, sino también por evitar las consecuencias de las inundaciones y del comportamiento imprevisto de las corrientes.

Los trabajos necesarios para llevar a cabo la entrega de agua al Valle de México requieren gran cantidad de personal y la correcta administración de los recursos para garantizar el abasto a la zona más poblada del país, una región delicada por la baja cantidad de agua renovable con que cuenta, que es 3401 hm³/año o 144 m³/hab/año (Conagua, 2018a).

La gran cantidad de agua que consume actualmente la ZMVM requiere un caudal medio de 59.9 m³/s proveniente de acuíferos (39.7 m³/s), del Sistema Cutzamala (15.3 m³/s), el Sistema Lerma (3.8 m³/s) y de la presa Madín y manantiales (1.1 m³/s). De esta cantidad, la Conagua ha entregado, durante el año del 2019 un promedio de 22.7 m³/s, lo que representa el 38% del consumo, caudal suministrado a través del Sistema Cutzamala y de los PAI Norte y Sur.

Las principales problemáticas en la entrega de agua a la Zona Conurbada de la Ciudad de México son:

1. Variaciones en la precipitación y almacenamiento de las presas
2. Problemas de funcionamiento en uno o más componentes del sistema
3. Fugas en el sistema de distribución
4. Extracciones clandestinas desde las conducciones
5. Cambios en la demanda

En un sistema tan complejo, incluso la suma de dos o más de estos factores puede llevar a una reducción temporal en la entrega de agua potable. La operación del sistema es compleja ya que se deben conciliar distintos objetivos, por un lado, extraer el mayor recurso posible de los embalses, pero sin llegar a condiciones de déficit y evitar, por otro lado, los posibles derrames en las presas que componen dicho sistema.

Ante un panorama donde las condiciones necesarias para lograr un servicio sustentable del sistema a mediano plazo no están completamente satisfechas, se vuelve indispensable desarrollar herramientas que permitan comprender mejor la dinámica hídrica del Cutzamala, visualizar el efecto de los cambios ocurridos (cambio de uso de suelo y cambio climático) y ayuden a la toma de decisiones complejas.

Por lo anterior, se propuso implementar, políticas de operación de las principales presas del Sistema Cutzamala, con la revisión del funcionamiento histórico del sistema se pretenden investigar posibles deficiencias en las políticas de operación que podrían ser superadas para lograr una mejor entrega del recurso agua hacia su

destino final la Zona Metropolitana del Valle de México.

El sistema del río Cutzamala entrega agua al Valle de México y zonas conurbadas con una eficiencia estimada del orden del 60%, el caudal que no se logra entregar se atribuye a las fugas que existen en las conducciones y particularmente en la distribución; parte del problema puede deberse a las políticas de operación de las presas del sistema, si dichas políticas se modificaran, podría mejorarse el funcionamiento del conjunto y obtener así mejores extracciones, evitando tener déficit o disminuirlos lo máximo posible, procurando evitar además que se presenten derrames en dichas presas. Para lograrlo en este estudio se propuso realizar una revisión del funcionamiento histórico y de esta manera detectar las deficiencias en las políticas de operación, para posteriormente dar una nueva propuesta de extracciones que pueda optimizar el funcionamiento del Sistema.

Es importante señalar que tanto en el análisis histórico como el que se calcula en esta tesis, se supone un comportamiento en paralelo, es decir que las principales presas en cuestión, a conocerse como El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria; captaran sus ingresos como cuencas propias y sus salidas o extracciones llegaran directamente a la planta potabilizadora Los Berros (la presa El Bosque trasvasa cierto volumen de agua a la presa de Valle de Bravo, pero para el caso de este estudio se considerarán independientes debido a que no se conoce con exactitud el volumen aportado), así como las aportaciones de las presas derivadoras: Chilesdo, Ixtapan del Oro y Colorines.

Los alcances definidos en un principio corresponden a definir políticas de operación con y sin curvas guía optimizadas de las principales presas del sistema Cutzamala, usando programación dinámica estocástica y evolutiva, sin embargo debido a los tiempos que se tenían para la realización de esta tesis, se decidió delimitar sus alcances y finalmente no se usó el método de la programación dinámica estocástica (PDE) en este estudio, los alcances del trabajo finalmente se disminuyeron al uso de cómputo evolutivo combinado con la simulación de funcionamiento de vaso.

1.6. Objetivo general.

1. Implementar un protocolo de operación de las presas del Sistema Cutzamala que indique la extracción anual programada de cada una de las tres principales presas, en función del almacenamiento disponible en cada una de ellas al final de cada época de lluvias.

1.6.1. Objetivos específicos.

1. Definir curvas tipo Z y obtener los porcentajes de extracción anual.
2. Determinar la extracción mensual de cada presa, tomando en cuenta la distribución mensual de las aportaciones por lluvia.
3. Establecer curvas guías altas y bajas optimizadas por cada presa.
4. Aplicar la programación evolutiva mediante la optimización de una función objetivo que por una parte premie los volúmenes entregados y por otro castigue las situaciones no deseables (derrames y déficit).

2. Estado del Arte

Desde tiempos ancestrales el hombre ha construido barreras sobre los ríos para almacenar, controlar o simplemente derivar el agua. La presencia de esas barreras genera lagos artificiales llamados comúnmente vasos de almacenamiento o embalses. Al sistema formado por el embalse y la barrera, llamada cortina, se le conoce con el nombre de “presa”.

El objetivo más común de una presa, cualquiera que sea el tamaño, forma o capacidad del embalse, es regular los escurrimientos de un río, almacenando así, en forma temporal, el volumen de agua que escurre en exceso en la época de lluvias para luego ser usado en el estiaje. El fin principal es entonces satisfacer una demanda, ya sea del sector rural o urbano. Sin embargo, cada vez en mayor medida, las presas se construyen con múltiples propósitos.

2.1. Política de Operación

La política de operación de una presa es el conjunto de reglas que definen la forma de operar de un almacenamiento y se representan de manera gráfica o mediante fórmulas que prescriben el volumen a extraerse en cierto periodo condicionado a la situación que presenta el almacenamiento (Contreras, 1999).

Las políticas de operación para la asignación de agua involucran dos factores importantes cuya dificultad radica en la combinación óptima de ambos. Uno determinístico asociado con el aseguramiento de agua y otro estocástico relacionado con la probabilidad de ocurrencia de los escurrimientos. Las lluvias, los caudales, los niveles de los embalses son eventos estocásticos que se caracterizan por tener un patrón medio a largo plazo y porque el pronóstico de sus magnitudes en un momento dado tiene mayor grado de incertidumbre (Gutiérrez L. A. et al., 2008).

En forma general se puede hablar de dos eventos extremos en la asignación de agua en un almacenamiento, uno donde el recurso agua se utiliza inmediatamente y se basa en el valor presente del líquido; otro, donde se utilizan sólo pequeños volúmenes de agua para asegurar un mayor almacenamiento a futuro. Ambas tendencias son contradictorias y es muy difícil su aseguramiento.

Otro punto importante es el ciclo de toma de decisiones, que se relaciona directamente con el propósito ya sea de generación eléctrica o riego. En el caso de riego se basa en los ciclos de cultivo. En lo que respecta a generación eléctrica se toman en cuenta n periodos de decisión que pueden ser 12 si la política es mensual, 24 si la política es quincenal o más si es semanal o mensual.

Analizar el estado de la presa es necesario para conocer la situación actual del embalse, se expresa en términos de volumen, es decir, es el almacenamiento al inicio de cada etapa. La etapa representa un periodo de tiempo, que puede ser un año, un mes, una quincena, un día, etc.

2.1.1. Función Objetivo

Para poder obtener una política óptima, es necesario establecer una norma que permita comparar distintas políticas y decidir cuál es la mejor. A esta norma de comparación se le llama función objetivo.

La función objetivo es una relación matemática entre las variables de decisión y una magnitud que representa el objetivo (minimizar o maximizar) o producto del sistema. Es la suma de los beneficios correspondientes a cada etapa. Esta función debe permitir que se pueda evaluar de manera independiente la contribución de cada etapa al objetivo final y comparar las distintas políticas de operación y decidir cuál es la mejor.

2.1.2. Estudios realizados de políticas de operación en el extranjero.

La bibliografía relativa a los métodos de optimización es extensa; los primeros avances versan en el cálculo diferencial e integral y el posterior desarrollo de teorías matemáticas afines, no es sino con la segunda guerra mundial que la aplicación de los métodos hacia problemas prácticos empezó a tomar relevancia.

En 1971, William S. Butcher de la Universidad de Austin, Texas publicó: "Stochastic Dynamic Programming for Optimum Operation", demostró que se puede obtener una política de operación en términos del estado del embalse mediante el método de la programación dinámica estocástica; utilizando la misma técnica otros investigadores publicaron sus propios resultados en torno al manejo de recursos hidráulicos, como Yakowitz S. J. en 1982 con su edición "Dynamic programming applications in water resources".

En el ámbito de sistemas de presas resalta el trabajo de Revelle Charles en 1999, quien planteó modelos determinísticos para la operación y diseño de sistemas de embalses en paralelo, mediante su investigación "Optimizing reservoir resources"; por su parte Turgeon A. Ribeiro, trabajó con sistemas de presas en serie que le permitían publicar en 1998: "Determining the maximum daily storage of several reservoirs in series subject to annual flood".

2.1.3. Estudios realizados en México.

En la década de los 90's sobresalen los estudios de Rebolledo S. de la Facultad de Ingeniería, analizando la operación de un sistema hidroeléctrico en paralelo en 1990 con su tesis: "Operación óptima de un sistema hidráulico formado dos presas en paralelo", también se puede mencionar a Avilés H. R., estudiando la operación de un sistema de presas en línea, cuyos resultados se publicarían en 1994 con el título: "Optimización en línea de presas hidroeléctricas".

En el 2003, Sánchez C. y Wagner G., publicarían "Determinación de reglas de operación para dos embalses, utilizando algoritmo genético", un año después ambos investigadores utilizarían un modelo numérico simulador-optimizador para plantear reglas de operación óptimas para sistemas superficiales, el trabajo se publicaría para el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; En el 2015, Huerta Loera S. F., realizó su tesis doctoral "Políticas de operación a largo plazo de un sistema de presas de propósito múltiple", donde analizó y plantearía políticas a largo y a corto plazo, manteniendo niveles óptimos ante la ocurrencia de algún evento e incorporando una estimación de riesgos por inundaciones aguas abajo.

En el Instituto de Ingeniería UNAM, se ha realizado trabajos con relación a la política de operación de una presa, destacando algunos trabajos que a continuación se en listan:

1. Domínguez et al (1998), estudio elaborado para la CNA (ahora CONAGUA) que complementa el informe de 1993 para la CFE, definiendo políticas de extracción en función del almacenamiento final del mes anterior.
2. Domínguez et al (2000), informe realizado para la CFE que revisa el funcionamiento y la operación de las presas, redefiniendo las avenidas de diseño e incluyendo las lluvias intensas ocurridas un año antes.
3. Arganis J. M. (2004), tesis doctoral que analiza la operación óptima del sistema de presas considerando condiciones reales y el uso de muestras sintéticas para una simulación a largo plazo.
4. Domínguez et al (2006), informe para la CFE donde se ajustan las avenidas de diseño y los parámetros después de las lluvias intensas de 2005, para definir políticas de operación quincenales del conjunto turbina-vertedor.
5. Martínez Alarcón (2009), tesis de maestría que define políticas de operación óptimas para un sistema de presas, usando algoritmos genéticos.
6. Acuña S. G. analizo la revisión y optimización de la operación histórica de las presas del Sistema del Río Cutzamala Tesina de especialidad. 25 de junio 2014.

3. Descripción de las principales presas del Sistema Cutzamala

3.1. Presa Valle de Bravo

La subcuenca Valle de Bravo se encuentra en el estado de México y comprende el 96% del municipio Amanalco, el 61% de Valle de Bravo y porcentajes menores de Donato Guerra, Villa de Allende y Villa Victoria, con una extensión de 535 km², el uso del suelo en la subcuenca se distribuye de la siguiente manera: 31% de la superficie tiene un uso agrícola, 55% bosque, 5% pastizal, 3% riego, 2% asentamientos y 4% cuerpos de agua.

La Presa Valle de Bravo abarca una superficie de 2,900 ha. La capacidad máxima de almacenamiento fue inicialmente de 457 hm³, reducida por azolve a 394 hm³. La extracción promedio para el Sistema Cutzamala es de 6 m³/s, con máximos de 15 m³/s (OCAVM). Por tanto, el volumen de extracción de la presa es muy variable, aproximadamente del 43% del total de las tres presas, en general, los máximos se registran desde abril y hasta septiembre, en coincidencia con la época de lluvia. En concordancia, los mayores niveles de almacenamiento inician en el mes de septiembre, como resultado de la acumulación de los escurrimientos de lluvia y la disminución de la extracción, y se mantienen hasta el mes de marzo. A partir de marzo inician los descensos, llegando a niveles de almacenamiento mínimo en el mes de junio, e iniciando su recuperación en septiembre (Acuña Soto, 2014).

3.2. Presa Villa Victoria

La Presa Villa Victoria se ubica a una altitud de 2,544 msnm, tiene una capacidad total de 254 hm³ y una capacidad útil de 186 hm³. La presa provee 18% del agua potable para la ciudad de México. Su principal aporte es el río La Compañía, además de otros escurrimientos de menor importancia y manantiales.

3.3. Presa El Bosque

La Presa El Bosque se ubica a una altitud de 1741 msnm, tiene una capacidad total de 248 hm³ y una capacidad útil de 202 hm³. La profundidad máxima de la presa es de aproximadamente 40 m, con un ancho de 4 km y una longitud 6 km. Los principales usos son el riego agrícola en los municipios colindantes al sur, suministro de agua potable y generación de electricidad. Se abastece de las corrientes del río Zitácuaro o San Juan Viejo, del río San Isidro y parte del río Tuxpan a través de túneles y canales, así como de escurrimientos intermitentes y manantiales.

En la tabla 3.1 se proporciona la evolución del almacenamiento en las presas del Sistema Cutzamala del 1° de noviembre del año 1996 al 2018, y en la figura 3.1 se visualiza el comportamiento de los almacenamientos de forma gráfica.

Tabla 3.1. Almacenamiento de las presas del Sistema Cutzamala (Fuente: CONAGUA)

Años	Presas				Capacidad NAMO (3 presas) hm ³
	El Bosque	Valle de Bravo	Villa Victoria	Suma de las 3 Presas	
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	
1996	195.34	349.29	107.4	652.08	782.51
1997	111.56	342.30	97.9	551.72	782.51
1998	153.44	377.53	158.0	688.96	782.51
1999	169.90	362.50	167.3	699.74	782.51
2000	159.84	341.64	164.3	665.80	782.51
2001	188.58	388.88	173.5	750.99	782.51
2002	160.03	346.23	184.3	690.51	782.51
2003	197.92	393.75	186.9	778.58	782.51
2004	200.33	395.65	184.0	779.93	782.51
2005	174.40	304.05	124.3	602.78	782.51
2006	159.94	326.75	134.0	620.69	782.51
2007	166.52	331.38	164.9	662.77	782.51
2008	141.05	285.73	112.4	539.14	782.51
2009	126.47	275.45	89.5	491.45	782.51
2010	193.38	389.30	139.9	722.53	782.51
2011	184.68	327.90	130.2	642.77	782.51
2012	164.07	282.35	112.1	558.55	782.51
2013	199.87	315.45	153.0	668.37	782.51
2014	201.48	394.75	180.4	776.63	782.51
2015	201.94	392.68	174.8	769.39	782.51
2016	197.40	387.83	173.3	758.52	782.51
2017	199.18	362.34	169.5	731.07	782.51
2018	200.56	378.51	178.3	757.39	782.51

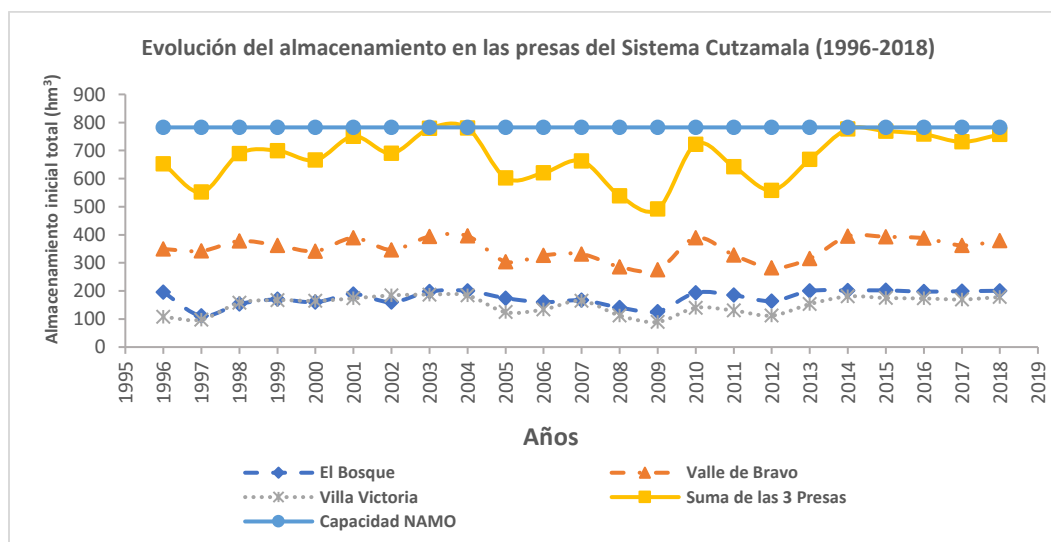


Figura 3.1. Gráfico de los almacenamientos del Sistema Cutzamala

Fuente: CONAGUA

Con base al análisis de la figura 3.1, se observa la evolución de almacenamiento de las principales presas del Cutzamala, en los años de análisis nunca se rebasa el NAMO, por lo cual no hay derrames en las presas, por otro lado, la presa El Bosque y Villa Victoria tiene un almacenamiento histórico muy similar a diferencia de la presa Valle Bravo en el cual se observa que el almacenamiento entre los años 2009 y 2012 ha sido menor a los otros años.

3.4. Funcionamiento del sistema Cutzamala

A grandes rasgos el Sistema Cutzamala opera como se describe a continuación:

A la presa derivadora Tuxpan llegan el río Grande y el río Chiquito; al río Grande llegan los caudales de las presas Pucuate, Sabanetas y Agostitlán. La derivadora Tuxpan envía agua hacia la presa de almacenamiento El Bosque a través de un canal con capacidad de 19 m³/s, en el trayecto se toma parte para la agricultura, mayormente en época de estiaje del agua de las presas Pucuate, Sabanetas y Agostitlán. Los gastos que no puede conducir los derrama hacia el río Tuxpan.

A la presa El Bosque llega lo que deriva la presa Tuxpan y los ríos Zitácuaro, Las Garitas y el Oro. Esta presa tiene una capacidad útil de aproximadamente 142 hm³. De este embalse se envía agua a la presa Colorines a través de un canal y al igual que en el caso de Tuxpan, parte de ésta es usada con fines de riego. Los vertidos de esta presa se van por el río Zitácuaro.

A la presa derivadora Ixtapan del Oro llega el escurrimiento del río Ixtapan del Oro, casi la totalidad de este escurrimiento se conduce a la presa Colorines, sólo se derrama hacia el río Ixtapan del Oro cuando se presenta un exceso de gasto que sobrepasa la capacidad de conducción o para efectos de mantenimiento de los canales. La presa derivadora Chilesdo, está en el cauce del río San José Malacatepec, además de recibir los gastos de su cuenca propia, recibe el exceso de la Presa de almacenamiento Villa Victoria. Esta presa alimenta a la planta de bombeo No. 6, que tiene una capacidad de bombeo de hasta 4.8 m³/s, pero el gasto promedio bombeado es de 1 m³/s. Los derrames de la presa Chilesdo van hacia la presa Tilostoc.

La presa derivadora Colorines recibe los aportes de la presa El Bosque e Ixtapan del Oro, así como parte de la presa Tilostoc. La planta de bombeo 1 (PB1) del Sistema Cutzamala, equipada con 5 bombas de 4 m³/s cada una, toma el agua de la presa Colorines para enviarla a la presa Valle de Bravo o para incorporarla directamente a la PB2. A la presa Valle de Bravo llegan los arroyos el Salto, el Molino, Santa Mónica, González y Carrizal. La PB2 está equipada con 6 bombas de 4 m³/s cada una y puede tomar el agua directamente de la presa Valle de Bravo o como la suma del caudal proveniente de la presa Colorines más agua de Valle de Bravo.

Las plantas PB2, PB3 y PB4, cada una con 6 bombas de 4 m³/s, envían agua de las presas Colorines y Valle de Bravo hacia la Planta Potabilizadora Los Berros, la cual recibe agua enviada desde la PB6.

A la presa Villa Victoria llegan los aportes de los ríos San Diego, la Compañía, el Ramal y el Molino. Los escurrimientos regulados se envían hacia la Planta Potabilizadora Los Berros y sus derrames van a la presa Chilesdo. El volumen útil de la presa es de alrededor de 155 hm³.

Actualmente no existe un protocolo de Operación del Sistema de presas de almacenamiento y el sistema se opera procurando entregar un gasto promedio anual de alrededor de 15 m³/s. El Sistema de Aguas de la Ciudad

de México (SACMEX) y la Comisión de Agua del Estado de México (CAEM), organismos operadores de la Ciudad de México y del Estado de México, respectivamente, han solicitado a la CONAGUA modificar la política de operación de tal manera que el Sistema Cutzamala envíe más agua a estas dos entidades federativas en la época de estiaje, incremento que podrá ser compensado en la época de lluvias.

Considerando además que el promedio histórico, medio anual, de los derrames de las presas de almacenamiento Villa Victoria, Valle de Bravo y el Bosque ha sido de 0.9 m³/s, y que en la presa Tuxpan llegaron a ser en 2013 de 1.4 m³/s y de 3.5 m³/s en 2014, debido al incremento de escurrimientos a través del río Zitácuaro por las precipitaciones en su cuenca alta, por lo que se derivó menos agua hacia la presa El Bosque, se propone elaborar un protocolo de operación para decidir las extracciones mensuales de las presas de almacenamiento del Sistema Cutzamala en función del almacenamiento disponible, por ejemplo al 1 de noviembre, al mismo tiempo de manejar las extracciones de los acuíferos del Valle de México parando pozos cuando las presas están llenas o usando más agua de pozos cuando de las presas deba reducirse la extracción.

Debido a que las presas derivadoras tienen poco margen de operación, se propone elaborar, en una primera etapa, un protocolo que indique la extracción anual programada de cada una de las 3 presas de almacenamiento en función del almacenamiento disponible en cada una de ellas al final de la época de lluvias, y ajustar la extracción mensual de cada una de ellas tomando en cuenta la distribución mensual de las aportaciones por lluvia a cada una. (OCAVM,2020, SACMEX,2020).

3.5. Recopilación y análisis de la información

Con objeto de simular el funcionamiento del sistema Cutzamala para el abastecimiento de agua al valle de México se realizó la estimación de las aportaciones netas, es decir restando el agua utilizada para otros usos como el riego a las presas derivadoras (aportaciones que se considerarán independientes de la política de operación), y después los ingresos históricos a las presas de almacenamiento de El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria. El procedimiento utilizado para estas estimaciones se describe en seguida.

3.5.1. Presas derivadoras

El aporte por cuenca propia de Colorines menos los gastos utilizados para otros usos dan como resultado la estimación de las aportaciones netas históricas de las presas derivadoras, la cual se hizo a partir de información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y la Gerencia de aguas del valle de México. Con la información proporcionada se logró tener la estimación de aportaciones netas diarias, como se describe a continuación:

a) Estimación de las aportaciones netas diarias de las derivadoras situadas entre El Bosque y las plantas de bombeo 2, 3 y 4 (Colorines e Ixtapan del Oro).

Para estimar las aportaciones netas de la cuenca propia de Colorines e Ixtapan del Oro se considera que cuando la extracción de Colorines es mayor a lo bombeado en las plantas 2,3 y 4, significa que hubo un trasvase en Valle de Bravo y se representa como una extracción negativa, con lo cual se estiman los ingresos (anti-funcionamiento).

Por lo antes mencionado se determinó realizar la estimación de las aportaciones de la cuenca propia de Colorines e Ixtapan del Oro, en una primera aproximación, como la diferencia entre las extracciones de Colorines menos las de El Bosque.

Se contabilizaron los gastos enviados a Valle de Bravo desde Colorines que ocurrieron cuando los bombeos en las plantas 2, 3 y 4 fueron menores que las extracciones de Colorines; para este caso dicho gastos se estimaron como la diferencia entre lo bombeado en las plantas menos las salidas de Colorines, por lo que resultan extracciones negativas. El resultado obtenido debe coincidir con las extracciones negativas reportados en los estadísticos de la presa Valle de Bravo. Esta estimación permitió conocer las aportaciones netas de la cuenca propia de las derivadoras Colorines e Ixtapan.

b) Aportaciones diarias estimadas para las derivadoras Chilesdo y El Barraje

Para estimar estas aportaciones se calcularon primero las llegadas a la planta potabilizadora Los Berros como la suma de las aportaciones de las plantas de bombeo 2, 3 y 4 más las extracciones desde Villa Victoria y Chilesdo. Por otra parte, se cuenta con el registro de los envíos hacia el Valle de México en la planta de bombeo 5 (PB 5). Considerando los datos antes mencionados, se estimó la diferencia de lo que llegó a Los Berros y lo que salió de la PB 5, lo estimado permitió una primera estimación de las pérdidas en Los Berros.

Los operadores, sugirieron que para una estimación más estable de lo que se pierde en Los Berros, se puede considerar un valor constante de 500 l/s. Tomando el valor sugerido, se recalcularon las entradas a Los Berros como lo bombeado en la PB5 más 0.5 m³/s, y al resultado obtenido se restó las aportaciones de las PB 2, 3 y 4 más Villa Victoria más Chilesdo, obteniendo como estimación final las aportaciones de la cuenca propia adicionales a las de Chilesdo, atribuyéndolos a El Barraje.

3.5.2. Verificación 1

Para tener la certeza de que lo estimado en el apartado anterior correspondiente a las aportaciones netas se realizó una primera verificación, que a continuación se describe:

El procedimiento de estimación de las aportaciones históricas de las presas derivadoras permitirá evaluar distintas políticas de operación de las presas de almacenamiento a partir de una base de ingresos común. En particular, para reproducir la operación histórica, dicho procedimiento se verifica, por un lado, que los gastos bombeados a las plantas 2, 3 y 4 sean iguales a las aportaciones desde El Bosque más las de Valle de Bravo más las estimadas para la cuenca propia de Colorines e Ixtapan del Oro menos lo que se envió a Valle de Bravo.

En la figura 3.2 se muestra la verificación 1 correspondiente a los valores diarios de diciembre de 1999 (con línea azul los gastos bombeados a las plantas 2,3 y 4, con la línea punteada naranja los valores estimados con salidas El B+ salidas V de B+aportac derivadoras-entradas a V de B). Se observan pequeñas diferencias los días 23, 25 y 26; en el primer caso (día 23) se estimó que de Colorines se envió un gasto de 1.66 m³/s a Valle de Bravo, de manera que la diferencia (0.5m³/s) hubiera sido de 2.16 m³/s si no se hubiera considerado el gasto que se mandó a Valle de Bravo; en el caso de los días 25 y 26 no se derivó ningún gasto a Valle de Bravo, por lo que las diferencias (0.6 y 0.3 m³/s, respectivamente) no son atribuibles al procedimiento de estimación

utilizado.

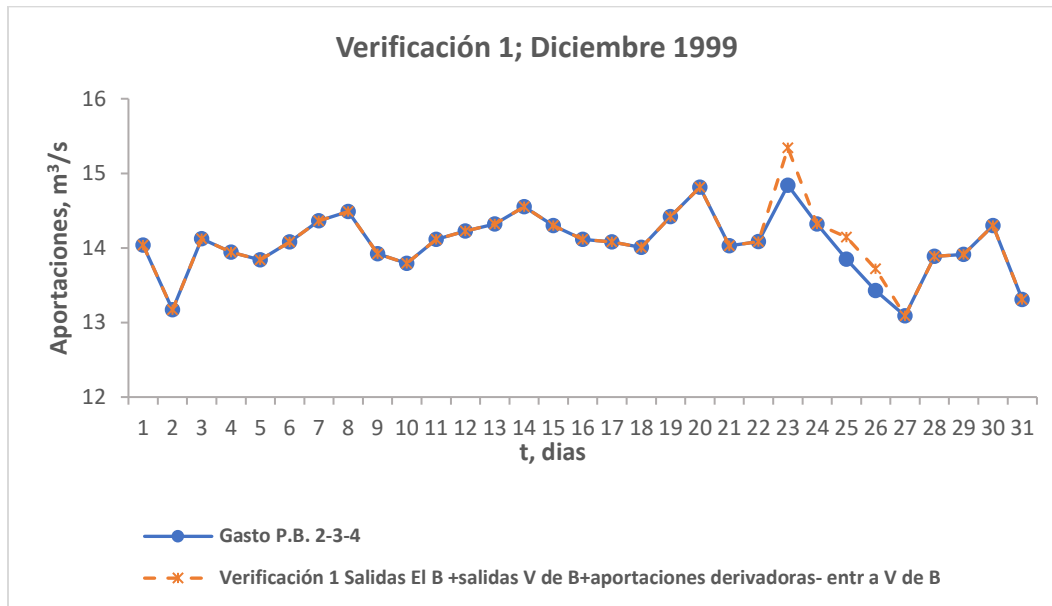


Figura 3.2. Verificación 1 de gastos medios mensuales y medio anual 1999

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.3 se muestra la misma comparación, pero analizando el mes de noviembre de 1999. Se observa que de no haber descontado el gasto derivado a Valle de Bravo las diferencias serían mayores.

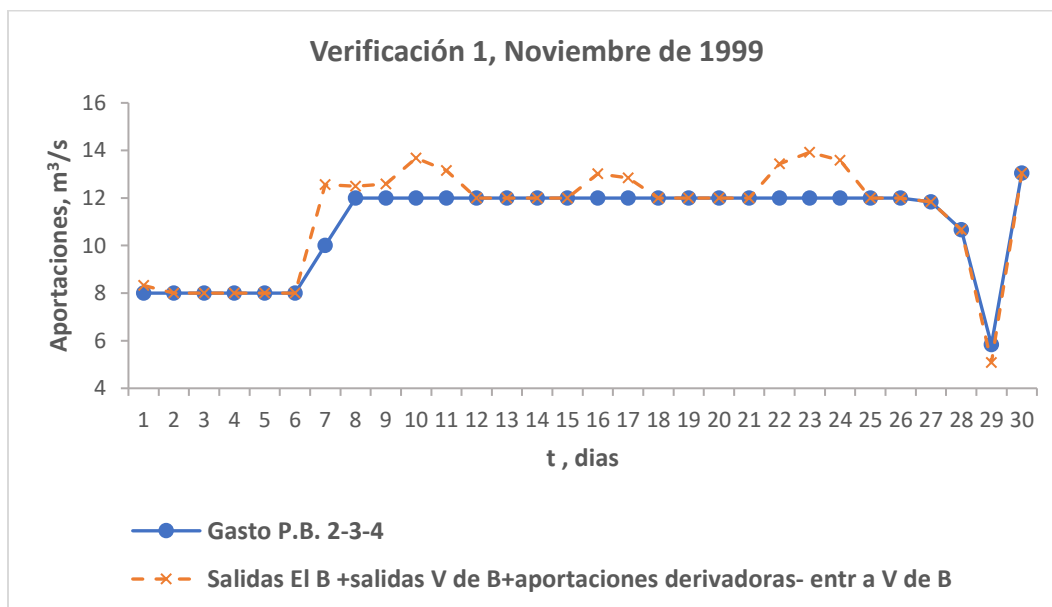


Figura 3.3. Verificación de los valores diarios de noviembre de 1999. Presas derivadoras. Sistema Cutzamala.

Fuente: Elaboración propia

En resumen, para los gastos medios de los 12 meses de 1999, la verificación 1 da como resultado la figura 3.4, en la que se observa que la única diferencia significativa de 0.57 m³/s ocurre precisamente en noviembre.

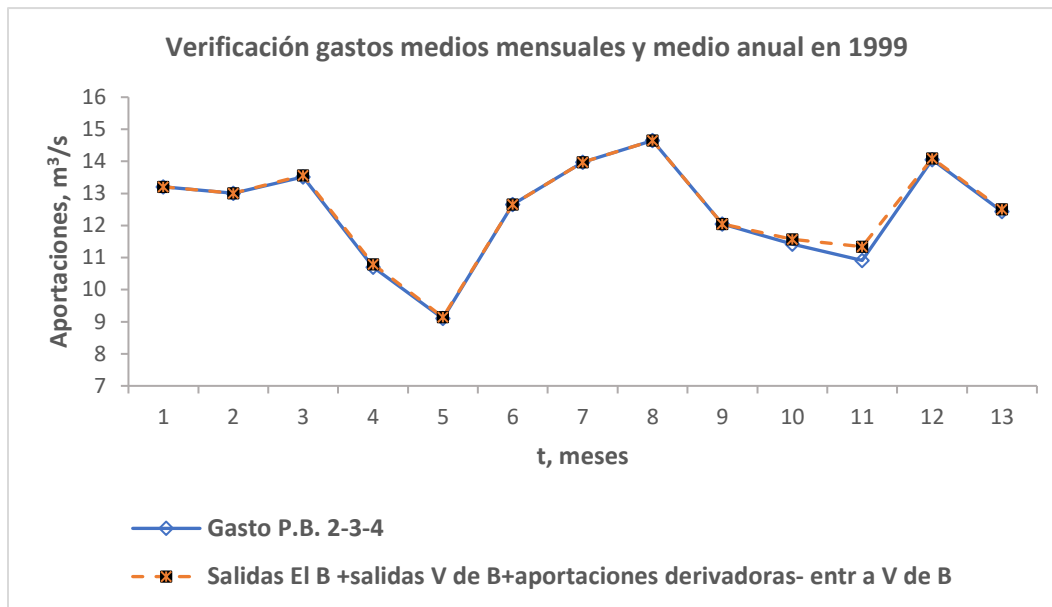


Figura 3.4. Verificación 1 de gastos medios mensuales y medio anual 1999.

Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Verificación 2

Por otra parte, para los gastos medios estimados para las derivadoras de Chilesdo y El Barraje, la verificación se realizó contrastando los valores de la PB5 (línea naranja punteada en figura 3.5) contra la suma de lo entregado por las PB 2, 3 y 4 más la aportación de Villa Victoria más la aportación deducida para Chilesdo y El Barraje, menos 0.5 m³/s (Línea azul en la figura 3.5) a lo que se llamó verificación 2.

En la figura 3.5 se muestra que los gastos registrados en la PB 5 son idénticos a los calculados.

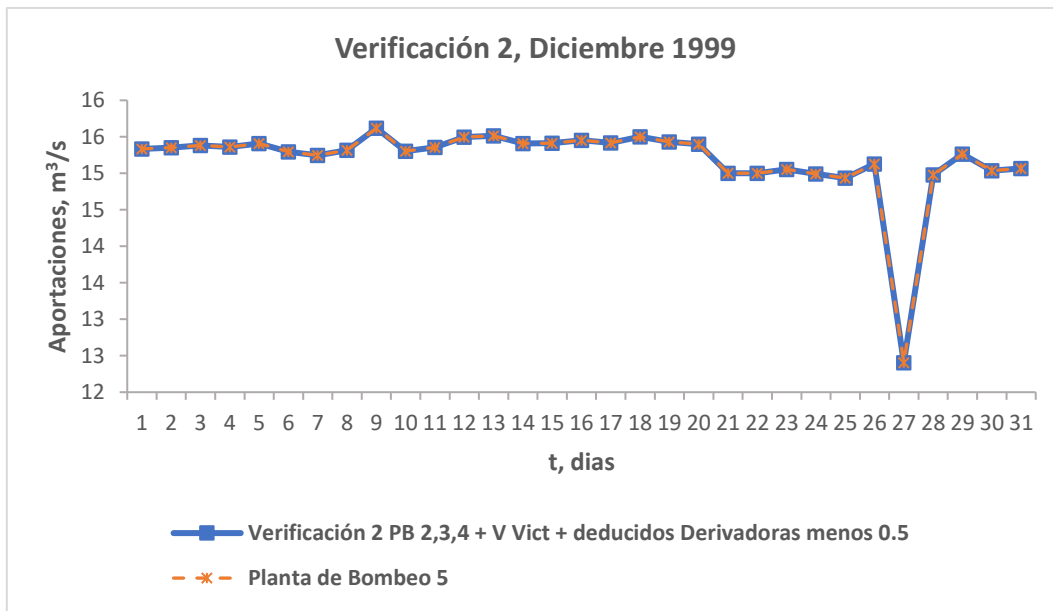


Figura 3.5. Verificación segunda muestra

Fuente: Elaboración propia

3.6. Ingresos diarios a las presas de almacenamiento

Los ingresos diarios a las presas El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria se calcularon a partir de la ecuación de continuidad, es decir que, para cada día el volumen de ingreso es igual al cambio en el almacenamiento más el volumen de salida.

En ocasiones, probablemente debido a la imprecisión en las medidas de las elevaciones en el vaso, que se traducen en volúmenes almacenados, al aplicar la ecuación de continuidad se obtienen ingresos negativos. Dado que no debe haber ingresos negativos, frecuentemente se recurre a que cuando esto ocurre se asignan valores iguales a 0 a los ingresos; sin embargo, esta práctica se traduce en una sobreestimación de los ingresos a un mayor plazo (por ejemplo, mensuales), por lo que en este trabajo se decidió conservar los valores diarios de los ingresos que se obtienen al aplicar la ecuación de continuidad, aunque resulten negativos.

En el caso de Valle de Bravo, sus ingresos, además de los de cuenca propia, en algunas ocasiones provienen de envíos desde Colorines; en esas ocasiones se realizó el ajuste correspondiente para obtener los ingresos históricos por cuenca propia que serán utilizados al simular las distintas alternativas de políticas de operación.

3.7. Resultados del análisis de datos

3.7.1. Aportaciones netas de las derivadoras

En la figura 3.6 se muestran los valores estimados de las aportaciones netas mensuales en el lapso de 1999 al 2018; por una parte, se manejan las presas derivadoras ubicadas entre el Bosque y Colorines (es decir, Ixtapan del Oro y Colorines), y por otra las situadas aguas abajo de Colorines (es decir, Chilesdo y El Barraje).

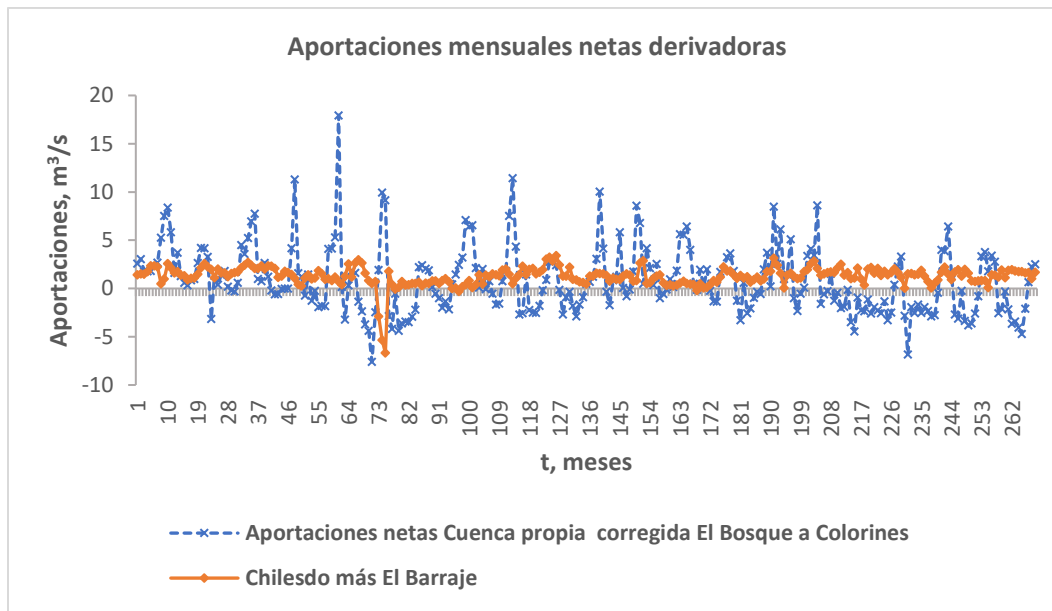


Figura 3.6. Valores estimados de aportaciones netas de presas derivadoras

Fuente: Elaboración propia

Se aprecian algunos valores negativos grandes que se verificaron y se encontró que posiblemente se deban a derrames de las presas de almacenamiento que fueron registrados como aportaciones; de hecho, al limitar las aportaciones de Villa Victoria a 8.5 m³/s, los valores negativos de Chilesdo y el Barraje se modifican, como se muestra en la figura 3.7 para los años de 2003 y 2004 y para todo el periodo en la figura 3.8.

En seguida se resumen los cálculos realizados para estimar las aportaciones a las derivadoras y a las presas de almacenamiento.

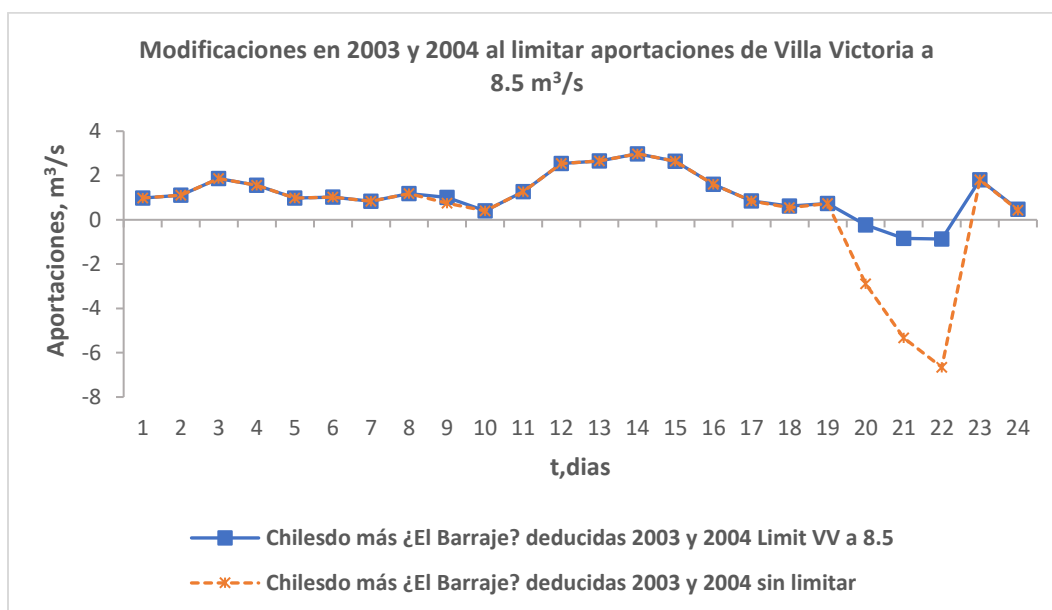


Figura 3.7. Efectos en Chilesdo más el Barraje al limitar aportaciones en Villa Victoria 2003 y 2004

Fuente: Elaboración propia

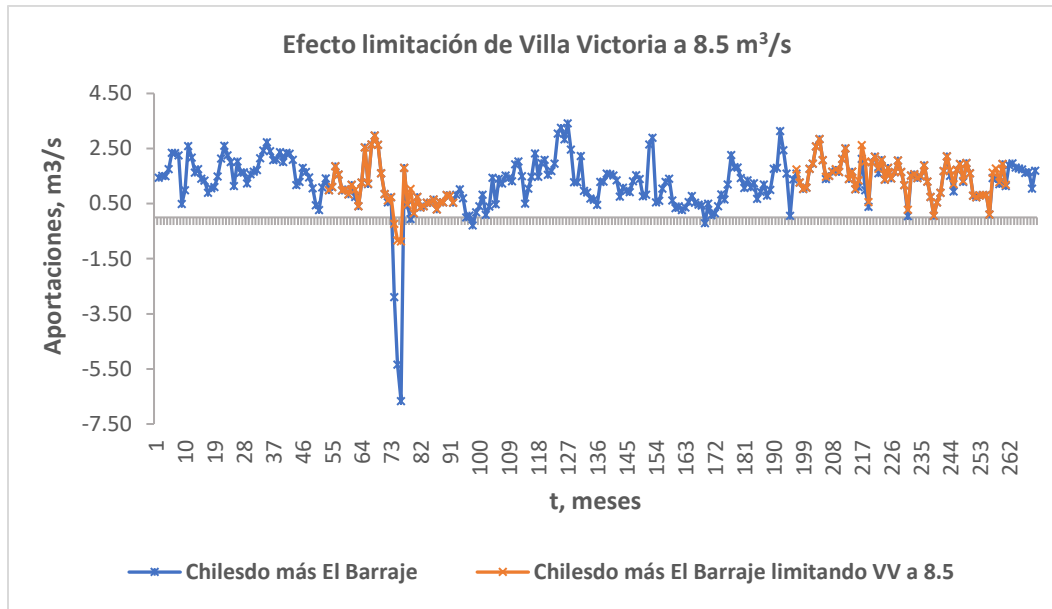


Figura 3.8. Efectos en Chilesdo más el Barraje al limitar aportaciones en Villa Victoria todo el periodo

Fuente: Elaboración propia

La estimación de las aportaciones diarias a las presas derivadoras Colorines e Ixtapan del Oro se obtiene al restar la extracción diaria en m³/s de la derivadora Colorines menos las extracciones diarias de la presa El Bosque (ec.3.1).

$$Q_{col+ixt} = Q_{colorines} - Q_{El\ Bosque} \quad (3.1)$$

El gasto calculado se corrige solo si la aportación de la derivadora Colorines rebasa al gasto reportado en la planta de bombeo (P.B. 2-3-4); en ese caso, se obtiene la diferencia de dichos gastos y el resultado se resta a la aportación de las derivadoras calculada originalmente (ec. 3.2).

$$\begin{aligned} & \text{if } \left((Q_{P.B.2,3,4} < 0), (Q_{col+ixt(Corregida)} = Q_{col+ixt} - (Q_{P.B.2,3,4} - Q_{Colorines})) \right) \\ & \text{else } (Q_{col+ixt(Corregida)} = Q_{col+ixt}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.7.2. Aportaciones por cuenca propia de las derivadoras Chilesdo más El Barraje

La estimación de las aportaciones diarias de las derivadoras Chilesdo y El Barraje se obtiene de sumar la extracción reportada diariamente en m³/s de la derivadora Chilesdo más las extracciones deducidas diariamente en m³/s de la derivadora El Barraje (ec. 3.3).

$$Q_{chil+Barr} = Q_{chil} + Q_{Barraje\ deducido} \quad (3.3)$$

Las aportaciones de la derivadora El Barraje ($Q_{Barraje}$), se estimaron como la diferencia del gasto diario corregido en m^3/s de entrada a la planta de Los Berros, menos la suma del gasto que llega de las PB 2,3,4 más el gasto de las presas Chilesdo y Villa Victoria (ec. 3.4).

$$Q_{Barraje} = Q_{Los\ Berros\ (corregido)} - (Q_{P.B.2,3,4} + Q_{chil} + Q_{V.Victoria}) \quad (3.4)$$

La aportación a la planta los Berros se corrigió, de acuerdo con los comentarios de los operadores, sumando un gasto de $0.5 m^3/s$ al caudal reportado como $Q_{P.B.5}$. (ec. 3.5).

$$Q_{Los\ Berros\ (corregido)} = Q_{P.B.5} + 0.5 \quad (3.5)$$

Los gastos medios mensuales de cada conjunto de derivadoras se calculan como el promedio de los gastos diarios en m^3/s ocurridos durante cada mes (ec. 3.6).

$$Q_{mensual} = \bar{Q}_{diario} = \frac{\sum Q_{diario}}{n} \quad (3.6)$$

Donde n es el número de días al mes.

Los volúmenes mensuales, en hm^3 , de ingreso a cada conjunto de derivadoras se calculan mediante la (ec. 3.7).

$$V_{mensual} = \frac{Q_{mensual} * n * 86400}{1000000} \quad (3.7)$$

Donde n es el número de días al mes.

3.8. Ingresos a las presas de almacenamiento

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), brindó un reporte del funcionamiento de las presas de almacenamiento del sistema Cutzamala correspondiente al 31 de enero de 1996 al 31 de agosto del 2019,

En el reporte mencionado se analizó los ingresos mensuales deducidos para las presas de almacenamiento, en el lapso de 1996 a 2019, en hm^3 , en la figura 3.9 se observa la evolución de los ingresos correspondiente a la fecha mencionada.

Se obtuvieron los ingresos de Valle de Bravo aplicando la ecuación de continuidad, reportada en la figura 3.9 como "Valle de Bravo entradas totales", a los ingresos totales se restó lo enviado a Colorines, denominado "Valle de Bravo corregidos" en la misma figura.

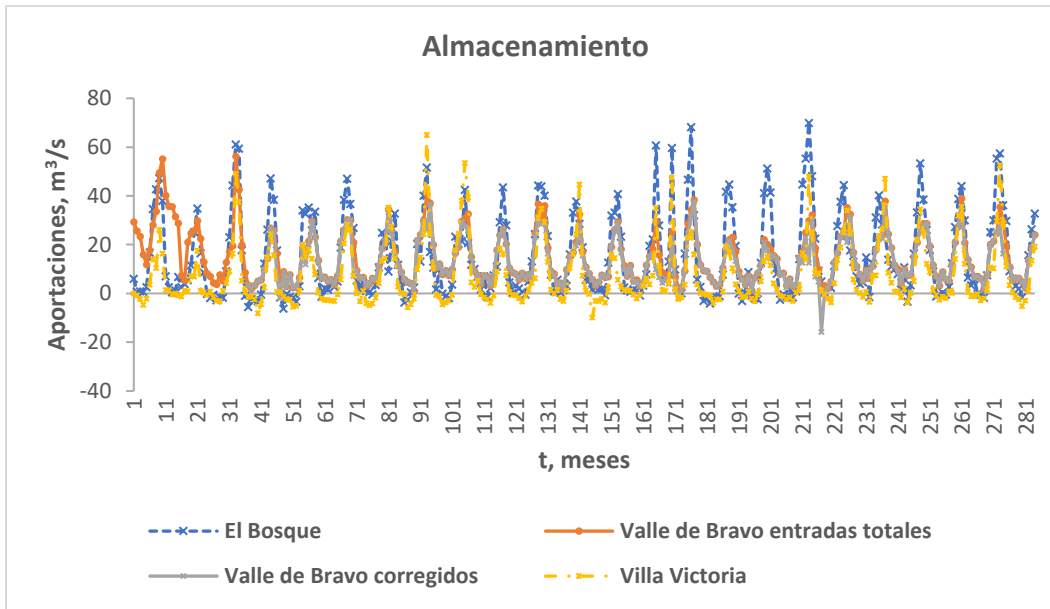


Figura 3.9. Ingresos mensuales deducidos para las presas de almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en las figuras (3.10 a 3.12) se muestra de manera individual los valores estimados para los ingresos mensuales por cuenca propia de cada una de las presas de almacenamiento.

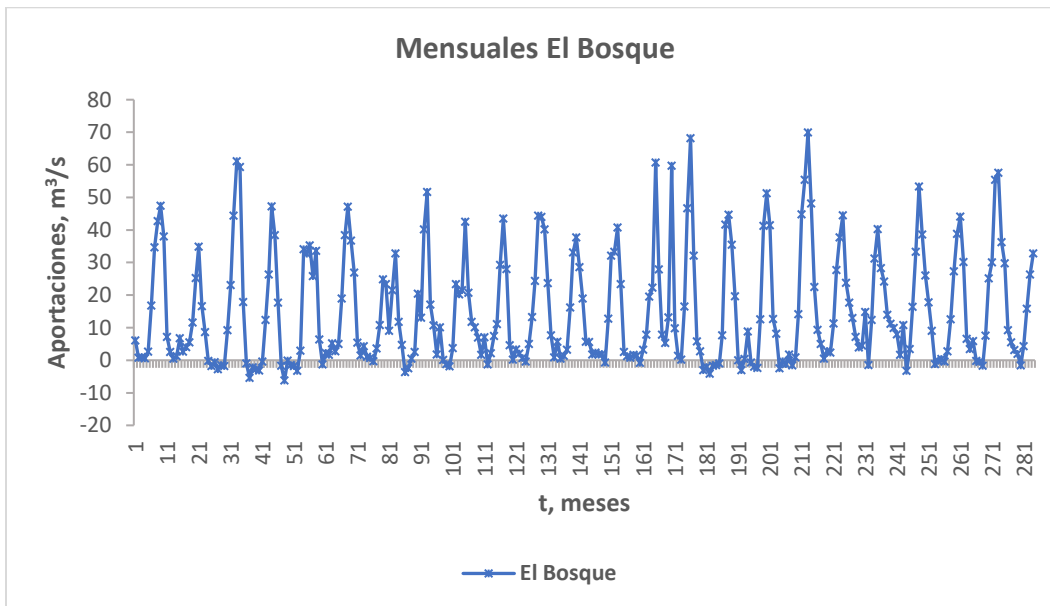


Figura 3.10. Ingresos mensuales deducidos para la presa El Bosque

Fuente: Elaboración propia

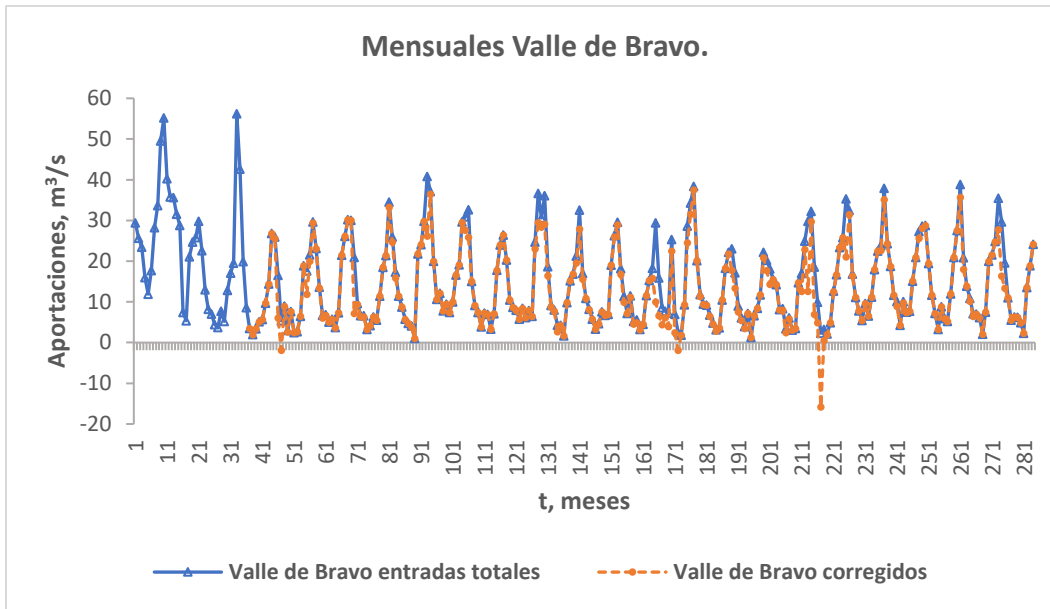


Figura 3.11. Ingresos mensuales deducidos para la presa Valle de Bravo.

Fuente: Elaboración propia

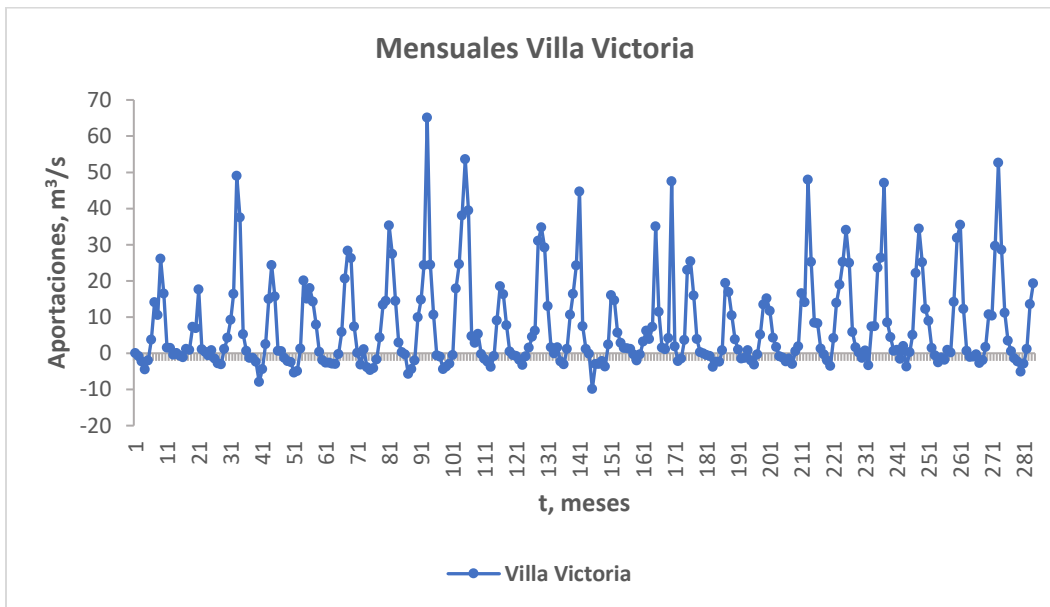


Figura 3.12. Ingresos mensuales deducidos para la presa Villa Victoria.

Fuente: Elaboración propia

3.9. Datos generales considerados en la simulación

En la tabla 3.2 se reportan los principales niveles y capacidades de almacenamiento de las presas del Sistema Cutzamala.

Tabla 3.2. Niveles y capacidades presas principales del Sistema Cutzamala (Acuña,2014)

Presa	Muerta	NAMINO	NAMO	NAME
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	30	60	202.40	250.50
Valle de Bravo	25	50	394.39	458.00
Villa Victoria	20	30	185.73	252.03

En la tabla 3.3 se presenta la lámina de evaporación mensual neta en mm y en la figura 3.13 se presenta la evolución de la evaporación mensual neta (valor promedio obtenido con los datos mensuales reportados entre 1994 y 2012, Acuña,2014)

Tabla 3.3. Lámina de evaporación mensual neta, en mm en las presas principales del Sistema Cutzamala (Acuña,2014)

Mes	El Bosque	Valle de Bravo	Villa Victoria
ENE	3.27	2.97	1.75
FEB	3.08	4.24	2.72
MAR	6.08	6.20	4.56
ABR	7.95	6.64	4.32
MAY	6.07	5.06	2.66
JUN	-0.21	-1.52	-1.65
JUL	-3.15	-2.28	-2.80
AGO	-4.48	-3.15	-2.19
SEP	-1.85	-2.74	-1.71
OCT	1.45	0.87	1.16
NOV	2.46	2.45	1.89
DIC	2.91	2.59	1.70

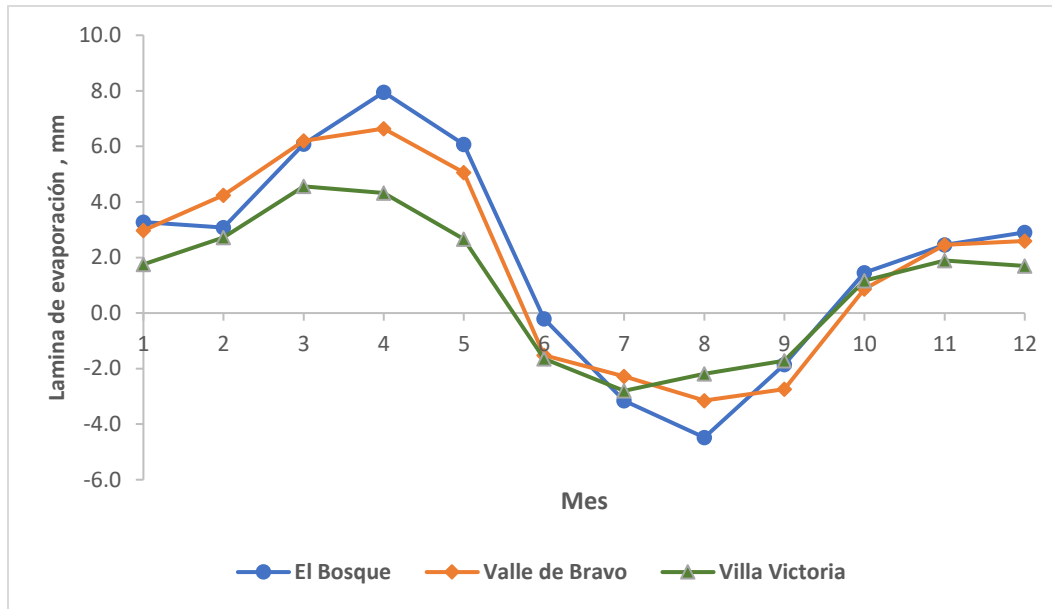


Figura 3.13. Lamina de evaporación de las presas del Sistema Cutzamala

Fuente: Elaboración propia

En las tablas 3.4 a 3.6 se presentan las curvas elevaciones-capacidades-áreas de las presas principales del Sistema Cutzamala.

Tabla 3.4. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa El Bosque, (Acuña,2014)

Elevaciones msnm	Capacidades hm ³	Áreas ha
1724.77	60.00	621.36
1728.94	88.46	712.33
1732.66	116.95	799.85
1735.70	145.46	868.25
1738.71	173.90	942.75
1741.40	202.40	994.25
1742.25	212.18	1005.94
1743.07	221.61	1017.21
1743.91	231.27	1028.76
1744.74	240.81	1040.18
1745.59	250.59	1051.86

Tabla 3.5. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa Valle de Bravo, (Acuña,2014)

Elevaciones	Capacidades	Áreas
msnm	hm ³	ha
1806.83	49.97	966.40
1812.82	118.86	1316.90
1817.38	187.69	1501.40
1821.79	256.53	1619.80
1826.06	325.35	1739.00
1830.00	394.39	1871.00
1830.71	407.16	1892.30
1831.41	419.76	1913.30
1832.12	432.54	1934.60
1832.82	445.14	1955.60
1833.54	458.10	1977.20

Tabla 3.6. Curva elevaciones-capacidades-áreas. Presa Villa Victoria, (Acuña,2014)

Elevaciones	Capacidades	Áreas
msnm	hm ³	ha
2598.21	30.02	1221.9
2600.32	61.13	1770
2601.89	92.27	2203.3
2603.21	123.32	2488
2604.4	154.42	2730.3
2605.5	185.73	3057.8
2605.94	198.76	3216.4
2606.39	212.08	3378.4
2606.84	225.4	3540.4
2607.29	238.72	3702.4
2607.74	252.04	3864.4

4. Metodología

4.1. Métodos de optimización

Los problemas de optimización buscan maximizar o minimizar los valores resultantes de funciones reales que retratan ciertos sistemas o procesos, para conseguirlo se han creado y aplicado diferentes métodos y técnicas, que aportan rapidez y eficacia.

Existen distintos métodos de optimización, desde técnicas tradicionales como la programación lineal, programación dinámica, hasta métodos recientes como la optimización global, algoritmos genéticos, redes neuronales, etc.

De los métodos mencionados, en este trabajo se aplicó programación dinámica, técnica que permite determinar de manera eficiente la secuencia de decisiones que optimizan el comportamiento de un sistema que evoluciona a lo largo de una serie de etapas.

Los primeros avances en optimización son tratados en el cálculo diferencial e integral, cuyos campos fueron estudiados por numerosos matemáticos a lo largo de la historia, sin embargo, fue George. B. Dantzig, el precursor directo de la optimización de funciones lineales aplicando para tal efecto la programación lineal.

Más tarde, el matemático Richard Bellman y G. B. Dantzig, desarrollarían la programación dinámica, conocida en aquel entonces como programación lineal estocástica. Bellman publicó sus resultados en el primer libro sobre el tema: el "Dynamic Programming" en 1957.

"La programación dinámica está asociada a situaciones de evolución de un sistema a lo largo de varias etapas, de ahí el nombre de dinámica" (Arallely, 2010, p. 31),

De acuerdo con la forma en la que el sistema evoluciona a lo largo del tiempo se pueden establecer 2 grandes vertientes de la programación dinámica:

1. La programación dinámica determinística, que se aplica a procesos cuyos cambios a través del tiempo se conocen con certeza.
2. La programación dinámica estocástica, aplicable a sistemas que evolucionan de acuerdo con leyes de probabilidad conocidas.

4.1.1. El problema de programación dinámica

Se describen los elementos básicos que forman parte de la formulación de un problema de programación dinámica. En particular, se está enfocando a un problema cuyo número de etapas es finito y el tiempo es discreto. El planteamiento que se presenta está basado en una de las referencias básicas cuando se habla de programación dinámica, escrita por el matemático (Bertsekas, 1995.).

4.1.1.1. Ecuación de transformación de estados

$$x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k) \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (4.1)$$

Donde:

k: es el índice para el tiempo y representa una etapa. Una etapa es un momento en el cual se debe tomar una decisión. El problema original es dividido en subproblemas resueltos en N etapas.

x_k : estado del sistema. Resume la información pasada que es relevante para la futura optimización. Los estados son las condiciones posibles en las que se puede encontrar el sistema en determinada etapa, además representa la conexión entre etapas. Así, cuando se optimiza independientemente cada etapa, la decisión será factible para el problema completo (más adelante definido como 'principio de optimalidad').

u_k : variable de decisión, control o alternativa seleccionada en la etapa k. Se debe tener un panorama de las posibilidades de decisión en cada etapa y el beneficio asociado a cada alternativa.

w_k : parámetro aleatorio (perturbación o ruido), representa la incertidumbre (usado en programación dinámica estocástica.)

N: horizonte de tiempo (veces que el control es aplicado).

La función definida en (4.1) muestra que el estado actual del sistema depende del estado precedente y cambia con base en la decisión e incertidumbre. Esta función también es conocida como la ecuación de transformación de estados.

4.1.1.2. Función de costo

La función de costo es el segundo elemento de un problema de programación dinámica. Esta función es fundamental pues proporciona el valor del sistema en la etapa k dado el estado en el que se encuentra el sistema, la decisión tomada y el elemento aleatorio. Esta función es la herramienta que ayuda a construir la función de recursión para el algoritmo de programación dinámica.

El costo en que se incurre en el tiempo k está en función del estado del sistema, la alternativa seleccionada y el parámetro aleatorio. En general, el costo será aleatorio debido a que la perturbación w_k es una variable aleatoria. Este es denotado por (ec. 4.2.):

$$g_k(x_k, u_k, w_k) \quad (4.2)$$

Si la función de costo tiene la propiedad de ser aditiva, es decir, el costo en que se incurre en cada etapa k se acumula con el tiempo, entonces el costo total del problema al final de todas las etapas es (ec. 4.3):

$$g_N(x_n) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \tag{4.3}$$

La expresión $g_N(x_n)$ hace referencia a la condición frontera, es decir, el costo incurrido al final del proceso.

En realidad, puesto que interviene el azar, se optimiza el costo esperado; es decir, la esperanza matemática del costo total definido en (ec. 4.3):

$$E \left[g_N(x_n) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k, w_k) \right] \tag{4.4}$$

La esperanza es calculada con respecto a la distribución conjunta de las variables involucradas: el estado del sistema, la decisión y la variable de incertidumbre. La optimización es sobre las variables u_k , para $k = 0, 1, \dots, N - 1$; estas son seleccionadas con algún conocimiento del estado actual x_k .

La figura 4.1 muestra la representación gráfica de cada una de las etapas del problema y el planteamiento de este. En cada etapa las variables de entrada (inputs) son: el estado del sistema (x_k), con base en el cual se elige la alternativa o decisión (u_k) e interviene un parámetro aleatorio (w_k). La interacción de estas variables produce un costo $g_k(x_k, u_k, w_k)$ y un estado del sistema para la etapa posterior determinado por el sistema dinámico (ec. 4.1); estas últimas son las variables de salida.

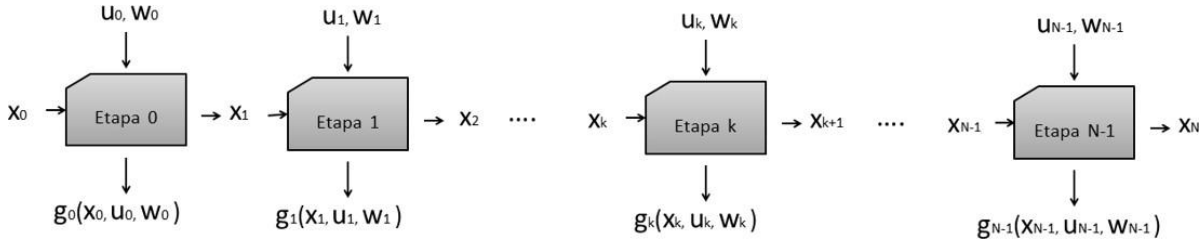


Figura 4.1. Representación gráfica del planteamiento del problema.

Fuente: (Bautista Chávez,2005)

Es importante enfatizar que, si bien en este planteamiento las etapas son indexadas por k empezando en 0 y terminando en $N - 1$ ($k = 0, 1, \dots, N - 1$), en algunas ocasiones por el contexto y para un mejor manejo del problema las etapas se indexarán de la forma $k = 1, 2, \dots, N$. Esta particularidad se ejemplifica más adelante.

Hasta ahora, se tienen los elementos básicos para un problema donde el horizonte es finito y el tiempo es discreto; uno de ellos es la variable u_k , definida como la variable de decisión. El objetivo del algoritmo de programación dinámica es minimizar el costo total (ec. 4.3) y esto se logra a través de la correcta selección de $\{u_k\}$. Es sobre estas variables sobre las cuales se tiene control en cada una de las etapas ya que las demás entradas son aleatorias, o bien, están en función de otras variables.

Por lo anterior, se reafirma que la selección de $\{u_k\}$ determinará la optimalidad de la solución del problema. La forma en la que se realiza tal selección se aborda en la siguiente sección.

4.1.1.3. Políticas de selección

Como se ha mencionado anteriormente, las decisiones son tomadas por etapas, por lo que la información que se reúne entre las demás etapas es útil para que las decisiones sean de mejor calidad, es decir, entre más información se tenga la decisión tomada será más robusta. Esto es, la selección de la variable u_k se pospone hasta el último momento posible, es decir, se toma una decisión cuando se conoce el estado actual del sistema x_k .

Lo que se busca es establecer reglas para seleccionar u_k para cada valor posible de x_k y en cada etapa k , para $k = 0, 1, \dots, N - 1$. Matemáticamente lo que se plantea es buscar una función que determine la decisión que debe tomarse en una etapa, teniendo como parámetro el estado del sistema de la etapa de interés.

Con el objetivo de determinar las reglas de decisión, se define a μ_k como la función que asigna el valor u_k a cada x_k posible, estas son llamadas políticas admisibles (4.4)

$$\mu_k(x_k) = u_k$$

Donde:

$\mu_k(x_k)$: decisión que debe tomarse en el tiempo k si el estado del sistema es x_k .

Una vez que se ha determinado la decisión óptima, es decir, la que otorga el máximo beneficio o minimiza los costos, esta se denota por $\mu_k^*(x_k)$.

Se define además la política o ley de control para el sistema completo, denotado por $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \dots, \mu_{N-1}\}$, como el conjunto de decisiones realizadas a lo largo del problema. Cada π tiene un costo asociado, determinado por un valor inicial del sistema x_0 , es denotado por $J(x_0)$ y se define como sigue con base en (ec. 4.4):

$$J_\pi(x_0) = E \left[g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k), w_k) \right] \quad (4.5)$$

Así, la finalidad es minimizar el valor de $J(x_0)$ sobre toda π que satisfaga las condiciones del problema.

4.1.1.4. El problema básico

El problema general que se plantea es aquel en el que las decisiones son tomadas bajo incertidumbre estocástica sobre un número finito de etapas. En cada uno de los problemas, los elementos necesarios para obtener la solución, con base en la programación dinámica, son los siguientes:

- **Etapas:** k .
- **Estados:** x_k .
- **Decisiones:** u_k .
- **Ecuación de transformación de estados:** $x_{k+1} = f_k(x_k, u_k, w_k)$.

- **Parámetros aleatorios independientes con distribución de probabilidad conocida:** w_k .
- **Restricciones de la variable de control** u_k .
- **El costo acumulado:** $E \left[g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k), w_k) \right]$
- **Optimización** sobre políticas, reglas para seleccionar: u_k en la etapa k y para cada x_k posible.

4.2. Algoritmo de programación dinámica

En esta sección se describirá el algoritmo general que sigue la programación dinámica para encontrar la solución óptima en un problema finito de tiempo discreto, como se ha descrito anteriormente. Al inicio se enuncia el principio de optimalidad, el cual es fundamental en la técnica que se está estudiando.

4.2.1. Principio de optimalidad

El principio de optimalidad dice que, dado un estado del sistema, la decisión óptima para cada una de las etapas restantes es independientemente de los estados previamente alcanzados o las decisiones tomadas (Winston, 2004.) , es decir, la política óptima para las siguientes etapas no depende de la política utilizada en las etapas anteriores. Además, una vez que se conoce la solución óptima de un problema es posible conocer la solución óptima para cualquier subproblema.

Matemáticamente el principio de optimalidad es como sigue:

Sea $\pi^* = \{\mu_0^*, \mu_1^*, \dots, \mu_{N-1}^*\}$ una política óptima para el problema básico, suponemos que cuando usamos π^* un estado x_i ocurre al tiempo i con probabilidad positiva.

Se considera el subproblema en el que nos encontramos en el estado x_i en el tiempo i : El objetivo es minimizar el costo de transitar del tiempo i al tiempo N ; este costo está dado por (ec. 4.6):

$$E \left[g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k(x_k), w_k) \right] \quad (4.6)$$

Entonces, lo que dicta el principio de optimalidad es que la política truncada $\mu_i^*, \mu_{i+1}^*, \dots, \mu_{N-1}^*$ es óptima para este subproblema.

El principio sugiere que la política óptima puede ser construida paso a paso, es decir, construir primero la política óptima para la "cola" del subproblema, es decir, la última etapa, luego se extenderá a las 2 últimas etapas y así sucesivamente hasta que la política óptima esté construida para el problema completo. Es aquí donde la función de recursión es construida, de manera que se pueda encontrar la solución óptima al subproblema a partir de ella, (Bautista Chávez,2005).

Es importante mencionar que existen trabajos que trabajan de manera conjunta con otras metodologías, ejemplo de ello es el objetivo de las políticas de operación para obtener un mejor aprovechamiento hidráulico, es por esa razón que para los intereses de esta tesis se desarrolla una política óptima con ayuda de los algoritmos genéticos, que es una metodología que tiene gran aplicación científica en el campo de los algoritmos evolutivos.

4.3. Algoritmos evolutivos

Debido a los diversos problemas de búsqueda y optimización encontrados en las investigaciones y proyectos adelantados en los últimos tiempos, se han generado diferentes herramientas para facilitar su estudio y análisis. En la rama de desarrollo y optimización de problemas, entre algunas de estas soluciones se encuentran los algoritmos evolutivos (AE) y la programación lineal. Su uso depende de la relación existente entre sus variables, las cuales pueden ser lineales, caso para las cuales, en la primera opción se prefiere el uso de programación lineal, y en la segunda el uso de AE.

Los AE se basan, como su nombre lo indica, en la teoría de evolución de Darwin y los procesos de la naturaleza. Algunos de los métodos desarrollados en esta rama son la optimización de colonia de hormigas, evolución simulada, computación DNA, las estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos (AG), siendo este último método el de especial interés para este estudio.

El fundamento de la estructura de los AE es la codificación generalmente en cadenas de la solución a un problema, simulando un genotipo. Cuando este genotipo es decodificado en su solución se encuentra el fenotipo. Los genotipos se encuentran compuestos por cromosomas y cada cromosoma a su vez por genes que toman ciertos valores denominados alelos (Ossa Calderón, 2005).

4.3.1. Antecedentes de algoritmos genéticos

Para comprender que y de que trata un AG es necesario comenzar por definir que es un **algoritmo**, y en este trabajo se define a un algoritmo como una serie de instrucciones o pasos bien definidos que se llevan a cabo para dar solución a un problema y que puede ser ejecutado todas las veces que, este se presente.

Con la definición anterior es más fácil explicar que un AG es una serie de pasos o instrucciones exactas que se llevan a cabo para dar solución a problemas de búsqueda y optimización, solo que en este caso los algoritmos genéticos hacen la aplicación de los métodos de la evolución biológica, es decir seleccionan su población, la reproducen y además en algunas ocasiones utilizan mutación.

Con esto se puede observar que las reglas o principios que la naturaleza aplica la evolución de las especies pueden ser aplicadas en la resolución de diferentes problemas, y gracias a estos procedimientos se puede llegar a encontrar la solución óptima, dejando que sean los individuos más aptos los que tengas más posibilidades de sobrevivir y por lo tanto de reproducirse, y en caso de un problema matemático o computacional dejando que la mejor solución vaya abriéndose paso entre todas las demás posibles soluciones.

La definición más completa de un AG es la de (Koza, 1992):

“Es un algoritmo matemático altamente paralelo que transforma un conjunto de objetos matemáticos individuales con respecto al tiempo usando operaciones modeladas de acuerdo con el principio Darwiniano de reproducción y supervivencia del más apto, y tras haberse presentado de forma natural una serie de operaciones genéticas de entre las que destaca la recombinación sexual. Cada uno de estos objetos matemáticos suele ser una cadena de caracteres (letras o números) de longitud fija que se ajusta al modelo de las cadenas de cromosomas, y se les asocia con una cierta función matemática que refleja aptitud”, (Koza, 1992).

Los AG's son aplicados para resolver problemas muy complejos que en ocasiones no pueden ser resueltos con un simple y sencillo algoritmo. Para adentrarse un poco más en los AG's es necesario conocer cómo es que fueron descubiertos y aplicados, por lo tanto, se comenzará por decir que fue Darwin el primero en mencionar algo sobre la evolución de las especies y cómo iban heredando generación tras generación ciertos rasgos y características específicas para la mejor adaptación al medio ambiente, y la creación de nuevas y mejores especies.

Sin embargo, Darwin nunca pudo explicar a ciencia como era que las especies heredaban a sus hijos la capacidad de adaptación a un determinado medio.

Otros personajes importantes en la evolución de los AG's fueron Joh Von Newman, Alan Turing y Mendel (Bautista Chávez, 2005), este último fue quien describió que los cambios de una generación a otra de individuos son llevados a cabo gracias a la herencia del padre o de la madre, dependiendo del tipo de carácter (dominante o recesivo), con esto podemos ver que la herencia se va dando de manera discreta en los individuos. A estos caracteres que se heredaban y que en ocasiones cambiaban de valor se les llaman genes y a los valores que pudieran tomar se les llaman alelos.

Otras personas relacionadas con el tema fueron Watson y Crick que descubrieron que los genes se encuentran situados dentro del ADN (ácido desoxirribonucleico).

Los personajes antes mencionados fueron los que sentaron las bases para que John Holland en la década de los 70's descubriera junto con sus colaboradores los algoritmos genéticos antes llamados “planes reproductivos”, (Goldberg, 1989).

4.3.2. Conceptos básicos

Se sabe que todos los seres vivos están constituidos por diminutas partes denominadas células, estas a su vez están constituidas por otros componentes que a continuación se explican.

Cromosomas: En términos biológicos son aquellos que transmiten la información genética, están formados por ADN y proteína. Con respecto al área de la computación los cromosomas son cadenas de caracteres binarios.

Gen: Dentro de los cromosomas encontramos los denominados genes, estos son las unidades básicas de herencia, cada gen contiene dentro de sí la información genética que es la responsable de los rasgos que caracterizan a cada persona o individuo. En computación el gen es una característica o un valor en particular del problema que pretende resolver.

Alelo: Valor contenido dentro del gen.

Genotipo: Es todo el conjunto de genes que le han sido heredados a un individuo, es decir es todo aquello que no se puede ver. Para este trabajo el genotipo será la estructura.

Fenotipo: Es el conjunto de todas las características que pueden ser observadas, mientras que para los AG's es la estructura sometida a resolver.

Individuo: Es una posible solución al problema.

Generación: serie de ciclos por los que un cierto número de individuos pasan a lo largo de su transformación.



Cromosoma

Figura 4.2. Representación de un cromosoma y sus componentes.

Fuente: (Bautista Chávez,2005)

4.3.3. Funcionamiento de los algoritmos genéticos

4.3.3.1. ¿Cómo funcionan los algoritmos genéticos?

Un AG aplica las mismas reglas que la naturaleza en la evolución de las especies esto quiere decir, que los individuos con más capacidades de adaptación hacia su entorno serán los que tengan más posibilidades de sobrevivir y por lo tanto de procrear individuos con iguales o mayores posibilidades de adaptación que ellos, este procedimiento se repite generación tras generación hasta que hay un individuo que tiene mejor adaptabilidad.

Cuando se aplica a un problema un algoritmo genético tendremos la seguridad de que si no encontramos la mejor solución al menos sabremos que encontramos una cercana a la óptima.

El funcionamiento general de un AG es el que a continuación se menciona:

- Se crea de forma aleatoria una población
- Se evalúan todos y cada uno de los individuos integrantes de la población
- A partir de la mutación y recombinación de los individuos de la población generada, es creada una nueva población.

Lo que se puede observar siguiendo este método es que cada individuo de una determinada población es en potencia la solución al problema que se desea resolver, solo que todos y cada uno de estos individuos debe ser codificado de manera adecuada al tipo y grado de complejidad que tenga el problema.

Lo que se tiene que tomar en cuenta para ejecutar un Algoritmo Genético.

Tamaño de la población a evaluar. Esta depende de la PC o computadora en la que vaya a realizar el proceso de solución del problema. El tamaño de la población tiene que ser lo suficientemente grande para poder escoger entre varias soluciones.

Condición de terminación, esta puede estar determinada por varios factores, los cuales se mencionan más adelante en el tema: Criterios de Paro en un AG, (Fox & Wait , 1986).

Cuando se pretende resolver un problema con un AG es necesario tener en cuenta que el problema debe de estar bien definido.

Para ilustrar el funcionamiento de los AG's se va a utilizar el siguiente problema:

- Minimizar la función $f(x) = x^2$
- La cual estará representada en este problema por 6 individuos con 5 genes cada uno.

4.3.3.2. Población inicial

Estará formada por cierto número de individuos y será la base mediante la cual se ejecutará por primera vez el AG.

Una forma sencilla y fácil de generar la población inicial es hacerlo al azar, para ejemplificarlo en este trabajo se hará de la siguiente forma: se toma una moneda en la cual la cara anterior representa un 1 y la cara posterior un 0. Esto se deberá hacer 5 veces para obtener el valor de todos y cada uno de los genes de cada individuo.

4.3.3.3. Condiciones de terminación en un AG

Una condición de terminación es aquella que se utiliza para saber el momento en el que un AG ha acabado con su misión, o cuando ha alcanzado la solución más cercana a la óptima.

No existe un criterio específico para terminar con el trabajo de un AG, el criterio que se utilice dependerá de la persona que lo supervisara o incluso del mismo AG, pero a continuación se representa algunas condiciones de terminación que se mencionan en el libro de (Goldberg, 1989).

1. Número máximo de generaciones.
2. Después de un tiempo previamente establecido.
3. Después de encontrar una solución al criterio del que aplica y supervisa el AG.
4. Cuando la mayoría de los individuos de la población tiene características muy similares (convergencia).

4.3.3.4. Codificación

Para poder resolver un problema con AG's es necesario que se codifiquen los datos del problema en un cromosoma. La correcta aplicación de un AG consiste en representar (codificar) a los individuos de una población como un conjunto de parámetros (genes), las cuales en este trabajo esta representados por 0's o por

1's, ya que la teoría de la que son derivados los AG's está determinada por este alfabeto.

La manera más practica o la más común para codificar es en modo binario (0's y 1's), pero también se puede codificar en: código Gray, bcd y codificación en números reales.

Tabla 4.1. Resultado de la codificación del problema

No. De Individuo	Codificación en binario	Valor decimal (x)
1	11110	30
2	11000	24
3	11010	26
4	01010	10
5	01110	14
6	10001	17

4.4. Operadores genéticos

4.4.1. Función objetivo o aptitud.

La aptitud tiene como objetivo dar una regla que evalúe el desempeño de los individuos a través del desarrollo del problema. Es decir, califica a los individuos por medio de una función que se obtiene dependiendo del problema que se quiera resolver. En el caso de nuestro problema se pretende calificar mejor a los individuos que mejor se acercan a minimizar la ecuación.

Para este problema en específico se pretende la función $f(x) = x^2$ ya que solo contiene un mínimo, al cual pretendemos acercarnos lo más posible. Para poder asignar a esta función una aptitud se divide 1 entre el valor decimal de cada individuo, con esto se podrá ir observando cual individuo es el que ha obtenido una mayor aptitud.

Tabla 4.2. Fitness correspondiente a cada individuo

No. De Individuo	Codificación en binario	Valor decimal (x)	Fitness
1	11110	30	0.033
2	11000	24	0.041
3	11010	26	0.039
4	01010	10	0.100
5	01110	14	0.071
6	10001	17	0.058

Como se puede observar en la tabla 4.2, el individuo con mejor aptitud en esta población inicial es el número 4 ya que su valor es el que se está acercando más al mínimo que deseamos encontrar. Pero para poder saber si este individuo será elegido para formar parte de la siguiente generación es necesario aplicar un método de selección, el cual se observa en el siguiente punto a desarrollar.

4.5. Selección.

Para elegir a los individuos que formaran parte de la nueva generación es necesario aplicar un procedimiento. Los procedimientos o métodos que se observarán en este trabajo serán los más comunes, aunque también se pueden utilizar algunos otros.

Cabe aclarar que cuando un individuo es seleccionado es mandado a un lugar denominado **mating pool**, (Olea Franco, 1999), lugar donde irán todos los seleccionados para formar la siguiente generación.

4.5.1. Ruleta.

Este procedimiento también es conocido como muestreo estocástico con reemplazo. El método puede ser representado de dos formas: la primera es con una recta en la cual n segmentos representarán a n individuos y estos serán elegidos por medio de números aleatorios; y la segunda que es representarlo con un círculo que estará dividido en n partes, de acuerdo con el número de individuos y sus probabilidades de ser seleccionados, un puntero estará dirigido a la mitad del círculo para que cuando este gire y posteriormente pare apunte hacia un individuo (individuo seleccionado).

Pasos para seguir para la representación por medio de la recta:

1. Se define una recta que va de $[0,1]$
2. Se le asigna un segmento de recta a cada individuo, el tamaño de este segmento dependerá de la aptitud que se le ha asignado. Esto quiere decir que mientras mayor sea la aptitud mayor será el tamaño del segmento que le corresponderá a cada individuo.
3. Para tener proporción entre un individuo y otro es necesario sacar la probabilidad de selección, la cual es obtenida con la siguiente formula (ec. 4.7):

$$P_s(C_i) = \frac{Aptitud(C_i)}{\sum_{j=1}^p Aptitud(C_j)} \tag{4.7}$$

Donde:

$P_s(C_i)$ = Probabilidad que tiene el individuo de ser elegido.

$Aptitud(C_i)$ = Es la aptitud que obtuvo el individuo al ser calificado

$Aptitud(C_j)$ = Es la suma de las aptitudes de todos los individuos.

Una vez que se ha obtenido el primer valor se coloca en la recta, después se le suma el valor de la siguiente probabilidad y se coloca también en la recta y esto se hace con las probabilidades de todos los individuos.

4. Los individuos serán elegidos mediante la generación de números aleatorios, por esa razón en este

- paso se tiene que generar un número aleatorio para cada selección de un individuo, el cual se colocará dentro del segmento que corresponda a su valor y por consecuencia se verá que individuo fue elegido.
- Los pasos anteriores se deberán de repetir de acuerdo con el número de individuos que se deseen seleccionar.

Tabla 4.3. Probabilidad de selección a cada individuo

Individuo	Aptitud	Probabilidad de selección
1	0.033	0.096
2	0.041	0.120
3	0.039	0.111
4	0.100	0.293
5	0.071	0.208
6	0.058	0.170

Tabla 4.4. Probabilidad de selección a cada individuo

AL ₁	AL ₂	AL ₃	AL ₄	AL ₅
0.76	0.56	0.42	0.32	0.91

Donde:

AL: Número aleatorio

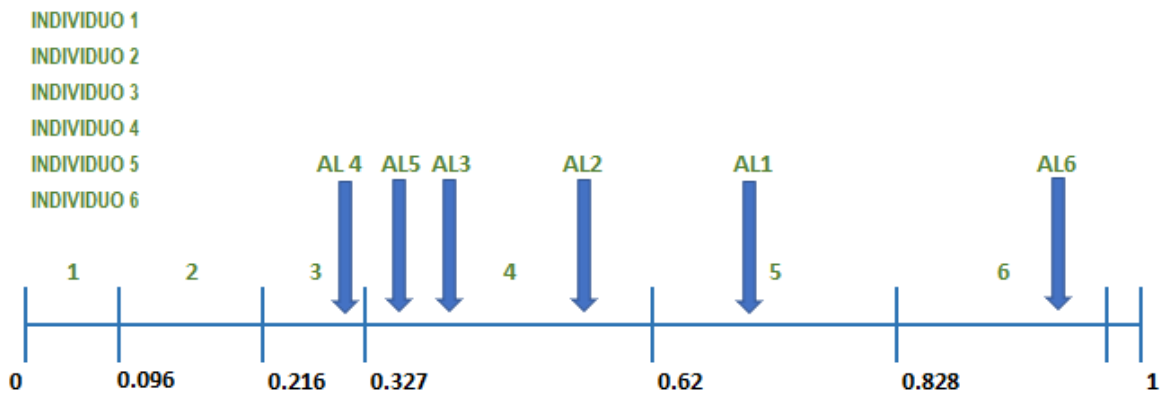


Figura 4.3. Método de la ruleta representando en una recta

Fuente: Elaboración propia

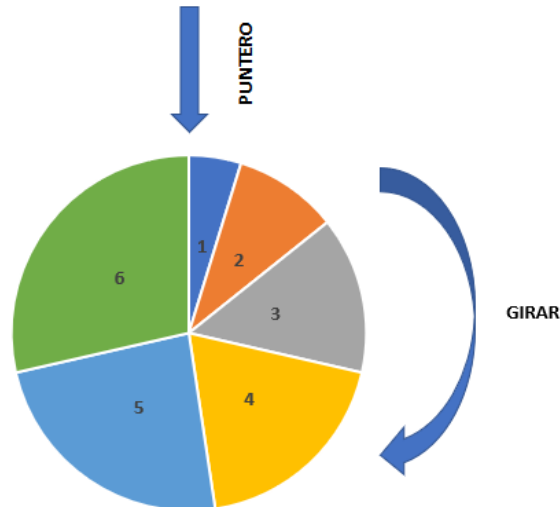


Figura 4.4. Método de la ruleta representando con un puntero y un círculo que girara.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5. Número de selecciones y nueva posición de los individuos (método de la ruleta)

Individuo	No. de veces seleccionado	Individuo decimal
1	0	-
2	0	-
3	1	4
4	4	2,3,5
5	1	1
6	1	6

La tabla 4.5 confirma que mientras más grande sea la aptitud de un individuo, es más probable que sea elegido para formar parte de una nueva generación. Esto es gracias a que a mayor aptitud mayor posibilidad de encontrar la solución al problema planteado.

Con los individuos que fueron seleccionados ya se puede conocer la formación de la siguiente generación como lo muestra la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Individuos que forman parte de la nueva generación obtenida mediante la ruleta

Individuo Nuevo	Individuo binario	Individuo decimal
1	01110	14
2	01010	10
3	01010	10
4	11010	26
5	01010	10
6	10001	17

4.5.2. Torneo.

La selección por torneo es bastante simple, ya que este método consiste en resolver a todos los miembros de la población y ponerlos a competir para seleccionar a los mejores.

El método consta de los siguientes pasos:

1. Se elige el número de veces que se revolverá la población para elegir a los individuos que formaran parte del Torneo.
2. Elegir el tamaño del torneo T_{torneo} (Número de individuos que competirán entre si para ser seleccionadas), por lo general el tamaño es de 2.
3. Se eligen al azar los individuos que tomaran parte del Torneo.
4. Se compara la adaptación de los individuos elegidos al azar y se escoge el mejor.
5. Se finaliza la competencia entre los individuos del torneo, se eligen nuevos individuos para un nuevo torneo.
6. Esto se repite hasta tener el número exacto de individuos de la población inicial.

4.5.3. Elitismo.

El método de elitismo fue desarrollado hace algunos años para mejorar los resultados obtenidos por un AG, y consiste en mantener sin alteración alguna al mejor individuo de una población. El individuo pasará de generación en generación sin alteración alguna (no se aplicará ningún operador genético después de la primera generación), esto dará la certeza de que no se perderá la mejor solución obtenida hasta ese momento y dará la oportunidad de que se sustituya ese individuo hasta que aparezca otro con una mejor aptitud.

Para aplicar elitismo en una población lo que se hace es básicamente lo siguiente:

Se escoge el mejor individuo (I_e) de la población inicial, este es colocado de manera directa en la siguiente generación.

Ya que la siguiente generación es evaluada, se observa si hubo algún individuo mejor que el individuo elite, si es así este seguirá el destino de los demás individuos, es decir tendrá que pasar por los operadores genéticos, pero si no entonces volverá a ser insertado en la siguiente generación sin ningún proceso de por medio.

De acuerdo con la tabla 4.1 el mejor individuo es el número 5, por lo tanto, será este el que se insertará sin ninguna modificación en la siguiente generación.

Como el ejemplo que se ha planteado consta de una población pequeña, se observa que no es necesaria la aplicación de elitismo, ya que el mejor individuo aparece en una nueva generación, y por lo tanto se conserva la mejor solución hasta el final.

4.5.4. Crossover o Cruza.

Después de haber integrado la población que posiblemente resolverá el problema planteado, es el momento de pasar a la siguiente etapa, que es la cruce entre individuos y esto consiste en crear a los descendientes

mediante el proceso que también sigue la naturaleza, es decir haciendo un intercambio de genes.

Este es el más importante operador en la aplicación de un “Algoritmo Genético”, ya que si no hay reproducción no hay AG.

En la cruce se mezclan los genes del padre y de la madre y por lo tanto los descendientes de estos serán la posible solución al problema que se desea resolver.

Para la realización de este intercambio de genes existen dos técnicas principales:

- **En un solo punto de cruce:** Es elegido al azar el punto de ruptura en los padres, donde serán intercambiados o substituidos el conjunto de genes de un padre por los genes del otro.
- **En dos puntos de cruce:** Son elegidos al azar los dos puntos de cruce a partir de los cuales se intercambiarán los genes de un padre y otro.
- **Multipunto:** Son elegidos n puntos de cruce al azar a partir de los cuales se intercambiarán genes tanto del padre como de la madre.

Para ver el funcionamiento de este operador se utilizarán los mejores individuos seleccionados con el método de la ruleta. Los individuos para utilizar son el 1 y el 2 de la tabla 4.6.

4.5.1. Un punto de cruce.

Para cruzar a dos individuos es necesario:

1. Saber que individuos se van a cruzar.
Como el ejemplo que se está llevando a cabo es de una población de 6 individuos, pequeña en realidad, solo cruzara a la mitad de la población, es decir un 50% (0.5).
2. El número de puntos de corte que tiene cada individuo, eso se sabe con la siguiente formula (ec. 4.8):

$$No.PC = Long - 1 \quad (4.8)$$

Donde:

No. Pc = Número de puntos de Corte.

Long = Número de genes del individuo.

Ejemplo:

Los individuos que se manejan en el ejemplo contienen 5 genes cada uno, por lo tanto, Long vale 5.

$$No.PC = 5 - 1 = 4$$

3. Saber el punto de corte en el que se llevara a cabo la cruce. Esta información se obtendrá de la siguiente manera:

- El número total de puntos de corte que tiene el individuo empleado es de 4, por lo tanto 4 es el 100%. Cuando ya se sabe lo anterior se procede a realizar la siguiente división $4/100$, la cual da como resultado 0.04, valor que se aplica para determinar el intervalo en el que tiene que caer el número aleatorio que seleccionara el punto de corte
- Insertando segmentos de recta que vayan de 0.01 en 0.01, hasta llegar a 0.04
- Generar un número aleatorio 0.028
- Posteriormente colocar ese número en el segmento de recta que le corresponda. Con esto sabremos el punto de corte en el que se intercambiaran los genes de los padres, para generar un hijo.



Figura 4.5. Elección de un punto de corte mediante un numero aleatorio

Fuente: Elaboración propia

Mediante la figura 4.5 se observa que el punto escogido para que los individuos intercambien genes y por lo tanto información (procrear un nuevo individuo) es el punto de corte 3.

Ahora se procede a realizar el intercambio de información entre cromosomas, ver figura 4.6.

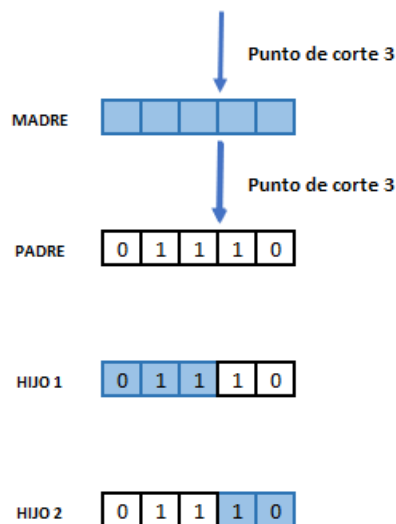


Figura 4.6. Individuos creados mediante la cruce en 1 punto (Hijo 1 e Hijo 2)

Fuente: Elaboración propia

Como se observa los hijos obtenidos mediante el proceso de cruce son iguales a sus padres, para evitar que todos los individuos de una población sean iguales existe otro operador llamado mutación, el cual se explica más adelante.

4.5.2. En dos puntos de cruce.

Para realizar la cruce en dos puntos se sigue el mismo procedimiento en un solo punto, solo que ahora se generaran dos números aleatorios y se corta a los padres en dos puntos en vez de uno. Para ejemplificar se tomó el punto de corte 2 y 3 como se observa en la figura 4.7.

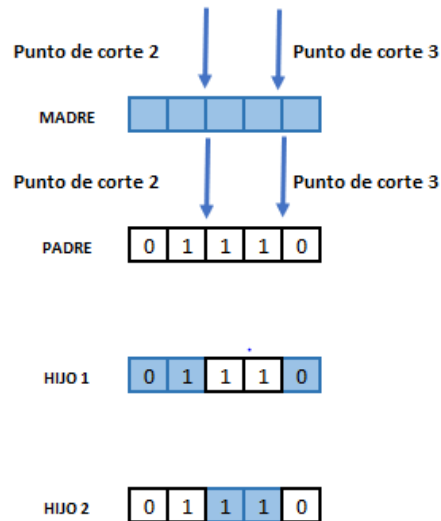


Figura 4.7. Individuos creados mediante la cruce en 2 puntos (Hijo 1 e Hijo 2)

Fuente: Elaboración propia

4.5.3. Multipunto.

En la cruce denominada multipunto se emplea el mismo procedimiento que en los dos puntos anteriores, solo que ahora se tienen que elegir aleatoriamente no 1 ni 2 puntos si no n.

4.6. Mutación.

La mutación es un mecanismo que es generador de diversidad y es aplicado también en la naturaleza, pero como se sabe es poco común que aparezca y cuando se hace la mayoría de las veces es para empeorar la situación de un individuo. Pero en los AG's es utilizada para aumentar las posibilidades de que aparezca un mejor individuo y por lo tanto una mejor solución a un determinado problema. El operador de mutación se utiliza también cuando el algoritmo genético está entrando en un estancamiento.

La mutación es aplicada según los números aleatorios de la tabla 4.7, los bits que serán cambiados de valor son elegidos al azar y su valor es cambiado por un valor contrario como se muestra en la siguiente figura 4.8

Los mejores candidatos para la aplicación de la mutación son los individuos que resultaron de la cruce en un punto (figura 4.6), ya que son iguales a sus padres y por lo tanto el AG podría estancarse. Normalmente los hijos no salen idénticos a sus padres, este es un caso especial que nos sirve para ejemplificar la mutación.

Pasos que seguir para realizar la mutación:

- Elegir el individuo a los individuos a los que se aplicara la mutación.
- Elegir el porcentaje de mutación. En este caso se utilizará un porcentaje de mutación del 0.5% (0.005) de los individuos.
- Sustituir los bits de los cromosomas mediante la siguiente condición.

Si el numero aleatorio $AL \in [0,1]$

$0 \leq AI \leq 0.005$ cambiar bit

$0.005 < AI \leq 1$ no cambiar bit

Tabla 4.7. Individuos que forman parte de la nueva generación obtenida mediante la ruleta

Individuo (Cromosoma)					Números aleatorios					Individuo nuevo				
0	1	0	1	0	0.042	0.983	0.622	0.321	0.403	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0.271	0.291	0.061	0.417	0.012	0	1	1	1	1

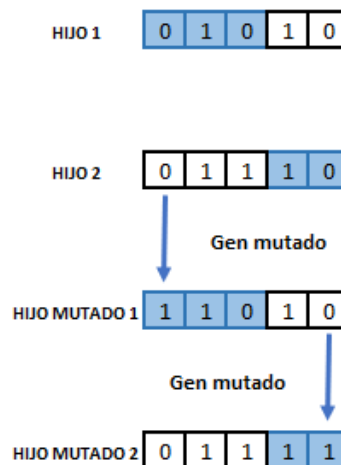


Figura 4.8. Ampliación de la mutación

Fuente: Elaboración propia

4.7. Programación dinámica

Se analizó la obtención de políticas de operación para las principales presas de almacenamiento del sistema Cutzamala, considerando la altura y tipo de la cortina limitados por la topografía y la geología del lugar, pero desde el punto de vista hidráulico las aportaciones y las demandas son los factores más importantes que definen el proyecto.

Los ingresos al sistema se determinan a partir de los registros históricos. La hidrología propone métodos para deducir escurrimientos, completar registros e inclusive generar escurrimientos probables utilizando análisis estocásticos. Lo importante es tener datos de aportaciones a la presa para simular su funcionamiento,

confrontándolos con una política de demandas y un criterio de operación.

Una vez definidas las aportaciones, se realizan simulaciones para determinar la capacidad del embalse y con ello los niveles de operación, para ello es necesario confrontar las aportaciones con las extracciones. Estas últimas están definidas por la demanda o por algún criterio de operación especificado después de analizar todo el sistema. Por ello, es necesario estudiar un gran número de alternativas para diferentes casos de ingresos y demandas.

Las aportaciones que se utilizan en la simulación pueden ser de dos tipos:

1. Registros históricos de escurrimientos.
2. Escurrimientos generados con procedimientos estocásticos, basados en las características estadísticas estocásticas de los registros históricos.

El primer criterio presupone que los escurrimientos registrados, o unos muy parecidos se presentarán nuevamente (determinístico). Este método será tanto mejor y cuanto más largo y confiable sea el registro disponible. Sin embargo, se debe considerar que estos ingresos no se repetirán exactamente igual por tratarse de una variable con una componente probabilística.

El segundo criterio permite “generar” escurrimientos tan factibles como los registrados y de la magnitud que se desee, por ejemplo: 500, 1 000 o más años. Con esta información, los resultados de la simulación permitirán estimar alguna de las posibles formas de comportamiento del vaso.

Se presenta un análisis que permite obtener la operación óptima de una presa, a partir del uso de programación dinámica estocástica. Este método requiere analizar para cada etapa un número de alternativas que se calcula por el producto del número de estados en cada presa, multiplicado por el producto de las variables de decisión y las probabilidades.

De esta forma es posible evaluar diversas alternativas en los valores de los parámetros más sensibles para la obtención de la política óptima; por ejemplo, las variables de decisión, los coeficientes de penalización, el intervalo de discretización, etc., y simular rápidamente el resultado para ver qué efecto tiene en el sistema.

La programación dinámica estocástica permite dar respuesta a las siguientes interrogantes:

1. ¿Cuánto se debe extraer (k)? de tal forma que se satisfagan las demandas y se obtenga el beneficio óptimo durante su operación.
2. ¿En función de qué se decide? Depende del nivel del almacenamiento al inicio de la etapa (i), de la época del año (etapa n), y de los ingresos que se tengan.
3. ¿Para qué? Puede ser para generar energía, dotación de riego, agua potable, etc. Evitar derrame o déficit (implica no poder satisfacer las demandas). Garantizar una reserva. Se evalúa a través de la función objetivo que es la suma de los beneficios individuales correspondientes a cada etapa que a su vez dependen de las extracciones por lo que es necesario saber cuánto se gana si se extrae k pasando de un estado i a un estado j .

4. ¿Cuáles son las restricciones por cumplir? Dado que el funcionamiento de una presa se rige por la ecuación de continuidad se debe verificar que el almacenamiento al final de la etapa sea mayor o igual que el mínimo, pero que sea menor o igual que el máximo.

Para un mejor entendimiento a continuación, se dan a conocer algunas definiciones:

Política de operación: conjunto de reglas que determinan cuál debe ser el volumen de extracción o el volumen deseable al final de la etapa tomando en cuenta el estado presente del sistema, el cual se define en términos de variables medibles, principalmente volumen almacenado en la presa y la época del año. Una política óptima debe cumplir la condición de que cualquiera que sea el estado y la decisión inicial, las decisiones restantes deben de constituir una política óptima con respecto al estado resultante de la primera decisión

Estado: situación actual del embalse, se expresa en términos de volumen, es decir, es el almacenamiento al inicio de cada etapa.

Etapas: representa un periodo de tiempo, que puede ser un año, un mes, una quincena, un día, etc.

Función objetivo: es una relación matemática entre las variables de decisión y una magnitud que representa el objetivo destinado a maximizar o minimizar. Es la suma de los beneficios correspondientes en cada etapa. Esta función debe permitir que se pueda evaluar de manera independiente la contribución de cada etapa al objetivo final y comparar las distintas políticas de operación para finalmente elegir la mejor.

Niveles o cotas de operación:

NAMINO (Nivel de aguas mínimas de operación). Es el límite inferior del nivel del agua en el vaso abajo del cual las turbinas no deben trabajar. Está relacionado con la altura de la entrada de la obra de toma y se localiza por encima de dicha entrada.

NAMO (Nivel de aguas máximas de operación). El volumen almacenado aprovechable o “capacidad útil” se encuentra confinado entre este nivel y el **NAMINO**, se determina en función de la magnitud de las aportaciones del río y del tipo de operación que se asigne a la presa.

Lo anterior significa que el **NAMO** corresponde a la posición máxima de la superficie del agua en el vaso, en condiciones normales de operación. Cuando el nivel del embalse sobrepasa el **NAMO** se considera que ya se trata de una emergencia y, por tal razón, en ese nivel empiezan los derrames, es decir entra en funcionamiento la obra de excedencia.

4.7.1. Programación dinámica aplicada a la operación de una presa

Cuando la programación dinámica se aplica en sistemas de embalses, las variables de estado son los niveles de almacenamiento, las etapas el intervalo de tiempo: meses, quincenas y/o semanas. Las variables de decisión son las salidas del embalse y la variable aleatoria generalmente es el volumen de ingreso, dicha variable se representa como una función de distribución de probabilidad lo que permite dar paso a la programación

dinámica estocástica (Alegria Díaz, 2010) .

Una de las ecuaciones que gobierna el funcionamiento de la presa es la de continuidad (ec. 4.9), se aplica para un intervalo de tiempo (etapa). Si se considera que el embalse tiene un volumen útil que se divide en NS intervalos de magnitud ΔV (figura 4.9) en donde se considera el mismo intervalo para discretizar todas las variables, la ecuación de continuidad se da a través de la siguiente expresión:

$$j = i + x - k \tag{4.9}$$

Sujeta a:

$$\begin{aligned} 1 &\leq j \leq NS \\ 0 &\leq k \leq NK \\ 1 &\leq x \leq NX \end{aligned}$$

Donde:

$i = 1,2,3, \dots, NS \rightarrow$ Volumen almacenado (por unidad ΔV) al inicio de la etapa.

$j = 1,2,3, \dots, NS \rightarrow$ Volumen almacenado (por unidad ΔV) al final de la etapa.

$x = 1,2,3, \dots, NX \rightarrow$ Volumen de ingreso (por unidad ΔV) durante la etapa.

$k = 0,1,2, \dots, NK \rightarrow$ Volumen de extracción (por unidad ΔV) durante la etapa.

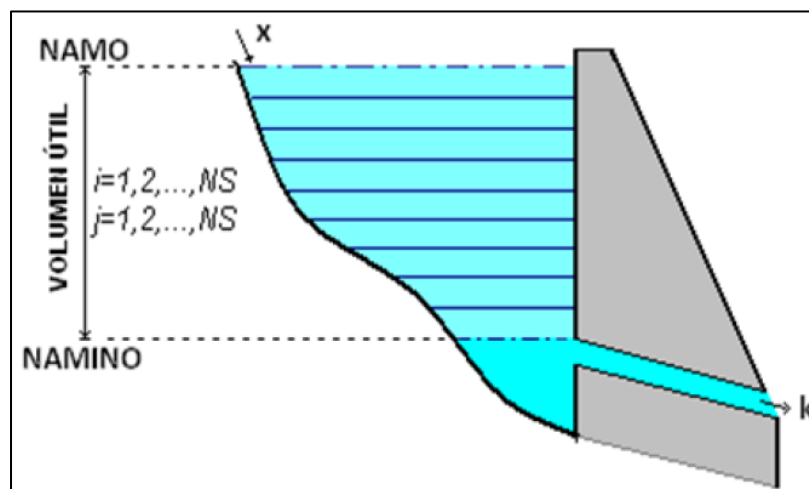


Figura 4.9. Variables discretizadas en un embalse

Fuente: (Alegria Díaz, 2010)

Al considerar de forma discreta, el beneficio que corresponde a una etapa n cualquiera, depende del volumen extraído k y de los almacenamientos i y j al inicio y al final de la etapa; es decir, los beneficios en la etapa se pueden expresar como $b_n^k(i, j)$.

El programa también debe tomar en cuenta los déficit o derrames que pudieran presentarse (Figura 4.10). Por lo tanto, si se supone que lloverá poco, y se extrae poco, pero la realidad es que llueve mucho, entonces el almacenamiento al final de la etapa j será mayor que el NAMO y esto implicaría un derrame, por lo tanto, un castigo. Por otro lado, si se tiene el estado inicial del embalse es el mínimo y se supone que lloverá mucho por

lo que se extrae mucho, pero la realidad es que llovió poco, entonces el almacenamiento al final de la etapa j será menor al NAMINO lo que implicará un déficit, es decir, no se podrán satisfacer las demandas prometidas, por lo que también implica un castigo.

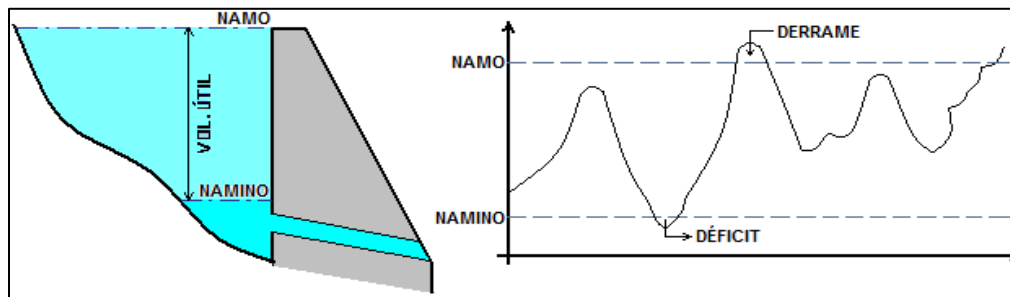


Figura 4.10. Condiciones por evitar de una presa

Fuente: (Alegria Díaz, 2010)

Debido a los tiempos que se tenían para la realización de esta tesis, se decidió delimitar sus alcances y finalmente no se usó el método de la programación dinámica estocástica (PDE) en este estudio, únicamente se decidió dejar las bases teóricas para futuros desarrollos en los que se realice el algoritmo de PDE completo aplicado a la optimización de las políticas de extracción del Sistema Cutzamala.

A continuación, se describe el proceso utilizado para la obtención de la mejor política de operación considerando curvas z y para su optimización la aplicación de computación evolutiva que para este estudio consistió en el uso de algoritmos genéticos.

4.8. Curva Z

Para el análisis y construcción de la curva Z histórica, se analizan las extracciones históricas totales en hm^3 , que han reportado las principales presas del sistema Cutzamala, es importante mencionar que el organismo responsable de establecer el volumen total anual de agua que puede ser extraída del embalse es la CONAGUA, el volumen de extracción se infiere a partir de una gráfica que lleva por nombre curva Z.

La curva Z se construye al analizar las extracciones históricas totales que tienen las presas para cada año, así como la consideración de los almacenamientos iniciales que toman en cuenta que el año hidrológico (para el caso del Sistema Cutzamala) comienza el primero de noviembre, se seleccionan los valores máximos y mínimos de cada variable, teniendo como resultado las parejas de puntos que conforman la curva Z, ver tabla 4.8.

Cabe mencionar que se definirá como curva Z a la función que determina las aportaciones totales anuales que se programan para entregar a la planta potabilizadora de Los Berros, en función del almacenamiento total de las presas El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria al día primero de noviembre, el nombre de la curva obedece a la forma típica que adopta (Figura 4.11).

Tabla 4.8. Curva Z con almacenamientos y extracciones históricos en hm^3

Alm. 3 presas 1nov	Extracción total anual
hm^3	hm^3
0.00	404.57
491.45	404.57

779.93	529.68
900.00	529.68

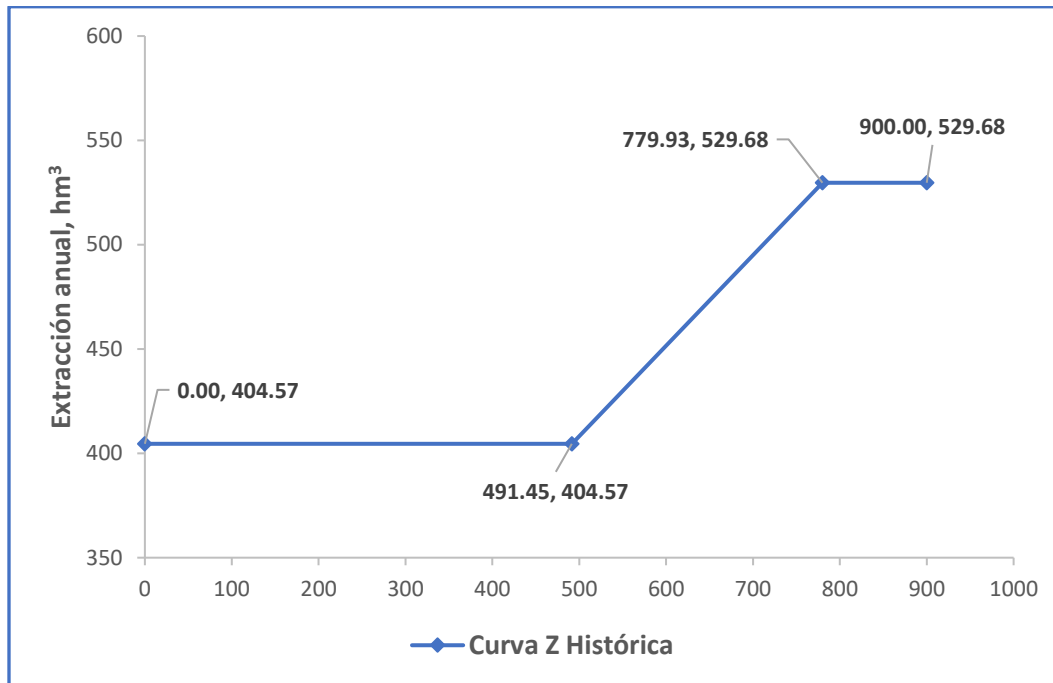


Figura 4.11. Ejemplo forma de la curva Z

Fuente: Elaboración propia

4.8.1. Curva guía

Las curvas guía son niveles sugeridos por el organismo operador federal en los embalses, para evitar condiciones no deseadas de derrames y de déficit que puedan implicar afectaciones en los sitios alojados aguas debajo de los mismos y problemas en la entrega prometida de agua, en México estas curvas se utilizan en el manejo de numerosas presas (aquí hay que explicar que en el manejo de varias presas en México se utilizan esas curvas para evitar llegar abruptamente a situaciones de déficit y derrame y lograr que los ajustes se hagan con anticipación y gradualmente). En esta tesis se consideraron curvas guías alta y baja como se muestra en la figura 4.12.

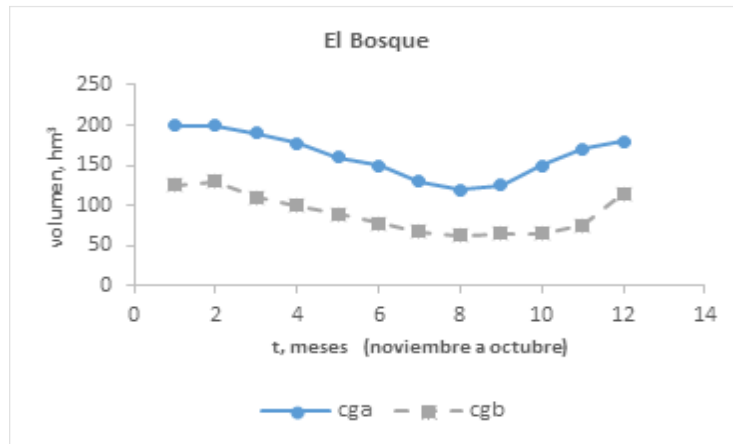


Figura 4.12. Ejemplo de curvas guía alta y baja

Fuente: Elaboración propia

4.9. Volumen de aportación de las presas derivadoras

En el sistema de presas del sistema Cutzamala, se tiene volúmenes de pequeñas presas derivadoras que también suministran parte del agua que se envía a la planta potabilizadora los Berros. Para el modelo de simulación se consideraron dos grupos por separado: los volúmenes de aportación de las presas derivadoras Colorines e Ixtapan del Oro y los volúmenes de la presa Chilesdo y El Barraje.

4.10. Simulación hidrológica conjunta de las 3 presas principales del sistema Cutzamala (sin curvas guía).

Para comprender mejor la influencia de los distintos elementos que pueden formar parte de una política de operación del sistema, el algoritmo de simulación se fue modificando de un caso simple, en el que solo se consideran como variables de decisión los puntos de la curva Z y los porcentajes asignados a cada presa de almacenamiento, hasta el caso más complejo que considera la optimización de los puntos de la curva guía, los coeficientes de ajuste usados cuando alguno o algunos de los niveles iniciales se salen del rango de las curvas guía y diversas limitantes asociadas a las capacidades de conducción. En seguida se describe cómo se fue modificando el algoritmo de simulación conforme se pasó de los casos más simples a los más complejos. En el capítulo 5 se describe la evolución de los resultados a medida que se consideró un algoritmo de simulación más complejo, al cual se fue asociando el correspondiente algoritmo de optimización.

Para la simulación hidrológica conjunta de las presas El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria se aplicó la ecuación de continuidad a cada una, expresada en volumen (ec. 4.10):

$$V_f - V_i = V_{\text{tradic. p}} + V_{\text{lluv}} - V_{\text{extrac}} - V_{\text{evap}} \quad (4.10)$$

Donde:

Ventradac.p: son las entradas por cuenca propia a la presa considerada en hm^3

Vlluv: volumen de lluvia en hm^3

Vextrac: volumen de extracción mensual en hm^3

Vevap: volumen evaporado en hm^3

Vf: almacenamiento final en hm^3

Vi: almacenamiento inicial en hm^3

El algoritmo de simulación para el caso más simple se aplica de la manera siguiente (Mendoza, 2020):

1.- Se propone como intervalo de tiempo para la simulación $\Delta t=1$ mes, para cada año la simulación se inicia en noviembre del año i y finaliza en el mes de octubre del año $i+1$.

2.- Se propone un almacenamiento inicial V_i para cada presa, comúnmente se plantea la condición de elevación al NAMO (es decir, presa llena).

3.- Se hace la suma de los volúmenes iniciales de las 3 presas y se ingresa a la curva Z para estimar el volumen de extracción total anual V_{totalZ} .

4.- Al V_{totalZ} se le resta el volumen total anual de extracción por las presas derivadoras para obtener el volumen anual (neto) que deben entregar las presas de almacenamiento (V_{totalN}).

5.- Se asigna un porcentaje de extracción total anual para cada presa, estos factores deben sumar uno.

6.- Se calcula el V_{extrac} de cada presa multiplicando el V_{totalN} por el factor de cada presa.

7.- Por sencillez se reparte el V_{totalN} de cada presa entre los 12 meses del año en forma idéntica y con ellos se obtiene el volumen de extracción mensual V_{extrac} de cada presa.

8.- De la ecuación 4.1 se obtiene el almacenamiento final V_f (ec. 4.11); los términos de Volumen de Lluvia (V_{lluv}) y Volumen evaporado (V_{evap}) se agruparon como evaporación neta.

$$V_f = V_i + \text{Ventradac.p} - V_{\text{extrac}} + (V_{\text{lluv}} - V_{\text{evap}}) \quad (4.11)$$

9.- Dependiendo del almacenamiento final calculado, se verifica si se presentaron condiciones de derrame o de déficit comparando, para el cada embalse el volumen final, V_f , con volumen al NAMO y al NAMINO:

Si $V_f > V_{\text{namo}}$ se cuantifica un derrame igual a la diferencia $V_f - V_{\text{namo}}$ y V_f se hace igual al V_{namo}

Si $V_f < V_{\text{namino}}$ se cuantifica un déficit igual a la diferencia $V_{\text{namino}} - V_f$ y V_f se hace igual al V_{namino}

Si $V_{\text{namino}} < V_f < V_{\text{namo}}$ no sucede ni déficit ni derrame y el V_f se queda igual al calculado con la ecuación 4.11.

10.- El volumen inicial (V_i) del mes siguiente se hace igual al volumen final (V_f) del mes anterior y se repite el proceso hasta finalizar el año.

11.- Se continúa haciendo la simulación los n años de registro considerados (en este trabajo se consideraron 19 años de registro histórico, desde 1999 al 2018 (años tomados de noviembre del año i a octubre del año i+1), debido a que se tenía una información verificada y confiable de los datos de todas las presas que forman al Sistema Cutzamala.

12.- Se hace un resumen anual de las variables de interés principales

13.- Se hace un resumen mensual de variables de interés

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que es el resumen del algoritmo de simulación sin curvas guía, ver figura 4.13.

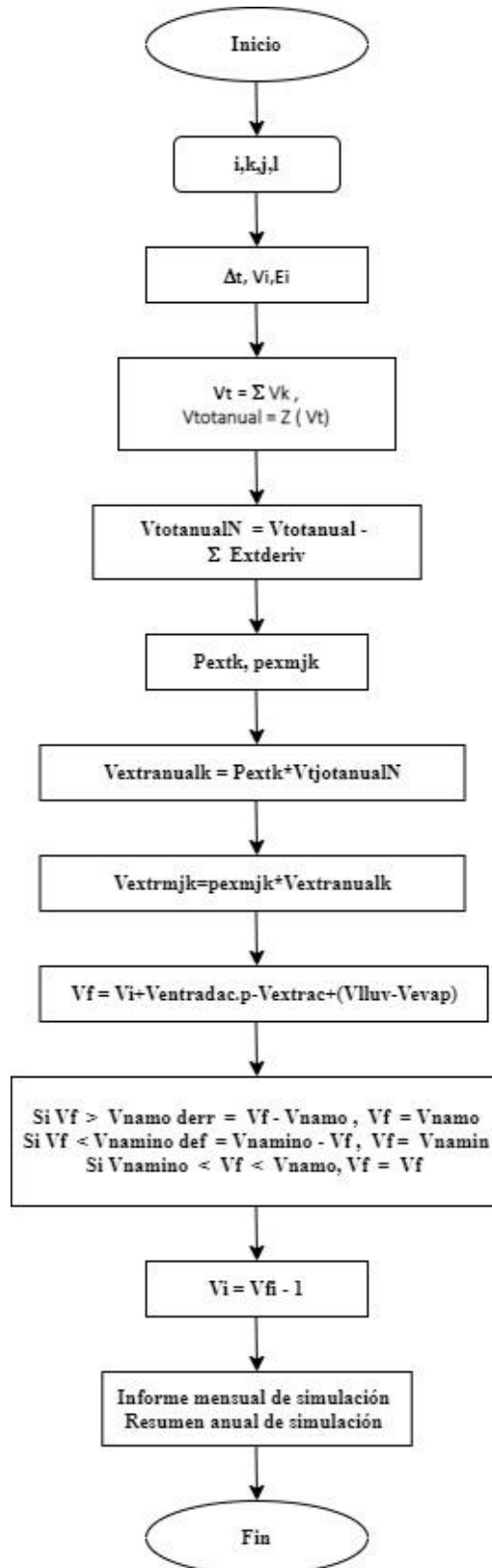


Figura 4.13. Diagrama de flujo de la simulación sin curvas guía

Fuente: Elaboración propia

4.11. Simulación conjunta de las 3 presas principales del río Cutzamala (considerando curvas guía y restricciones).

Debido a que los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con el algoritmo descrito en el apartado 4.10 mostraron valores grandes de derrames y déficit, y en la mayoría de las ocasiones esos eventos se podrían evitar distribuyendo mejor las extracciones de las 3 presas, se modificó el algoritmo considerando curvas guía (alta y baja) para cada una de ellas. Como primera aproximación se propusieron valores para las curvas guía obtenidos cualitativamente de la experiencia histórica, así como para los parámetros de las ecuaciones que definen una corrección en las extracciones en función de la diferencia entre el almacenamiento en cada presa al inicio del mes y el valor correspondiente de la curva guía.

El algoritmo de simulación modificado para este caso es el siguiente; importante considerar archivos con los valores de las curvas guía alta y baja (CGA y CGB) para cada presa, expresadas como volúmenes, en hm^3 .

8.- Se revisa el valor del almacenamiento inicial de cada presa respecto al límite de su CGA y una vez hecho esto se verifica respecto el valor del límite de la CGB. Si es necesario se hacen ajustes a la extracción propuesta para cada presa.

8.1.1 Si V_i en el mes $>$ CGA, en una de las presas se hace un ajuste a la extracción de esa presa, incrementándola en A_{justr} :

Diferencia = $V_i - \text{CGA}$

$A_{justr} = a_1 + a_2 * \text{diferencia}$

(4.12)

Donde:

a_1 es pendiente

a_2 es ordenada al origen

En esta etapa los valores de CGA, así como los coeficientes $a_1 = 2.6$ y $a_2 = 0.5$ se asignaron con base en la experiencia histórica; más adelante se comentan las modificaciones a estos valores obtenidas utilizando el algoritmo de optimación.

Para las presas restantes su V_{extrac} se modifica restando la mitad del A_{justr} calculado con la ecuación 4.12, de tal forma que la suma de los volúmenes totales mensuales que aportan las 3 presas se conserve.

8.1.2 Si $V_i >$ CGA en dos de las presas, se hace un ajuste a la extracción de las dos presas tomando la mitad de A_{justr} ; es decir que el $V_{extrac} = V_{extrac} + 0.5 * A_{justr}$ para cada una de las dos presas que excedieron la CGA.

Para la presa restante su V_{extrac} se obtiene restando el A_{justr} calculado con la ecuación 4.12, para que la suma de los volúmenes totales mensuales de las 3 presas se conserve.

8.1.3 Si en ninguna o en todas las presas se supera la CGA no se realizan ajustes y se pasa al caso de revisar respecto a la curva guía baja CGB.

8.2 Caso debajo de la CGB

8.2.1 Si $V_i < CGB$ en una de las presas se hace un ajuste a la extracción A_{justr} , de la siguiente forma:

Diferencia = $CGB - V_i$

$A_{justr} = a_3 + a_4 * \text{diferencia}$; a_3 y $a_4 < 0$

(4.13)

Donde:

a_3 es pendiente

a_4 es ordenada al origen

El V_{extrac} se modifica a $V_{extrac} + A_{justr}$ para la presa que quedó por debajo de la CGB (A_{justr} tendrá signo negativo en este caso y por tanto el V_{extrac} disminuirá).

Para las presas restantes su V_{extrac} se modifica sumando a cada una la mitad del valor absoluto de A_{justr} calculado con la ecuación 4.13, con el fin de que la suma de los volúmenes totales mensuales de las 3 presas se conserve.

8.2.2 Si en el mes de análisis $V_i < CGB$, en dos de las presas, se realiza un ajuste a la extracción de esas dos presas tomando la mitad de A_{justr} de la ecuación 4.13.

Es decir que el $V_{extrac} = V_{extrac} + 0.5 * A_{justr}$ para las dos presas que quedaron por debajo de la CGB.

Para la presa restante su V_{extrac} se estima restando el A_{justr} calculado con la ecuación 4.13, de manera que la suma de los volúmenes totales mensuales de las 3 presas se conserve.

8.2.3 Si en ninguna o en todas las presas se queda por debajo de la CGB no se hacen ajustes.

4.12. Simulación conjunta de las 3 presas principales del río Cutzamala (considerando curvas guía y limitaciones en la capacidad de conducción)

Con objeto de considerar las limitaciones en la capacidad de conducción, se añadieron los pasos 8.3 y 8.4 que se describen a continuación:

8.3. Si resulta negativo el V_{extrac} corregido en una presa en algún mes de análisis, se debe considerar un $V_{extrac} = 0$ en esa presa. El único caso en el que se admite V_{extrac} negativo es en Valle de Bravo debido a que puede recibir agua de Colorines.

8.4 Debe verificarse que no se excedan valores máximos de la capacidad de conducción:

Si V_{extrac} supera la capacidad de conducción se realiza el siguiente ajuste, $V_{extrac} =$ a la capacidad de conducción (dado que la simulación se hace con intervalos mensuales, se consideran las siguientes capacidades, en hm^3 : El Bosque, 31.5; en Bosque más Valle de Bravo, 48 (si la suma excede, disminuir extracciones en Valle de Bravo); Villa Victoria, 21, valores ligeramente menores a las capacidades, en m^3/s , de 13, 20 y 8.5, respectivamente.

Posteriormente los pasos que se realizan corresponden a los 8 a 13 del apartado 4.10.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo que es el resumen del algoritmo de simulación con curvas guía y restricciones de los apartados 4.10 y 4.11, ver figura 4.14.

El diagrama de la figura 4.14, es complemento del diagrama presentado en la figura 4.13.

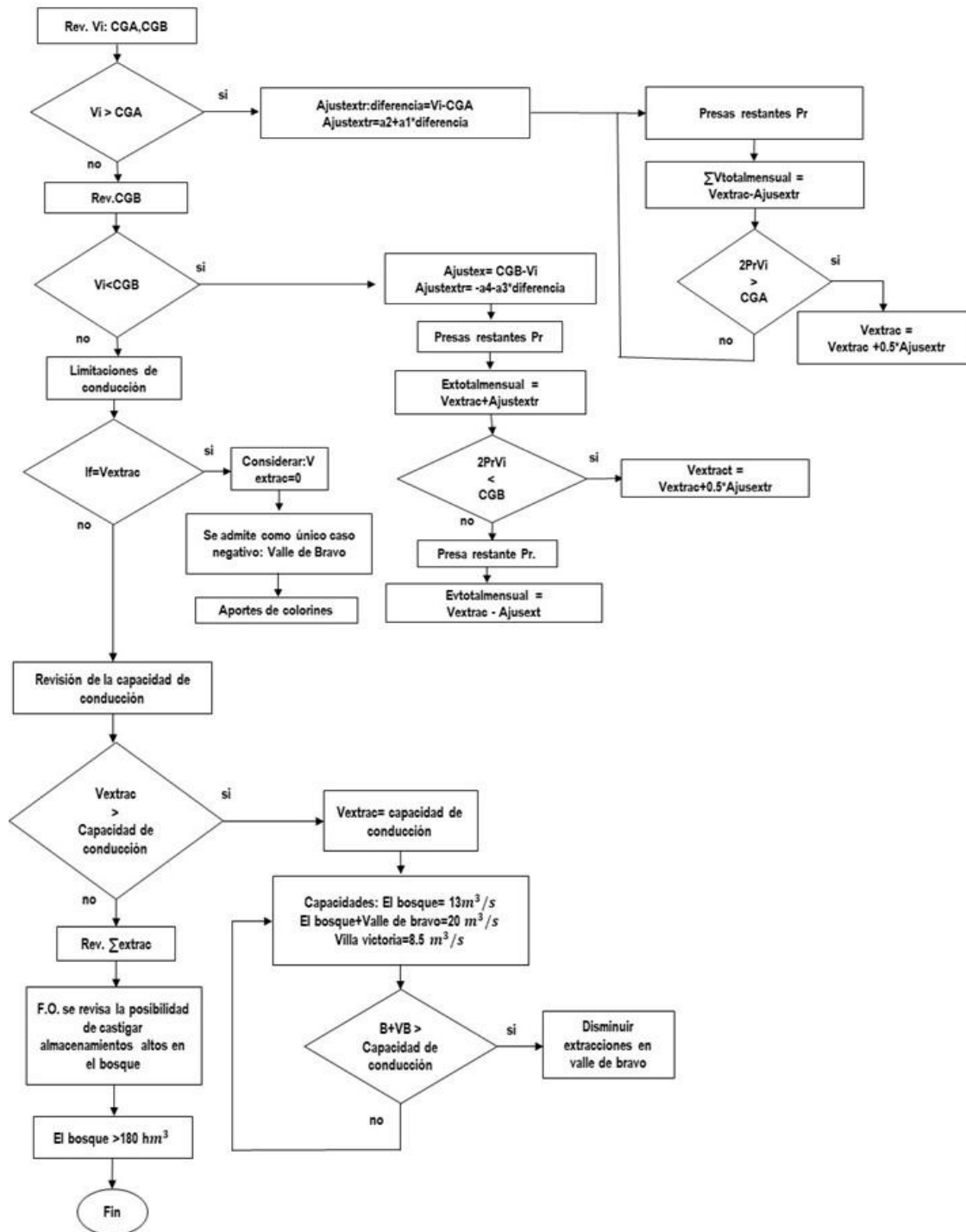


Figura 4.14. Diagrama de flujo de la simulación con curvas guía y restricciones

Fuente: Elaboración propia

4.13. Algoritmo de simulación con curvas guía, considerando por un lado la aportación de las derivadoras Colorines e Ixtapan del Oro, para restar las entregas requeridas de El Bosque y Valle de Bravo, y por otro las correspondientes a Chilesdo y El Barraje, para restarlas a Villa Victoria.

El algoritmo de simulación para este caso incluye los pasos de los algoritmos anteriores. La modificación consiste en que la extracción total anual de la curva Z se reparte primero mensualmente considerando los porcentajes asignados a cada mes. Posteriormente, en cada mes, las extracciones programadas para las presas El Bosque y Valle de Bravo se resta la mitad de la aportación neta de Colorines e Ixtapan del Oro, y a la aportación programada para Villa Victoria se resta la aportación neta de Chilesdo y El Barraje.

4.14. Algoritmo de simulación considerando aportaciones negativas en Valle de Bravo

Este algoritmo es idéntico al presentado en el apartado anterior, excepto que se permiten extracciones negativas en la presa Valle de Bravo porque puede recibir flujo de Colorines haciendo posible que ocurra este caso.

Es importante considerar que deben agregarse archivos de datos que contengan los valores de las curvas guía altas y bajas (CGA y CGB), ya sea propuestas u obtenidas mediante optimización, así como los parámetros de las ecuaciones de corrección, expresados en todos los casos como volúmenes, en hm^3 , y los archivos de los volúmenes de aportación mensual neta de las presas derivadoras Colorines (Ixtapan más Colorines) y Chilesdo (Chilesdo más El Barraje).

4.15. Algoritmo de simulación añadiendo la contabilidad de los volúmenes que superan 180 hm^3 en la presa El Bosque

Con objeto de añadir en la función objetivo la posibilidad de castigar almacenamientos altos en el Bosque (que eventualmente pueden impedir las transferencias de la presa Tuxpan), al algoritmo del apartado 4.14 se agregó el paso de acumular los almacenamientos en El Bosque por arriba de los 180 hm^3 de almacenamiento.

4.16. Nuevas limitaciones para el ajuste del volumen que se obtiene cuando el volumen almacenado en alguna o algunas de las presas sale del rango definido por las curvas guía.

1.- Del análisis de resultados de las simulaciones previas se observó que en el mes de agosto del año 2000 (año hidrológico: 1999-2000) la suma total de lo que llega a la planta potabilizadora excede su capacidad, por lo que se añadió como limitante que la suma total no sea mayor a 50 hm^3 , esto es:

$$\text{exttotal} \leq 50 \text{ hm}^3$$

Donde: exttotal es la suma de las extracciones de las presas El Bosque, Valle de Bravo, Villa Victoria y de y de las derivadoras Chilesdo y Colorines.

El proceso se realiza de la siguiente forma:

De acuerdo con el almacenamiento total de las 3 presas (por ejemplo en el año 2010 el almacenamiento total inicial es 559.06 hm³) y con los parámetros de la curva Z optimada (usando a1 = 2.22 y a2 = 0.86) , al sustituir en la curva z se obtiene que la extracción total en el año es de 550.57 hm³; para este caso se consideró una extracción uniforme durante el año, por lo que este valor se multiplica por 1/12 = 0.083, para obtener 45.88 hm³/mes. A su vez este valor se distribuye entre las tres presas de acuerdo con los porcentajes obtenidos de la optimación, por lo que las extracciones programadas en hm³ para el mes de agosto resultan de 20.88, 9.41 y 15.31 para El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria, respectivamente.

A estos valores se resta lo que aportan las derivadoras de la siguiente forma: a El Bosque y a Valle de Bravo se les resta, respectivamente, la mitad de lo que aporta Colorines y a Villa Victoria se le resta lo que aporta Chilesdo. Al estimar lo anterior, los volúmenes de extracción en hm³ programados para cada una de las presas de almacenamiento resultan de 15.30, 3.83 y 8.33, respectivamente.

El siguiente paso es comparar los almacenamientos iniciales con los almacenamientos correspondientes a las curvas guía. En este caso, El Bosque y Valle de Bravo rebasan las respectivas curvas guías altas, de manera que, de acuerdo con las ecuaciones de ajuste obtenidas de la optimación (Tabla 4.9), se recomienda incrementar las extracciones en esas presas en 13.74 hm³ y 21.94 hm³, respectivamente, y restar la suma de esos incrementos (35.68 hm³) a la extracción programada en Villa Victoria.

Al restar se obtiene un valor de -27.35 hm³ para VV, pero al no ser posible, se le asigna un valor de 0.

Tabla 4.9. Coeficientes para cada presa y ecuaciones de ajuste

Presa	Coeficientes para ajustar el volumen					Si se supera la CGA
	a1	a2	a3	a4	C1 = a1 C2 = a2	
El Bosque	2.22	0.86	-1.44	-0.85	C1 = a1 C2 = a2	Si se queda debajo de la CGB
Valle de Bravo	2.78	0.89	-2.85	-0.29	C1 = a3 C2 = a4	
Villa Victoria	2.64	0.37	-1.04	-0.76	C1 = a3 C2 = a4	
Quando la corrección se hace en dos presas:	VOLCO(IP,IMC) = ((C1(IP)+C2(IP)*VEXOAB(IP,IA,IMC)))*0.5					Donde: IP: índice de la presa a corregir C1 y C2: coeficientes de ajuste dependiendo el caso IMC: índice del mes IA: índice del año INP1: índice de la presa El Bosque INP2: índice de la presa Valle de Bravo INP3: índice de la presa Villa Victoria
La corrección que se aplica a la tercer presa es:	VOLCO(INP3,IMC) = VOLCO(INP1,IMC)+VOLCO(INP2,IMC)					
Quando la corrección se hace a una sola presa:	VOLCO(IP,IMC) = C1(IP)+C2(IP)*VEXOAB(IP,IA,IMC)					

Siguiendo ese procedimiento es posible limitar la extracción total evitando superar la capacidad de la planta potabilizadora de Los Berros, por lo que se añadió al programa un límite (considerando la situación actual se fijó un valor de 50 hm³ al mes, que equivale a un gasto de 19 m³/s, este valor puede modificarse).

Regresando al caso que se está utilizando como ejemplo, la extracción total (presas de almacenamiento más derivadoras) resultó de 66.14 hm³, por lo que se tendría un excedente de 16.14hm³, que se resta proporcionalmente a los valores obtenidos para las presas de almacenamiento (en este caso se resta 8.07 hm³ a El Bosque y a Valle de Bravo, debido a que Villa Victoria no puede dar menos de 0). En la figura 4.15 se detalla el ejemplo de estos cálculos.

% MENSUAL DE CADA PRESA =	0.083			BOSQUE +VB =	48.00	LIM. ADICIONAL
AGOSTO DEL 1er AÑO	%			CAPACIDAD DE		
EXT CURVA Z	550.57	EB	0.46	CONDUCCIÓN		
		VB	0.21	EB	31.50	
		VV	0.34	VB	16.50	
				VV	21.00	
				EXTRACCIÓN		
				MENSUAL		
EXTRACCIÓN PARA CADA	EB	251.61	20.88	SE QUITAN	15.30	
PRESA =	VB	113.42	9.41	DERIVADORAS	3.83	
	VV	184.44	15.31		8.33	

SE REVISAN CAPACIDADES DE CONDUCCIÓN Y EXTRACCION NEGATIVA PARA VALLE DE BRAVO						
SI EB Y VB REBASAN CGA	VOLCO	EXT TOT				
	13.74	29.04	> CAPCON(1)	NO	ENTONCES	EXTRACC = 29.04
	21.94	25.77	> SUMA EB+VB	SI	ENTONCES	EXTRACC = 18.96
	35.68	-27.35	< 0.0	SI	ENTONCES	EXTRACC = 0.00
					SUMA =	66.14

CORRECCIÓN CAPACIDAD DE PLANTA POTABILIZADORA (50 hm ³ /mes)			
SI	66.14	> 50	ENTONCES
			16.14
			8.07
			EB
			20.97
			VB
			10.89
			VV
			-8.07
			SI VV < 0, ENTONCES VV= 0

Figura 4.15. Limitante por capacidad de la planta potabilizadora

Fuente: Elaboración propia

2.-En septiembre del año 2009-2010 se detectó que el almacenamiento inicial en la presa de El Bosque, excedió el límite de la curva guía alta (CGA), casi un 100%, por lo que se planteó hacer la corrección del volumen de ajuste limitando la diferencia a no exceder lo que le falta a la extracción programada originalmente (lo que dicta la curva Z multiplicado por el porcentaje que le corresponde a la presa y por el porcentaje del mes, y restando la mitad del ingreso neto de la derivadora Colorines) para alcanzar la capacidad de conducción de las extracciones de la presa. Sobre esa diferencia se hace el ajuste de las ecuaciones para el volumen de corrección. El proceso consiste fundamentalmente en que a la extracción original en el Bosque (17.02 hm³) se suma la corrección dada por la ecuación de la tabla 4.2 se obtiene 77.68 hm³, lo que supera los 31.5 máximos posibles, por lo que sólo se pueden dar adicionales 31.5-17.02 = 14.47 que es el valor que se tiene que restar a las otras presas (por mitades), es decir 7.24 a cada una, de tal modo que la extracción para Valle de Bravo resulta de 7.29-7.24 = 0.06 hm³. Para Villa Victoria la diferencia resulta negativa por lo que se asigna un valor nulo.

El proceso completo se muestra en la figura 4.16.

PORCENTAJES MENSUALES DE CADA PRESA =		0.083				BOSQUE +VB =		48.00	LIM. ADICIONAL
AÑO 2009-2010, ANÁLISIS SEP 2010				%					
EXT CURVA Z	464.51	EB	0.46			EB	31.50		
		VB	0.21			VB	16.50		
		VV	0.34			VV	21.00		
				EXTRACCIÓN MENSUAL		SE QUITAN DERIVADORAS			
EXTRACCIÓN PARA CADA PRESA =		EB	212.60	17.72	17.03	EXT OR EB			
		VB	95.84	7.99	7.30	EXT OR VB			
		VV	156.07	13.01	5.25	EXT OR VV			
COEFICIENTES PARA LAS ECS DE AJUSTE "EB"									
A1	A2	A3	A4						
2.22	0.86	-1.44	-0.85						
EB SUPERA CGA									
ALMINI	CGA	ALMINI-CGA	VOLCO						
199.43	111.27	88.16	77.68						
289.61									
130.43									
SI	77.68	> CAPCON(1)	ENTONCES	VOLCO-CAPCON(1) =	46.18				
SI	63.21	> CAPCOND(1)	ENTONCES	EXTRACC =	31.5				
SI	-15.80	< 0	ENTONCES	EXTRACC=	-15.80	EN VB SE PERMITEN EXTRACCIONES NEGATIVAS CORRECTOS EN EL PROGRAMA			
SI	-17.84	< 0	ENTONCES	EXTRACC=	0				
		EXT OR EB	MÁS						
		EXT OR VB	MENOS	ENTRE 2					
		EXT OR VV	MENOS	ENTRE 2					

NUEVA CORRECCIÓN				
14.47	EB	31.50		
	VB	0.06		
SI	VV	-1.98	SI VV < 0, ENTONCES VV = 0	

Figura 4.16. Limitante adicional sobre la capacidad de conducción

Fuente: Elaboración propia

3.- Al analizar los resultados obtenidos para diciembre del año 2013-2014, se observó que se debe también limitar el volumen de corrección cuando al sumarse a la extracción original se excede la capacidad de conducción de la presa El Bosque o la de Villa Victoria. Antes de salir de la subrutina de corrección de una presa se puso esta nueva limitación. La figura 4.17 muestra las líneas de código añadidas al programa de simulación.

```

1. C... HACEMOS UNA CORRECCIÓN MAS:
2. C.... SI AL SUMAR EL VOLCO CON LA EXTRACCIÓN SEA DE EB O DE VV SE EXCEDE
3. C LA CAPACIDAD DE CONDUCCIÓN DE ELLAS, EL NUEVO VOLCO SERÁ SOLO EL
4. C VOL QUE SE TOMA SEA EN EB O EN VV PARA LLEGAR A LA CAP DE CONDUCCIÓN
5. C PRINT*, 'LLEGO CON VOLVO'
6. C PRINT*, VOLCO (INP1, IMC)
7. C READ*
8. C
9. SUM = VOLCO (INP1, IMC) +EXTMM (INP1, IMC)
10. IF (SUM.GT.CAPCON(INP1)) VOLCO (INP1, IMC) = SUM-CAPCON(INP1)
11. C PRINT*, 'CORREGIMOS ANTES DE SALIR DE LA SUBROUTINA'
12. C PRINT*, SUM, VOLCO (INP1, IMC)
    
```

Figura 4.17. Líneas agregadas al código de la subrutina de corrección de una presa.

Fuente: Elaboración propia

Hasta aquí se han descrito las adaptaciones que se fueron realizando al programa de simulación. Dicho programa es la base para aplicar el algoritmo de optimización que está basado en los algoritmos genéticos y, por ello, requiere corridas de simulación para cada conjunto de parámetros que se requiera evaluar.

En seguida se describe, el proceso de optimización realizado para diversas alternativas, utilizando en conjunto el algoritmo genético con el programa de simulación que corresponde a cada alternativa.

4.17. Programa SIMCUT.FOR

El programa SIMCUT está escrito en lenguaje FORTRAN y compilado con la versión de Microsoft Developer Studio del paquete Fortran Power Station 4.0 versión 1994-1995. Se puede compilar y ejecutar desde la ventana del paquete o desde MS-DOS. Tiene como objetivo simular el funcionamiento de un sistema de tres presas en paralelo que tienen una política de operación mensual determinada. Se aplica a tres presas del sistema Cutzamala: El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria. Tiene como antecesores a los programas SIMEPPAR y SIMEPPARD hechos en 2013 y 2019, respectivamente para trabajos previos sobre el mismo sistema (Mendoza, 2013, Mendoza, 2020). Las diferencias con respecto al programa del 2013 son básicamente una serie de restricciones impuestas a la política de operación de las presas considerando dos curvas guía (un alta (CGA) y otra baja (CGB)). Con respecto al programa del 2019 solo es una mejor estructuración del código, incluir 14 variables con formatos de salida en un archivo que se hace para facilitar el análisis de los resultados y añadir 2 subrutinas para el cálculo de valores máximos, mínimos y promedios.

Consta de un programa principal, que es el encargado de la ejecución de la secuencia del algoritmo, 8 subrutinas y una función:

1. **Subrutina LEE_DATOS:** es la encargada de leer el archivo que contiene los datos generales para las tres presas.
2. **Subrutina MESBUENO:** se usa para ajustar el índice del inicio del mes en el proceso de simulación (se inicia en noviembre) a la secuencia que se tiene normalmente en el año.
3. **Subrutina INTERLIN:** en ella se realiza el proceso de interpolación lineal para los datos de las curvas elevaciones-capacidades-áreas.
4. **Subrutina CORRIGE1P:** se usa para ajustar el volumen de extracción del sistema cuando se rebasa el límite superior de la CGA o se queda por debajo del de la CGB, en una sola presa.
5. **Subrutina CORRIGE2P:** en ella se ajusta el volumen de extracción del sistema cuando se rebasa el límite superior de la CGA o se queda por debajo del de la CGB, en dos presas.
6. **Subrutina CORRIGE_EXTRA:** en ella se ajusta la extracción de las presas si es que se rebasa la capacidad de la planta potabilizadora Los Berros, considerando 50 hm³/mes.
7. **Subrutina MAXMIN:** obtiene los valores máximo y mínimo para una variable tipo matriz.
8. **Subrutina ESCALARMAXMIN:** obtiene los valores máximo y mínimo para una variable tipo escalar.
9. **Función CAR:** se encarga de transformar un entero de dos dígitos en una cadena de caracteres.

4.17.1. Descripción de los archivos de entrada y salida del programa SIMCUT.FOR

En el cuerpo principal del programa se designan las unidades para la escritura de los resultados del proceso de simulación de cada presa y se abren los archivos de datos. También se definen como datos dentro del programa el mes (dado como tipo entero) en el que se inicia la simulación (noviembre, en este caso) y el volumen límite para El Bosque. También se abren los siguientes archivos de datos:

1. **VOLPRE1, VOLPRE2, VOLPRE 3:** Archivos que contienen los volúmenes de ingreso históricos (en hm^3) de enero a diciembre para cada embalse.
2. **DATOSGE:** Archivo general de datos cuya estructura se detalla en secciones más adelante.
3. Tres archivos que contienen los factores mensuales en los que se repartirá la extracción en cada presa: **FACTOBOS, FACTOVBR y FACTOVVI**, todos con extensión txt y ordenados de enero a diciembre.
4. **PORCEPRE.TXT:** archivo que contiene el porcentaje de extracción para cada presa. Ordenadas de la siguiente forma:
 - 1) El Bosque
 - 2) Valle de Bravo
 - 3) Villa Victoria.
5. **CURVAS.TXT:** volumen de los límites de las CGA y CGB de cada presa, ordenados de enero a diciembre. Ordenadas de la siguiente forma:
 - 1) El Bosque
 - 2) Valle de Bravo
 - 3) Villa Victoria.
6. **COEFICIENTES.TXT:** valor de los coeficientes de ajuste para cada presa, son 4: a_1 , a_2 , a_3 y a_4 . Los valores de a_1 y a_2 son para la CGA y los otros dos para la CGB. Ordenadas de la siguiente forma:
 - 1) El Bosque
 - 2) Valle de Bravo
 - 3) Villa Victoria

Los archivos de salida se nombraron como:

1. **SIMPRE1, SIMPRE2 y SIMPRE3**, son los archivos que contienen el detalle mes a mes el funcionamiento de cada presa.
 - 1) SIMPRE1: El Bosque
 - 2) SIMPRE2: Valle de Bravo
 - 3) SIMPRE3: Villa Victoria.
2. Se generan tres archivos más denominados **DERXX, DEFXX y EXTXX**, siendo XX 01 (El Bosque), 02 (Valle de Bravo) y 03 (Villa Victoria). Cada uno de ellos contiene los totales de derrame, déficit y extracción, de cada presa.
3. El archivo **EXTRAT.TXT** contiene para cada mes: la fecha en formato dd/mm/aaaa, los almacenamientos iniciales de cada presa, las extracciones para las 3 presas y las 2 derivadoras, los déficits en cada presa, la suma total de las extracciones mensuales tanto en hm^3/mes como en m^3/s , y el almacenamiento total inicial.

Los casos que se consideran para modificar la extracción con las curvas guía son las siguientes:

1. Si dos presas exceden la CGA
2. Si una presa excede la CGA
3. Si una presa queda por debajo de la CGB
4. Si dos presas quedan por debajo de su CGB
5. Si las tres exceden la CGA no se corrige nada de extracción y si ninguna la excede tampoco
6. Si las tres quedan por debajo de su CGB o si ninguna queda no se corrige nada

Ahora en vez de restar el total anual de las derivadoras se resta la aportación de cada una de ellas de la siguiente forma, una vez obtenida la extracción total de la curva z, se reparte el porcentaje de cada presa y en ella asignado el porcentaje mensual:

1. a El Bosque se le quita la mitad de Colorines
2. a Valle de Bravo se le resta la mitad de Colorines
3. a Villa Victoria se le resta la aportación total de Chilesdo

A la subrutina de corrección de rebase de CGA de una y de dos presas, se agrega la comparación de que el volumen en exceso corregido no debe superar la capacidad de conducción de las presas.

Restricciones adicionales:

1. Las extracciones en El Bosque y Villa Victoria no pueden ser negativas.
2. La suma de las extracciones de El Bosque y Valle de Bravo no puede exceder los 48 hm³/mes.
3. La suma de las extracciones mensuales de El Bosque, Valle de Bravo, Villa Victoria, Colorines y Chilesdo no debe exceder la capacidad de la planta potabilizadora de Los Berros. Se hicieron las siguientes consideraciones:
 - 3.1 Si la suma excede los 50 hm³/mes y las extracciones en las tres presas no son cero, entonces el excedente se divide entre tres y se resta a cada una de las presas
 - 3.2 Si una de las extracciones es cero, entonces solo se resta el excedente a las dos presas con extracción distinta de cero.
 - 3.3 Si dos de las extracciones son cero solo se resta el excedente a la presa cuya extracción es diferente a cero.

En cada uno de los casos se verifica la cantidad que se resta a la extracción de las presas, cuidando que no se haga negativa la extracción, si fuera el caso solo se toma la cantidad que haga cero la extracción y a la presa que lo soporte se le resta este faltante. Solo Valle de Bravo acepta valores negativos. En El Bosque y Villa Victoria se hacen cero las extracciones menores a este valor.

4.18. Descripción del algoritmo genético aplicado a la optimización de curvas z

4.18.1. Generalidades del programa AG

La optimización de las políticas de operación de las principales presas del sistema Cutzamala se logró al aplicar un Algoritmo Genético Simple (AG) en combinación con la simulación del funcionamiento del embalse usando el registro histórico de ingresos por cuenca propia en primera instancia (Acuña,2014).

El algoritmo genético utilizado se encuentra codificado en Matlab®, fue escrito originalmente por Andrew Chipperfield en marzo de 1994 y cuenta con diversas modificaciones hechas por el Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) y posteriormente por el Instituto de Ingeniería desde enero del 2004. El algoritmo trabaja en combinación con la simulación del funcionamiento de vaso programado en Fortran® y compilado con la versión de Microsoft Developer Studio del paquete Fortran PowerStation 4.0 versión 1994-1995, bajo el nombre SIMEPARD.exe cuyo detalle de funcionamiento se encuentra explicado en su manual de uso.

La figura 4.18 muestra la forma en la que opera el algoritmo genético y como interactúa con la simulación del funcionamiento de vaso para llegar a la solución óptima.

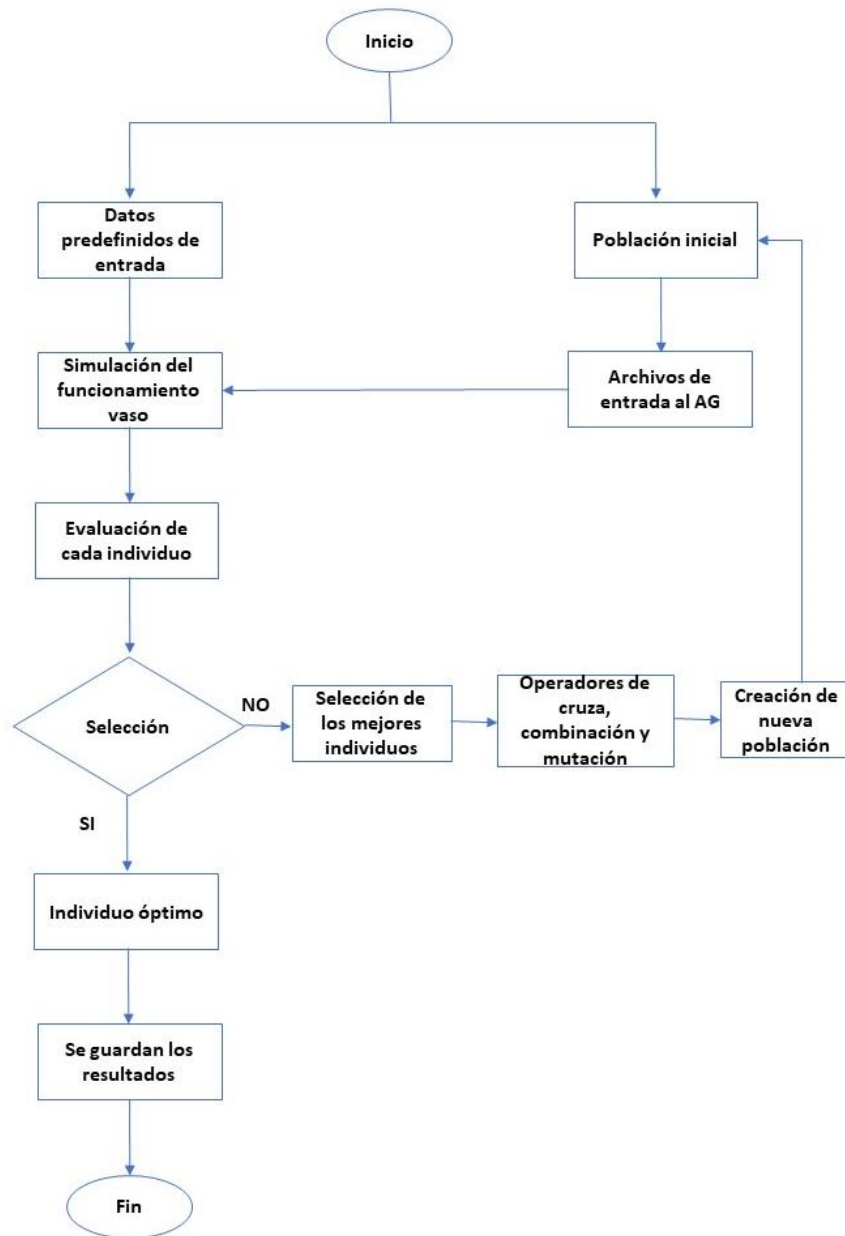


Figura 4.18. Diagrama de flujo del algoritmo AG acoplado con la simulación del vaso.

Fuente: Elaboración propia

El algoritmo empieza con la generación aleatoria de una población inicial de “n” individuos, con ellos se construyen algunos de los archivos de entrada para el programa que simula el funcionamiento del vaso; otros archivos de entrada están definidos previamente.

La simulación del funcionamiento de vaso (Aparicio, 1992) se realiza para cada individuo y los resultados se guardan en archivos de salida, cuyos valores se evalúan mediante la función objetivo. Mientras el número de generaciones fijada no se cumpla, el algoritmo selecciona los mejores individuos, a los que se les aplican los operadores de cruce (método de la ruleta) y mutación para formar una nueva generación de individuos. La nueva población ingresa al algoritmo y el proceso se repite hasta cumplir con las generaciones fijadas, solo

entonces se selecciona el mejor individuo.

El algoritmo AG funciona gracias a un acoplamiento de catorce subprogramas, cada uno de los cuales realiza una función diferente; a continuación, se describe cada uno de ellos:

1.- SGACUTZ6.m y /o SGACUTZ7.m: es el controlador principal del Algoritmo Genético Simple. Los algoritmos detallados que corresponden a estos dos programas se describen en los apartados 4.19 y 4.22. En estos programas se define: el número de individuos que conforman a la población; el número de generaciones (iteraciones); la brecha generacional, es decir, el número de individuos nuevos que se crean; el número de variables (incógnitas) y la precisión de la representación binaria; en la línea que indica Field es una estructura donde se establecen los valores de los límites inferiores y superiores de los intervalos de búsqueda que pueden tomar las variables incógnita del problema. Luego el script llama a los siguientes subprogramas, que se ejecutan en orden descendente:

2.- rep.m: replica una matriz en dos dimensiones, con una fila y n columnas, cada una de las cuales corresponde a una variable incógnita.

3.- crtbp.m: crea una población de vectores binarios (cromosomas), cuyo tamaño y estructura está determinada por el número de variables y la precisión de la representación binaria, la función llama a crtbase.m.

3.1.- crtbase.m: crea un vector fila cuyos elementos son la base de los bits asociados a un cromosoma (concatenación de cadenas binarias).

4.- bs2rv.m: decodifica los cromosomas en números reales utilizando decodificación binaria o decodificación Gray.

5.- Objcutz6.m y/o Objcutz7.m: evalúa el desempeño de los individuos usando la función objetivo. El script crea/guarda los siguientes archivos que usa el programa de simulación: curvaex.txt, porcepre.txt, coeficientes.txt, curvas.txt, luego llama al programa de simulación SIMCUTZAR.exe y finalmente abre los archivos de resultados que genera el programa de simulación para evaluar la función objetivo; aquí mismo se define tanto la función objetivo, como los coeficientes de penalización.

La diferencia en los scripts Objcutz6.m y Objcutz7.m es la función objetivo que manejan, estas funciones objetivo se indican en las ecuaciones 4.5 y 4.6.

6.- ranking.m: clasifica a los individuos de acuerdo con su "fitness" asociado y devuelve un vector columna; para múltiples poblaciones se realizan diferentes clasificaciones por separado.

7.- select.m: organiza a las múltiples poblaciones y llama a la función de bajo nivel: **rws.m** para realizar la selección real.

7.1.- rws.m: selecciona un número dado de individuos de cada población y devuelve un vector columna con los índices de la nueva generación de cromosomas. La nueva población está lista para los operadores de cruza.

8.- recombin.m: combina los cromosomas entre dos pares de individuos; la función maneja múltiples poblaciones y llama a la función de bajo nivel: **xovsp.m** para realizar el proceso de recombinación real.

8.1.- xovsp.m: utiliza las matrices que contienen la representación binaria de los individuos para aplicar el cruce de pares consecutivos de cromosomas en un punto con una probabilidad dada; al final devuelve la población resultante.

8.2.- xovmp.m: operador cruce multipunto. Aplica el operador cruce a pares consecutivos de individuos con una probabilidad dada y devuelve la población resultante

9.- mut.m: llama a la representación binaria de la población actual y muta a cada elemento de acuerdo con una probabilidad dada, para obtener una nueva población.

10.- reins.m: reinserta la descendencia creada en la nueva población que reemplazara a los padres.

4.19. Estimación de la curva z optimizada con algoritmo genético y simulación del funcionamiento de vaso de las tres presas principales del sistema con aportaciones de las presas derivadoras y sin curvas guía (algoritmo del apartado 4.10).

Para realizar la optimización de la curva z se utilizan de manera acoplada un algoritmo genético simple (Goldberg, 1989, The Mathworks, 1992, Gestal et al., 2010) y el algoritmo de simulación descrito en el apartado 4.10.

Los pasos del algoritmo de optimización se presentan a continuación.

1.- Se genera aleatoriamente una población inicial de n individuos, cada individuo está constituido por los cuatro datos de los dos puntos de la curva z buscada dentro de un intervalo de búsqueda y los porcentajes de volumen de extracción de las tres presas respecto al total anual. Es decir, son 7 variables por optimar.

2.- Con los individuos generados aleatoriamente se construyen archivos de entrada al algoritmo de simulación que son los dos puntos de la curva z y el archivo que contiene el porcentaje del volumen de extracción de cada presa respecto al total anual.

3.- Se evalúa el desempeño de cada individuo; para ello el AG llama al programa de simulación descrito en el apartado 4.10, que lee además de los datos generales de las presas, los archivos que generó el AG para cada individuo, realiza la simulación mensual del funcionamiento del vaso de las presas, iniciando el primero de noviembre de 1999, y guarda los resultados del volumen total de extracción de cada presa, el derrame total y el déficit total que ocurre en cada presa; estos resultados se regresan al AG para evaluar la función objetivo que considera coeficientes de penalización por derrames y déficit en cada presa y obliga a que la suma de los porcentajes de extracción de las tres presas sea aproximadamente uno.

4.- Se seleccionan aleatoriamente los individuos con el mejor desempeño usando el método de la ruleta, se aplican los operadores intercambio o cruza y mutación y se genera la nueva población de individuos que pasa a la siguiente generación.

5.- Se repiten los pasos 2 al 3 hasta que concluye el número de generaciones o iteraciones y se selecciona el individuo que maximizó a la función objetivo.

La ecuación 4.13 indica la función objetivo considerada:

$$FO = (-0.01 * (cr1 * RESP11 + cr2 * RESP21 + cr3 * RESP31 - cderr1 * RESP12 - cderr2 * RESP22 - cderr3 * RESP32 - cdef1 * RESP13 - cdef2 * RESP23 - cdef3 * RESP33)) + (cerr * p * p) \quad (4.13)$$

Donde:

Factor: -0.01, permite (maximizar el término de la función y no tener números grandes).

cri: coeficiente que afecta a la extracción total anual (de todos los años simulados) de la presa i, i=1,2,3, para no manejar números grandes de la función objetivo.

cderr: coeficiente de penalización que afecta al derrame total anual (de todos los años simulados)

cdefi: coeficiente de penalización que afecta al déficit total anual (de todos los años simulados) de la presa i, i=1,2,3

cerr: coeficiente de penalización del error

(1: El Bosque 2: Valle de Bravo 3: Villa Victoria)

RESP11: volumen total de extracción simulado para la presa 1

RESP21: volumen total de extracción simulado para la presa 2

RESP31: volumen total de extracción simulado para la presa 3

cderr: coeficiente de penalización por derrame aplicado a las presas 1, 2 y 3

RESP12 derrame en la presa 1

RESP22 derrame en la presa 2

RESP32 derrame en la presa 3

cdef: coeficiente de penalización por déficit aplicado a las presas 1, 2 y 3

RESP13 déficit en la presa 1

RESP23 déficit en la presa 2

RESP33 déficit en la presa 3

cerr: coeficiente de penalización del error p en la suma de los porcentajes del volumen total anual asignado a las presas 1, 2 y 3 (esta suma debe acercarse a uno).

6.- Con el mejor individuo que representa la solución se construye el último archivo de puntos de la curva z y el archivo de los porcentajes del total anual para cada presa y se realiza una última simulación del funcionamiento de vaso del sistema para tener el resultado del comportamiento del sistema con la curva z óptima.

La figura 4.19 muestra la forma en la que opera el algoritmo genético y como interactúa con la simulación del funcionamiento de vaso para llegar a la solución óptima.

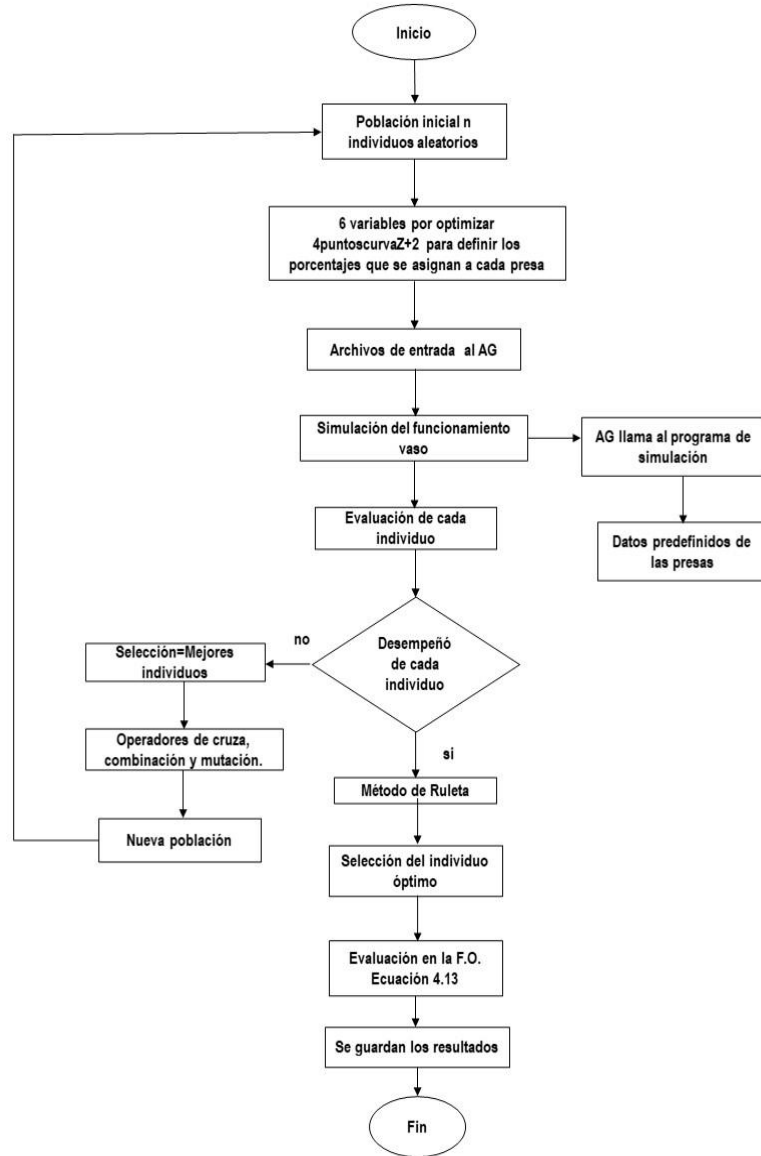


Figura 4.19. Diagrama de flujo del algoritmo genético acoplado a simulación del sistema Cutzamala

Fuente: Elaboración propia

4.20. Estimación de la curva z de extracciones optimizada con algoritmo genético combinando la simulación del funcionamiento de vaso de las tres presas principales del sistema con aportaciones de las presas derivadoras y con curvas guía (aplicables a los algoritmos de simulación de los apartados 4.10 a 4.16).

Para realizar la optimización de la curva z se utilizan de manera acoplada un algoritmo genético simple y el algoritmo de simulación descrito en los apartados 4.11 a 4.15.

En este algoritmo de optimización únicamente cambian los pasos 1,2 y 5 respecto a lo descrito en el apartado 4.10, para considerar en el proceso de optimación los coeficientes de las ecuaciones de ajuste aplicables cuando el nivel inicial en alguna (s) presa sale del rango entre curva guía alta y curva guía baja.

1.- Se genera aleatoriamente una población inicial de n individuos, cada individuo son los 4 datos de los dos puntos de la curva z, buscada dentro de un intervalo de búsqueda y los 3 porcentajes de volumen de extracción de las tres presas respecto al total anual; adicionalmente contempla los parámetros de las ecuaciones tipo recta que se consideran en cada presa de almacenamiento para los casos en que se queda por arriba de la curva guía alta o por debajo de la curva guía baja (son 3 presas x 2 casos x 2 parámetros de las rectas) lo que da un total de 19 variables a optimar.

2.- Con los individuos generados aleatoriamente se construyen archivos de entrada al algoritmo de simulación que contienen los 19 parámetros a optimar.

5.- Con el mejor individuo que representa la solución se construye el último archivo de puntos de la curva z, el archivo de los porcentajes del total anual para cada presa y el archivo que tiene los parámetros de las rectas para los casos de rebase y de quedar por debajo de curvas guías alta y baja, se realiza una última simulación del funcionamiento del vaso del sistema para tener el resultado del comportamiento del sistema con la política óptima.

4.21. Algoritmo genético con modificaciones para optimizar la curva z de extracciones, los porcentajes de asignación anual para las 3 presas y los parámetros de ajuste a la extracción debido a las curvas guía.

En total se consideran 91 parámetros a optimar; los 19 ya mencionados en el apartado anterior y los 72 necesarios para definir los valores mensuales de las curvas guía altas y bajas de las 3 presas analizadas.

Este algoritmo cambia respecto a la versión antes mencionada (apartado 4.20) en los pasos 1, 2 y 5:

1.- Se genera aleatoriamente una población inicial de n individuos, cada uno con los valores obtenidos aleatoriamente para los 91 parámetros a optimar.

2.- Con los individuos generados aleatoriamente se construyen archivos de entrada al algoritmo de simulación, para los 91 parámetros a optimizar.

5.- Con el mejor individuo que representa la solución se construye el último archivo de puntos de la curva z, el

archivo de los porcentajes del total anual para cada presa, el archivo que tiene los parámetros de las rectas para los casos de rebase y de quedar por debajo de curvas guías alta y baja, el archivo con los valores, para cada mes, de las curvas guía altas y bajas de las 3 presas y se hace una última simulación del funcionamiento de vaso del sistema para tener el resultado del comportamiento del sistema con la política óptima.

4.22. Algoritmo genético del apartado 4.21 modificando la función objetivo.

Los pasos de este algoritmo, excepto el 4, coinciden con los del apartado 4.21, la diferencia es que el programa de simulación envía al AG el dato de la suma de diferencias de almacenamiento de la presa El Bosque al excederse de 180 hm³, suma que se incluye en la nueva función objetivo:

$$FO = (-0.01 * (cr1 * RESP11 + cr2 * RESP21 + cr3 * RESP31 - cderr1 * RESP12 - cderr2 * RESP22 - cderr3 * RESP32 - cdef1 * RESP13 - cdef2 * RESP23 - cdef3 * RESP33 - csu * RESPSU)) + (cerr * p * p) \quad (4.14)$$

Donde:

Csu: coeficiente de penalización de la suma de diferencias de almacenamientos en El bosque que superan 180 hm³.

RESPSU: suma de las diferencias de almacenamientos de El Bosque, en hm³, cuando superan 180hm³.

Los pasos del algoritmo genético del apartado 4.21 se presentan en la figura 4.20.

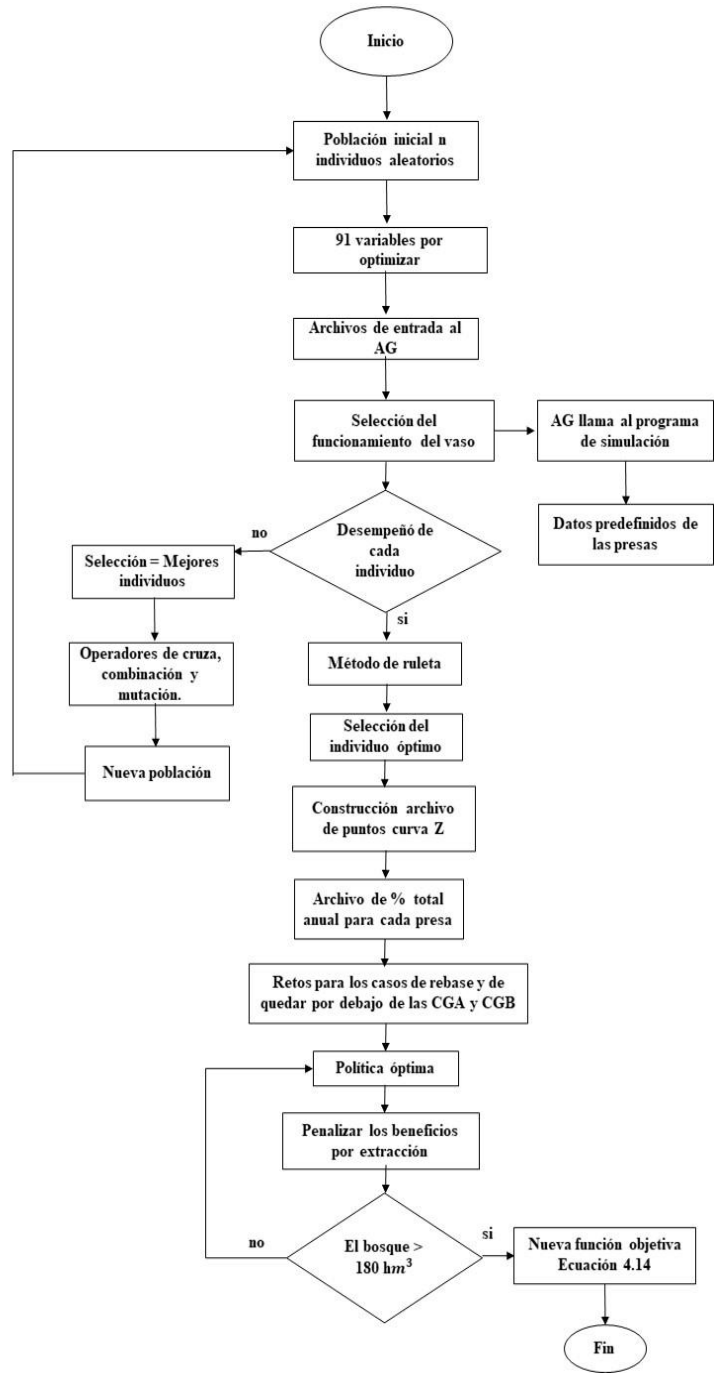


Figura 4.20. Diagrama de flujo del algoritmo genético acoplado a simulación del sistema Cutzamala modificando la función objetivo

Fuente: Elaboración propia

5. Aplicación y resultados

5.1. Obtención de políticas de extracción total anual de las presas de regulación en función del almacenamiento el 1° de noviembre.

5.1.1. Introducción

Con el objetivo de analizar los resultados de la aplicación del algoritmo de simulación – optimación, para cada una de las etapas de su desarrollo, descritas en el capítulo 3 de esta tesis, se utilizó el registro histórico de ingresos en hm³, para cada presa, en el lapso comprendido de noviembre de 1999 a octubre del 2018.

A continuación, se describen las simulaciones y los resultados obtenidos; por cada caso se presenta el algoritmo de simulación utilizado, los parámetros óptimos que se encontraron: los de la curva Z, los de los porcentajes para cada presa y, en su caso, los coeficientes de las ecuaciones de las rectas de ajuste y los valores de la curva guía. Finalmente se presentan los resultados de la simulación mensual y un resumen en el que se destacan los totales anuales de extracciones derrames y déficits.

5.2. Política AG1. Análisis de la extracción de las 3 presas y la distribución porcentual correspondiente a cada una, suponiendo una extracción mensual uniforme en los 12 meses del año.

La política de extracción óptima obtenida al aplicar el algoritmo genético (AG1) considero 7 variables de búsqueda (dos puntos de la curva Z y 3 porcentajes de asignación anual de las 3 presas principales) y sin considerar curvas guía en la simulación (es decir usando el algoritmo de simulación del apartado 4.10 y el de optimización 4.19.). Mediante un proceso de prueba y error, se definieron los coeficientes de la función objetivo correspondientes a la extracción total (cr), la penalización por derrame (cderr) y la penalización por déficit (cdéf) reportados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG1

AG 1	El Bosque	Valle de Bravo	Villa Victoria
cr	1	1	1
cderr	5000	1000	2000
cdéf	1000	2000	1000
cerr	1000000		

La figura 5.1 muestra la curva Z obtenida que representa el volumen total anual programado para entregar a la planta potabilizadora Los Berros, en función del almacenamiento inicial total de las 3 presas al primero de noviembre.

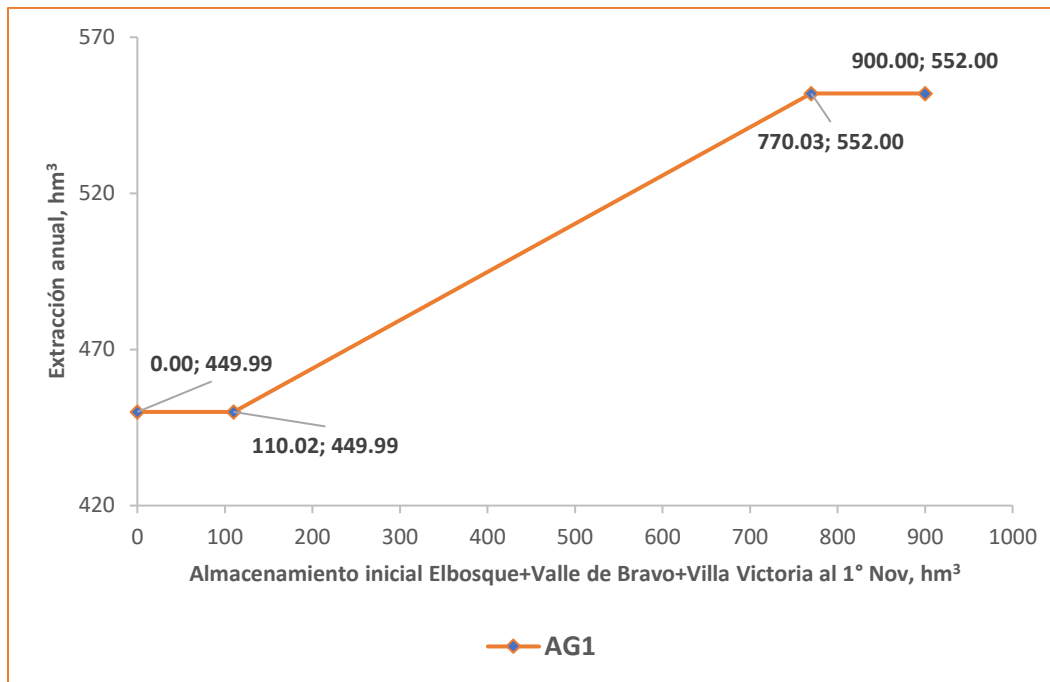


Figura 5.1. Curva Z optimizada con AG1. Sin curva guía

Los porcentajes de asignación anual se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG1	0.41	0.39	0.20	1.00

En la tabla 5.3 se presenta el resumen de los resultados de la simulación en las 3 presas. En esta simulación se observa que se tiene un mayor déficit en comparación con el derrame total.

Tabla 5.3. Resumen de resultados de la simulación (AG1)

AG1	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm³	hm³	hm³
El Bosque	103.60	210.51	3547.40
Valle de Bravo	25.87	0.00	3392.70
Villa Victoria	66.58	96.38	1803.10
Suma	196.05	306.89	8743.20

En el anexo A se muestra el detalle del funcionamiento mensual simulado, con la política AG1

5.3. Política AG2. Anexa curvas guías propuestas y optimiza ecuaciones de ajuste.

La política óptima de aportación a la planta los Berros obtenida al utilizar el algoritmo genético (AG2), que toma en cuenta en la simulación las curvas guía alta y baja propuestas como primera aproximación, y obtiene los valores óptimos de las ecuaciones de ajuste 4.12 y 4.13 (es decir usa el algoritmo de simulación del apartado 4.11 y el de optimización 4.20) ver figura 5.2. En este caso en la optimización se tuvieron 19 variables de búsqueda (las 7 que contemplaba el AG1 y 12 variables adicionales que corresponden a las ecuaciones antes mencionadas para hacer adecuaciones mensuales a la extracción por posible rebase de la curva guía alta o baja).

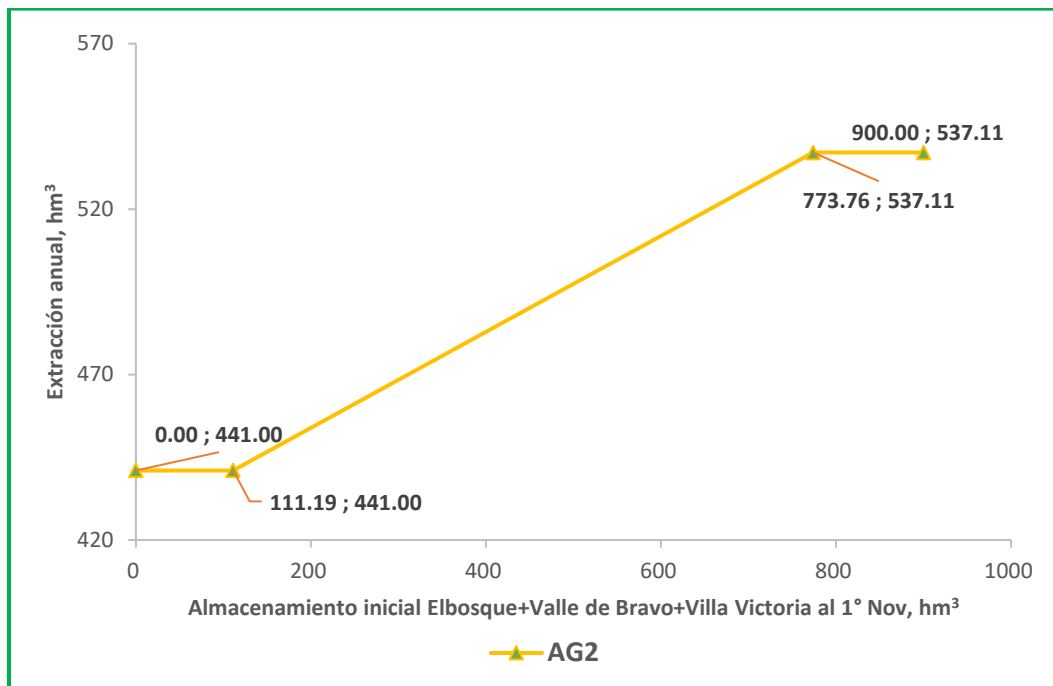


Figura 5.2. Curva Z optimizada con AG2.

Los porcentajes de asignación anual obtenidos aparecen mostrados en la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG2	0.35	0.28	0.37	1.00

En la tabla 5.5 se presentan los parámetros óptimos obtenidos para las ecuaciones 4.12 y 4.13, utilizando el algoritmo de simulación AG2.

Tabla 5.5. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	3.1989	0.8998	-2.6000	-0.5051
Valle de Bravo	1.8001	0.8997	-3.1996	-0.8996

Villa Victoria	1.8443	0.4099	-2.6666	-0.5501
----------------	--------	--------	---------	---------

De la tabla 5.6 se observa que al incorporar el ajuste a las extracciones programadas cuando se rebasa alguna de las curvas guía, se logra una reducción sustancial de los volúmenes totales de derrame y déficit, que pasan, de 196.1 y 306.9 hm³ obtenidos para la política AG1, a 47.2 y 46.6 hm³.

Tabla 5.6. Resumen de resultados de la simulación (AG2)

AG2	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	12.54	33.44	3460.90
Valle de Bravo	34.62	0.00	3262.10
Villa Victoria	0.03	13.13	1849.50
Suma	47.19	46.57	8572.50

5.4. Política AG3. Optimización de los valores correspondientes a las curvas guía alta y baja

La política AG3 considera la optimización de los valores correspondientes a las curvas guía alta y baja de las 3 principales presas del Sistema Cutzamala, es decir, considera 72 variables adicionales por optimizar, es decir en total 91 variables. En la figura 5.3 se muestra la curva Z optimizada de la política AG3.

En la tabla 5.7 se observan los valores de la curva Z con el equivalente de las extracciones en m³/s.

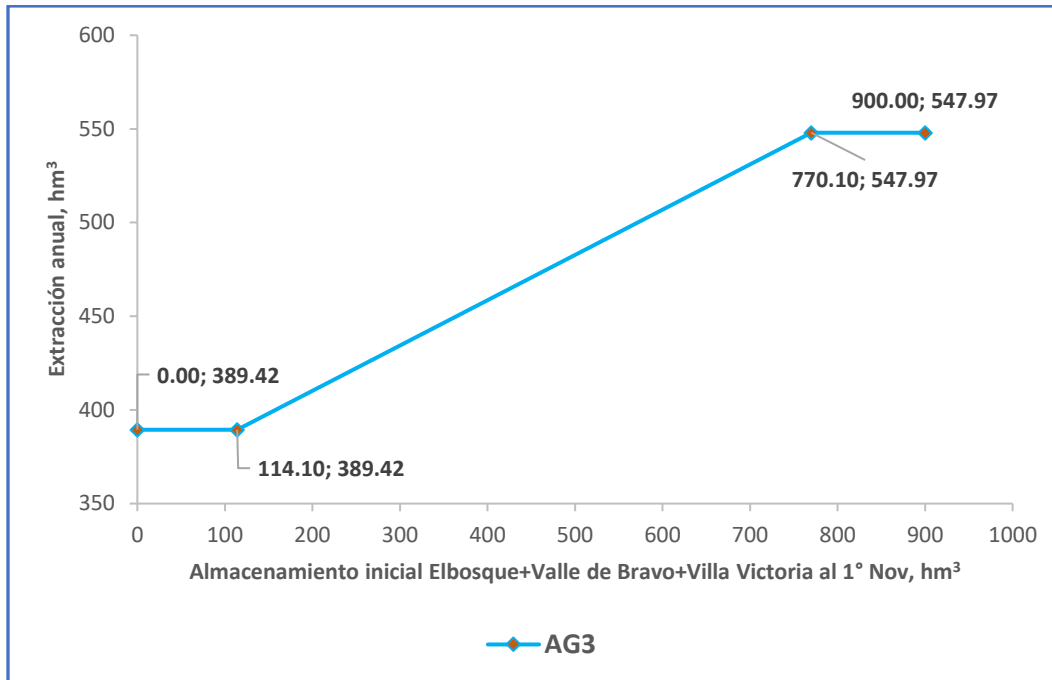


Figura 5.3. Curva Z optimizada con AG3 considerando 91 variables de búsqueda

Tabla 5.7. Curva Z política AG3 con extracciones en hm³ y en m³/s

Alm. 3 presas 1 nov	Extracción total anual	Extracción total anual
hm³	hm³	m³/s
0.00	389.42	12.35
114.10	389.42	12.35
770.10	547.97	17.38
900.00	547.97	17.38

Los porcentajes de asignación anual aparecen mostrados en la tabla 5.8.

Tabla 5.8. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG3	0.46	0.21	0.33	1.00

En la tabla 5.9 se presentan los parámetros de las ecuaciones 4.12 y 4.13, resultado de la simulación AG3.

Tabla 5.9. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	3.0761	0.8620	-1.4355	-0.8262
Valle de Bravo	3.1384	0.8724	-1.3783	-0.2976
Villa Victoria	2.6425	0.8994	-1.1414	-0.8454

En la tabla 5.10 se observa que al incluir en los parámetros que se optimizan a los valores que definen las curvas guía, ya no se presenta déficit en ninguna de las presas y el derrame ocurre solamente en la presa Valle de Bravo.

Tabla 5.10. Resumen de resultados de la simulación (AG3)

AG3	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3441.30
Valle de Bravo	3.73	0.00	3305.50
Villa Victoria	0.00	0.00	1828.70
Suma	3.73	0.00	8575.50

5.5. Política AG4. Analiza la sensibilidad de los coeficientes de penalización y considera la posibilidad de que las extracciones netas en Valle de Bravo sean negativas

La política de extracción óptima obtenida al utilizar el algoritmo genético (AG4), considera la posibilidad de tener extracciones negativas en Valle de Bravo. (es decir usa el algoritmo de simulación del apartado 4.14 y el genético 4.21) y con el objetivo de analizar la sensibilidad de los resultados a los coeficientes de penalización que se proponen en la función objetivo, para la política de extracción óptima correspondiente al algoritmo genético (AG4), se cambiaron los coeficientes de penalización por derrame en el Bosque a 10000 y el de penalización por déficit a 500 en Valle de Bravo, (Tabla 5.11).

Tabla 5.11. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG4

AG4	El Bosque	Valle de Bravo	Villa Victoria
cr	1	1	1
cderr	10000	1000	2000
cdéf	1000	500	1000
cerr	1000000		

La curva Z óptima obtenida con la política AG4 se observa en la figura 5.4 y en la tabla 5.12 aparece la curva Z con el equivalente de las extracciones en m³/s.

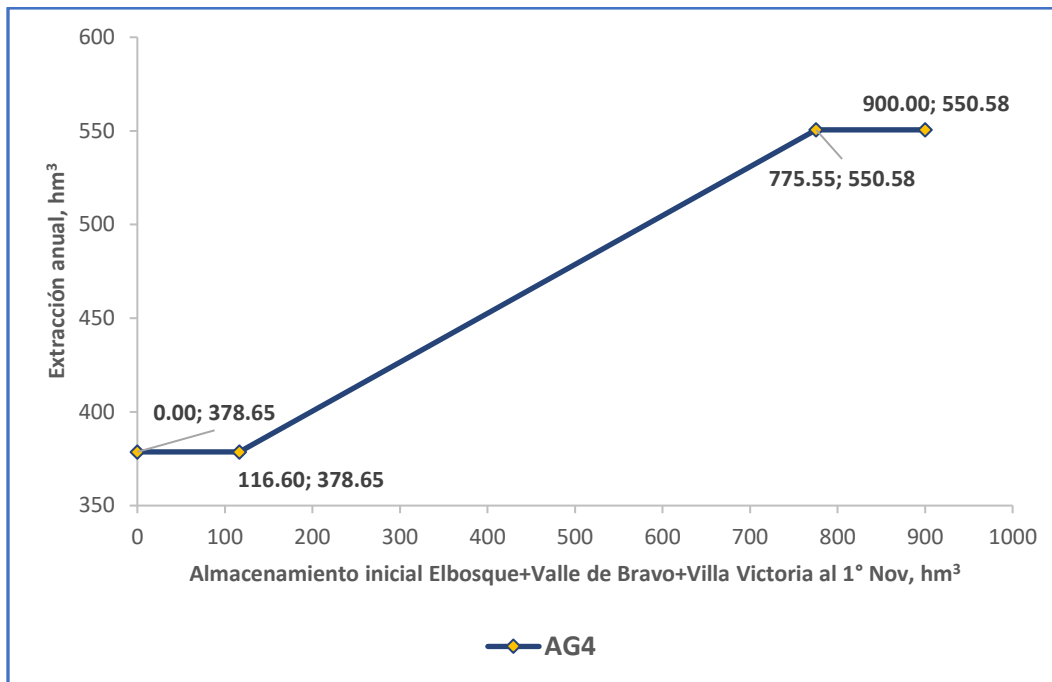


Figura 5.4. Curva Z optimizada con AG4 considerando nuevos coeficientes de penalización

Tabla 5.12. Curva Z política AG4 con extracciones en hm³ y en m³/s

Alm. 3 presas 1 nov	Extracción total anual	Extracción total anual
hm³	hm³	m³/s
0.00	378.65	12.01
116.60	378.65	12.01
775.55	550.58	17.46
900.00	550.58	17.46

Los porcentajes de asignación anual aparecen mostrados en la tabla 5.13.

Tabla 5.13. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG4	0.46	0.21	0.34	1.00

En la tabla 5.14. se presentan los parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13, obtenidos para la política AG4.

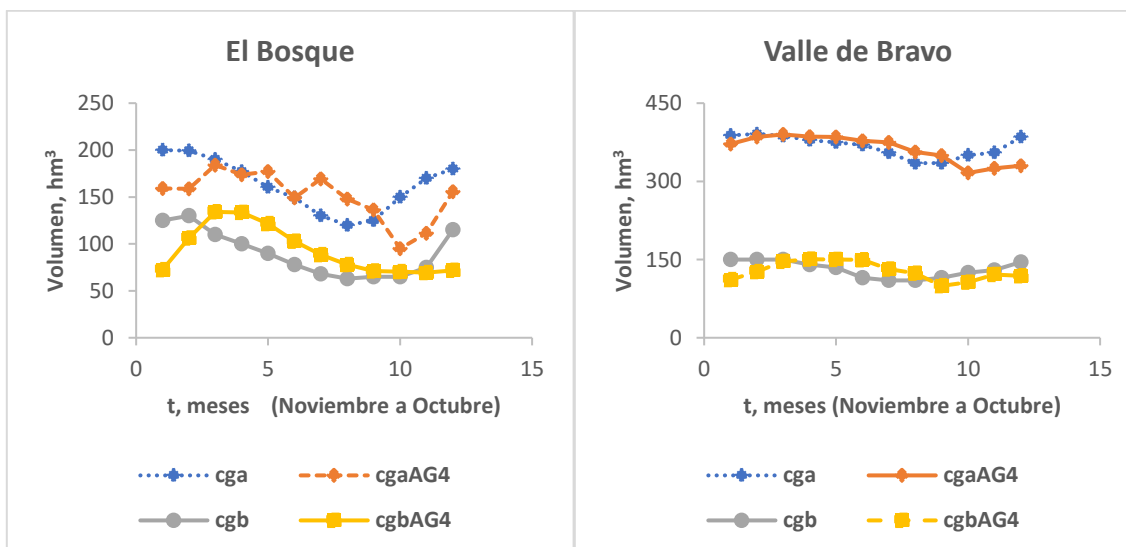
Tabla 5.14. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	2.2240	0.8560	-1.4412	-0.8483
Valle de Bravo	2.7803	0.8930	-2.8523	-0.2935
Villa Victoria	2.6392	0.3743	-1.0363	-0.7591

Las curvas guía alta y baja optimizadas con la política AG4 se presentan en la figura 5.5 y en la tabla 5.15.

Tabla 5.15. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG 4. Sistema Cutzamala

Curva guía hm ³						
Mes/Presa	El Bosque		Valle de Bravo		Villa Victoria	
	alta	baja	alta	baja	alta	baja
Nov	159.24	72.34	371.52	111.66	130.09	55.81
Dic	158.67	106.36	385.29	126.79	153.17	81.00
Ene	184.10	134.10	389.99	146.29	179.19	100.32
Feb	173.80	133.66	385.96	150.59	176.51	86.55
Mar	177.21	121.54	385.34	150.21	167.83	82.19
Abr	149.06	102.96	377.90	149.69	165.69	91.80
May	169.28	88.45	374.90	131.93	159.24	66.27
Jun	147.91	77.90	356.23	123.83	155.03	60.01
Jul	136.10	71.09	349.54	99.50	149.57	55.09
Ago	95.10	70.40	316.17	106.66	129.97	63.71
Sep	111.27	69.40	325.29	121.15	141.25	59.76
Oct	155.56	71.74	330.02	118.49	114.60	62.52



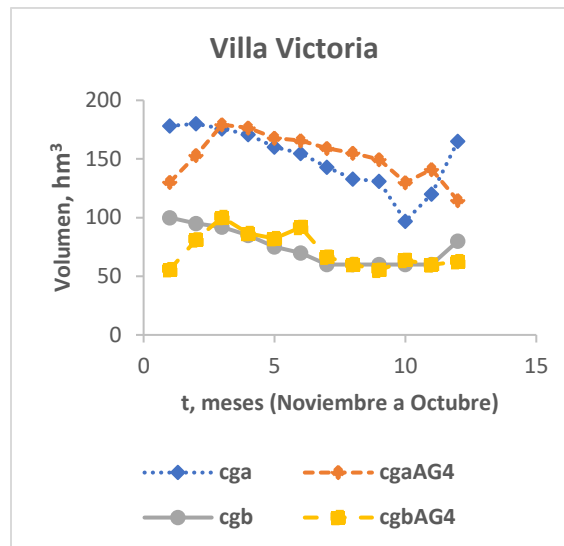


Figura 5.5. Curvas guía política AG4 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en la experiencia histórica

De la tabla 5.16 se observa que, al simular el registro, la política AG4 dio un ligero derrame, únicamente en la presa Valle de Bravo y los resultados en el déficit son nulos.

Tabla 5.16. Resumen de resultados de la simulación (AG4)

AG4	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3444.70
Valle de Bravo	5.39	0.00	3272.40
Villa Victoria	0.00	0.00	1818.20
Suma	5.39	0.00	8535.30

Dado que los resultados mostrados para el caso de la política AG4 logran condiciones de pocos derrames y sin déficit, con extracciones totales que no varían mucho respecto a la política AG3 se hizo la revisión del comportamiento de las entregas totales a la planta Potabilizadora los Berros y los almacenamientos iniciales que se habrían registrado en los principales embalses de usarse la política AG4.

En la figura 5.6 se representó el comportamiento de las extracciones totales (aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros), con la política AG4. Se observa que las entregas totales mensuales del Sistema de Presas del Cutzamala a la potabilizadora Los Berros fluctúan entre un máximo de 25.42 m³/s, que sobrepasa la capacidad de Los Berros, en los años 2000-2001 y un mínimo de 9.45 m³/s en los años 2010 y 2013, en promedio todo el periodo de simulación fluctúa en los 16.39 m³/s. Se destacan dos fechas en las que las aportaciones bajan cerca de 10 m³/s. por lo que se consideró necesario realizar nuevas adecuaciones al algoritmo de simulación.

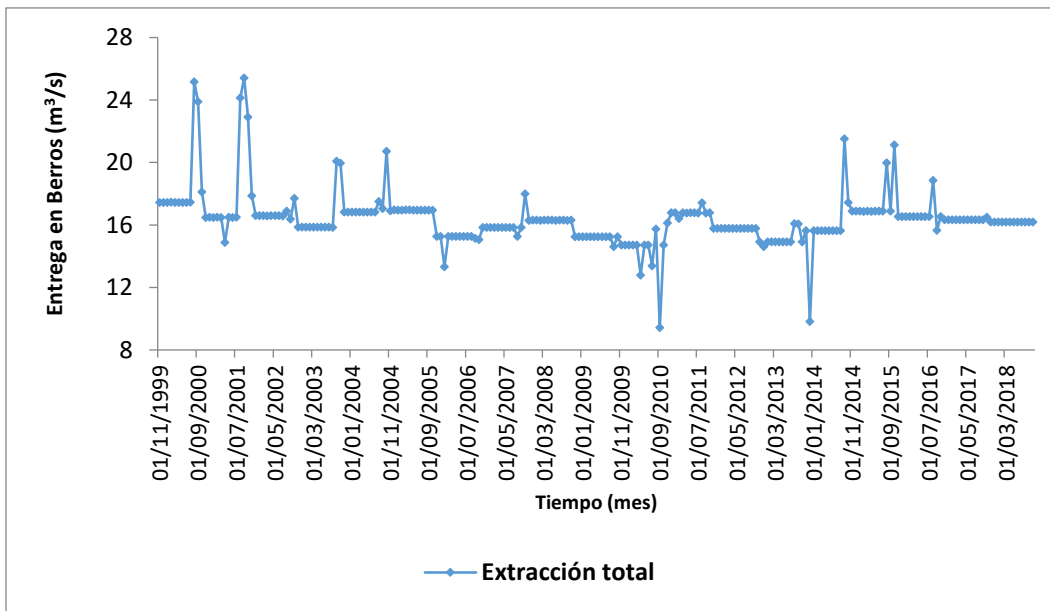


Figura 5.6. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros, política AG4

En las figuras 5.7 a 5.9 se dibujaron los almacenamientos obtenidos con la simulación realizada con la política AG 6. Estos datos se compararon con la operación que realmente se tuvo en el sistema.

En el caso de la presa El Bosque se destaca que, en general, en los últimos meses de la temporada de lluvias los almacenamientos máximos que se obtienen con la política son menores que los de la operación histórica real, lo cual significa que, al menos potencialmente, las restricciones para enviar agua de Tuxpan a El Bosque se reducen significativamente.

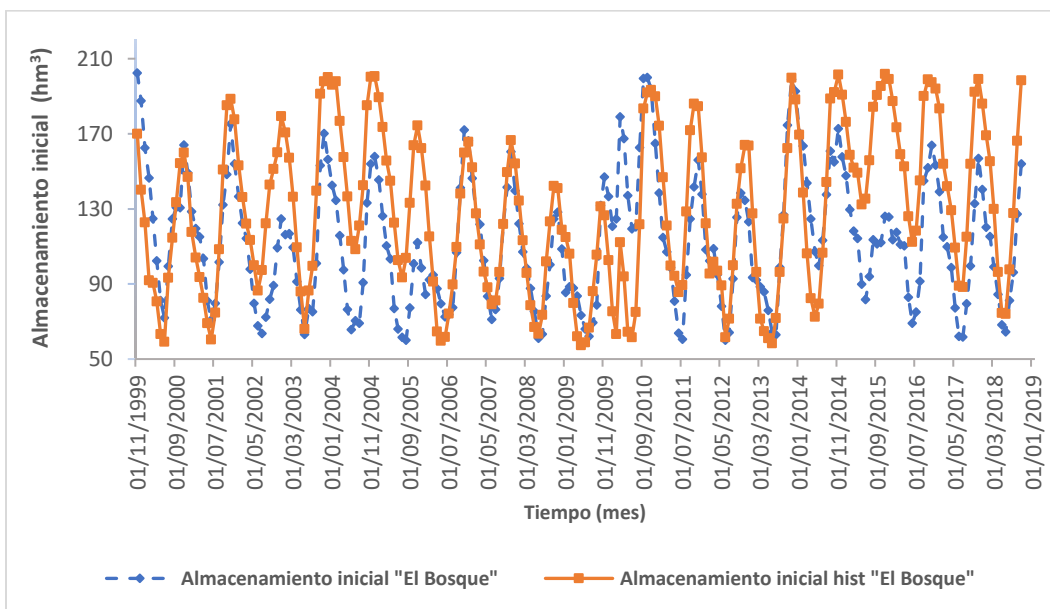


Figura 5.7. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Política AG4

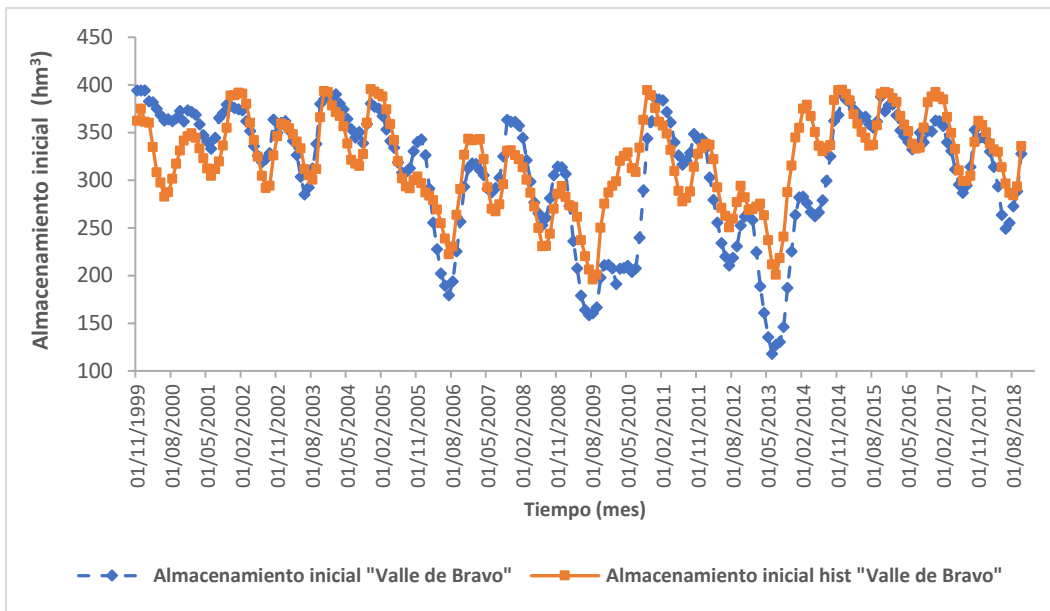


Figura 5.8. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Política AG4

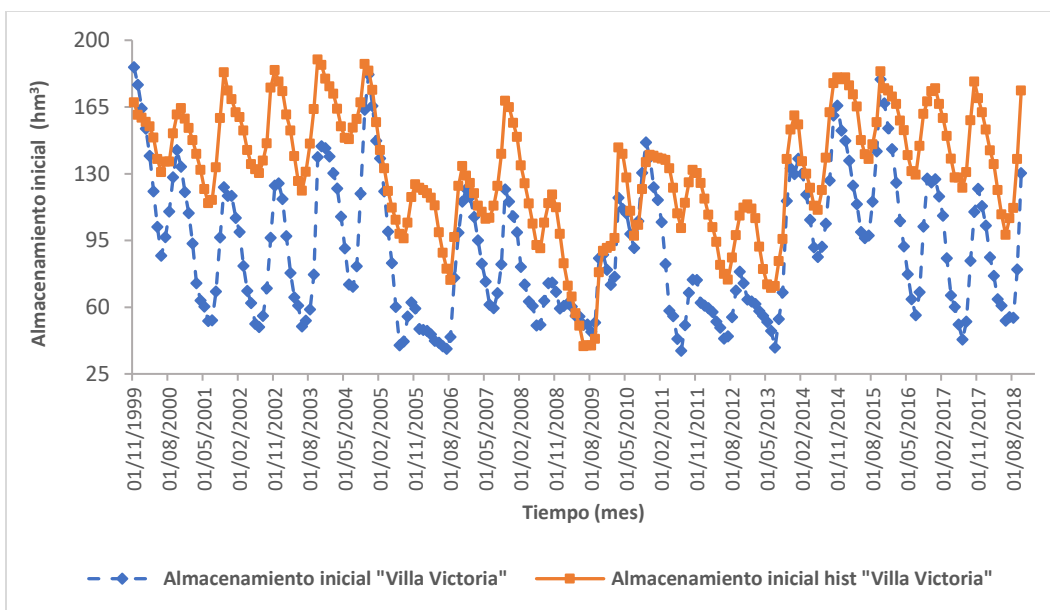


Figura 5.9. Almacenamiento de la Presa Villa Victoria. Política AG4

En el anexo B se muestra el detalle del funcionamiento mensual simulado, con la política AG4

Tomando en cuenta los comentarios anteriores, se realizaron algunos ajustes que se comentan a continuación: Para la política **AG5** se modificó la función objetivo buscando reducir aún más los niveles máximos en EL Bosque para facilitar la transferencia Tuxpán – El Bosque.

Para la política **AG6** fue necesario modificar el programa de simulación para evitar entregas muy bajas a la planta de Los Berros que se muestran en la figura 5.6 y tampoco rebasar la capacidad máxima de dicha planta.

5.6. Política AG5. Penaliza almacenamientos altos en la presa El Bosque.

Para este caso, se cambió la función objetivo penalizando la suma de diferencias de almacenamientos en la presa el bosque cuando excede los 180 hm³, el cual se multiplica por un coeficiente csu (Tabla 5.17), usa el algoritmo de simulación del apartado 4.14 y el genético 4.22.

Tabla 5.17. Coeficientes de penalización considerados en la Política AG5

AG 7	El Bosque	Valle de Bravo	Villa Victoria
cr	1	1	1
cderr	10000	1000	2000
cdéf	1000	500	1000
cerr	1000000		
csu	1000		

La curva Z óptima obtenida con la política AG5 se observa en la figura 5.10.

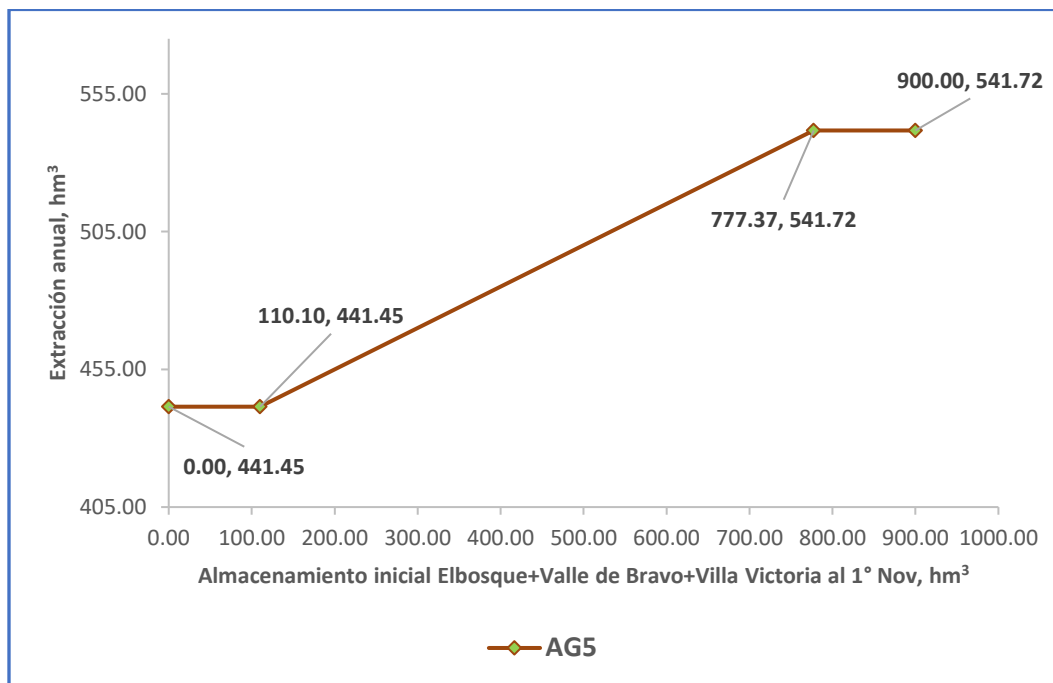


Figura 5.10. Curva Z optimizada con AG5

Los porcentajes de asignación anual aparecen mostrados en la tabla 5.18.

Tabla 5.18. Porcentajes de extracción total anual para cada presa.

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG5	0.35	0.21	0.44	1.00

En la tabla 5.19 se presentan los parámetros de las ecuaciones 4.12 y 4.13, obtenidos para política óptima AG5.

Tabla 5.19. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	3.1992	0.8992	-1.6549	-0.4465
Valle de Bravo	2.8342	0.8661	-3.1639	-0.8513
Villa Victoria	1.2320	0.5622	-2.8134	-0.6783

De la tabla 5.20 se observa que al simular el registro histórico y con la condición inicial de presas llenas, la política AG5 dio un mayor derrame únicamente en la presa Valle de Bravo y los resultados en el déficit son nulos.

Tabla 5.20. Resumen de resultados de la simulación (AG5)

AG5	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3440.10
Valle de Bravo	3.85	0.00	3285.50
Villa Victoria	0.00	0.00	1827.40
Suma	3.85	0.00	8553.00

En la figura 5.11 se observan las entregas a Los Berros sin embargo se presentan entregas pequeñas de 7.9 m³/s, por lo que se planteó a seguir proponiendo cambios en la simulación.

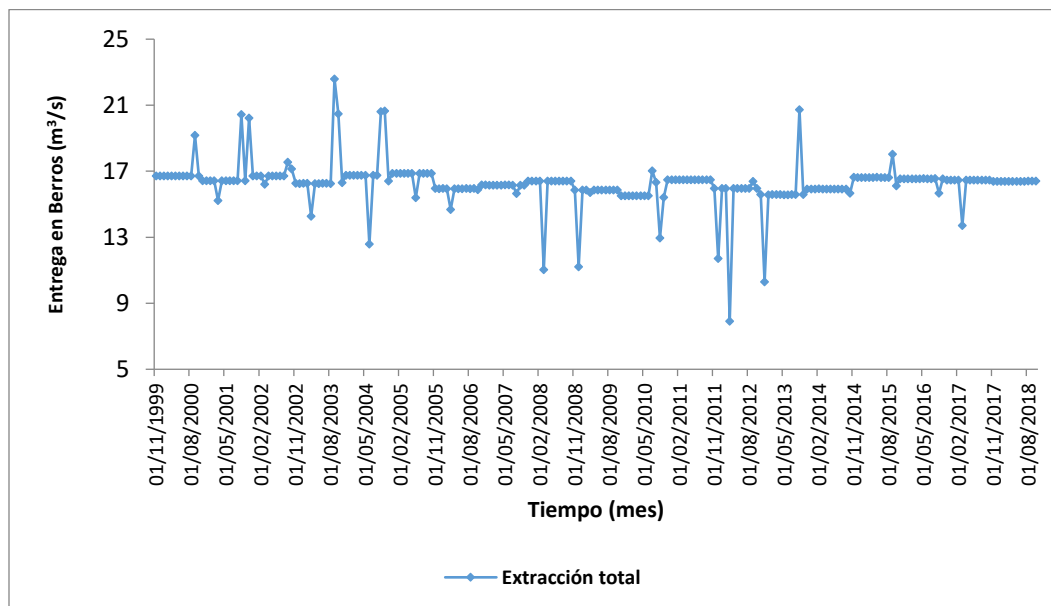


Figura 5.11. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros, política AG5

En la figura 5.12 se observan los niveles obtenidos en la presa El Bosque de las políticas AG4 y AG5 para mostrar el efecto de las modificaciones. Se observa una reducción ligera en los niveles máximos que se alcanzan.

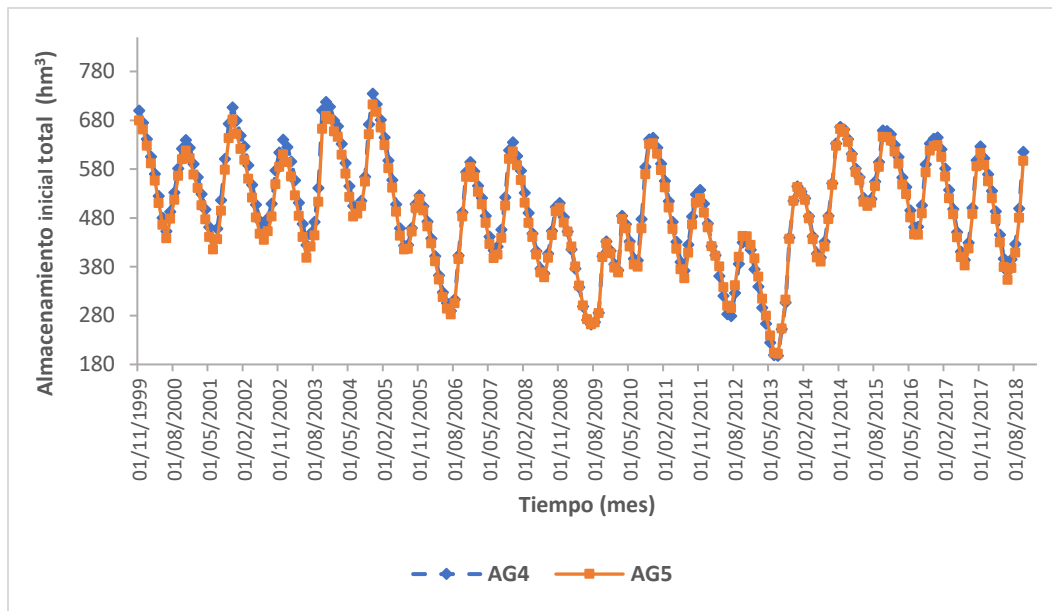


Figura 5.12. Almacenamiento inicial AG4 vs AG5

5.7. Política AG6. Analiza el NAMINO original de Valle de Bravo y los almacenamientos iniciales al NAMO.

Se ha mencionado con anterioridad que el programa de simulación se modificó para evitar entregas muy pequeñas a la Potabilizadora Los Berros y para no sobrepasar la capacidad de dicha planta.

La política de extracción óptima al utilizar el algoritmo genético (AG6), se obtuvo con la función objetivo y condiciones del AG4, (es decir usa el algoritmo de simulación del apartado 4.16 y el genético 4.21), el cual considera el valor original en el NAMINO de Valle de Bravo, de 50 hm³, y 394.39 hm³ en el NAMO.

La curva Z óptima obtenida con la política AG6 se observa en la figura 5.13. y en la tabla 5.21 aparece la curva Z con el equivalente de las extracciones en m³/s.

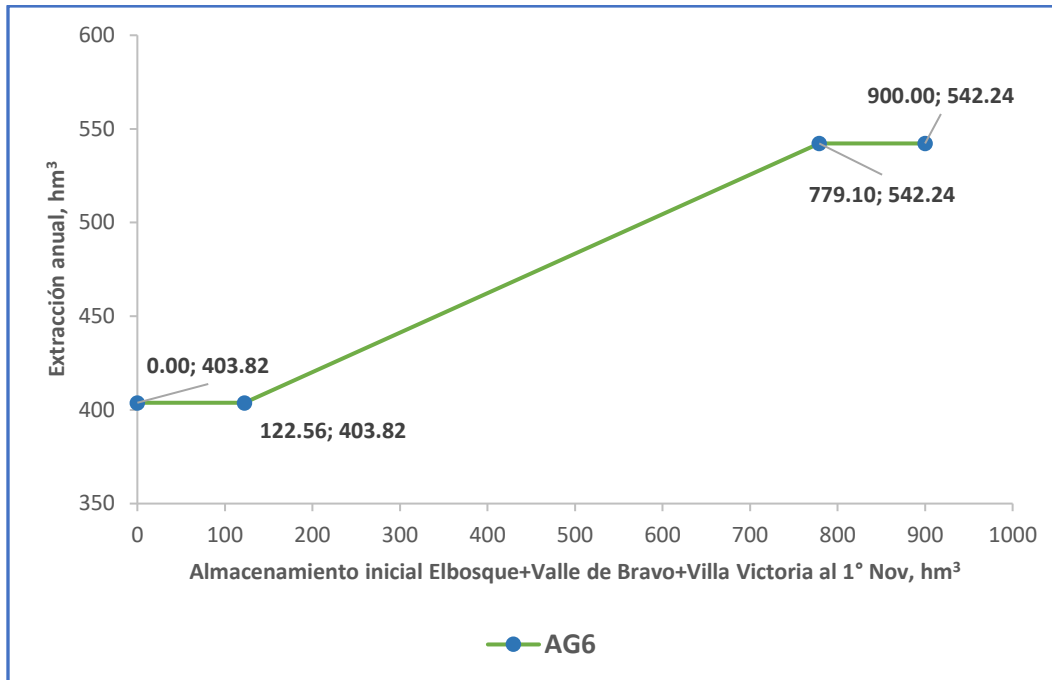


Figura 5.13. Curva Z optimizada con AG6

Tabla 5.21. Curva Z política AG6 con extracciones en hm³ y en m³/s

Alm. 3 presas 1nov hm³	Extracción total anual hm³	Extracción total anual m³/s
0.00	403.82	12.81
122.56	403.82	12.81
779.10	542.24	17.19
900.00	542.24	17.19

Los porcentajes de asignación anual aparecen mostrados en la tabla 5.22.

Tabla 5.22. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Política AG6

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG6	0.35	0.32	0.33	1.00

En la tabla 5.23 se presentan los parámetros de las ecuaciones 4.12 y 4.13, resultado de la política óptima AG6.

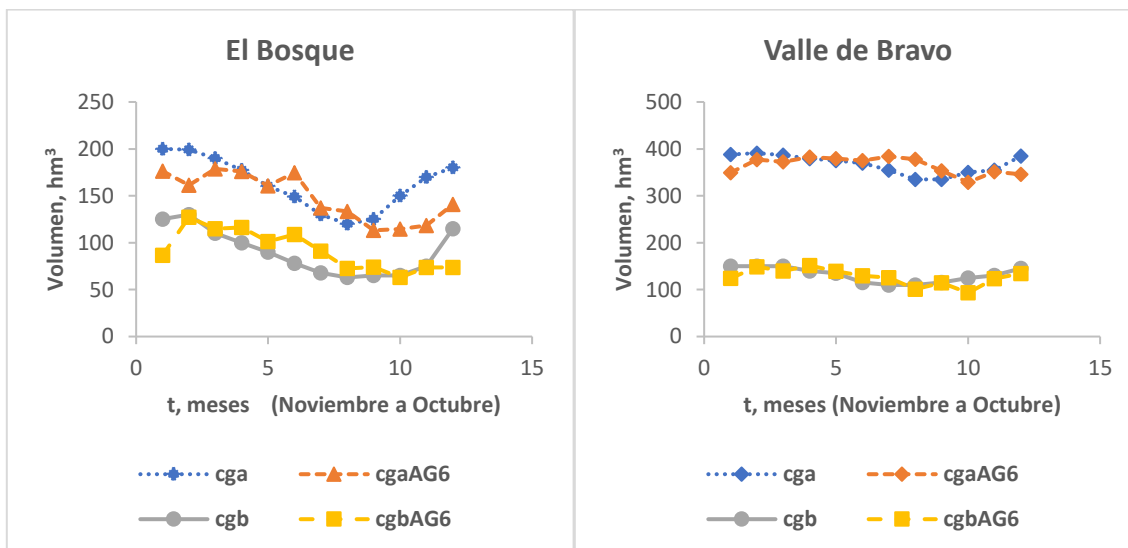
Tabla 5.23. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	2.0015	0.6266	-2.1280	-0.7590
Valle de Bravo	3.1823	0.7243	-1.7924	-0.8593
Villa Victoria	2.4089	0.8362	-1.3707	-0.4505

Las curvas guía alta y baja optimizadas con la política AG6 se presentan en la figura 5.14 y en la tabla 5.24.

Tabla 5.24. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG 6. Sistema Cutzamala

Curva guía hm ³						
Mes/Presas	El Bosque		Valle de Bravo		Villa Victoria	
	alta	baja	alta	baja	alta	baja
Nov	176.33	86.64	349.48	123.89	134.22	65.52
Dic	161.42	127.17	376.89	148.85	153.00	79.32
Ene	178.66	115.03	372.14	140.06	177.27	102.42
Feb	176.10	116.45	382.50	151.36	170.87	85.42
Mar	160.69	101.17	379.10	138.90	166.33	95.85
Abr	174.66	108.66	375.26	129.49	163.61	90.85
May	137.21	91.22	383.79	125.73	161.53	83.66
Jun	133.49	72.58	378.00	101.16	156.19	76.98
Jul	113.23	74.11	353.06	114.51	150.55	60.89
Ago	114.49	62.99	328.77	93.15	131.96	69.06
Sep	118.24	73.64	351.57	123.78	137.62	69.38
Oct	140.68	73.69	345.77	134.10	117.04	60.94



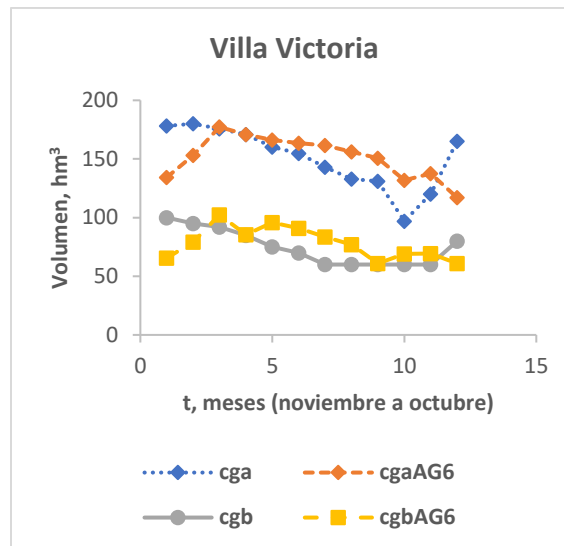


Figura 5.14. Curvas guía política AG6 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en operación histórica

Al aplicar la política óptima política AG6 se obtienen los derrames y déficit que se muestran en la tabla 5.25.

Tabla 5.25. Resumen de resultados de la simulación (AG6)

AG6	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3434.90
Valle de Bravo	45.94	0.00	3246.80
Villa Victoria	0.00	0.00	1814.40
Suma	45.94	0.00	8496.10

En la tabla 5.25 se presenta un resumen de los resultados de la simulación. Se observa que, al simular el registro histórico, la política AG6 dio un mayor derrame en Valle de Bravo, respecto a la política AG4, y los resultados en el déficit son nulos.

En las tablas 5.26 a 5.28, se muestran los resúmenes anuales del comportamiento de las 3 presas y en el Anexo C el detalle del funcionamiento mensual simulado.

Tabla 5.26. Resumen anual. Pol. AG6. El Bosque

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	149.84	177.80	149.42	1736.12
2000-2001	0.00	0.00	189.89	161.50	138.94	1735.00
2001-2002	0.00	0.00	105.59	163.80	136.70	1734.77
2002-2003	0.00	0.00	188.47	156.90	127.35	1733.77
2003-2004	0.00	0.00	151.37	168.70	128.47	1733.89
2004-2005	0.00	0.00	157.65	182.00	112.76	1732.11
2005-2006	0.00	0.00	181.40	135.70	106.34	1731.28
2006-2007	0.00	0.00	177.43	195.30	137.40	1734.84
2007-2008	0.00	0.00	160.28	172.20	108.92	1731.61
2008-2009	0.00	0.00	148.20	138.10	98.48	1730.25
2009-2010	0.00	0.00	266.44	246.30	161.20	1737.37
2010-2011	0.00	0.00	138.35	163.50	116.04	1732.54
2011-2012	0.00	0.00	160.10	168.10	107.10	1731.37
2012-2013	0.00	0.00	237.53	186.10	112.00	1732.01
2013-2014	0.00	0.00	204.93	247.30	157.71	1737.00
2014-2015	0.00	0.00	192.04	218.60	127.97	1733.84
2015-2016	0.00	0.00	209.16	183.50	114.38	1732.32
2016-2017	0.00	0.00	180.79	171.80	113.80	1732.25
2017-2018	0.00	0.00	225.30	197.70	120.04	1732.99
Total	0.00	0.00	3424.76	3434.90	2375.02	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					63.55	hm ³

Tabla 5.27. Resumen anual. Pol. AG6. Valle de Bravo

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	147.68	161.80	360.09	1828.04
2000-2001	12.80	0.00	178.06	150.30	359.34	1828.00
2001-2002	0.00	0.00	154.15	179.30	351.29	1827.54
2002-2003	30.86	0.00	207.02	150.20	345.36	1827.20
2003-2004	2.28	0.00	206.58	203.90	357.54	1827.90
2004-2005	0.00	0.00	148.89	215.10	326.56	1826.13
2005-2006	0.00	0.00	190.04	237.00	245.80	1821.10
2006-2007	0.00	0.00	159.01	92.30	282.49	1823.40
2007-2008	0.00	0.00	147.40	207.30	285.03	1823.56
2008-2009	0.00	0.00	139.30	243.20	197.24	1817.99
2009-2010	0.00	0.00	190.91	37.60	203.94	1818.42
2010-2011	0.00	0.00	140.22	159.90	301.26	1824.57
2011-2012	0.00	0.00	130.41	238.30	224.43	1819.73
2012-2013	0.00	0.00	165.69	186.00	141.54	1814.32
2013-2014	0.00	0.00	187.50	46.40	220.02	1819.45
2014-2015	0.00	0.00	195.29	165.10	321.34	1825.81
2015-2016	0.00	0.00	190.95	195.60	329.24	1826.28
2016-2017	0.00	0.00	181.81	195.90	309.80	1825.10
2017-2018	0.00	0.00	186.19	181.40	288.73	1823.79

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
Total	45.94	0.00	3247.10	3246.60	5451.04	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					89.40	hm ³

Tabla 5.28. Resumen anual. Pol. AG6. Villa Victoria

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	60.48	97.70	136.59	2603.72
2000-2001	0.00	0.00	74.97	86.10	103.25	2602.36
2001-2002	0.00	0.00	78.23	91.40	96.61	2602.07
2002-2003	0.00	0.00	143.63	111.80	103.68	2602.38
2003-2004	0.00	0.00	170.99	139.60	127.38	2603.37
2004-2005	0.00	0.00	55.20	172.30	105.72	2602.46
2005-2006	0.00	0.00	100.42	50.90	57.67	2600.09
2006-2007	0.00	0.00	115.18	102.70	101.83	2602.30
2007-2008	0.00	0.00	20.64	72.70	81.58	2601.35
2008-2009	0.00	0.00	67.97	52.70	62.78	2600.40
2009-2010	0.00	0.00	124.04	84.20	110.54	2602.67
2010-2011	0.00	0.00	41.45	102.70	77.36	2601.14
2011-2012	0.00	0.00	42.73	33.70	54.28	2599.86
2012-2013	0.00	0.00	98.63	52.20	61.83	2600.36
2013-2014	0.00	0.00	133.02	84.70	122.80	2603.19
2014-2015	0.00	0.00	123.82	132.20	129.54	2603.45
2015-2016	0.00	0.00	101.76	135.70	112.96	2602.77
2016-2017	0.00	0.00	98.72	107.00	94.10	2601.97
2017-2018	0.00	0.00	126.95	104.00	88.31	2601.69
Total	0.00	0.00	1778.83	1814.30	1828.81	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					36.47	hm ³

En la figura 5.15 se presentan las aportaciones totales a la planta potabilizadora Los Berros de usarse la política AG6. Se observa que los cambios en el algoritmo de simulación utilizado en el apartado 4.16, en ningún mes se excedió la capacidad considerada para la planta de Los Berros y, por otra parte, los valores mínimos del gasto de entrega son siempre mayores que 14.0 m³/s.

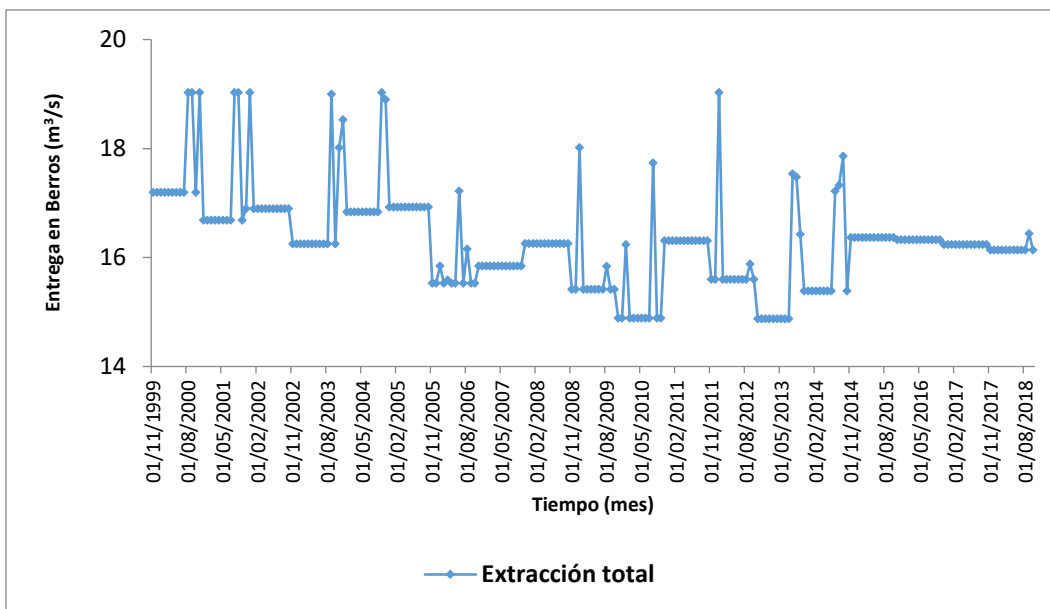


Figura 5.15. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros

En las figuras 5.16 a 5.19 se presenta la comparación de los almacenamientos iniciales simulados con la política AG6 respecto a la simulación histórica para cada una de las 3 presas. Se observa que los niveles máximos obtenidos en El Bosque son menores, lo que facilita las transferencias de Tuxpan a El Bosque. En el caso de Valle de Bravo se obtienen varios meses con niveles cercanos a 150 hm³, y en Villa Victoria se observan niveles similares a los históricos.

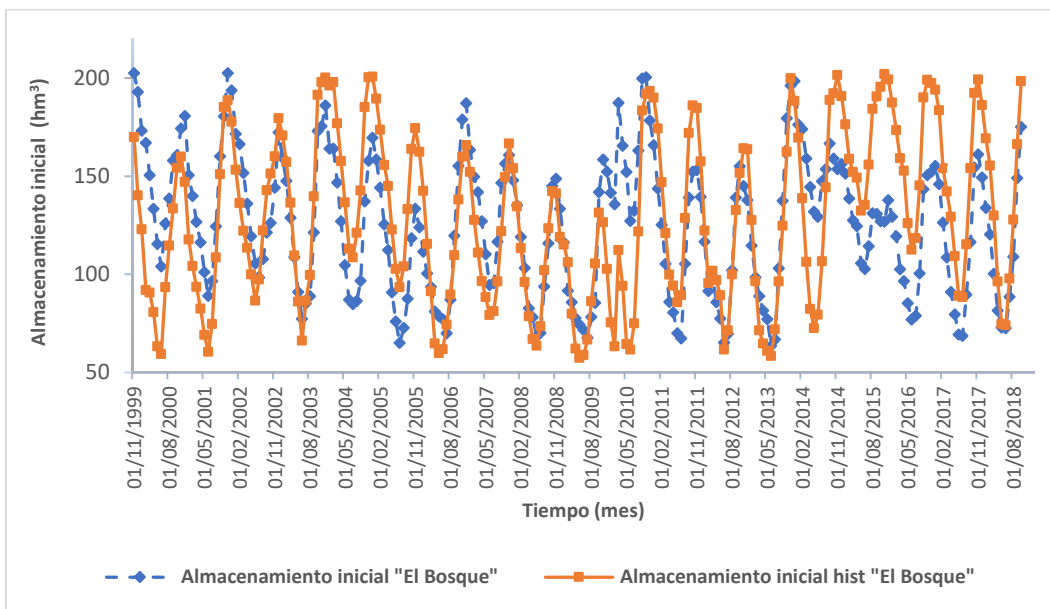


Figura 5.16. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Pol AG6

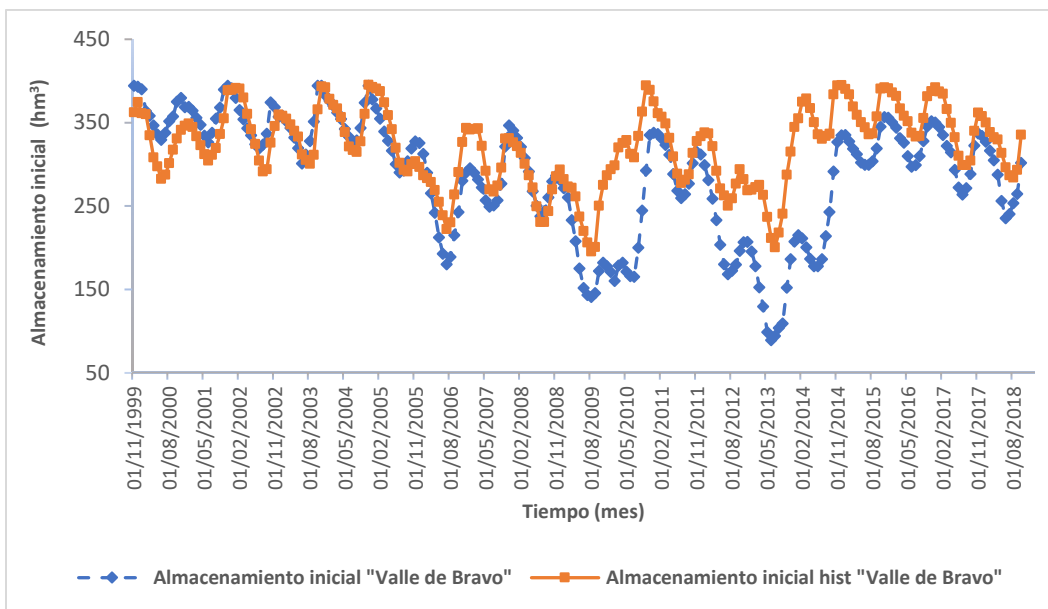


Figura 5.17. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Pol AG6

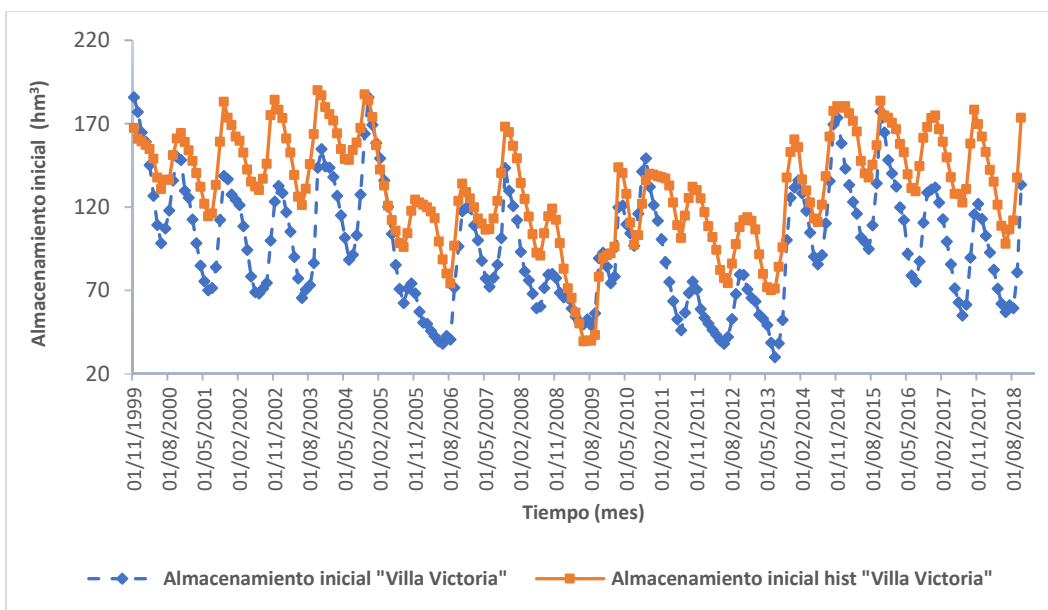


Figura 5.18. Almacenamiento inicial de la Presa Villa Victoria. Pol AG6

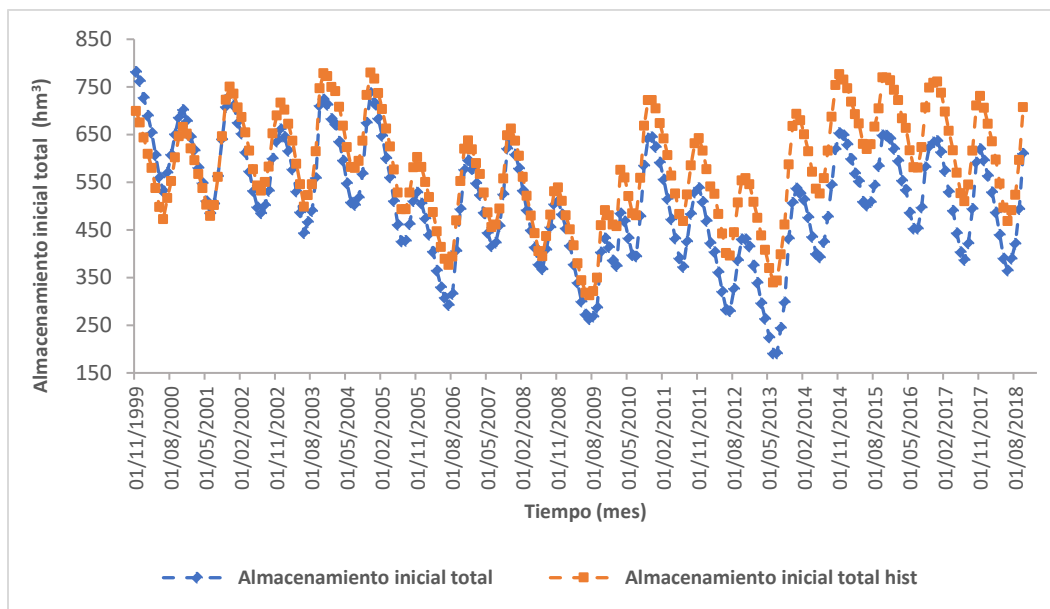


Figura 5.19. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico.

En las figuras anteriores, particularmente en la 5.18 correspondiente a la comparación de la presa Villa Victoria, se observa que el almacenamiento simulado utiliza todo el volumen útil disponible, y en Valle de Bravo se llega a niveles muy inferiores a los históricos.

Finalmente, en la figura 5.20 se comparan las entregas a Los Berros obtenidas al simular la política AG6 con las entregas a la planta de Los Berros registradas históricamente.

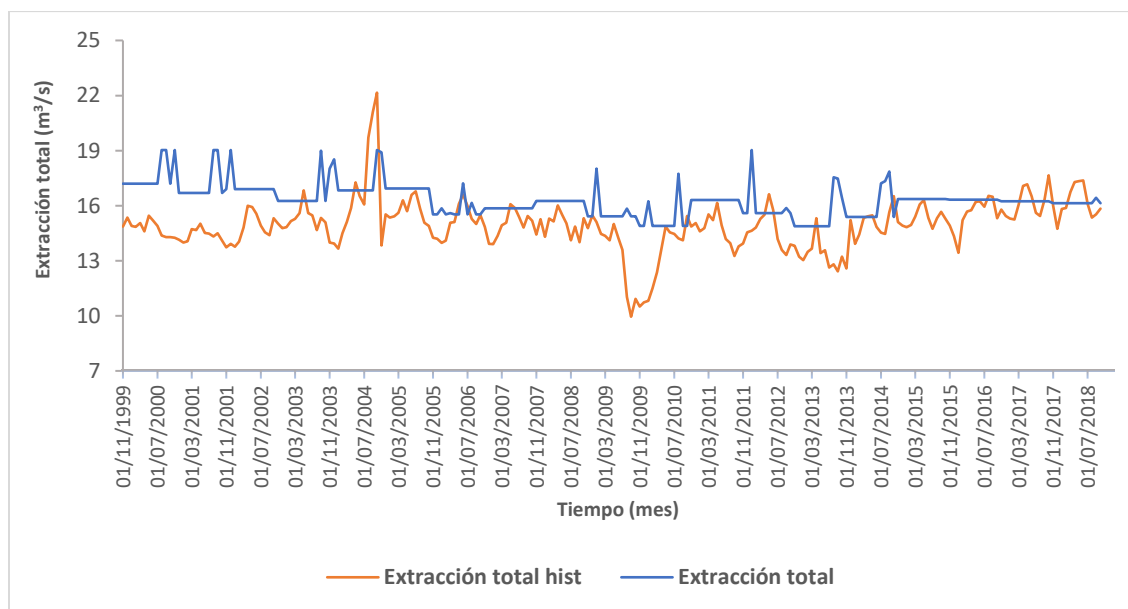


Figura 5.20. Comparación de entregas a la planta de Los Berros

Se observa que la política con la que se simuló la operación del sistema permite entregas siempre superiores a los 14.5 m³/s, aunque, como ya se comentó se utiliza toda la capacidad de almacenamiento disponible teóricamente.

5.8. Política AG7. Analiza el NAMINO de Valle de Bravo modificado y Vol. inicial NAMO).

Los resultados obtenidos hasta la política AG4 fueron presentados al personal técnico de la CONAGUA, quienes, además de comentarios menores consideraron que debe tomarse en cuenta que, en la práctica, para almacenamientos menores a 190 hm³ en la presa Valle de Bravo se perjudica la actividad turística en el lago de la presa y también se inducen problemas de calidad del agua que dificultan su potabilización en la planta Los Berros.

Por este motivo se decidió realizar ensayos adicionales en las que se incrementaron las penalizaciones por déficit en algunas de las presas y se modificó el NAMINO de Valle de Bravo a un valor de 170 hm³ y volumen inicial al NAMO de 394.39 hm³. Los resultados obtenidos para la política, a la que se denominó AG7 se muestran a continuación.

En la figura 5.21 se muestra la comparación de la curva Z óptima de las políticas 4, 6 y 7, y en la tabla 5.29 se muestra la curva Z con el equivalente a extracciones en m³/s. En la tabla 5.30 se muestra la comparación de las entregas a la planta potabilizadora los Berros con las políticas 4, 6 y 7.

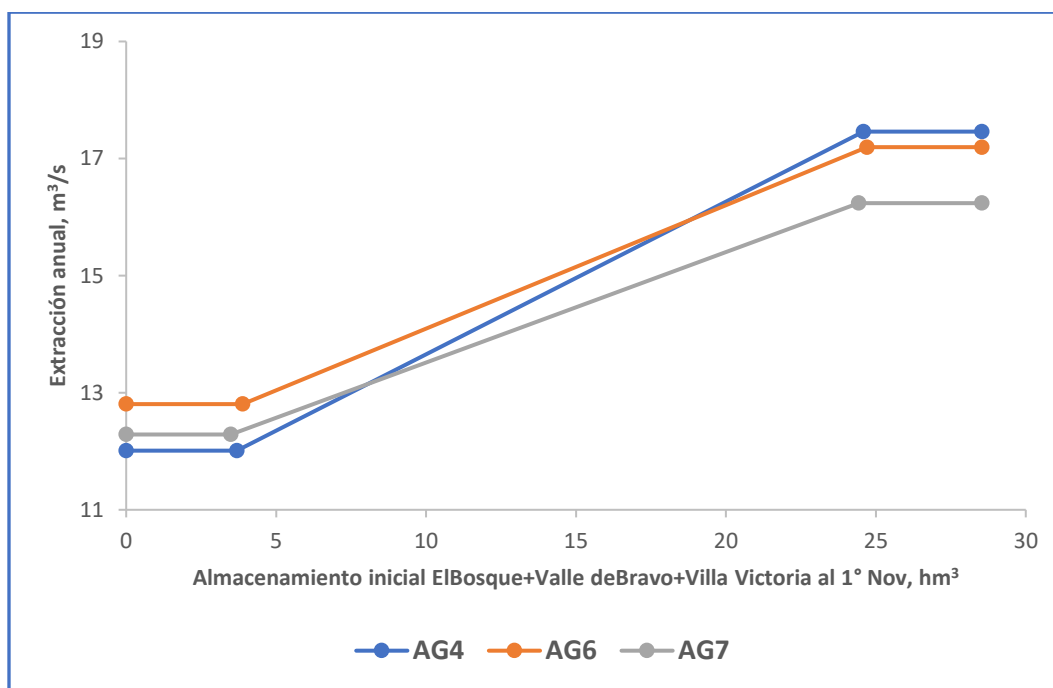


Figura 5.21. Curva Z optimizada con AG7.

Tabla 5.29. Curva Z política AG7 con extracciones en hm³ y en m³/s

Alm. 3 presas 1nov hm ³	Extracción total anual hm ³	Extracción total anual m ³ /s
0.00	387.46	12.29
110.19	387.46	12.29
770.51	512.09	16.24
900.00	512.09	16.24

Tabla 5.30. Entregas a Berros en m³/s

Alm 3 presas 1 Nov	Entregas a Berros	Entregas a Berros	Entregas a Berros
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
hm ³	POL AG4	POL AG6	POL AG7
0.00	12.01	12.81	12.29
110.20	12.01	12.81	12.29
116.60	12.01	12.81	12.33
122.56	12.06	12.81	12.36
200.00	12.70	13.33	12.83
300.00	13.53	13.99	13.43
400.00	14.35	14.66	14.02
500.00	15.18	15.33	14.62
600.00	16.01	16.00	15.22
700.00	16.84	16.66	15.82
770.50	17.42	17.13	16.24
775.55	17.46	17.17	16.24
779.10	17.46	17.19	16.24
900.00	17.46	17.19	16.24

Como se muestra en la tabla 5.30 las diferencias más grandes cuando las presas estén muy vacías el 1° de noviembre son del orden de 0.75 m³/s con entregas mayores para la política AG6, que considera el NAMINO original en Valle de Bravo; cuando las presas están llenas, la política AG7 (que considera un volumen útil menor al considerar un NAMINO más alto en Valle de Bravo) propone entregas menores que la política AG6, con una diferencia máxima de 0.95 m³/s.

Los porcentajes de asignación anual aparecen mostrados en la tabla 5.31.

Tabla 5.31. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Política AG7

Ensayo	% El bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG7	0.41	0.36	0.23	1.00

En la tabla 5.32 se presentan los parámetros de las ecuaciones 4.12 y 4.13, resultado de la política óptima AG7.

Tabla 5.32. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.12 y 4.13

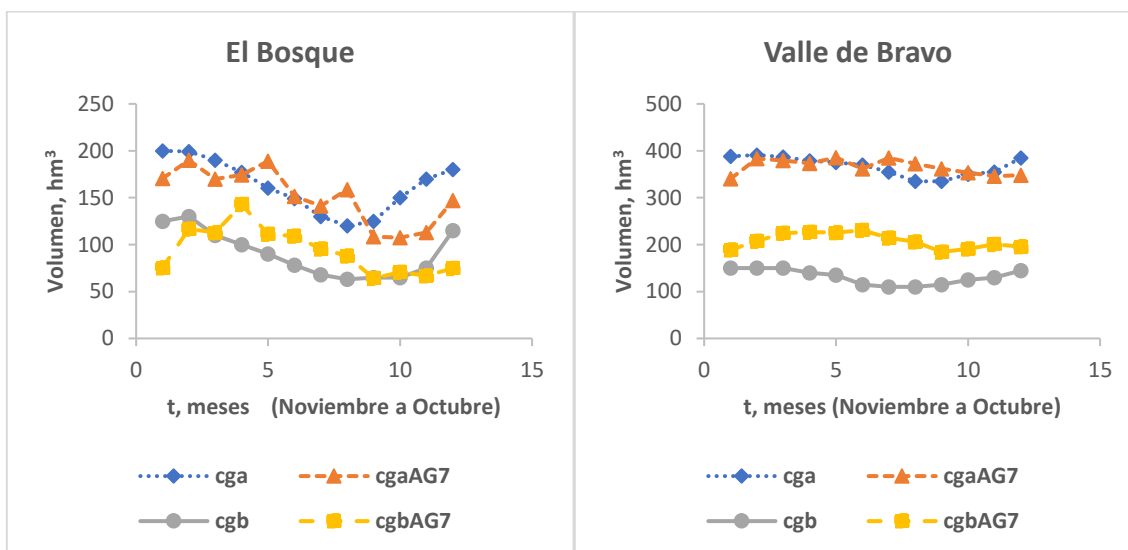
Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	1.8248	0.8740	-2.6227	-0.7863
Valle de Bravo	2.3329	0.5052	-2.9481	-0.7824
Villa Victoria	3.0711	0.8555	-2.3221	-0.4207

Las curvas guía altas y bajas optimizadas con la política AG7 se presentan en la figura 5.22 y en la tabla 5.33.

Lo más notable de este resultado es que, como era de esperarse, al modificar su NAMINO, la curva guía baja de Valle de Bravo queda más arriba.

Tabla 5.33. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG7. Sistema Cutzamala

Curva guía hm ³						
Mes/Presas	El Bosque		Valle de Bravo		Villa Victoria	
	alta	baja	alta	baja	alta	baja
Nov	170.59	75.35	340.27	189.12	130.04	55.62
Dic	189.93	116.79	383.58	207.57	151.18	81.39
Ene	170.04	112.88	379.35	224.44	177.35	99.39
Feb	174.26	142.80	373.48	226.30	177.30	101.31
Mar	188.99	111.36	385.69	225.59	178.31	101.77
Abr	151.45	109.26	361.37	230.44	173.84	75.17
May	141.10	95.54	384.70	214.27	166.63	82.90
Jun	158.68	88.16	372.61	206.43	151.54	74.79
Jul	108.44	64.02	361.88	184.21	133.05	63.10
Ago	107.42	70.63	353.57	191.41	126.04	56.35
Sep	112.99	66.93	345.80	200.95	121.14	69.93
Oct	146.99	74.59	348.29	195.84	101.67	66.72



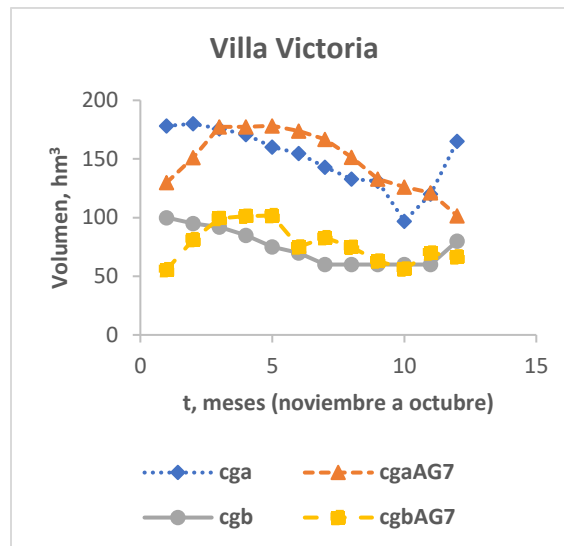


Figura 5.22. Curvas guía política AG7 vs curvas guía inicialmente propuestas con base en la operación histórica

Al aplicar la política óptima política AG7 se obtienen los derrames y déficit que se muestran en la tabla 5.34.

Tabla 5.34. Resumen de resultados de la simulación (AG7)

AG7	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3438.60
Valle de Bravo	103.23	0.00	3142.90
Villa Victoria	67.70	0.00	1715.00
Suma	170.93	0.00	8296.50

En la tabla 5.34 se observa que los derrames totales pasaron de 45.94 hm³ a 170.93 hm³, al reducir la capacidad útil considerada para Valle de Bravo y no se presentaron déficit.

En las tablas 5.35 a 5.37, se muestran los resúmenes anuales del comportamiento de las 3 presas y en el Anexo D, el detalle del funcionamiento mensual simulado.

Tabla 5.35. Resumen anual. Pol. AG7. El Bosque

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	149.84	185.00	139.15	1735.03
2000-2001	0.00	0.00	189.89	154.30	138.89	1735.00
2001-2002	0.00	0.00	105.59	165.00	130.77	1734.13
2002-2003	0.00	0.00	188.47	148.00	135.09	1734.59
2003-2004	0.00	0.00	151.37	168.60	131.00	1734.16
2004-2005	0.00	0.00	157.65	188.60	117.71	1732.74
2005-2006	0.00	0.00	181.40	134.80	109.33	1731.67
2006-2007	0.00	0.00	177.43	196.10	136.55	1734.75
2007-2008	0.00	0.00	160.28	167.10	122.85	1733.29
2008-2009	0.00	0.00	148.20	141.20	105.53	1731.17
2009-2010	0.00	0.00	266.44	238.70	161.58	1737.41
2010-2011	0.00	0.00	138.35	162.90	127.18	1733.75
2011-2012	0.00	0.00	160.10	179.70	119.31	1732.91
2012-2013	0.00	0.00	237.53	183.40	110.55	1731.83
2013-2014	0.00	0.00	204.93	249.20	148.12	1735.98
2014-2015	0.00	0.00	192.04	198.90	136.51	1734.75
2015-2016	0.00	0.00	209.16	202.40	126.83	1733.71
2016-2017	0.00	0.00	180.79	170.20	124.46	1733.46
2017-2018	0.00	0.00	225.30	204.60	132.55	1734.32
Total	0.00	0.00	3424.76	3438.70	2453.96	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					63.12	hm ³

Tabla 5.36. Resumen anual. Pol. AG7. Valle de Bravo

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	Msnm
1999-2000	14.35	0.00	147.68	132.90	367.03	1828.44
2000-2001	24.74	0.00	178.06	152.90	364.37	1828.29
2001-2002	0.00	0.00	154.15	161.10	357.58	1827.90
2002-2003	36.48	0.00	207.02	162.80	355.74	1827.79
2003-2004	7.17	0.00	206.58	199.00	361.62	1828.13
2004-2005	0.00	0.00	148.89	215.70	326.87	1826.15
2005-2006	0.00	0.00	190.04	201.80	258.84	1821.93
2006-2007	0.00	0.00	159.01	106.40	309.52	1825.08
2007-2008	0.00	0.00	147.40	192.80	303.03	1824.68
2008-2009	0.00	0.00	139.30	212.00	248.10	1821.25
2009-2010	0.00	0.00	190.91	44.80	267.99	1822.50
2010-2011	0.00	0.00	140.22	161.70	353.78	1827.68
2011-2012	0.00	0.00	130.41	212.10	289.59	1823.84
2012-2013	0.00	0.00	165.69	174.80	228.31	1819.98
2013-2014	20.50	0.00	187.50	53.20	307.36	1824.94
2014-2015	0.00	0.00	195.29	202.30	363.69	1828.25
2015-2016	0.00	0.00	190.95	195.10	350.58	1827.50
2016-2017	0.00	0.00	181.81	200.30	332.11	1826.45

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	Msnm
2017-2018	0.00	0.00	186.19	161.10	315.53	1825.45
Total	103.24	0.00	3247.10	3142.80	6061.64	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					183.77	Mill M ³

Tabla 5.37. Resumen anual. Pol. AG7. Villa Victoria

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	Msnm
1999-2000	0.00	0.00	60.48	80.80	155.55	2604.44
2000-2001	0.00	0.00	74.97	67.00	131.10	2603.51
2001-2002	0.00	0.00	78.23	96.50	145.11	2604.04
2002-2003	10.13	0.00	143.63	101.60	131.27	2603.51
2003-2004	36.27	0.00	170.99	134.40	161.09	2604.63
2004-2005	0.00	0.00	55.20	142.20	119.84	2603.06
2005-2006	0.00	0.00	100.42	68.50	82.14	2601.38
2006-2007	0.00	0.00	115.18	74.10	132.24	2603.55
2007-2008	0.00	0.00	20.64	88.10	115.61	2602.88
2008-2009	0.00	0.00	67.97	65.00	82.05	2601.37
2009-2010	0.00	0.00	124.04	74.30	133.76	2603.61
2010-2011	0.00	0.00	41.45	97.60	110.00	2602.64
2011-2012	0.00	0.00	42.73	42.90	80.49	2601.30
2012-2013	0.00	0.00	98.63	67.50	76.59	2601.10
2013-2014	3.06	0.00	133.02	72.80	137.97	2603.77
2014-2015	18.24	0.00	123.82	117.80	152.86	2604.34
2015-2016	0.00	0.00	101.76	112.10	137.11	2603.74
2016-2017	0.00	0.00	98.72	101.60	123.72	2603.23
2017-2018	0.00	0.00	126.95	110.20	120.51	2603.09
Total	67.70	0.00	1778.83	1715.00	2329.01	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					40.62	hm ³

En la figura 5.23 se muestran los gastos medios mensuales que se entregarían a la planta Los Berros. Los valores mínimos siguen siendo superiores a 14.5 m³/s.

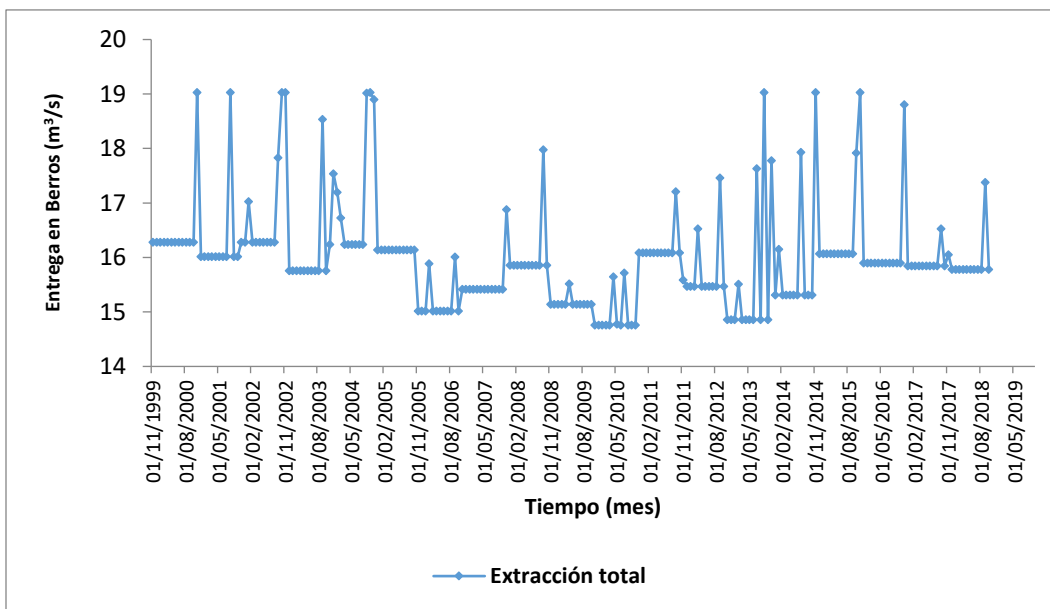


Figura 5.23. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros

En las figuras 5.24 a 5.27 se compara la evolución de los almacenamientos en cada una de las tres presas y el acumulado en las tres, contra los valores históricos registrados. Se observa que, en el caso de Valle de Bravo, excepto por un valor de 175.6 hm³, en ningún otro caso el almacenamiento es menor a 190 hm³; por otra parte, los almacenamientos máximos en El Bosque son menores que los valores históricos (particularmente de 2010 en adelante) lo que facilitaría las transferencias desde Tuxpan.

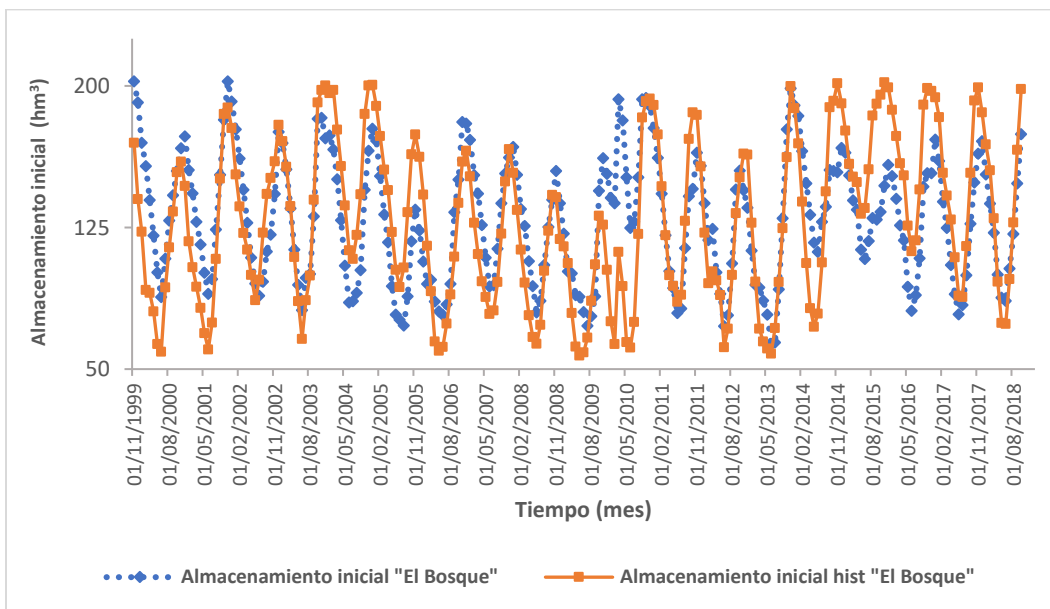


Figura 5.24. Almacenamiento inicial de la Presa El Bosque. Pol AG7

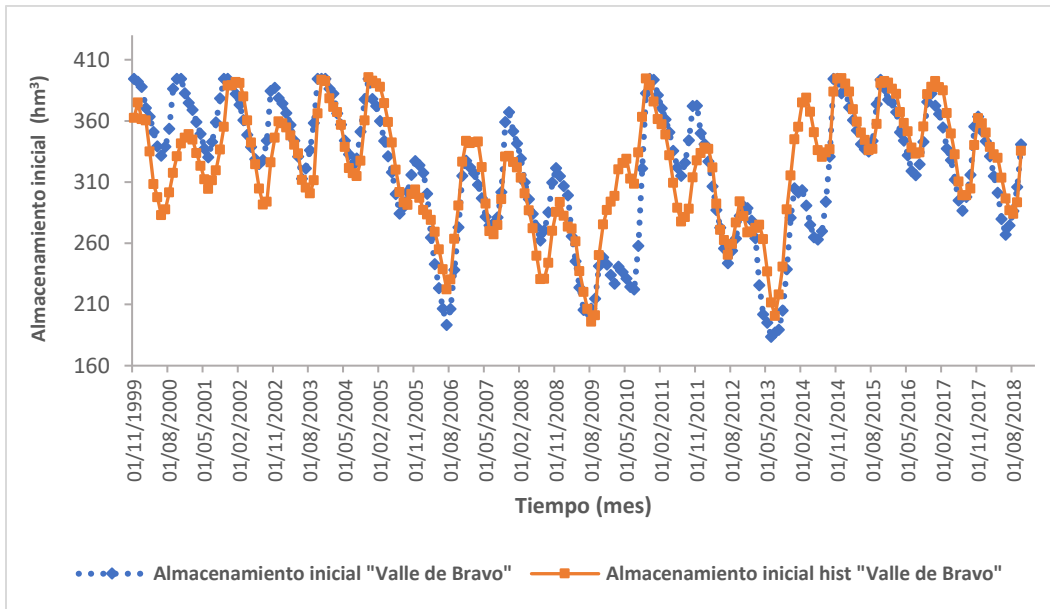


Figura 5.25. Almacenamiento inicial de la Presa Valle de Bravo. Pol AG7

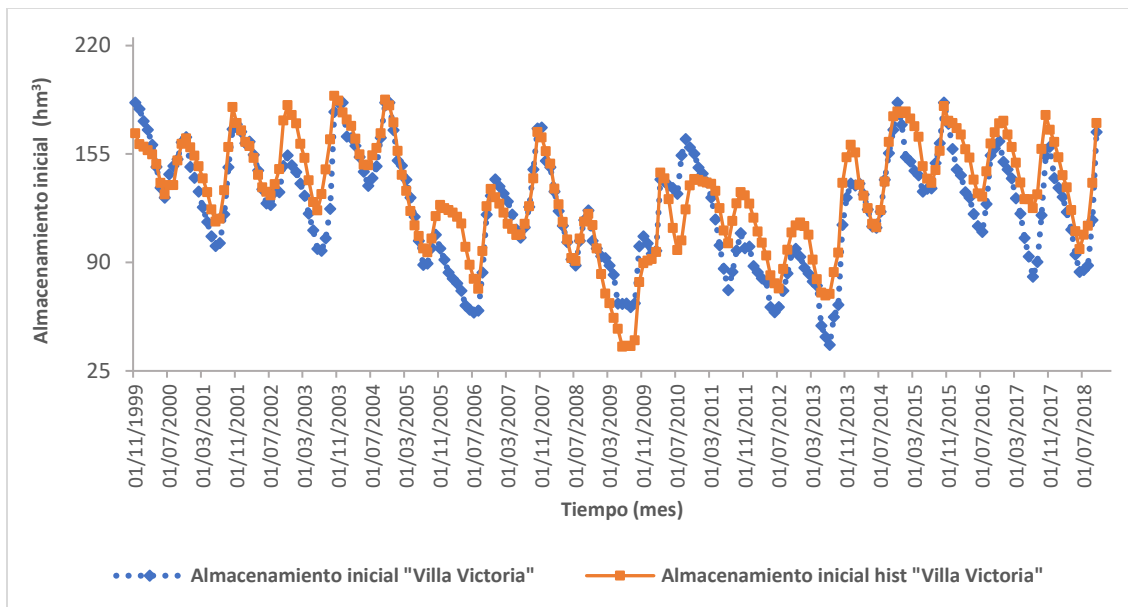


Figura 5.26. Almacenamiento inicial de la Presa Valle Victoria. Pol AG7

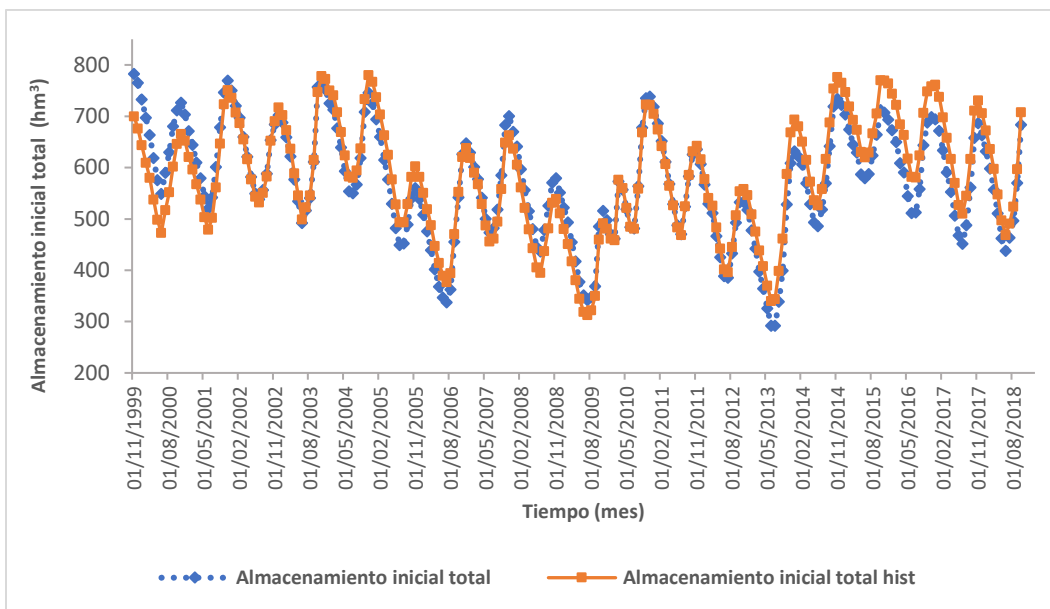


Figura 5.27. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico

Finalmente, en la figura 5.28 se comparan las entregas a Los Berros obtenidas al simular la política AG7 con las entregas a la planta de Los Berros registradas históricamente.

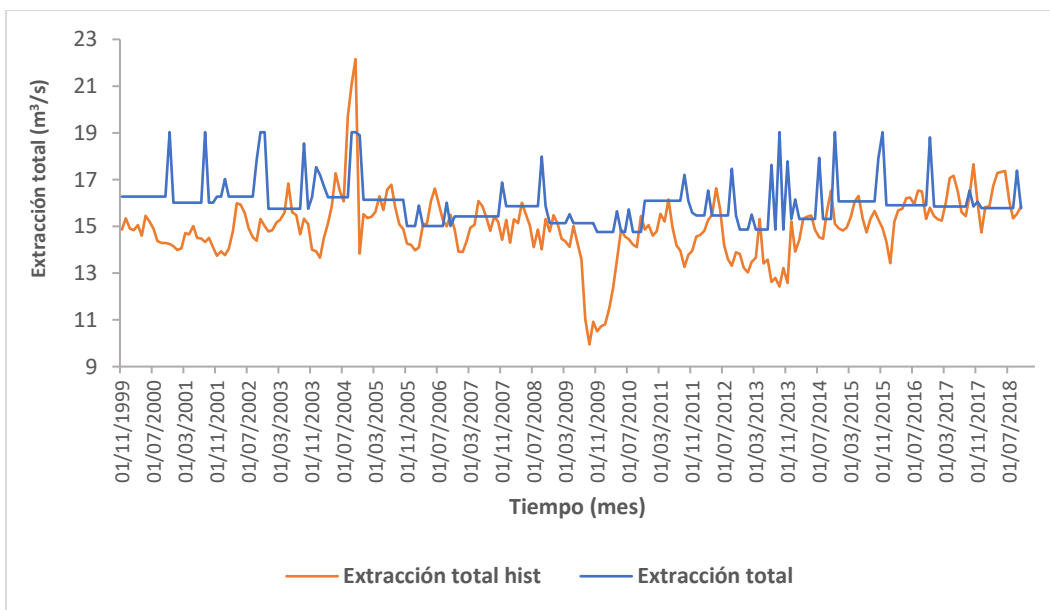


Figura 5.28. Comparación de entregas a la planta Los Berros

5.9. Simulaciones de políticas óptimas con elevación inicial histórica al 1° de Noviembre.

En todas las simulaciones presentadas se trabajó suponiendo que el almacenamiento al 1° de noviembre de 1999 fuera igual al NAMO de cada una de las presas; para visualizar el efecto de esta consideración, se realizaron simulaciones adicionales en las que la simulación se inicia el 1° de noviembre de 1999 con los

almacenamientos históricos registrados en esa fecha.

5.9.1. Política AG8. Simulación con la política AG6 y considerando los volúmenes iniciales históricos del 1 noviembre de 1999.

Se denominó AG8 a la simulación realizada utilizando la política AG6 que considera el NAMINO original en Valle de Bravo, pero partiendo de los volúmenes de almacenamiento histórico del 1° de noviembre de 1999, quedando el NAMO de 169.90 hm³ para la presa El Bosque, 362.5 hm³ para Valle de Bravo y de 167.35 hm³ en Villa Victoria.

Los parámetros óptimos utilizados para la simulación se indicaron en las figuras 5.13 y 5.14, y las tablas 5.21 a 5.34.

En la tabla 5.38 se muestra el resumen de los resultados de la simulación.

Tabla 5.38. Resumen de resultados de la simulación (AG8)

AG8	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	7.85	3410.30
Valle de Bravo	28.15	0.00	3227.80
Villa Victoria	0.00	0.58	1796.30
Suma	28.15	8.43	8434.40

En la tabla 5.38 se observa que, al iniciar la simulación con los volúmenes iniciales correspondientes a los que se presentaron el 1° de noviembre de 1999 (en lugar de los correspondientes al NAMO de cada presa) los derrames de la presa Valle de Bravo se redujeron de 45.94 a 28.15 hm³ y se produjo un déficit de 7.85 hm³ en El Bosque y uno pequeño, de 0.58 hm³ en Villa Victoria

En las tablas 5.39 a 5.41, se muestran los resúmenes anuales del comportamiento de las 3 presas.

Tabla 5.39. Resumen anual. Pol. AG8. El Bosque

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	149.84	158.90	123.74	1733.38
2000-2001	0.00	0.00	189.89	167.80	127.71	1733.81
2001-2002	0.00	0.00	105.59	161.20	116.02	1732.54
2002-2003	0.00	0.00	188.47	142.10	121.23	1733.12
2003-2004	0.00	0.00	151.37	167.50	126.96	1733.73
2004-2005	0.00	0.00	157.65	181.30	112.00	1732.01
2005-2006	0.00	0.00	181.40	135.10	106.24	1731.26
2006-2007	0.00	0.00	177.43	195.30	137.45	1734.85
2007-2008	0.00	0.00	160.28	172.20	109.00	1731.62
2008-2009	0.00	0.00	148.20	138.10	98.55	1730.26
2009-2010	0.00	0.00	266.44	246.30	161.27	1737.37
2010-2011	0.00	0.00	138.35	163.50	116.07	1732.55
2011-2012	0.00	0.00	160.10	168.10	107.12	1731.38

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
2012-2013	0.00	7.85	237.53	191.10	111.85	1731.99
2013-2014	0.00	0.00	204.93	241.00	160.30	1737.27
2014-2015	0.00	0.00	192.04	219.30	130.02	1734.05
2015-2016	0.00	0.00	209.16	191.70	118.05	1732.78
2016-2017	0.00	0.00	180.79	171.90	115.19	1732.43
2017-2018	0.00	0.00	225.30	197.90	119.82	1732.97
Total	0.00	7.85	3424.76	3410.30	2318.59	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					60.00	Mill M ³

Tabla 5.40. Resumen anual. Pol. AG8. Valle de Bravo

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	147.68	151.60	338.37	1826.80
2000-2001	5.36	0.00	178.06	136.20	334.98	1826.61
2001-2002	0.00	0.00	154.15	182.20	348.44	1827.38
2002-2003	20.39	0.00	207.02	157.80	338.11	1826.79
2003-2004	2.40	0.00	206.58	203.80	357.64	1827.90
2004-2005	0.00	0.00	148.89	216.00	326.29	1826.11
2005-2006	0.00	0.00	190.04	238.70	243.73	1820.97
2006-2007	0.00	0.00	159.01	92.10	280.02	1823.25
2007-2008	0.00	0.00	147.40	206.90	282.87	1823.42
2008-2009	0.00	0.00	139.30	242.80	195.55	1817.88
2009-2010	0.00	0.00	190.91	37.30	202.60	1818.34
2010-2011	0.00	0.00	140.22	159.60	300.24	1824.50
2011-2012	0.00	0.00	130.41	238.10	223.64	1819.68
2012-2013	0.00	0.00	165.69	182.50	145.82	1814.61
2013-2014	0.00	0.00	187.50	38.80	224.24	1819.72
2014-2015	0.00	0.00	195.29	175.50	329.46	1826.29
2015-2016	0.00	0.00	190.95	192.60	330.98	1826.38
2016-2017	0.00	0.00	181.81	192.80	315.06	1825.42
2017-2018	0.00	0.00	186.19	182.60	294.31	1824.13
Total	28.15	0.00	3247.10	3227.90	5412.35	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					97.36	hm ³

Tabla 5.41. Resumen anual. Pol. AG8. Villa Victoria

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	60.48	106.70	106.16	2602.48
2000-2001	0.00	0.00	74.97	66.20	92.14	2601.88
2001-2002	0.00	0.00	78.23	85.80	95.10	2602.01

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
2002-2003	0.00	0.00	143.63	114.20	99.12	2602.18
2003-2004	0.00	0.00	170.99	137.50	125.03	2603.28
2004-2005	0.00	0.00	55.20	171.50	103.79	2602.38
2005-2006	0.00	0.00	100.42	49.90	57.07	2600.05
2006-2007	0.00	0.00	115.18	102.30	101.74	2602.29
2007-2008	0.00	0.00	20.64	72.60	81.68	2601.36
2008-2009	0.00	0.00	67.97	52.70	62.87	2600.41
2009-2010	0.00	0.00	124.04	84.20	110.65	2602.67
2010-2011	0.00	0.00	41.45	102.80	77.44	2601.14
2011-2012	0.00	0.00	42.73	33.70	54.32	2599.86
2012-2013	0.00	0.58	98.63	50.90	61.11	2600.32
2013-2014	0.00	0.00	133.02	93.50	123.69	2603.22
2014-2015	0.00	0.00	123.82	123.80	130.42	2603.48
2015-2016	0.00	0.00	101.76	132.60	116.26	2602.91
2016-2017	0.00	0.00	98.72	111.60	94.32	2601.98
2017-2018	0.00	0.00	126.95	103.60	88.42	2601.70
Total	0.00	0.58	1778.83	1796.10	1781.33	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					30.00	hm ³

En la figura 5.29 se presentan las aportaciones totales hacia la planta potabilizadora Los Berros de usarse la política AG8. Se observa que en mayo de 2013 (es decir 1 de los 228 simulados) el gasto de entrega es menor que 14.5 m³/s.

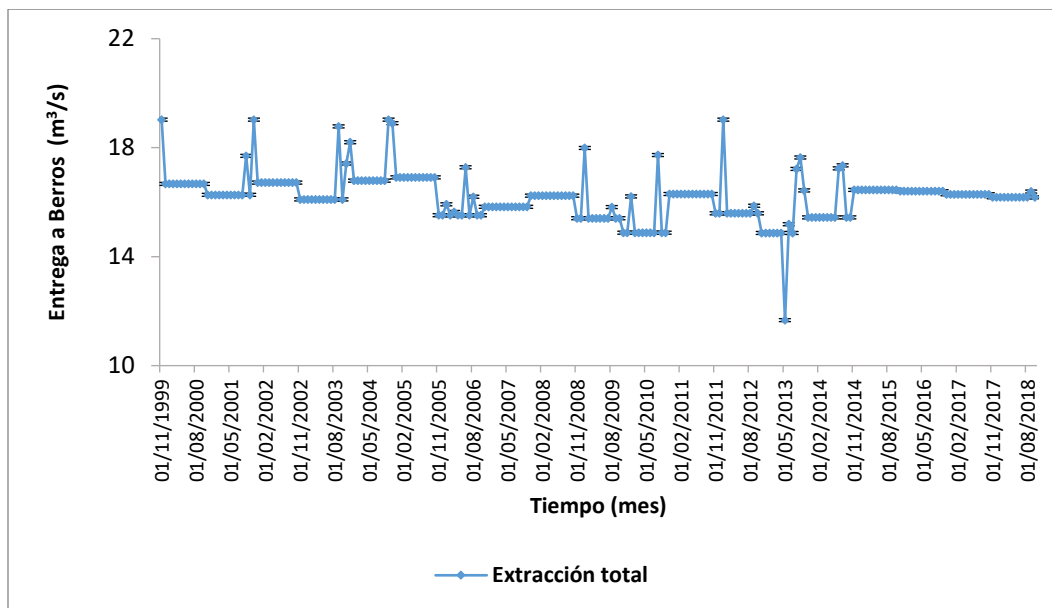


Figura 5.29. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros

En la figura 5.30 se presenta la comparación de los almacenamientos iniciales totales simulados con la política

AG8 respecto al comportamiento histórico de dichos volúmenes. Se observa que en abril y mayo de 2013 se presentaron los menores valores de los almacenamientos simulados, es precisamente en mayo de 2013 que se presentó el déficit en El Bosque y el menor valor de los gastos de entrega a Los Berros.

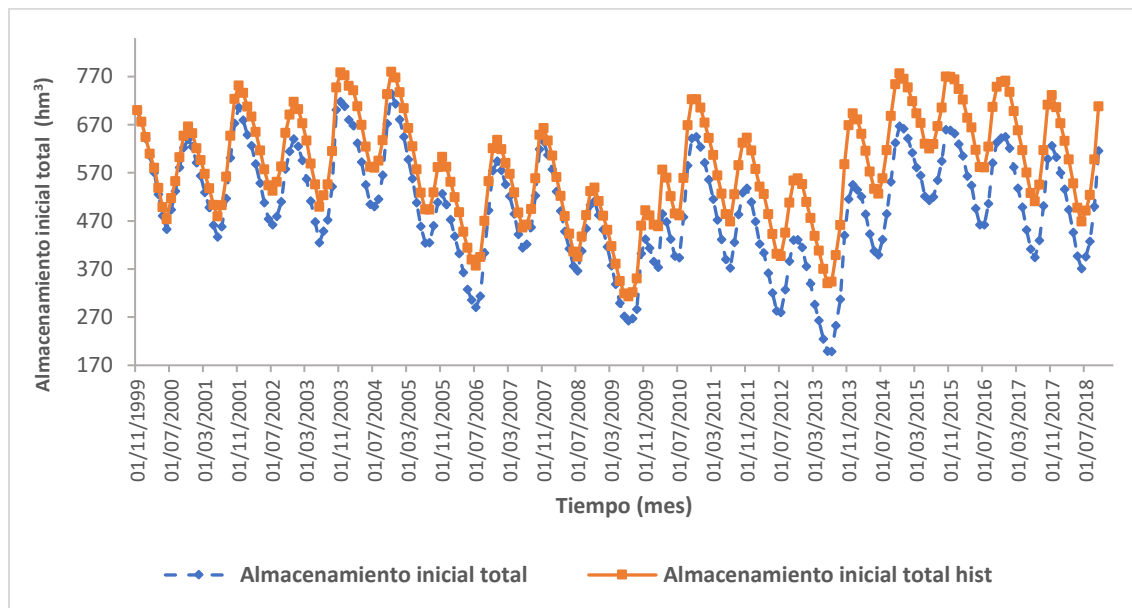


Figura 5.30. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico.

5.9.2. Política AG9. Simulación con la política AG7 y considerando los volúmenes iniciales históricos del 1 noviembre de 1999.

Para la simulación a la que se denominó AG9 se utilizó la política AG7 óptima que se presentó en las figuras 5.21 y 5.22 y las tablas 5.29 a 5.33, obtenida considerando el volumen al NAMINO en Valle de Bravo de 170 hm³. La simulación se inició con los volúmenes de almacenamiento registrados el 1° de noviembre de 1999, quedando el NAMO de 169.90 hm³ para la presa El Bosque, 362.5 hm³ para Valle de Bravo y de 167.35 hm³ en Villa Victoria.

De esta simulación se obtienen los derrames y déficit que se muestran en la tabla 5.42. Se observa que al modificar el volumen con el que se inicia la simulación el derrame total bajó de 170.93 a 128.25 hm³.

Tabla 5.42. Resumen de resultados de la simulación (AG9)

AG9	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3406.10
Valle de Bravo	57.48	0.00	3156.70
Villa Victoria	70.77	0.00	1693.60
Suma	128.25	0.00	8256.40

En las tablas 5.43 a 5.45 se muestran los resúmenes anuales del comportamiento de las 3 presas.

Tabla 5.43. Resumen anual. Pol. AG9. El Bosque

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	149.84	149.80	127.95	1733.83
2000-2001	0.00	0.00	189.89	163.70	136.56	1734.75
2001-2002	0.00	0.00	105.59	165.50	126.01	1733.63
2002-2003	0.00	0.00	188.47	142.00	131.83	1734.25
2003-2004	0.00	0.00	151.37	167.50	130.50	1734.11
2004-2005	0.00	0.00	157.65	188.50	117.69	1732.74
2005-2006	0.00	0.00	181.40	134.80	109.32	1731.66
2006-2007	0.00	0.00	177.43	196.10	136.55	1734.75
2007-2008	0.00	0.00	160.28	167.10	122.85	1733.29
2008-2009	0.00	0.00	148.20	141.20	105.53	1731.17
2009-2010	0.00	0.00	266.44	238.70	161.59	1737.41
2010-2011	0.00	0.00	138.35	162.90	127.18	1733.75
2011-2012	0.00	0.00	160.10	179.70	119.31	1732.91
2012-2013	0.00	0.00	237.53	183.40	110.55	1731.83
2013-2014	0.00	0.00	204.93	249.20	148.12	1735.98
2014-2015	0.00	0.00	192.04	198.90	136.51	1734.75
2015-2016	0.00	0.00	209.16	202.40	126.83	1733.71
2016-2017	0.00	0.00	180.79	170.20	124.46	1733.46
2017-2018	0.00	0.00	225.30	204.60	132.55	1734.32
Total	0.00	0.00	3424.76	3406.20	2431.89	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					63.12	hm ³

Tabla 5.44. Resumen anual. Pol. AG9. Valle de Bravo

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	147.68	145.40	331.64	1826.42
2000-2001	3.27	0.00	178.06	144.40	336.14	1826.68
2001-2002	0.00	0.00	154.15	166.90	355.45	1827.78
2002-2003	26.82	0.00	207.02	166.70	350.75	1827.51
2003-2004	6.91	0.00	206.58	199.30	361.50	1828.12
2004-2005	0.00	0.00	148.89	215.70	326.84	1826.15
2005-2006	0.00	0.00	190.04	201.80	258.77	1821.93
2006-2007	0.00	0.00	159.01	106.40	309.45	1825.07
2007-2008	0.00	0.00	147.40	192.80	302.99	1824.67
2008-2009	0.00	0.00	139.30	211.90	248.06	1821.25
2009-2010	0.00	0.00	190.91	44.80	267.96	1822.50

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
2010-2011	0.00	0.00	140.22	161.70	353.77	1827.68
2011-2012	0.00	0.00	130.41	212.10	289.58	1823.84
2012-2013	0.00	0.00	165.69	174.80	228.30	1819.98
2013-2014	20.49	0.00	187.50	53.20	307.35	1824.94
2014-2015	0.00	0.00	195.29	202.30	363.69	1828.25
2015-2016	0.00	0.00	190.95	195.10	350.58	1827.50
2016-2017	0.00	0.00	181.81	200.30	332.11	1826.45
2017-2018	0.00	0.00	186.19	161.10	315.53	1825.45
Total	57.49	0.00	3247.10	3156.70	5990.46	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					183.76	hm ³

Tabla 5.45. Resumen anual. Pol. AG9. Villa Victoria

Resumen Anual						
Año	Derrame	Déficit	Ing Hist	Ext Total	Almac Pro	Elev Pro
	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	hm ³	msnm
1999-2000	0.00	0.00	60.48	105.70	118.64	2603.01
2000-2001	0.00	0.00	74.97	44.20	108.53	2602.58
2001-2002	0.00	0.00	78.23	77.40	130.23	2603.47
2002-2003	13.23	0.00	143.63	97.10	129.39	2603.44
2003-2004	36.24	0.00	170.99	134.40	161.10	2604.63
2004-2005	0.00	0.00	55.20	142.20	119.81	2603.06
2005-2006	0.00	0.00	100.42	68.50	82.14	2601.38
2006-2007	0.00	0.00	115.18	74.10	132.24	2603.55
2007-2008	0.00	0.00	20.64	88.10	115.61	2602.88
2008-2009	0.00	0.00	67.97	65.00	82.05	2601.38
2009-2010	0.00	0.00	124.04	74.30	133.77	2603.61
2010-2011	0.00	0.00	41.45	97.60	109.99	2602.64
2011-2012	0.00	0.00	42.73	42.90	80.49	2601.30
2012-2013	0.00	0.00	98.63	67.50	76.59	2601.10
2013-2014	3.06	0.00	133.02	72.80	137.96	2603.77
2014-2015	18.24	0.00	123.82	117.80	152.86	2604.34
2015-2016	0.00	0.00	101.76	112.10	137.11	2603.74
2016-2017	0.00	0.00	98.72	101.60	123.72	2603.23
2017-2018	0.00	0.00	126.95	110.20	120.51	2603.09
Total	70.77	0.00	1778.83	1693.50	2252.74	
Almacenamiento Inicial Mínimo Registrado:					40.62	hm ³

En la figura 5.31 se muestran los gastos medios mensuales que se entregarían a la planta Los Berros. Los valores mínimos siguen siendo superiores a 14.5 m³/s.

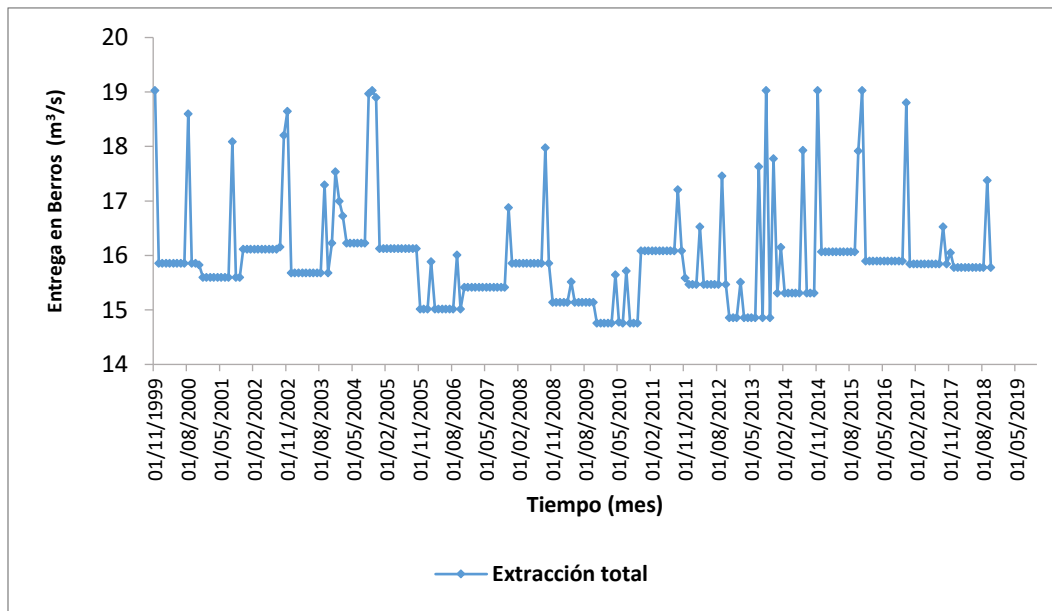


Figura 5.31. Aportaciones totales mensuales a la Planta Potabilizadora Los Berros

En la figura 5.32 se compara la evolución de los almacenamientos en Valle de Bravo, y en la figura 5.33 el volumen acumulado en las tres presas, contra los valores históricos registrados. Se observa que, en el caso de Valle de Bravo, excepto por los valores de 183.76, 187.16 y 189.31 hm³, que se presentan al inicio de los meses de junio, julio y agosto de 2013, en ningún otro caso el almacenamiento es menor a 190 hm³.

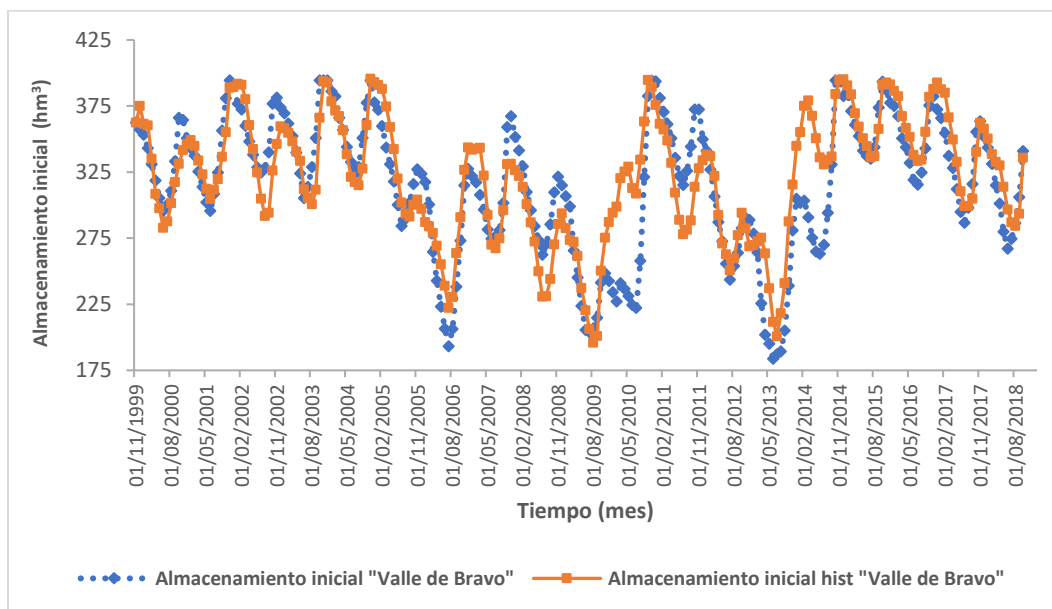


Figura 5.32. Almacenamiento inicial en Valle de Bravo vs almacenamiento inicial histórico

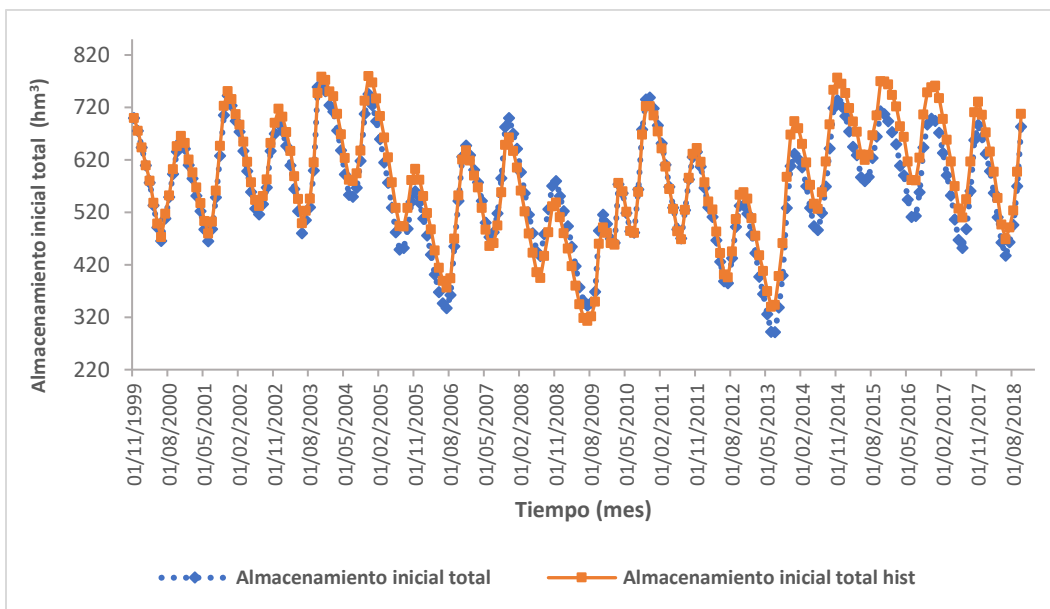


Figura 5.33. Almacenamiento inicial total vs almacenamiento inicial total histórico

Finalmente, en la figura 5.34 se comparan las entregas a la planta de los Berros simuladas contra las históricas. Es notable que con la política propuesta no fueron necesarias las reducciones drásticas que ocurrieron en 2009 y en 2012-2013.

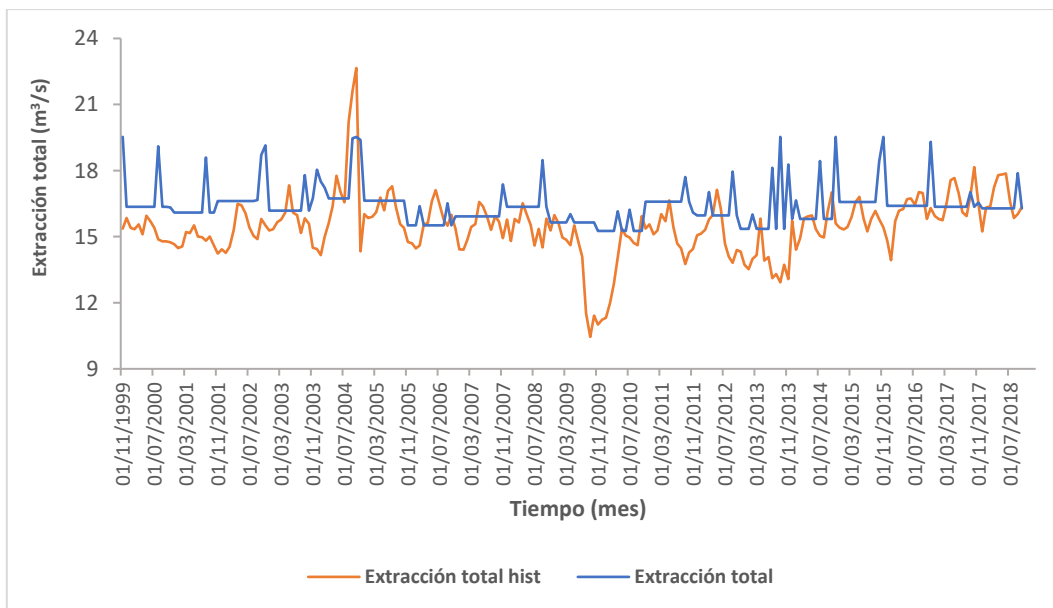


Figura 5.34. Entrega a Berros simuladas vs históricas

5.10. Resumen de resultados

En la tabla 5.46 se presentan los porcentajes de extracción total anual óptimos, en cada presa, obtenidos para cada política AG optimizada y simulada; se observa que, consistentemente, se propone un porcentaje mayor para El Bosque.

Tabla 5.46. Porcentajes de extracción total anual para cada presa. Sistema Cutzamala

Ensayo	% El Bosque	% Vbravo	% Vvictoria	Suma
AG 1	0.41	0.39	0.20	1.00
AG 2	0.35	0.28	0.37	1.00
AG 3	0.46	0.21	0.33	1.00
AG 4	0.46	0.21	0.34	1.00
AG 5	0.35	0.21	0.44	1.00
AG 6	0.35	0.32	0.33	1.00
AG 7	0.41	0.36	0.23	1.00
AG 8	0.35	0.32	0.34	1.00
AG 9	0.41	0.36	0.24	1.00

A continuación, se comparan las características de las políticas AG6 y AG7 recomendadas. En la primera se considera el valor de 50 hm³ correspondiente al NAMINO original de Valle de Bravo y en la segunda se considera que dicho NAMINO se establece a la elevación correspondiente a un almacenamiento de 170 hm³.

La curva Z óptima para las políticas AG6 y AG7 se muestra en la figura 5.35 y en la tabla 5.47. Se observa que la política AG 7 es más conservadora (en el sentido de que, para el mismo almacenamiento el 1° de noviembre plantea menores entregas a Los Berros) debido a que considera un NAMINO más alto en Valle de Bravo, y por lo tanto menor capacidad de regulación.

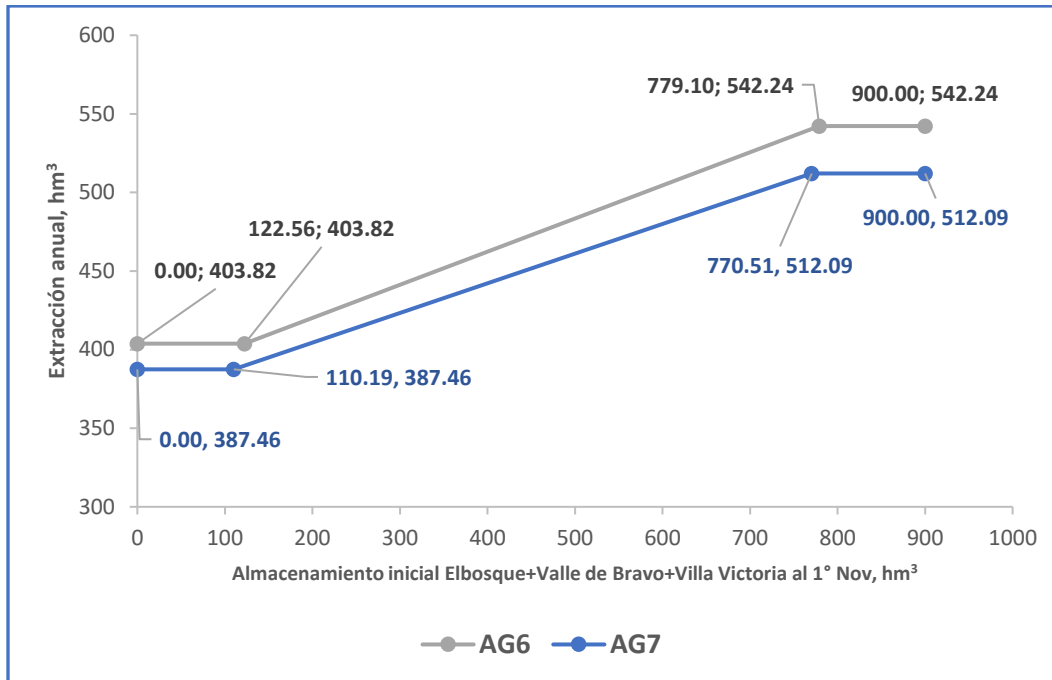


Figura 5.35. Curva Z optimizada de los diferentes AG's simulados

Tabla 5.47. Entregas a Berros en m³/s

Almacenamiento 3 presas 1° Nov hm³	Entregas a Berros m³/s	Entregas a Berros m³/s
	AG6	AG7
0.00	12.81	12.29
110.20	12.81	12.29
116.60	12.81	12.33
122.56	12.81	12.36
200.00	13.33	12.83
300.00	13.99	13.43
400.00	14.66	14.02
500.00	15.33	14.62
600.00	16.00	15.22
700.00	16.66	15.82
770.50	17.13	16.24
775.55	17.17	16.24
779.10	17.19	16.24
900.00	17.19	16.24

En las tablas 5.48 y 5.49 se presentan los parámetros de las ecuaciones 4.3 y 4.4, resultado de las políticas óptimas AG6 y AG7, respectivamente.

Tabla 5.48. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.3 y 4.4. Política AG6

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	2.0015	0.6266	-2.1280	-0.7590
Valle de Bravo	3.1823	0.7243	-1.7924	-0.8593
Villa Victoria	2.4089	0.8362	-1.3707	-0.4505

Tabla 5.49. Parámetros óptimos de las ecuaciones 4.3 y 4.4. Política AG7

Presa	Arriba de curva guía		Abajo de curva guía	
	a1	a2	a3	a4
El Bosque	1.8248	0.8740	-2.6227	-0.7863
Valle de Bravo	2.3329	0.5052	-2.9481	-0.7824
Villa Victoria	3.0711	0.8555	-2.3221	-0.4207

Las diferencias más notables, particularmente en las pendientes de las curvas de corrección, se presentan en Valle de Bravo, en donde para la política AG7 la pendiente correspondiente al rebase de la curva guía alta es menor y la correspondiente a la curva guía baja es mayor.

La diferencia es más notable en las propias curvas guía (figura 5.36 y tablas 5.50 y 5.11), ya que considerar un NAMINO más alto, y por lo tanto reducir la capacidad de regulación en Valle de Bravo obliga a subir también los almacenamientos correspondientes a la curva guía baja.

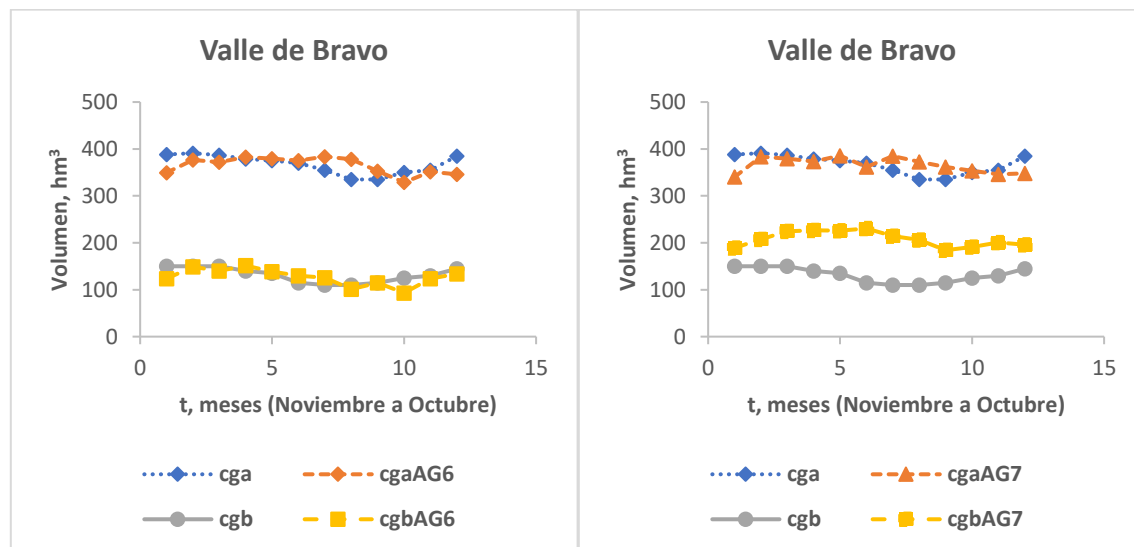


Figura 5.36. Curvas Guía para Valle de Bravo, para las políticas AG6 (Izquierda) y AG7 (Derecha)

Tabla 5.50. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG6. Sistema Cutzamala

Curva guía hm ³						
Mes/Presas	El Bosque		Valle de Bravo		Villa Victoria	
	alta	baja	alta	baja	alta	baja
Nov	176.33	86.64	349.48	123.89	134.22	65.52
Dic	161.42	127.17	376.89	148.85	153.00	79.32
Ene	178.66	115.03	372.14	140.06	177.27	102.42
Feb	176.10	116.45	382.50	151.36	170.87	85.42
Mar	160.69	101.17	379.10	138.90	166.33	95.85
Abr	174.66	108.66	375.26	129.49	163.61	90.85
May	137.21	91.22	383.79	125.73	161.53	83.66
Jun	133.49	72.58	378.00	101.16	156.19	76.98
Jul	113.23	74.11	353.06	114.51	150.55	60.89
Ago	114.49	62.99	328.77	93.15	131.96	69.06
Sep	118.24	73.64	351.57	123.78	137.62	69.38
Oct	140.68	73.69	345.77	134.10	117.04	60.94

Tabla 5.51. Curvas guía alta y baja optimizadas. Pol. AG7. Sistema Cutzamala

Curva guía hm ³						
Mes/Presas	El Bosque		Valle de Bravo		Villa Victoria	
	alta	baja	alta	baja	alta	baja
Nov	170.59	75.35	340.27	189.12	130.04	55.62
Dic	189.93	116.79	383.58	207.57	151.18	81.39
Ene	170.04	112.88	379.35	224.44	177.35	99.39
Feb	174.26	142.80	373.48	226.30	177.30	101.31
Mar	188.99	111.36	385.69	225.59	178.31	101.77
Abr	151.45	109.26	361.37	230.44	173.84	75.17
May	141.10	95.54	384.70	214.27	166.63	82.90
Jun	158.68	88.16	372.61	206.43	151.54	74.79
Jul	108.44	64.02	361.88	184.21	133.05	63.10
Ago	107.42	70.63	353.57	191.41	126.04	56.35
Sep	112.99	66.93	345.80	200.95	121.14	69.93
Oct	146.99	74.59	348.29	195.84	101.67	66.72

Para visualizar las consecuencias de contar con una menor capacidad de regulación en Valle de Bravo en las entregas a la planta de Los Berros, en seguida se presentan las figuras 5.37 y 5.38 que corresponden a las entregas obtenidas de la simulación para las políticas AG6 y AG7, respectivamente.

Aparte de la reducción en el gasto mensual mínimo entregado a la planta de Los Berros, que pasa de 14.88 a 14.76 m³/s, al reducirse la capacidad de regulación en Valle de Bravo, se observa que esta reducción en la capacidad de regulación conduce a una muy clara mayor variabilidad de los volúmenes entregados, que para la política AG 9 con mucha frecuencia pasan de valores relativamente bajos (del orden de 15 a 16 m³/s), a los máximos de 19.03 m³/s que puede procesar la planta de Los Berros.

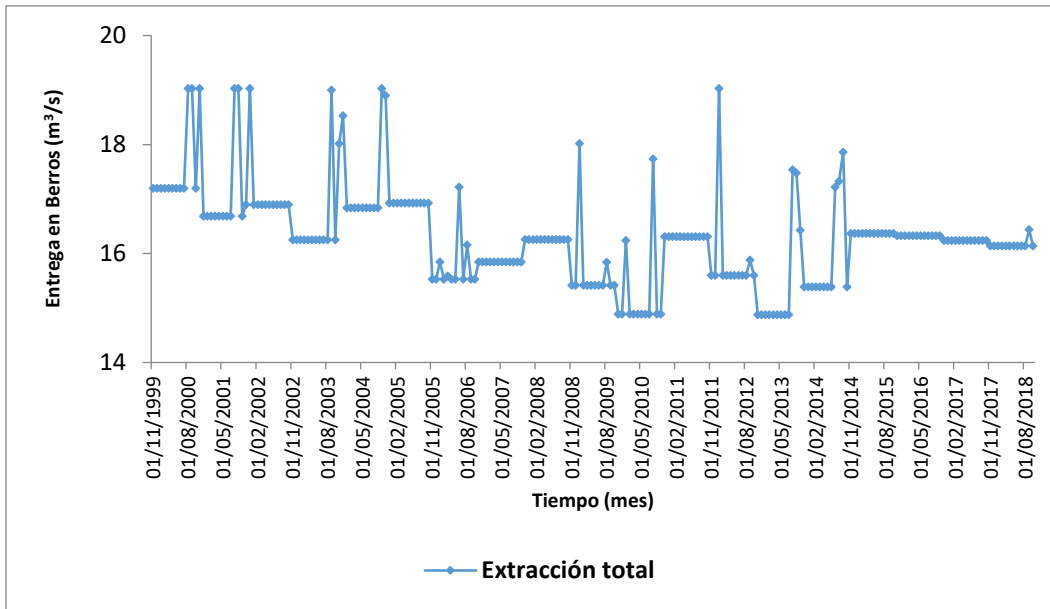


Figura 5.37. Gastos medios mensuales que se entregarían a la planta de Los Berros al aplicar la política AG6.

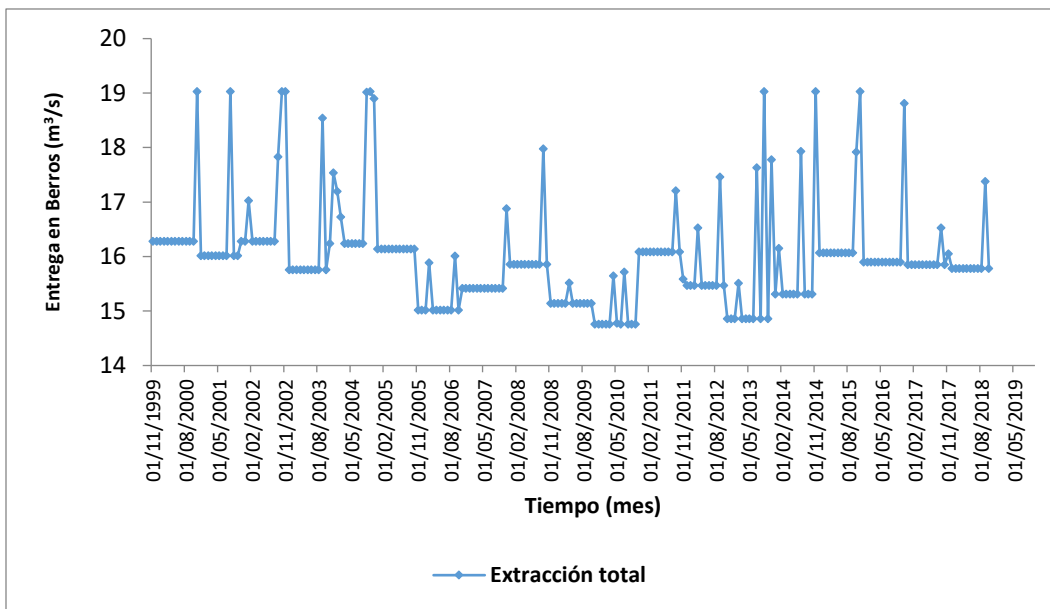


Figura 5.38. Gastos medios mensuales que se entregarían a la planta de Los Berros al aplicar la política AG 9.

Finalmente, en las tablas 5.52 y 5.53 se muestra un resumen de los resultados obtenidos al simular las 2 políticas. Es claro que la reducción en la capacidad de regulación provoca mayores derrames en el Sistema.

Tabla 5.52. Resumen de resultados de la simulación (AG6)

AG6	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3434.90
Valle de Bravo	45.94	0.00	3246.80
Villa Victoria	0.00	0.00	1814.40
Suma	45.94	0.00	8496.10

Tabla 5.53. Resumen de resultados de la simulación (AG7)

AG7	Derrame total	Déficit total	Extracción total
	hm ³	hm ³	hm ³
El Bosque	0.00	0.00	3438.60
Valle de Bravo	103.23	0.00	3142.90
Villa Victoria	67.70	0.00	1715.00
Suma	170.93	0.00	8296.50

6. Conclusiones y Recomendaciones

Se utilizaron algoritmos genéticos y la simulación de funcionamiento de vaso para obtener políticas de operación óptimas para la operación mensual del Sistema de Presas Cutzamala que incluyen tanto a sus tres presas principales (El Bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria) como a sus presas derivadoras (Colorines, Chilesdo, Ixtapan del Oro). Las políticas obtenidas optimizan una función objetivo que minimiza los derrames y los déficits en el largo plazo (se consideraron los datos históricos de 19 años).

Se consideraron las condiciones iniciales de las presas principales llenas al NAMO, para el periodo de años hidrológicos (noviembre a octubre) de 1999 al 2018, pero posteriormente se hicieron simulaciones tomando en cuenta los almacenamientos históricos al primero de noviembre de 1999, con la finalidad de tener condiciones que permitan comparar políticas óptimas cuando los niveles son menores al NAMO.

Se destacan como políticas óptimas las políticas AG6 y AG7 en las que se consideran 91 variables de búsqueda para ser optimizadas, que incluyen las de la curva Z de extracción total anual, las de los porcentajes de extracción total anual de las tres principales presas del sistema, las de los factores para hacer adecuaciones en las extracciones durante la simulación en caso de rebases de curva guía alta o de quedar por abajo de la curva guía alta y las que definen las curvas guías alta y baja de las tres presas principales del sistema.

Con cada una de estas políticas óptimas se simuló el comportamiento del Sistema analizando las entregas totales hacia la planta potabilizadora los Berros.

Se considera conveniente aumentar la capacidad de conducción de Villa Victoria a Los Berros, para reducir la probabilidad de derrames en Villa Victoria.

El modelo de simulación se fue desarrollando desde la política denominada AG1, en la cual solo se optimizan los valores de la curva Z y los porcentajes asignados a cada presa de regulación, pasando por AG2 donde se proponen curvas índices (curvas Guía) con base en la experiencia, AG3 en donde se considera adicionalmente la optimización de los valores correspondientes a las curvas guía alta y baja.

En la política AG5 se incluye la penalización por almacenamientos muy altos en El Bosque, y en AG6 y AG7 se presentan las políticas recomendadas, en definitiva, considerando también el límite en la capacidad de Los Berros. En AG6 se considera el NAMINO original de Valle de Bravo y en AG7 se considera que dicho NAMINO se establece para una capacidad de 170 hm³.

Esta forma en la que se desarrolló la investigación permite visualizar las consecuencias de incluir más variables en la función objetivo que son los cuatro puntos de la curva z, los porcentajes de extracción anual (tres variables), los 12 puntos por cada curva guía correspondiente a cada presa que son igual a 72 variables, y cuando se tiene una diferencia en alguna de las curvas guías se realiza un ajuste que es una función lineal de esa diferencia por lo que se consideran 12 variables por ajustes, así como las correspondientes a los límites en las capacidades de conducción o los de la capacidad de la planta de Los Berros.

Con las políticas, cada 1° de noviembre se define el volumen (se puede expresar como gasto medio) que se programa para entregar a la potabilizadora Los Berros, utilizando la llamada curva Z. La entrega puede distribuirse en porcentajes mensuales que sumen 100, pero por default toma 100/12 para cada mes.

Para disminuir la probabilidad de déficit o derrame se utilizaron curvas guía con lo que se logró prácticamente anular el déficit, y que los derrames sólo ocurrieran con las tres presas muy llenas (antes de poner curvas guía se presentaban déficit en una presa cuando había agua disponible en las otras y algo similar ocurría con los derrames).

De esta manera, cada inicio de mes se revisa el almacenamiento en cada presa respecto a su curva guía: si está arriba de la curva guía alta (CGA), se incrementa la extracción en esa presa, pero se reduce en las otras buscando no alterar la entrega programada el 1° de noviembre; algo similar se hace cuando el almacenamiento está debajo de la curva guía baja (CGB), pero ahora reduciendo la extracción en la presa cuyo almacenamiento está por debajo de la curva guía y compensando con las otras dos presas.

El resultado al aplicar las consideración antes descritas, es que la extracción programada se mantiene todo el año (de noviembre a octubre) salvo en unos cuanto casos (cuando se incrementó la extracción en una o dos presas y con la otra o alguna de las otras no se puede compensar porque excepto en Valle de Bravo no pueden tener extracciones negativas) caso en que se presenta un pico hacia arriba, o cuando la reducción en la extracción no puede compensarse por limitaciones en la capacidad de conducción y cuando se produce un déficit, caso en el que se produce un pico hacia abajo. Lo anterior se ejemplifica en la figura 6.1 en la que se producen varios picos hacia arriba y un pico hacia abajo que corresponde a un mes en el que se presentó un déficit.

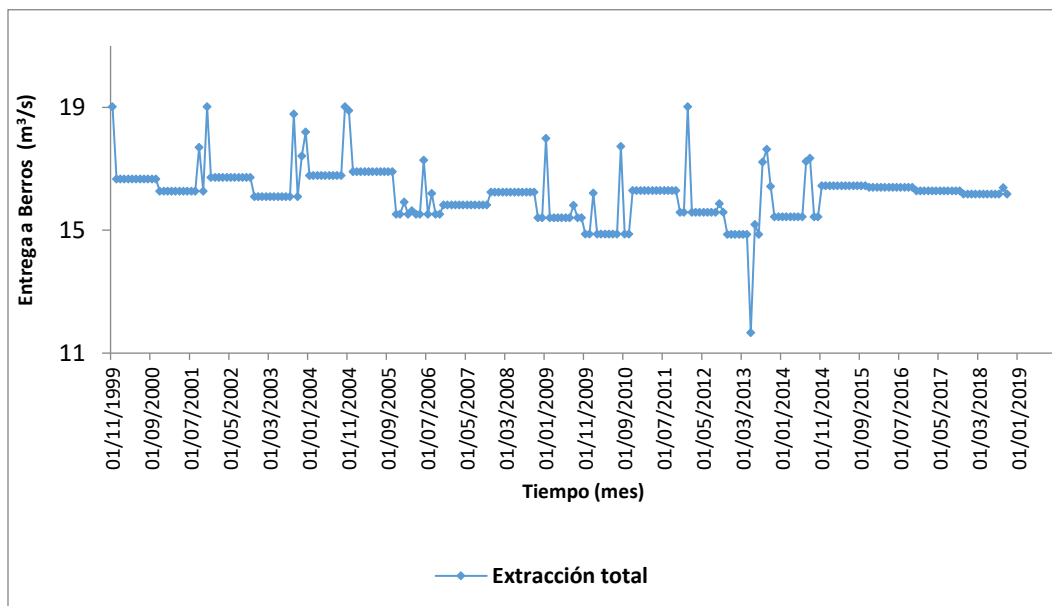


Figura 6.1. Extracciones de noviembre a octubre.

Los cambios bruscos se presentan al pasar de un año hidrológico a otro, por ejemplo, en la figura 6.1, al pasar

de 14.88 m³/s en octubre de 2010 a 16.30 m³/s en noviembre de 2010 o de 16.91 m³/s en octubre de 2005 a 15.52 m³/s en noviembre de 2005. Dado que no se ha encontrado la manera de suavizar estos cambios “bruscos” (ya sea modificando la función objetivo o introduciendo en el programa algún tipo de pronóstico) se sugiere que cuando, como ocurre en septiembre de 2020, el almacenamiento esté sensiblemente debajo de la media, se analicen escenarios basados en el pronóstico meteorológico, y se decida, con el consenso de los usuarios, reducir gradualmente las entregas a Los Berros.

Como se mencionó las políticas óptimas AG6 Y AG7 consideran embalses totalmente llenos, sin embargo, se analizó el escenario considerando los embalses menores al NAMO, ya que con este planteamiento se analiza la bondad de que tan eficiente es el algoritmo propuesto que permita maximizar la cantidad de agua que se entrega, bajo esta consideración es posible obtener políticas óptimas que permitan comparar ambos escenarios, este escenario se planteó en las políticas AG8 y AG9.

Con el fin de revisar el comportamiento del sistema en el largo plazo de utilizarse las políticas seleccionadas, se podría proponer simulaciones con series de volúmenes de ingreso mensual sintéticos con 100 años de registro. Existen numerosas metodologías para la generación de series sintéticas a partir de un registro histórico anual o periódico (semestral, mensual, diario). El método de Svanidze modificado permite generar series sintéticas periódicas, con la ventaja de que no se requiere que los datos tengan una distribución normal (Domínguez et al., 2001, Arganis et al 2008)

7. Referencias

Acuña Soto, Gerardo. 2014. "Revisión y optimización de la operación histórica de las presas del sistema del río Cutzamala". Tesina de Especialidad. Dirección de posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

Alegría Díaz, Arallely. 2010 "Política de operación óptima del sistema de presas del río Grijalva. Efectos de la curva guía" (Tesis de Maestría). Posgrado en Ingeniería Civil. Facultad de ingeniería. UNAM

Aparicio Mijares, Francisco J. 1992. "Fundamentos de Hidrología de superficie", México.

Arganis, J. M. L., Domínguez, M. R., Cisneros, I.H.L., Fuentes, M. G. E. 2008. "Génération d'échantillons synthétiques des volumes mensuels écoulés de deux barrages utilisant la Méthode de Svanidze Modifiée". Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques, 53(1) Février 2008. 130-141 pp. FI 1.447 ISSN: 0262-6667 <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.53.1.130>

Bertsekas, Dimitry P. Dynamic Programming and optimal control. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 1995.

Banco mundial, CONAGUA. (2015). Cutzamala "Diagnóstico Integral". México: World bank group.

Banco mundial, CONAGUA. (2020). Cutzamala "Diagnóstico Integral". México: World bank group.

Bautista Chávez, Adrian. (2005). Elaboracion de un tutorial animado e interactivo de algoritmos geneticos. Estado de México: UNAM.

Comisión Nacional del Agua. (2005). Sistema Cutzamala. Agua para millones de mexicanos. México: Gerencia

Contreras Cruz, Claudia. Operación Óptima de un Sistema de Presas en Cascada. Aplicación al Sistema del Río Grijalva. Tesis de maestría. UNAM. 1999.

Chipperfield Andrew et al., "Genetic Algorithm tool box" (Guia de usuario de MatLab), Department of Automatic Control And Systems Engineering University Of Sheffield.

Domínguez, M. R., Fuentes M. G., Arganis, J. M. L. 2001. "Procedimiento Para Generar Muestras Sintéticas de Series Periódicas Mensuales a través del Método de Svanidze Modificado Aplicado a los Datos de las Presas La Angostura y Malpaso". Series Instituto de Ingeniería C1-19. Agosto del 2001. Series Blanca

Fox David y Wait Mitchell, "Gráficos animados por computadora", Ed., Mc Graw Hill, 1986. P.p. 525

Olea Franco, Pedro, "Manual de técnicas de investigación documental para la enseñanza", Ed. esfinge, 1999. P.p. 221.

Gutiérrez López Alfonso, Rivera Trejo Fabián, Soto Cortés Gabriel. Hidrología de Embalses Nuevos Enfoques. IMTA, UJAT, UAM-A. México, 2008.

Goldberg, David E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning". United States of

America, Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989. P.p 412.

Jairo Andres Ossa Calderón. (2005). Uso de algoritmos genéticos para facilitar el manejo de las variables y su relación con el valor presente neto, en la construcción de un parque urbano. Bogotá: Pontifica Universidad Javeriana.

Koza, J. R., "Genetic Programming on the Programming of Computers by Means of Natural selection", The MIT Press, 1992.

Martínez Alarcón, Israel. (2009). Políticas de operación óptimas para un sistema de presas. Aplicación de algoritmos genéticos, (Tesis de Maestría). Posgrado en Ingeniería Civil. Facultad de ingeniería. UNAM

Mendoza, R., 2013. Manual del programa SIMEPPAR.FOR. Informe interno. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Morelia, Mich.

Mendoza, R., 2020. Manual del programa SIMEPPARD.FOR. Informe interno. Instituto de Ingeniería de la UNAM. Morelia, Mich.

Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala.

SACMEX. (2012). El gran reto del agua de la Ciudad de México: pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México

Winston, Wayne L. Operations research: applications and algorithms. Fourth Edition. s.l.: Thomson, 2004.

Gerardo Acuña Soto. (2014). Revisión y optimización de la operación histórica de las presas del sistema del río Cutzamala. CDMX: UNAM.

8. Anexo A. Simulación con curva Z de la política AG1

***** SIMULACION DE TRES PRESAS DEL SISTEMA CUTZAMALA *****

PRESA: PRESA: EL BOSQUE

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 1999-2000 *****								
NOV	202.40	-1.65	.024	14.87	.00	.00		
DIC	185.86	-6.24	.028	14.87	.00	.00		
ENE	164.72	-.15	.030	14.87	.00	.00		
FEB	149.68	-1.46	.027	14.87	.00	.00		
MAR	133.32	-1.76	.051	14.87	.00	.00		
ABR	116.65	-3.30	.064	14.87	.00	.00		
MAY	98.41	2.97	.045	14.87	.00	.00		
JUN	86.47	34.09	-.001	14.87	.00	.00		
JUL	105.69	32.67	-.024	14.87	.00	.00		
AGO	123.52	35.28	-.037	14.87	.00	.00		
SEP	143.97	25.80	-.016	14.87	.00	.00		
OCT	154.92	33.59	.013	14.87	.00	.00		
EXT CURVA Z:	552.0	VOLAPCOLIXT:	60.9	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	437.2	EXT
PRESA: 178.4								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2000-2001 *****								
NOV	173.63	6.39	.023	13.41	.00	.00		
DIC	166.59	-1.33	.027	13.41	.00	.00		
ENE	151.82	2.25	.029	13.41	.00	.00		
FEB	140.62	1.69	.026	13.41	.00	.00		
MAR	128.88	5.17	.050	13.41	.00	.00		
ABR	120.58	2.68	.064	13.41	.00	.00		
MAY	109.79	4.98	.047	13.41	.00	.00		
JUN	101.31	18.90	-.002	13.41	.00	.00		
JUL	106.80	38.39	-.024	13.41	.00	.00		
AGO	131.81	47.13	-.037	13.41	.00	.00		
SEP	165.57	36.76	-.017	13.41	.00	.00		
OCT	188.93	26.89	.014	13.41	.00	.00		
EXT CURVA Z:	541.2	VOLAPCOLIXT:	85.6	VOLAPCOLCHIL:	61.1	EXTCURVAZREDUCIDA:	394.4	EXT
PRESA: 160.9								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2001-2002 *****								
NOV	202.40	5.42	.024	15.10	.00	.00		
DIC	192.70	1.42	.028	15.10	.00	.00		
ENE	178.98	4.28	.031	15.10	.00	.00		
FEB	168.14	1.06	.029	15.10	.00	.00		
MAR	154.07	.62	.054	15.10	.00	.00		
ABR	139.53	-.34	.068	15.10	.00	.00		
MAY	124.02	3.57	.050	15.10	.00	.00		
JUN	112.45	10.81	-.002	15.10	.00	.00		
JUL	108.16	24.87	-.024	15.10	.00	.00		
AGO	117.95	23.38	-.036	15.10	.00	.00		
SEP	126.27	9.02	-.015	15.10	.00	.00		
OCT	120.21	21.48	.012	15.10	.00	.00		
EXT CURVA Z:	548.1	VOLAPCOLIXT:	50.2	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	444.0	EXT
PRESA: 181.2								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2002-2003 *****								
NOV	126.58	32.83	.020	14.64	.00	.00		
DIC	144.75	11.79	.025	14.64	.00	.00		
ENE	141.87	4.69	.028	14.64	.00	.00		
FEB	131.89	-3.62	.026	14.64	.00	.00		
MAR	113.60	-2.48	.048	14.64	.00	.00		
ABR	96.43	.46	.059	14.64	.00	.00		
MAY	82.20	2.48	.042	14.64	.00	.00		
JUN	70.00	20.39	-.001	14.64	.00	.00		
JUL	75.74	13.09	-.021	14.64	.00	.00		
AGO	74.21	40.13	-.030	14.64	.00	.00		
SEP	99.74	51.65	-.014	14.64	.00	.00		
OCT	136.76	17.08	.012	14.64	.00	.00		
EXT CURVA Z:	531.2	VOLAPCOLIXT:	67.6	VOLAPCOLCHIL:	33.0	EXTCURVAZREDUCIDA:	430.5	EXT
PRESA: 175.7								

MES ALM.INICIAL INGRESO VOL EVAP EXT POL DERRAME DEFICIT

	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3

	2003-2004		*****			
NOV	139.18	10.68	.021	17.41	.00	.00
DIC	132.42	1.70	.024	17.41	.00	.00
ENE	116.68	10.07	.026	17.41	.00	.00
FEB	109.32	.05	.024	17.41	.00	.00
MAR	91.93	-1.18	.044	17.41	.00	.00
ABR	73.28	-1.89	.053	17.41	.00	6.07
MAY	60.00	3.70	.038	17.41	.00	13.75
JUN	60.00	23.34	-.001	17.41	.00	.00
JUL	65.92	20.19	-.020	17.41	.00	.00
AGO	68.72	21.54	-.029	17.41	.00	.00
SEP	72.87	42.50	-.012	17.41	.00	.00
OCT	97.97	20.69	.011	17.41	.00	.00
EXT CURVA Z:	544.2	VOLAPCOLIXT: -5.4	VOLAPCOLCHIL: 37.4	EXTCURVAZREDUCIDA: 512.1	EXT	
	PRESA: 209.0					

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3

	2004-2005		*****			
NOV	101.23	11.76	.018	19.34	.00	.00
DIC	93.63	10.09	.021	19.34	.00	.00
ENE	84.36	6.95	.023	19.34	.00	.00
FEB	71.96	1.66	.020	19.34	.00	5.74
MAR	60.00	7.02	.038	19.34	.00	12.35
ABR	60.00	-1.28	.049	19.34	.00	20.67
MAY	60.00	2.18	.038	19.34	.00	17.19
JUN	60.00	7.47	-.001	19.34	.00	11.86
JUL	60.00	11.03	-.020	19.34	.00	8.28
AGO	60.00	29.26	-.028	19.34	.00	.00
SEP	69.95	43.54	-.012	19.34	.00	.00
OCT	94.17	27.96	.011	19.34	.00	.00
EXT CURVA Z:	538.3	VOLAPCOLIXT: -49.3	VOLAPCOLCHIL: 18.9	EXTCURVAZREDUCIDA: 568.6	EXT	
	PRESA: 232.0					

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3

	2005-2006		*****			
NOV	102.78	4.61	.019	15.10	.00	.00
DIC	92.28	.22	.021	15.10	.00	.00
ENE	77.38	3.28	.022	15.10	.00	.00
FEB	65.54	2.07	.020	15.10	.00	7.51
MAR	60.00	.62	.038	15.10	.00	14.51
ABR	60.00	-.42	.049	15.10	.00	15.57
MAY	60.00	4.95	.038	15.10	.00	10.19
JUN	60.00	13.21	-.001	15.10	.00	1.88
JUL	60.00	24.33	-.020	15.10	.00	.00
AGO	69.25	44.38	-.029	15.10	.00	.00
SEP	98.57	43.98	-.014	15.10	.00	.00
OCT	127.47	40.16	.012	15.10	.00	.00
EXT CURVA Z:	517.4	VOLAPCOLIXT: 58.8	VOLAPCOLCHIL: 14.7	EXTCURVAZREDUCIDA: 444.0	EXT	
	PRESA: 181.2					

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3

	2006-2007		*****			
NOV	152.51	23.62	.022	14.26	.00	.00
DIC	161.85	7.67	.027	14.26	.00	.00
ENE	155.24	.88	.029	14.26	.00	.00
FEB	141.83	5.66	.026	14.26	.00	.00
MAR	133.20	.45	.051	14.26	.00	.00
ABR	119.33	1.39	.064	14.26	.00	.00
MAY	106.40	3.17	.047	14.26	.00	.00
JUN	95.26	16.16	-.002	14.26	.00	.00
JUL	97.16	33.13	-.023	14.26	.00	.00
AGO	116.05	37.72	-.036	14.26	.00	.00
SEP	139.55	28.61	-.016	14.26	.00	.00
OCT	153.92	18.99	.013	14.26	.00	.00
EXT CURVA Z:	528.9	VOLAPCOLIXT: 67.3	VOLAPCOLCHIL: 42.3	EXTCURVAZREDUCIDA: 419.3	EXT	
	PRESA: 171.1					

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3

	2007-2008		*****			
NOV	158.64	5.65	.022	16.08	.00	.00
DIC	148.18	5.56	.025	16.08	.00	.00
ENE	137.63	1.76	.028	16.08	.00	.00
FEB	123.28	2.29	.025	16.08	.00	.00
MAR	109.46	1.71	.047	16.08	.00	.00
ABR	95.04	1.88	.058	16.08	.00	.00
MAY	80.77	-.72	.042	16.08	.00	.00
JUN	63.93	12.75	-.001	16.08	.00	.00



MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
JUL	60.60	32.06	-.020	16.08	.00	.00
AGO	76.59	33.25	-.030	16.08	.00	.00
SEP	93.79	40.73	-.013	16.08	.00	.00
OCT	118.45	23.38	.012	16.08	.00	.00
EXT CURVA Z:	533.4	VOLAPCOLIXT: -14.8	VOLAPCOLCHIL: 75.3	EXTCURVAZREDUCIDA:	472.9	EXT PRESA: 193.0

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2008-2009 *****						
NOV	125.74	2.51	.020	15.31	.00	.00
DIC	112.92	1.28	.023	15.31	.00	.00
ENE	98.86	.77	.024	15.31	.00	.00
FEB	84.29	1.63	.022	15.31	.00	.00
MAR	70.59	1.36	.040	15.31	.00	3.40
ABR	60.00	-.84	.049	15.31	.00	16.20
MAY	60.00	3.24	.038	15.31	.00	12.11
JUN	60.00	7.81	-.001	15.31	.00	7.50
JUL	60.00	19.51	-.020	15.31	.00	.00
AGO	64.22	22.31	-.028	15.31	.00	.00
SEP	71.25	60.69	-.012	15.31	.00	.00
OCT	116.64	27.92	.012	15.31	.00	.00
EXT CURVA Z:	510.5	VOLAPCOLIXT: 24.0	VOLAPCOLCHIL: 36.2	EXTCURVAZREDUCIDA:	450.3	EXT PRESA: 183.7

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2009-2010 *****						
NOV	129.24	7.82	.020	13.26	.00	.00
DIC	123.78	5.26	.024	13.26	.00	.00
ENE	115.76	13.15	.026	13.26	.00	.00
FEB	115.63	59.74	.025	13.26	.00	.00
MAR	162.09	9.79	.055	13.26	.00	.00
ABR	158.57	1.31	.072	13.26	.00	.00
MAY	146.55	.16	.053	13.26	.00	.00
JUN	133.40	16.44	-.002	13.26	.00	.00
JUL	136.59	46.69	-.027	13.26	.00	.00
AGO	170.05	68.20	-.042	13.26	22.63	.00
SEP	202.40	32.09	-.018	13.26	18.85	.00
OCT	202.40	5.80	.014	13.26	.00	.00
EXT CURVA Z:	502.3	VOLAPCOLIXT: 69.7	VOLAPCOLCHIL: 42.7	EXTCURVAZREDUCIDA:	389.8	EXT PRESA: 159.1

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2010-2011 *****						
NOV	194.93	2.71	.024	14.85	.00	.00
DIC	182.76	-3.03	.028	14.85	.00	.00
ENE	164.85	-2.10	.030	14.85	.00	.00
FEB	147.87	-4.12	.027	14.85	.00	.00
MAR	128.88	-1.69	.050	14.85	.00	.00
ABR	112.28	-1.48	.062	14.85	.00	.00
MAY	95.88	-1.01	.045	14.85	.00	.00
JUN	79.98	7.68	-.001	14.85	.00	.00
JUL	72.81	41.65	-.021	14.85	.00	.00
AGO	99.63	44.72	-.033	14.85	.00	.00
SEP	129.53	35.44	-.015	14.85	.00	.00
OCT	150.13	19.58	.013	14.85	.00	.00
EXT CURVA Z:	525.0	VOLAPCOLIXT: 68.4	VOLAPCOLCHIL: 19.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	436.8	EXT PRESA: 178.2

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2011-2012 *****						
NOV	154.84	-.01	.022	15.13	.00	.00
DIC	139.68	-3.03	.025	15.13	.00	.00
ENE	121.50	.32	.027	15.13	.00	.00
FEB	106.67	8.82	.024	15.13	.00	.00
MAR	100.34	-.67	.046	15.13	.00	.00
ABR	84.50	-2.01	.056	15.13	.00	.00
MAY	67.31	-2.36	.039	15.13	.00	10.22
JUN	60.00	12.52	-.001	15.13	.00	2.61
JUL	60.00	41.23	-.020	15.13	.00	.00
AGO	86.12	51.26	-.032	15.13	.00	.00
SEP	122.28	41.43	-.015	15.13	.00	.00
OCT	148.60	12.60	.013	15.13	.00	.00
EXT CURVA Z:	506.4	VOLAPCOLIXT: 32.4	VOLAPCOLCHIL: 29.2	EXTCURVAZREDUCIDA:	444.9	EXT PRESA: 181.5

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2012-2013 *****						

NOV	146.06	8.17	.021	14.75	.00	.00		
DIC	139.46	-2.51	.025	14.75	.00	.00		
ENE	122.17	-.28	.027	14.75	.00	.00		
FEB	107.12	-1.25	.024	14.75	.00	.00		
MAR	91.09	1.79	.044	14.75	.00	.00		
ABR	78.08	-1.61	.054	14.75	.00	.00		
MAY	61.66	.85	.038	14.75	.00	12.28		
JUN	60.00	14.13	-.001	14.75	.00	.62		
JUL	60.00	44.79	-.020	14.75	.00	.00		
AGO	90.06	55.38	-.032	14.75	.00	.00		
SEP	130.72	69.92	-.015	14.75	.00	.00		
OCT	185.90	48.14	.014	14.75	16.88	.00		
EXT CURVA Z:	496.7	VOLAPCOLIXT:	16.1	VOLAPCOLCHIL:	46.7	EXTCURVAZREDUCIDA:	433.8	EXT
PRESA: 177.0								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2013-2014 *****								
NOV	202.40	22.50	.024	13.29	9.18	.00		
DIC	202.40	9.30	.029	13.29	.00	.00		
ENE	198.38	5.00	.032	13.29	.00	.00		
FEB	190.06	.43	.030	13.29	.00	.00		
MAR	177.17	2.80	.058	13.29	.00	.00		
ABR	166.62	2.31	.073	13.29	.00	.00		
MAY	155.57	11.29	.054	13.29	.00	.00		
JUN	153.51	27.73	-.002	13.29	.00	.00		
JUL	167.95	37.67	-.029	13.29	.00	.00		
AGO	192.36	44.49	-.044	13.29	21.21	.00		
SEP	202.40	23.78	-.018	13.29	10.51	.00		
OCT	202.40	17.65	.014	13.29	4.35	.00		
EXT CURVA Z:	514.1	VOLAPCOLIXT:	71.0	VOLAPCOLCHIL:	52.2	EXTCURVAZREDUCIDA:	390.8	EXT
PRESA: 159.5								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2014-2015 *****								
NOV	202.40	12.97	.024	17.93	.00	.00		
DIC	197.42	7.11	.029	17.93	.00	.00		
ENE	186.57	3.95	.032	17.93	.00	.00		
FEB	172.56	4.52	.029	17.93	.00	.00		
MAR	159.12	14.84	.055	17.93	.00	.00		
ABR	155.99	-1.47	.071	17.93	.00	.00		
MAY	136.52	12.35	.051	17.93	.00	.00		
JUN	130.90	31.22	-.002	17.93	.00	.00		
JUL	144.19	40.27	-.027	17.93	.00	.00		
AGO	166.56	28.29	-.041	17.93	.00	.00		
SEP	176.97	24.10	-.018	17.93	.00	.00		
OCT	183.16	13.90	.014	17.93	.00	.00		
EXT CURVA Z:	527.4	VOLAPCOLIXT:	-53.7	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	527.2	EXT
PRESA: 215.1								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2015-2016 *****								
NOV	179.11	11.13	.023	17.82	.00	.00		
DIC	172.39	9.94	.027	17.82	.00	.00		
ENE	164.48	7.96	.030	17.82	.00	.00		
FEB	154.59	1.65	.027	17.82	.00	.00		
MAR	138.39	10.74	.052	17.82	.00	.00		
ABR	131.26	-3.25	.066	17.82	.00	.00		
MAY	110.12	3.39	.047	17.82	.00	.00		
JUN	95.64	16.34	-.002	17.82	.00	.00		
JUL	94.16	33.26	-.023	17.82	.00	.00		
AGO	109.62	53.36	-.035	17.82	.00	.00		
SEP	145.19	38.59	-.016	17.82	.00	.00		
OCT	165.97	26.04	.013	17.82	.00	.00		
EXT CURVA Z:	524.4	VOLAPCOLIXT:	-51.5	VOLAPCOLCHIL:	51.6	EXTCURVAZREDUCIDA:	524.2	EXT
PRESA: 213.9								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2016-2017 *****						
NOV	174.17	17.79	.023	16.42	.00	.00
DIC	175.51	8.99	.028	16.42	.00	.00
ENE	168.05	-1.25	.030	16.42	.00	.00
FEB	150.35	-.27	.027	16.42	.00	.00
MAR	133.63	.36	.051	16.42	.00	.00
ABR	117.53	-.41	.064	16.42	.00	.00
MAY	100.63	2.74	.046	16.42	.00	.00
JUN	86.90	12.51	-.001	16.42	.00	.00
JUL	83.00	27.29	-.022	16.42	.00	.00
AGO	93.88	38.83	-.033	16.42	.00	.00

SEP	116.32	44.11	-.015	16.42	.00	.00
OCT	144.03	30.09	.013	16.42	.00	.00
EXT CURVA Z:	520.3	VOLAPCOLIXT:	-3.6	VOLAPCOLCHIL:	40.9	EXTCURVAZREDUCIDA: 482.9 EXT
		PRESA:	197.1			

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2017-2018 *****						
NOV	157.68	6.58	.022	16.65	.00	.00
DIC	147.59	3.45	.025	16.65	.00	.00
ENE	134.36	5.86	.028	16.65	.00	.00
FEB	123.54	-.19	.025	16.65	.00	.00
MAR	106.67	-.52	.047	16.65	.00	.00
ABR	89.46	-1.71	.057	16.65	.00	.00
MAY	71.05	7.51	.040	16.65	.00	.00
JUN	61.86	25.15	-.001	16.65	.00	.00
JUL	70.36	30.07	-.021	16.65	.00	.00
AGO	83.79	55.36	-.031	16.65	.00	.00
SEP	122.53	57.51	-.015	16.65	.00	.00
OCT	163.41	36.23	.013	16.65	.00	.00
EXT CURVA Z:	516.4	VOLAPCOLIXT:	-12.8	VOLAPCOLCHIL:	39.5	EXTCURVAZREDUCIDA: 489.7 EXT
		PRESA:	199.8			

***** RESUMEN ANUAL *****

AÑO	DERRAME	DEFICIT	ING HIST	EXT TOTAL	ALMAC PRO	ELEV PRO
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	(MSNM)
1999-2000	.00	.00	149.84	178.4	136.40	1734.73
2000-2001	.00	.00	189.89	160.9	142.92	1735.43
2001-2002	.00	.00	105.59	181.2	139.09	1735.02
2002-2003	.00	.00	188.47	175.7	108.86	1731.60
2003-2004	.00	19.82	151.37	209.0	87.53	1728.80
2004-2005	.00	76.09	157.65	232.0	73.07	1726.69
2005-2006	.00	49.66	181.40	181.2	81.92	1727.98
2006-2007	.00	.00	177.43	171.1	131.54	1734.22
2007-2008	.00	.00	160.28	193.0	102.79	1730.81
2008-2009	.00	39.20	148.20	183.7	82.33	1728.04
2009-2010	41.48	.00	266.44	159.1	155.18	1736.73
2010-2011	.00	.00	138.35	178.2	126.62	1733.69
2011-2012	.00	12.83	160.10	181.5	103.59	1730.92
2012-2013	16.88	12.90	237.53	177.0	110.72	1731.85
2013-2014	45.24	.00	204.93	159.5	184.27	1739.69
2014-2015	.00	.00	192.04	215.1	165.76	1737.85
2015-2016	.00	.00	209.16	213.9	138.00	1734.90
2016-2017	.00	.00	180.79	197.1	127.29	1733.76
2017-2018	.00	.00	225.30	199.8	113.13	1732.16
TOTAL			103.60	210.51		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 60.00 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

P R O M E D I O S		
ELEVACIÓN	ALMACENAMIENTO	
MSNM	MILL M^3	
ENE	2041.05	122.75
FEB	2040.40	112.62
MAR	2039.80	101.76
ABR	2039.14	89.34
MAY	2038.35	81.58
JUN	2037.83	84.46
JUL	2038.01	99.72
AGO	2038.98	121.49
SEP	2040.30	142.77
OCT	2041.53	150.32
NOV	1649.88	145.61
DIC	1648.96	134.18

***** SIMULACION DE TRES PRESAS DEL SISTEMA CUTZAMALA *****

PRESA: PRESA: VALLE DE BRAVO

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 1999-2000 *****								
NOV	394.39	5.34	.046	14.22	.00	.00		
DIC	385.47	9.04	.048	14.22	.00	.00		
ENE	380.24	3.00	.055	14.22	.00	.00		
FEB	368.97	7.67	.077	14.22	.00	.00		
MAR	362.34	2.44	.112	14.22	.00	.00		
ABR	350.45	2.69	.119	14.22	.00	.00		
MAY	338.81	6.52	.089	14.22	.00	.00		
JUN	331.02	18.93	-.027	14.22	.00	.00		
JUL	335.76	17.67	-.040	14.22	.00	.00		
AGO	339.25	21.55	-.056	14.22	.00	.00		
SEP	346.64	29.66	-.049	14.22	.00	.00		
OCT	362.13	23.17	.016	14.22	.00	.00		
EXT CURVA Z:	552.0	VOLAPCOLIXT:	60.9	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	437.2	EXT
PRESA: 170.6								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2000-2001 *****								
NOV	371.06	13.67	.045	12.83	.00	.00		
DIC	371.87	6.71	.047	12.83	.00	.00		
ENE	365.70	6.86	.054	12.83	.00	.00		
FEB	359.68	5.09	.077	12.83	.00	.00		
MAR	351.87	5.77	.111	12.83	.00	.00		
ABR	344.70	3.72	.118	12.83	.00	.00		
MAY	335.48	7.36	.089	12.83	.00	.00		
JUN	329.92	21.53	-.027	12.83	.00	.00		
JUL	338.65	26.11	-.040	12.83	.00	.00		
AGO	351.98	30.25	-.056	12.83	.00	.00		
SEP	369.46	30.02	-.050	12.83	.00	.00		
OCT	386.71	20.96	.016	12.83	.45	.00		
EXT CURVA Z:	541.2	VOLAPCOLIXT:	85.6	VOLAPCOLCHIL:	61.1	EXTCURVAZREDUCIDA:	394.4	EXT
PRESA: 153.9								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2001-2002 *****								
NOV	394.39	9.63	.046	14.44	.00	.00		
DIC	389.53	6.61	.048	14.44	.00	.00		
ENE	381.65	6.65	.055	14.44	.00	.00		
FEB	373.81	3.24	.078	14.44	.00	.00		
MAR	362.53	4.20	.112	14.44	.00	.00		
ABR	352.18	6.33	.119	14.44	.00	.00		
MAY	343.95	5.54	.090	14.44	.00	.00		
JUN	334.96	11.41	-.027	14.44	.00	.00		
JUL	331.95	18.54	-.040	14.44	.00	.00		
AGO	336.09	21.45	-.055	14.44	.00	.00		
SEP	343.16	34.55	-.049	14.44	.00	.00		
OCT	363.31	26.01	.016	14.44	.00	.00		
EXT CURVA Z:	548.1	VOLAPCOLIXT:	50.2	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	444.0	EXT
PRESA: 173.3								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2002-2003 *****								
NOV	374.87	17.35	.045	14.00	.00	.00		
DIC	378.18	11.44	.048	14.00	.00	.00		
ENE	375.57	8.73	.055	14.00	.00	.00		
FEB	370.24	5.74	.077	14.00	.00	.00		
MAR	361.91	4.74	.112	14.00	.00	.00		
ABR	352.53	4.16	.119	14.00	.00	.00		
MAY	342.57	1.06	.090	14.00	.00	.00		
JUN	329.54	21.80	-.027	14.00	.00	.00		
JUL	337.36	24.13	-.040	14.00	.00	.00		
AGO	347.53	29.87	-.056	14.00	.00	.00		
SEP	363.45	40.83	-.050	14.00	.00	.00		
OCT	390.33	37.18	.016	14.00	19.10	.00		
EXT CURVA Z:	531.2	VOLAPCOLIXT:	67.6	VOLAPCOLCHIL:	33.0	EXTCURVAZREDUCIDA:	430.5	EXT
PRESA: 168.0								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2003-2004 *****						
NOV	394.39	20.02	.046	16.65	3.32	.00

DIC	394.39	10.68	.048	16.65	.00	.00
ENE	388.36	12.17	.055	16.65	.00	.00
FEB	383.82	7.80	.078	16.65	.00	.00
MAR	374.89	9.47	.114	16.65	.00	.00
ABR	367.59	7.41	.121	16.65	.00	.00
MAY	358.23	10.02	.091	16.65	.00	.00
JUN	351.50	16.60	-.027	16.65	.00	.00
JUL	351.48	19.12	-.041	16.65	.00	.00
AGO	353.99	29.64	-.057	16.65	.00	.00
SEP	367.03	30.97	-.050	16.65	.00	.00
OCT	381.39	32.68	.016	16.65	3.00	.00
EXT CURVA Z:	544.2	VOLAPCOLIXT: -5.4	VOLAPCOLCHIL: 37.4	EXTCURVAZREDUCIDA: 512.1	EXT	
PRESA: 199.9						

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP		EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2004-2005 *****							
NOV	394.39	15.03	.046	18.49	.00	.00	
DIC	390.88	9.17	.048	18.49	.00	.00	
ENE	381.51	7.44	.055	18.49	.00	.00	
FEB	370.40	3.92	.077	18.49	.00	.00	
MAR	355.75	7.30	.111	18.49	.00	.00	
ABR	344.45	6.97	.118	18.49	.00	.00	
MAY	332.81	3.33	.089	18.49	.00	.00	
JUN	317.55	7.15	-.026	18.49	.00	.00	
JUL	306.23	17.78	-.039	18.49	.00	.00	
AGO	305.56	24.05	-.054	18.49	.00	.00	
SEP	311.16	26.45	-.047	18.49	.00	.00	
OCT	319.17	20.32	.015	18.49	.00	.00	
EXT CURVA Z:	538.3	VOLAPCOLIXT: -49.3	VOLAPCOLCHIL: 18.9	EXTCURVAZREDUCIDA: 568.6	EXT		
PRESA: 221.9							

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP		EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2005-2006 *****							
NOV	320.98	10.53	.042	14.44	.00	.00	
DIC	317.03	8.68	.045	14.44	.00	.00	
ENE	311.22	7.98	.051	14.44	.00	.00	
FEB	304.72	5.80	.072	14.44	.00	.00	
MAR	296.01	8.44	.105	14.44	.00	.00	
ABR	289.91	6.17	.111	14.44	.00	.00	
MAY	281.53	7.88	.084	14.44	.00	.00	
JUN	274.88	6.45	-.025	14.44	.00	.00	
JUL	266.92	24.71	-.037	14.44	.00	.00	
AGO	277.22	36.66	-.052	14.44	.00	.00	
SEP	299.50	30.63	-.046	14.44	.00	.00	
OCT	315.73	36.10	.015	14.44	.00	.00	
EXT CURVA Z:	517.4	VOLAPCOLIXT: 58.8	VOLAPCOLCHIL: 14.7	EXTCURVAZREDUCIDA: 444.0	EXT		
PRESA: 173.3							

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP		EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2006-2007 *****							
NOV	337.38	18.70	.043	13.64	.00	.00	
DIC	342.40	9.17	.046	13.64	.00	.00	
ENE	337.88	8.09	.052	13.64	.00	.00	
FEB	332.29	4.26	.074	13.64	.00	.00	
MAR	322.84	4.28	.108	13.64	.00	.00	
ABR	313.37	1.69	.114	13.64	.00	.00	
MAY	301.31	9.85	.086	13.64	.00	.00	
JUN	297.43	15.24	-.026	13.64	.00	.00	
JUL	299.06	16.88	-.039	13.64	.00	.00	
AGO	302.34	21.24	-.054	13.64	.00	.00	
SEP	310.00	32.57	-.047	13.64	.00	.00	
OCT	328.97	17.05	.015	13.64	.00	.00	
EXT CURVA Z:	528.9	VOLAPCOLIXT: 67.3	VOLAPCOLCHIL: 42.3	EXTCURVAZREDUCIDA: 419.3	EXT		
PRESA: 163.6							

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP		EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2007-2008 *****							
NOV	332.37	10.92	.043	15.38	.00	.00	
DIC	327.87	8.23	.045	15.38	.00	.00	
ENE	320.68	5.81	.051	15.38	.00	.00	
FEB	311.06	3.35	.073	15.38	.00	.00	
MAR	298.95	4.68	.105	15.38	.00	.00	
ABR	288.15	7.56	.111	15.38	.00	.00	
MAY	280.21	6.73	.084	15.38	.00	.00	
JUN	271.48	6.98	-.025	15.38	.00	.00	
JUL	263.11	19.10	-.037	15.38	.00	.00	
AGO	266.86	26.28	-.052	15.38	.00	.00	
SEP	277.81	29.56	-.045	15.38	.00	.00	

OCT 292.03 18.20 .015 15.38 .00 .00
 EXT CURVA Z: 533.4 VOLAPCOLIXT: -14.8 VOLAPCOLCHIL: 75.3 EXTCURVAZREDUCIDA: 472.9 EXT
 PRESA: 184.6

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2008-2009 *****						
NOV	294.84	11.37	.041	14.64	.00	.00
DIC	291.52	7.22	.044	14.64	.00	.00
ENE	284.05	11.54	.050	14.64	.00	.00
FEB	280.90	5.24	.070	14.64	.00	.00
MAR	271.42	5.64	.102	14.64	.00	.00
ABR	262.32	3.26	.108	14.64	.00	.00
MAY	250.83	4.52	.081	14.64	.00	.00
JUN	240.63	11.62	-.024	14.64	.00	.00
JUL	237.63	15.25	-.036	14.64	.00	.00
AGO	238.27	18.24	-.050	14.64	.00	.00
SEP	241.92	29.47	-.044	14.64	.00	.00
OCT	256.79	15.92	.014	14.64	.00	.00

EXT CURVA Z: 510.5 VOLAPCOLIXT: 24.0 VOLAPCOLCHIL: 36.2 EXTCURVAZREDUCIDA: 450.3 EXT
 PRESA: 175.7

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2009-2010 *****						
NOV	258.05	8.60	.040	12.68	.00	.00
DIC	253.94	7.71	.042	12.68	.00	.00
ENE	248.93	7.26	.048	12.68	.00	.00
FEB	243.46	25.36	.068	12.68	.00	.00
MAR	256.08	6.93	.100	12.68	.00	.00
ABR	250.23	2.44	.107	12.68	.00	.00
MAY	239.88	1.87	.081	12.68	.00	.00
JUN	228.99	9.30	-.024	12.68	.00	.00
JUL	225.63	28.62	-.036	12.68	.00	.00
AGO	241.61	34.34	-.050	12.68	.00	.00
SEP	263.32	38.37	-.045	12.68	.00	.00
OCT	289.06	20.13	.015	12.68	.00	.00

EXT CURVA Z: 502.3 VOLAPCOLIXT: 69.7 VOLAPCOLCHIL: 42.7 EXTCURVAZREDUCIDA: 389.8 EXT
 PRESA: 152.1

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2010-2011 *****						
NOV	296.50	11.83	.041	14.20	.00	.00
DIC	294.08	9.47	.044	14.20	.00	.00
ENE	289.31	9.23	.050	14.20	.00	.00
FEB	284.28	6.79	.071	14.20	.00	.00
MAR	276.79	4.86	.103	14.20	.00	.00
ABR	267.35	3.20	.109	14.20	.00	.00
MAY	256.23	3.66	.082	14.20	.00	.00
JUN	245.61	10.45	-.024	14.20	.00	.00
JUL	241.88	18.29	-.036	14.20	.00	.00
AGO	246.00	22.22	-.050	14.20	.00	.00
SEP	254.07	23.03	-.044	14.20	.00	.00
OCT	262.94	17.18	.014	14.20	.00	.00

EXT CURVA Z: 525.0 VOLAPCOLIXT: 68.4 VOLAPCOLCHIL: 19.9 EXTCURVAZREDUCIDA: 436.8 EXT
 PRESA: 170.5

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2011-2012 *****						
NOV	265.90	9.03	.040	14.47	.00	.00
DIC	260.42	6.11	.042	14.47	.00	.00
ENE	252.02	3.93	.048	14.47	.00	.00
FEB	241.44	7.18	.068	14.47	.00	.00
MAR	234.08	1.26	.098	14.47	.00	.00
ABR	220.77	6.61	.103	14.47	.00	.00
MAY	212.81	8.41	.078	14.47	.00	.00
JUN	206.67	11.77	-.023	14.47	.00	.00
JUL	203.99	22.20	-.035	14.47	.00	.00
AGO	211.76	20.22	-.049	14.47	.00	.00
SEP	217.56	18.14	-.043	14.47	.00	.00
OCT	221.28	15.56	.014	14.47	.00	.00

EXT CURVA Z: 506.4 VOLAPCOLIXT: 32.4 VOLAPCOLCHIL: 29.2 EXTCURVAZREDUCIDA: 444.9 EXT
 PRESA: 173.6

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2012-2013 *****						
NOV	222.36	14.25	.038	14.11	.00	.00
DIC	222.46	8.12	.040	14.11	.00	.00
ENE	216.43	8.36	.046	14.11	.00	.00

FEB	210.63	3.42	.065	14.11	.00	.00		
MAR	199.87	6.07	.094	14.11	.00	.00		
ABR	191.73	3.10	.100	14.11	.00	.00		
MAY	180.62	3.48	.075	14.11	.00	.00		
JUN	169.92	14.75	-.022	14.11	.00	.00		
JUL	170.58	17.05	-.033	14.11	.00	.00		
AGO	173.55	24.98	-.046	14.11	.00	.00		
SEP	184.47	29.84	-.041	14.11	.00	.00		
OCT	200.25	32.28	.013	14.11	.00	.00		
EXT CURVA Z:	496.7	VOLAPCOLIXT:	16.1	VOLAPCOLCHIL:	46.7	EXTCURVAZREDUCIDA:	433.8	EXT
PRESA: 169.3								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2013-2014 *****								
NOV	218.41	18.55	.038	12.71	.00	.00		
DIC	224.22	9.91	.041	12.71	.00	.00		
ENE	221.38	2.31	.046	12.71	.00	.00		
FEB	210.93	3.25	.065	12.71	.00	.00		
MAR	201.41	2.15	.095	12.71	.00	.00		
ABR	190.76	4.94	.100	12.71	.00	.00		
MAY	182.89	12.66	.075	12.71	.00	.00		
JUN	182.76	16.70	-.023	12.71	.00	.00		
JUL	186.78	23.42	-.034	12.71	.00	.00		
AGO	197.52	25.80	-.048	12.71	.00	.00		
SEP	210.66	35.30	-.042	12.71	.00	.00		
OCT	233.29	32.51	.014	12.71	.00	.00		
EXT CURVA Z:	514.1	VOLAPCOLIXT:	71.0	VOLAPCOLCHIL:	52.2	EXTCURVAZREDUCIDA:	390.8	EXT
PRESA: 152.5								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2014-2015 *****								
NOV	253.07	16.90	.040	17.14	.00	.00		
DIC	252.79	11.10	.042	17.14	.00	.00		
ENE	246.70	7.81	.048	17.14	.00	.00		
FEB	237.32	5.43	.067	17.14	.00	.00		
MAR	225.54	9.60	.097	17.14	.00	.00		
ABR	217.90	6.59	.103	17.14	.00	.00		
MAY	207.24	11.23	.078	17.14	.00	.00		
JUN	201.25	17.97	-.023	17.14	.00	.00		
JUL	202.10	22.54	-.035	17.14	.00	.00		
AGO	207.52	23.88	-.048	17.14	.00	.00		
SEP	214.31	37.92	-.042	17.14	.00	.00		
OCT	235.13	24.33	.014	17.14	.00	.00		
EXT CURVA Z:	527.4	VOLAPCOLIXT:	-53.7	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	527.2	EXT
PRESA: 205.7								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2015-2016 *****								
NOV	242.30	18.72	.039	17.05	.00	.00		
DIC	243.94	11.68	.041	17.05	.00	.00		
ENE	238.53	10.11	.047	17.05	.00	.00		
FEB	231.54	4.26	.067	17.05	.00	.00		
MAR	218.69	10.11	.096	17.05	.00	.00		
ABR	211.65	7.48	.102	17.05	.00	.00		
MAY	201.98	7.76	.077	17.05	.00	.00		
JUN	192.61	15.10	-.023	17.05	.00	.00		
JUL	190.69	20.96	-.034	17.05	.00	.00		
AGO	194.64	27.32	-.048	17.05	.00	.00		
SEP	204.96	28.67	-.042	17.05	.00	.00		
OCT	216.63	28.78	.013	17.05	.00	.00		
EXT CURVA Z:	524.4	VOLAPCOLIXT:	-51.5	VOLAPCOLCHIL:	51.6	EXTCURVAZREDUCIDA:	524.2	EXT
PRESA: 204.6								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2016-2017 *****						
NOV	228.35	19.48	.038	15.71	.00	.00
DIC	232.09	11.63	.041	15.71	.00	.00
ENE	227.97	7.20	.047	15.71	.00	.00
FEB	219.43	3.25	.066	15.71	.00	.00
MAR	206.90	8.88	.095	15.71	.00	.00
ABR	199.98	5.93	.101	15.71	.00	.00
MAY	190.11	5.22	.076	15.71	.00	.00
JUN	179.54	11.96	-.022	15.71	.00	.00
JUL	175.82	20.93	-.034	15.71	.00	.00
AGO	181.07	27.56	-.047	15.71	.00	.00
SEP	192.98	38.89	-.041	15.71	.00	.00
OCT	216.21	20.87	.013	15.71	.00	.00

EXT CURVA Z: 520.3 VOLAPCOLIXT: -3.6 VOLAPCOLCHIL: 40.9 EXTCURVAZREDUCIDA: 482.9 EXT
PRESA: 188.5

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2017-2018 *****						
NOV	221.36	13.83	.038	15.93	.00	.00
DIC	219.22	10.87	.040	15.93	.00	.00
ENE	214.13	7.14	.046	15.93	.00	.00
FEB	205.29	7.03	.065	15.93	.00	.00
MAR	196.33	6.14	.094	15.93	.00	.00
ABR	186.45	2.07	.099	15.93	.00	.00
MAY	172.49	7.53	.074	15.93	.00	.00
JUN	164.02	20.01	-.022	15.93	.00	.00
JUL	168.13	21.55	-.033	15.93	.00	.00
AGO	173.79	24.85	-.046	15.93	.00	.00
SEP	182.76	35.52	-.041	15.93	.00	.00
OCT	202.40	29.65	.013	15.93	.00	.00

EXT CURVA Z: 516.4 VOLAPCOLIXT: -12.8 VOLAPCOLCHIL: 39.5 EXTCURVAZREDUCIDA: 489.7 EXT
PRESA: 191.1

***** RESUMEN ANUAL *****

AÑO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	147.68	170.6	356.01	1827.81
2000-2001	.45	.00	178.06	153.9	358.37	1827.94
2001-2002	.00	.00	154.15	173.3	357.33	1827.89
2002-2003	19.10	.00	207.02	168.0	361.97	1828.15
2003-2004	6.33	.00	206.58	199.9	372.26	1828.74
2004-2005	.00	.00	148.89	221.9	338.04	1826.78
2005-2006	.00	.00	190.04	173.3	297.67	1824.34
2006-2007	.00	.00	159.01	163.6	318.35	1825.63
2007-2008	.00	.00	147.40	184.6	291.09	1823.93
2008-2009	.00	.00	139.30	175.7	259.53	1821.98
2009-2010	.00	.00	190.91	152.1	253.14	1821.57
2010-2011	.00	.00	140.22	170.5	265.37	1822.34
2011-2012	.00	.00	130.41	173.6	225.43	1819.80
2012-2013	.00	.00	165.69	169.3	194.91	1817.84
2013-2014	.00	.00	187.50	152.5	207.97	1818.68
2014-2015	.00	.00	195.29	205.7	224.17	1819.72
2015-2016	.00	.00	190.95	204.6	214.52	1819.10
2016-2017	.00	.00	181.81	188.5	203.62	1818.40
2017-2018	.00	.00	186.19	191.1	191.76	1817.64
TOTAL			25.87	.00		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 164.02 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

	P R O M E D I O S	
	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	2083.44	277.01
FEB	2083.22	268.71
MAR	2082.97	260.12
ABR	2082.71	250.50
MAY	2082.41	242.52
JUN	2082.16	241.69
JUL	2082.14	247.33
AGO	2082.31	257.76
SEP	2082.63	273.69
OCT	2083.12	281.85
NOV	1733.47	289.61
DIC	1733.27	284.11

***** SIMULACION DE TRES PRESAS DEL SISTEMA CUTZAMALA *****

PRESA: PRESA: VILLA VICTORIA

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 1999-2000 *****								
NOV	185.73	.54	.058	7.56	.00	.00		
DIC	178.65	-1.38	.051	7.56	.00	.00		
ENE	169.67	-2.20	.051	7.56	.00	.00		
FEB	159.87	-2.48	.076	7.56	.00	.00		
MAR	149.76	-5.39	.123	7.56	.00	.00		
ABR	136.69	-4.99	.112	7.56	.00	.00		
MAY	124.03	1.22	.066	7.56	.00	.00		
JUN	117.63	20.07	-.040	7.56	.00	.00		
JUL	130.19	15.07	-.071	7.56	.00	.00		
AGO	137.77	17.92	-.057	7.56	.00	.00		
SEP	148.19	14.23	-.046	7.56	.00	.00		
OCT	154.91	7.87	.032	7.56	.00	.00		
EXT CURVA Z:	552.0	VOLAPCOLIXT:	60.9	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	437.2	EXT
PRESA: 90.7								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2000-2001 *****								
NOV	155.19	.32	.052	6.82	.00	.00		
DIC	148.64	-1.97	.046	6.82	.00	.00		
ENE	139.81	-2.70	.046	6.82	.00	.00		
FEB	130.25	-2.68	.069	6.82	.00	.00		
MAR	120.69	-2.89	.112	6.82	.00	.00		
ABR	110.87	-3.05	.103	6.82	.00	.00		
MAY	100.91	-.28	.061	6.82	.00	.00		
JUN	93.75	5.80	-.037	6.82	.00	.00		
JUL	92.77	20.57	-.062	6.82	.00	.00		
AGO	106.58	28.30	-.051	6.82	.00	.00		
SEP	128.12	26.24	-.043	6.82	.00	.00		
OCT	147.58	7.31	.031	6.82	.00	.00		
EXT CURVA Z:	541.2	VOLAPCOLIXT:	85.6	VOLAPCOLCHIL:	61.1	EXTCURVAZREDUCIDA:	394.4	EXT
PRESA: 81.8								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2001-2002 *****								
NOV	148.05	.08	.051	7.67	.00	.00		
DIC	140.41	-3.19	.045	7.67	.00	.00		
ENE	129.50	1.08	.044	7.67	.00	.00		
FEB	122.87	-3.93	.068	7.67	.00	.00		
MAR	111.19	-4.73	.108	7.67	.00	.00		
ABR	98.68	-4.12	.098	7.67	.00	.00		
MAY	86.79	-1.74	.057	7.67	.00	.00		
JUN	77.32	4.29	-.033	7.67	.00	.00		
JUL	73.97	13.34	-.055	7.67	.00	.00		
AGO	79.69	14.40	-.044	7.67	.00	.00		
SEP	86.45	35.31	-.036	7.67	.00	.00		
OCT	114.12	27.44	.028	7.67	.00	.00		
EXT CURVA Z:	548.1	VOLAPCOLIXT:	50.2	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	444.0	EXT
PRESA: 92.1								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2002-2003 *****								
NOV	133.87	14.40	.049	7.44	.00	.00		
DIC	140.78	2.87	.045	7.44	.00	.00		
ENE	136.17	.23	.045	7.44	.00	.00		
FEB	128.91	-.32	.069	7.44	.00	.00		
MAR	121.08	-5.72	.113	7.44	.00	.00		
ABR	107.81	-4.39	.101	7.44	.00	.00		
MAY	95.88	-2.06	.059	7.44	.00	.00		
JUN	86.32	9.92	-.035	7.44	.00	.00		
JUL	88.84	14.80	-.060	7.44	.00	.00		
AGO	96.26	24.35	-.049	7.44	.00	.00		
SEP	113.22	65.09	-.041	7.44	.00	.00		
OCT	170.91	24.44	.034	7.44	2.15	.00		
EXT CURVA Z:	531.2	VOLAPCOLIXT:	67.6	VOLAPCOLCHIL:	33.0	EXTCURVAZREDUCIDA:	430.5	EXT
PRESA: 89.3								

MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2003-2004 *****						
NOV	185.73	10.61	.058	8.85	1.70	.00

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
DIC	185.73	- .59	.052	8.85	.00	.00
ENE	176.24	-1.01	.052	8.85	.00	.00
FEB	166.33	-4.41	.078	8.85	.00	.00
MAR	152.99	-3.72	.124	8.85	.00	.00
ABR	140.30	-2.88	.113	8.85	.00	.00
MAY	128.45	- .52	.067	8.85	.00	.00
JUN	119.02	17.90	-.040	8.85	.00	.00
JUL	128.11	24.57	-.071	8.85	.00	.00
AGO	143.89	38.03	-.058	8.85	.00	.00
SEP	173.13	53.57	-.050	8.85	32.17	.00
OCT	185.73	39.44	.035	8.85	30.56	.00
EXT CURVA Z:	544.2	VOLAPCOLIXT: -5.4	VOLAPCOLCHIL: 37.4	EXTCURVAZREDUCIDA: 512.1	EXT	
		PRESA: 106.2				

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2004-2005 *****						
NOV	185.73	4.64	.058	9.83	.00	.00
DIC	180.48	2.79	.051	9.83	.00	.00
ENE	173.39	5.30	.051	9.83	.00	.00
FEB	168.81	- .30	.078	9.83	.00	.00
MAR	158.61	-1.57	.127	9.83	.00	.00
ABR	147.09	-2.43	.115	9.83	.00	.00
MAY	134.71	-3.84	.069	9.83	.00	.00
JUN	120.98	- .83	-.041	9.83	.00	.00
JUL	110.36	9.02	-.066	9.83	.00	.00
AGO	109.62	18.48	-.052	9.83	.00	.00
SEP	118.32	16.29	-.042	9.83	.00	.00
OCT	124.83	7.66	.029	9.83	.00	.00
EXT CURVA Z:	538.3	VOLAPCOLIXT: -49.3	VOLAPCOLCHIL: 18.9	EXTCURVAZREDUCIDA: 568.6	EXT	
		PRESA: 117.9				

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2005-2006 *****						
NOV	122.63	.47	.047	7.67	.00	.00
DIC	115.38	- .50	.041	7.67	.00	.00
ENE	107.16	- .79	.041	7.67	.00	.00
FEB	98.66	-1.82	.062	7.67	.00	.00
MAR	89.10	-3.25	.098	7.67	.00	.00
ABR	78.07	- .90	.087	7.67	.00	.00
MAY	69.42	1.53	.050	7.67	.00	.00
JUN	63.23	4.49	-.030	7.67	.00	.00
JUL	60.07	6.22	-.049	7.67	.00	.00
AGO	58.67	31.03	-.038	7.67	.00	.00
SEP	82.06	34.75	-.035	7.67	.00	.00
OCT	109.17	29.20	.027	7.67	.00	.00
EXT CURVA Z:	517.4	VOLAPCOLIXT: 58.8	VOLAPCOLCHIL: 14.7	EXTCURVAZREDUCIDA: 444.0	EXT	
		PRESA: 92.1				

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2006-2007 *****						
NOV	130.67	12.97	.048	7.25	.00	.00
DIC	136.34	1.58	.044	7.25	.00	.00
ENE	130.63	- .06	.045	7.25	.00	.00
FEB	123.27	1.60	.068	7.25	.00	.00
MAR	117.56	-2.27	.111	7.25	.00	.00
ABR	107.94	-3.07	.101	7.25	.00	.00
MAY	97.52	1.18	.060	7.25	.00	.00
JUN	91.39	10.61	-.036	7.25	.00	.00
JUL	94.79	16.31	-.062	7.25	.00	.00
AGO	103.92	24.26	-.051	7.25	.00	.00
SEP	120.98	44.69	-.042	7.25	.00	.00
OCT	158.47	7.39	.032	7.25	.00	.00
EXT CURVA Z:	528.9	VOLAPCOLIXT: 67.3	VOLAPCOLCHIL: 42.3	EXTCURVAZREDUCIDA: 419.3	EXT	
		PRESA: 87.0				

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³
***** 2007-2008 *****						
NOV	158.57	1.12	.052	8.17	.00	.00
DIC	151.47	- .15	.046	8.17	.00	.00
ENE	143.10	-9.91	.046	8.17	.00	.00
FEB	124.98	-2.97	.068	8.17	.00	.00
MAR	113.76	-2.99	.109	8.17	.00	.00
ABR	102.49	-2.25	.099	8.17	.00	.00
MAY	91.97	-3.72	.058	8.17	.00	.00
JUN	80.02	2.42	-.034	8.17	.00	.00
JUL	74.29	15.99	-.055	8.17	.00	.00
AGO	82.16	14.61	-.045	8.17	.00	.00
SEP	88.64	5.65	-.037	8.17	.00	.00

EXT CURVA Z: OCT 86.15 2.85 .025 8.17 .00 .00
 533.4 VOLAPCOLIXT: -14.8 VOLAPCOLCHIL: 75.3 EXTCURVAZREDUCIDA: 472.9 EXT
 PRESA: 98.1

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2008-2009 *****						
NOV	80.80	1.40	.039	7.78	.00	.00
DIC	74.38	1.33	.033	7.78	.00	.00
ENE	67.89	1.11	.033	7.78	.00	.00
FEB	61.19	-.38	.048	7.78	.00	.00
MAR	52.98	-2.00	.074	7.78	.00	.00
ABR	43.12	-.36	.063	7.78	.00	.00
MAY	34.91	3.16	.035	7.78	.00	.00
JUN	30.25	6.18	-.020	7.78	.00	1.33
JUL	30.00	3.86	-.044	7.78	.00	3.88
AGO	30.00	7.27	-.035	7.78	.00	.48
SEP	30.00	35.06	-.027	7.78	.00	.00
OCT	57.30	11.36	.020	7.78	.00	.00

EXT CURVA Z: 510.5 VOLAPCOLIXT: 24.0 VOLAPCOLCHIL: 36.2 EXTCURVAZREDUCIDA: 450.3 EXT
 PRESA: 93.4

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2009-2010 *****						
NOV	60.86	1.47	.033	6.74	.00	.00
DIC	55.57	1.05	.028	6.74	.00	.00
ENE	49.85	4.16	.028	6.74	.00	.00
FEB	47.25	47.47	.041	6.74	.00	.00
MAR	87.95	1.88	.098	6.74	.00	.00
ABR	82.99	-2.21	.090	6.74	.00	.00
MAY	73.95	-1.54	.052	6.74	.00	.00
JUN	65.62	3.64	-.030	6.74	.00	.00
JUL	62.56	22.96	-.050	6.74	.00	.00
AGO	78.83	25.36	-.044	6.74	.00	.00
SEP	97.49	15.95	-.038	6.74	.00	.00
OCT	106.74	3.85	.027	6.74	.00	.00

EXT CURVA Z: 502.3 VOLAPCOLIXT: 69.7 VOLAPCOLCHIL: 42.7 EXTCURVAZREDUCIDA: 389.8 EXT
 PRESA: 80.8

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2010-2011 *****						
NOV	103.83	.27	.044	7.55	.00	.00
DIC	96.52	-.11	.038	7.55	.00	.00
ENE	88.82	-.51	.038	7.55	.00	.00
FEB	80.72	-.76	.056	7.55	.00	.00
MAR	72.36	-3.84	.088	7.55	.00	.00
ABR	60.88	-2.39	.076	7.55	.00	.00
MAY	50.86	-2.38	.042	7.55	.00	.00
JUN	40.89	.78	-.023	7.55	.00	.00
JUL	34.14	19.32	-.036	7.55	.00	.00
AGO	45.95	16.89	-.033	7.55	.00	.00
SEP	55.33	10.41	-.029	7.55	.00	.00
OCT	58.22	3.77	.020	7.55	.00	.00

EXT CURVA Z: 525.0 VOLAPCOLIXT: 68.4 VOLAPCOLCHIL: 19.9 EXTCURVAZREDUCIDA: 436.8 EXT
 PRESA: 90.6

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2011-2012 *****						
NOV	54.42	.94	.031	7.69	.00	.00
DIC	47.64	-1.49	.026	7.69	.00	.00
ENE	38.44	-1.36	.024	7.69	.00	.63
FEB	30.00	.81	.043	7.69	.00	6.92
MAR	30.00	-2.06	.072	7.69	.00	9.82
ABR	30.00	-3.22	.067	7.69	.00	10.98
MAY	30.00	-.36	.041	7.69	.00	8.09
JUN	30.00	5.08	-.025	7.69	.00	2.58
JUL	30.00	13.43	-.043	7.69	.00	.00
AGO	35.79	15.08	-.029	7.69	.00	.00
SEP	43.21	11.68	-.025	7.69	.00	.00
OCT	47.23	4.21	.018	7.69	.00	.00

EXT CURVA Z: 506.4 VOLAPCOLIXT: 32.4 VOLAPCOLCHIL: 29.2 EXTCURVAZREDUCIDA: 444.9 EXT
 PRESA: 92.3

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2012-2013 *****						
NOV	43.73	1.64	.028	7.50	.00	.00
DIC	37.84	-.87	.023	7.50	.00	.55
ENE	30.00	-1.27	.027	7.50	.00	8.79

FEB	30.00	-2.33	.042	7.50	.00	9.87		
MAR	30.00	-1.55	.069	7.50	.00	9.12		
ABR	30.00	-3.05	.065	7.50	.00	10.61		
MAY	30.00	.48	.039	7.50	.00	7.05		
JUN	30.00	1.82	-.024	7.50	.00	5.66		
JUL	30.00	16.55	-.041	7.50	.00	.00		
AGO	39.09	14.02	-.030	7.50	.00	.00		
SEP	45.65	47.96	-.026	7.50	.00	.00		
OCT	86.14	25.23	.025	7.50	.00	.00		
EXT CURVA Z:	496.7	VOLAPCOLIXT:	16.1	VOLAPCOLCHIL:	46.7	EXTCURVAZREDUCIDA:	433.8	EXT
PRESA: 90.0								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2013-2014 *****								
NOV	103.85	8.37	.044	6.75	.00	.00		
DIC	105.43	8.20	.040	6.75	.00	.00		
ENE	106.83	1.20	.041	6.75	.00	.00		
FEB	101.23	-.33	.062	6.75	.00	.00		
MAR	94.09	-2.05	.101	6.75	.00	.00		
ABR	85.18	-3.53	.091	6.75	.00	.00		
MAY	74.80	4.13	.052	6.75	.00	.00		
JUN	72.13	13.91	-.032	6.75	.00	.00		
JUL	79.32	18.93	-.057	6.75	.00	.00		
AGO	91.56	25.18	-.048	6.75	.00	.00		
SEP	110.03	34.06	-.040	6.75	.00	.00		
OCT	137.38	24.95	.030	6.75	.00	.00		
EXT CURVA Z:	514.1	VOLAPCOLIXT:	71.0	VOLAPCOLCHIL:	52.2	EXTCURVAZREDUCIDA:	390.8	EXT
PRESA: 81.0								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2014-2015 *****								
NOV	155.55	5.81	.052	9.11	.00	.00		
DIC	152.20	1.60	.046	9.11	.00	.00		
ENE	144.64	.19	.046	9.11	.00	.00		
FEB	135.67	-1.32	.070	9.11	.00	.00		
MAR	125.17	.70	.114	9.11	.00	.00		
ABR	116.64	-3.36	.105	9.11	.00	.00		
MAY	104.07	7.33	.061	9.11	.00	.00		
JUN	102.23	7.43	-.038	9.11	.00	.00		
JUL	100.59	23.56	-.064	9.11	.00	.00		
AGO	115.10	26.32	-.053	9.11	.00	.00		
SEP	132.36	47.08	-.044	9.11	.00	.00		
OCT	170.37	8.49	.034	9.11	.00	.00		
EXT CURVA Z:	527.4	VOLAPCOLIXT:	-53.7	VOLAPCOLCHIL:	53.9	EXTCURVAZREDUCIDA:	527.2	EXT
PRESA: 109.3								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT		
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3		
***** 2015-2016 *****								
NOV	169.72	4.43	.055	9.06	.00	.00		
DIC	165.04	.58	.048	9.06	.00	.00		
ENE	156.51	.91	.048	9.06	.00	.00		
FEB	148.32	-1.64	.073	9.06	.00	.00		
MAR	137.55	1.96	.119	9.06	.00	.00		
ABR	130.33	-3.70	.110	9.06	.00	.00		
MAY	117.46	.30	.065	9.06	.00	.00		
JUN	108.64	5.07	-.039	9.06	.00	.00		
JUL	104.69	22.09	-.065	9.06	.00	.00		
AGO	117.79	34.43	-.053	9.06	.00	.00		
SEP	143.22	25.11	-.045	9.06	.00	.00		
OCT	159.31	12.21	.032	9.06	.00	.00		
EXT CURVA Z:	524.4	VOLAPCOLIXT:	-51.5	VOLAPCOLCHIL:	51.6	EXTCURVAZREDUCIDA:	524.2	EXT
PRESA: 108.7								

MES	ALM. INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	DERRAME	DEFICIT
	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2016-2017 *****						
NOV	162.43	8.94	.053	8.35	.00	.00
DIC	162.97	1.42	.048	8.35	.00	.00
ENE	155.99	-.61	.048	8.35	.00	.00
FEB	146.99	-2.53	.073	8.35	.00	.00
MAR	136.04	-1.29	.118	8.35	.00	.00
ABR	126.29	-1.87	.108	8.35	.00	.00
MAY	115.96	.89	.064	8.35	.00	.00
JUN	108.44	.20	-.039	8.35	.00	.00
JUL	100.33	14.12	-.064	8.35	.00	.00
AGO	106.17	31.81	-.051	8.35	.00	.00
SEP	129.69	35.49	-.043	8.35	.00	.00
OCT	156.87	12.16	.032	8.35	.00	.00

EXT CURVA Z: 520.3 VOLAPCOLIXT: -3.6 VOLAPCOLCHIL: 40.9 EXTCURVAZREDUCIDA: 482.9 EXT
PRESA: 100.2

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2017-2018 *****						
NOV	160.65	.60	.053	8.46	.00	.00
DIC	152.74	-1.11	.046	8.46	.00	.00
ENE	143.13	-1.01	.046	8.46	.00	.00
FEB	133.61	-.34	.070	8.46	.00	.00
MAR	124.74	-2.77	.114	8.46	.00	.00
ABR	113.39	-1.92	.104	8.46	.00	.00
MAY	102.90	1.66	.061	8.46	.00	.00
JUN	96.04	10.72	-.037	8.46	.00	.00
JUL	98.33	10.33	-.063	8.46	.00	.00
AGO	100.26	29.63	-.050	8.46	.00	.00
SEP	121.47	52.58	-.042	8.46	.00	.00
OCT	165.63	28.58	.033	8.46	.00	.00

EXT CURVA Z: 516.4 VOLAPCOLIXT: -12.8 VOLAPCOLCHIL: 39.5 EXTCURVAZREDUCIDA: 489.7 EXT
PRESA: 101.6

***** RESUMEN ANUAL *****

AÑO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	60.48	90.7	146.88	2604.11
2000-2001	.00	.00	74.97	81.8	122.34	2603.17
2001-2002	.00	.00	78.23	92.1	104.57	2602.41
2002-2003	2.15	.00	143.63	89.3	122.66	2603.18
2003-2004	64.43	.00	170.99	106.2	157.14	2604.50
2004-2005	.00	.00	55.20	117.9	139.15	2603.82
2005-2006	.00	.00	100.42	92.1	88.47	2601.70
2006-2007	.00	.00	115.18	87.0	120.12	2603.07
2007-2008	.00	.00	20.64	98.1	101.65	2602.29
2008-2009	.00	5.69	67.97	93.4	47.74	2599.41
2009-2010	.00	.00	124.04	80.8	76.05	2601.07
2010-2011	.00	.00	41.45	90.6	61.59	2600.34
2011-2012	.00	39.04	42.73	92.3	36.34	2598.64
2012-2013	.00	51.66	98.63	90.0	43.55	2599.13
2013-2014	.00	.00	133.02	81.0	101.13	2602.27
2014-2015	.00	.00	123.82	109.3	130.73	2603.49
2015-2016	.00	.00	101.76	108.7	137.61	2603.76
2016-2017	.00	.00	98.72	100.2	133.87	2603.61
2017-2018	.00	.00	126.95	101.6	128.16	2603.40
TOTAL			66.58	96.38		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 30.00 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

	P R O M E D I O S	
	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	2433.78	106.95
FEB	2414.18	101.28
MAR	2414.05	92.44
ABR	2413.82	83.23
MAY	2413.58	76.69
JUN	2413.39	76.17
JUL	2393.93	83.96
AGO	2433.16	98.38
SEP	2433.49	119.85
OCT	2453.39	125.10
NOV	2473.11	121.41
DIC	2453.40	114.39

NOV	128.16	2.51	.020	21.96	-7.20	18.36	.00	.00	
DIC	108.69	1.28	.023	24.56	-2.36	23.38	.00	.00	
ENE	85.39	.77	.023	-2.36	-4.76	-4.74	.00	.00	
FEB	88.49	1.63	.022	2.36	-7.75	-1.52	.00	.00	
MAR	87.74	1.36	.043	5.52	-4.43	3.31	.00	.00	
ABR	83.54	-.84	.055	9.34	-2.43	8.13	.00	.00	
MAY	73.31	3.24	.040	10.54	1.36	11.22	.00	.00	
JUN	65.97	7.81	-.001	11.62	1.92	12.58	.00	.00	
JUL	62.16	19.51	-.020	12.20	3.30	13.85	.00	.00	
AGO	69.49	22.31	-.029	13.10	8.31	17.26	.00	.00	
SEP	78.73	60.69	-.013	7.55	26.93	21.01	.00	.00	
OCT	131.88	27.92	.012	12.81	11.10	18.36	.00	.00	
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					479.73				
MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	INGRE	COL	POLMMCOL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2009-2010 *****					*****				
NOV	146.98	7.82	.021	18.16	-.89	17.72	.00	.00	
DIC	136.61	5.26	.025	21.10	-4.64	18.78	.00	.00	
ENE	120.74	13.15	.026	9.21	3.27	10.84	.00	.00	
FEB	124.66	59.74	.025	5.38	15.61	13.18	.00	.00	
MAR	179.00	9.79	.058	21.37	.21	21.47	.00	.00	
ABR	167.36	1.31	.074	31.50	-2.08	30.46	.00	.00	
MAY	137.10	.16	.051	17.83	-.22	17.72	.00	.00	
JUN	119.37	16.44	-.002	15.37	4.69	17.72	.00	.00	
JUL	120.45	46.69	-.025	4.47	22.99	15.96	.00	.00	
AGO	162.69	68.20	-.041	31.50	18.21	40.60	.00	.00	
SEP	199.43	32.09	-.018	31.50	1.38	32.19	.00	.00	
OCT	200.03	5.80	.014	12.11	11.20	17.72	.00	.00	
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					444.73				
MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	INGRE	COL	POLMMCOL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2010-2011 *****					*****				
NOV	193.71	2.71	.024	31.50	5.69	34.35	.00	.00	
DIC	164.89	-3.03	.027	23.47	.99	23.96	.00	.00	
ENE	138.37	-2.10	.028	21.51	-2.64	20.19	.00	.00	
FEB	114.74	-4.12	.024	3.44	-1.49	2.69	.00	.00	
MAR	107.16	-1.69	.047	6.68	-.27	6.54	.00	.00	
ABR	98.74	-1.48	.059	16.36	2.63	17.68	.00	.00	
MAY	80.84	-1.01	.042	16.03	.42	16.24	.00	.00	
JUN	63.76	7.68	-.001	10.96	5.02	13.47	.00	.00	
JUL	60.48	41.65	-.020	7.39	15.14	14.96	.00	.00	
AGO	94.75	44.72	-.033	14.86	14.93	22.33	.00	.00	
SEP	124.64	35.44	-.015	18.42	17.20	27.02	.00	.00	
OCT	141.67	19.58	.012	5.17	10.74	10.53	.00	.00	
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					528.34				
MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	INGRE	COL	POLMMCOL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2011-2012 *****					*****				
NOV	156.08	-.01	.022	18.30	1.37	18.98	.00	.00	
DIC	137.74	-3.03	.025	26.42	-.38	26.23	.00	.00	
ENE	108.27	.32	.025	6.23	.37	6.41	.00	.00	
FEB	102.34	8.82	.023	2.29	5.37	4.98	.00	.00	
MAR	108.85	-.67	.047	13.18	-.61	12.88	.00	.00	
ABR	94.95	-2.01	.058	14.73	-3.53	12.96	.00	.00	
MAY	78.15	-2.36	.041	15.70	-3.61	13.90	.00	.00	
JUN	60.05	12.52	-.001	8.38	4.62	10.69	.00	.00	
JUL	64.18	41.23	-.020	12.70	5.25	15.33	.00	.00	
AGO	92.73	51.26	-.033	18.52	8.76	22.89	.00	.00	
SEP	125.50	41.43	-.015	28.49	9.80	33.39	.00	.00	
OCT	138.46	12.60	.012	16.51	4.94	18.98	.00	.00	
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					497.71				
MES	ALM.INICIAL	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	INGRE	COL	POLMMCOL	DERRAME	DEFICIT
MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3
***** 2012-2013 *****					*****				
NOV	134.53	8.17	.021	19.64	-3.38	17.95	.00	.00	
DIC	123.04	-2.51	.024	27.10	-8.75	22.73	.00	.00	
ENE	93.41	-.28	.024	.97	-6.84	-2.45	.00	.00	
FEB	92.14	-1.25	.022	2.36	-5.48	-.38	.00	.00	
MAR	88.51	1.79	.043	4.48	-2.52	3.22	.00	.00	
ABR	85.77	-1.61	.056	8.17	-.85	7.74	.00	.00	
MAY	75.93	.85	.041	12.66	-1.47	11.92	.00	.00	
JUN	64.08	14.13	-.001	15.29	5.31	17.95	.00	.00	
JUL	62.92	44.79	-.020	8.78	9.96	13.76	.00	.00	
AGO	98.94	55.38	-.033	27.51	.60	27.81	.00	.00	
SEP	126.85	69.92	-.015	22.13	22.76	33.51	.00	.00	
OCT	174.65	48.14	.014	23.83	6.82	27.23	.00	.00	
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					475.97				

OCT 153.96 36.23 .013 11.47 7.51 15.22 .00 .00
 SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS 510.69

***** RESUMEN ANUAL *****

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	149.84	187.9	127.18	1733.75
2000-2001	.00	.00	189.89	178.6	117.04	1732.67
2001-2002	.00	.00	105.59	171.4	99.04	1730.32
2002-2003	.00	.00	188.47	127.3	106.15	1731.25
2003-2004	.00	.00	151.37	167.5	108.82	1731.60
2004-2005	.00	.00	157.65	199.3	99.82	1730.42
2005-2006	.00	.00	181.40	121.2	98.40	1730.24
2006-2007	.00	.00	177.43	188.8	117.76	1732.75
2007-2008	.00	.00	160.28	192.4	99.27	1730.35
2008-2009	.00	.00	148.20	129.2	90.20	1729.17
2009-2010	.00	.00	266.44	219.5	155.10	1736.72
2010-2011	.00	.00	138.35	175.8	112.18	1732.04
2011-2012	.00	.00	160.10	181.5	103.81	1730.94
2012-2013	.00	.00	237.53	172.9	107.10	1731.37
2013-2014	.00	.00	204.93	231.0	145.13	1735.66
2014-2015	.00	.00	192.04	238.5	116.29	1732.57
2015-2016	.00	.00	209.16	171.0	113.10	1732.16
2016-2017	.00	.00	180.79	187.6	107.14	1731.38
2017-2018	.00	.00	225.30	203.3	110.76	1731.85
TOTAL			.00	.00		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÓNIMO REGISTRADO: 60.00 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

	P R O M E D I O S	
	ELEVACIÒN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	1646.52	112.80
FEB	1645.78	107.87
MAR	1644.78	96.80
ABR	1642.88	79.02
MAY	1640.89	68.01
JUN	1640.46	73.01
JUL	1641.93	89.69
AGO	1644.45	112.11
SEP	1647.05	132.75
OCT	1649.12	148.68
NOV	1649.50	138.72
DIC	1647.94	121.10

AYO	DERRAME MILL M ³	DEFICIT MILL M ³	ING HIST MILL M ³	EXT TOTAL MILL M ³	ALMAC PRO MILL M ³	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	5.39	.00	147.68	174.5	373.80	1828.82
2000-2001	.00	.00	178.06	161.1	361.01	1828.09
2001-2002	.00	.00	154.15	182.2	348.59	1827.39
2002-2003	.00	.00	207.02	171.4	336.66	1826.71
2003-2004	.00	.00	206.58	210.8	367.89	1828.49
2004-2005	.00	.00	148.89	188.7	338.96	1826.84
2005-2006	.00	.00	190.04	236.9	248.71	1821.29
2006-2007	.00	.00	159.01	90.6	315.58	1825.45
2007-2008	.00	.00	147.40	193.9	303.30	1824.69
2008-2009	.00	.00	139.30	242.2	214.66	1819.11
2009-2010	.00	.00	190.91	40.2	240.18	1820.74
2010-2011	.00	.00	140.22	158.7	350.88	1827.52
2011-2012	.00	.00	130.41	210.6	262.11	1822.14
2012-2013	.00	.00	165.69	202.0	180.84	1816.93
2013-2014	.00	.00	187.50	44.3	294.59	1824.15
2014-2015	.00	.00	195.29	190.8	372.34	1828.74
2015-2016	.00	.00	190.95	211.5	352.22	1827.59
2016-2017	.00	.00	181.81	189.2	329.30	1826.29
2017-2018	.00	.00	186.19	172.8	303.37	1824.70
TOTAL			5.39	.00		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÓNIMO REGISTRADO: 118.14 MILL M³

***** RESUMEN MENSUAL *****

P R O M E D I O S
ELEVACIÓN ALMACENAMIENTO
MSNM MILL M³

ENE	1735.28	314.19
FEB	1734.52	300.28
MAR	1733.71	287.44
ABR	1732.88	272.99
MAY	1732.13	263.25
JUN	1731.78	261.68
JUL	1732.03	271.06
AGO	1732.72	283.92
SEP	1733.94	311.19
OCT	1734.97	318.05
NOV	1735.52	327.58
DIC	1735.68	325.34

NOV	132.74	8.37	.048	11.37	4.26	15.64	.00	.00
DIC	129.69	8.20	.043	.00	.17	.17	.00	.00
ENE	137.84	1.20	.046	9.15	4.67	13.82	.00	.00
FEB	129.85	-.33	.069	10.41	3.41	13.82	.00	.00
MAR	119.04	-2.05	.112	11.06	2.77	13.82	.00	.00
ABR	105.82	-3.53	.101	10.91	2.91	13.82	.00	.00
MAY	91.27	4.13	.058	9.07	4.75	13.82	.00	.00
JUN	86.28	13.91	-.035	8.59	5.23	13.82	.00	.00
JUL	91.64	18.93	-.061	6.91	6.91	13.82	.00	.00
AGO	103.72	25.18	-.051	2.61	7.63	10.24	.00	.00
SEP	126.34	34.06	-.043	.00	5.57	5.57	.00	.00
OCT	160.44	24.95	.032	19.77	3.95	23.72	.00	.00
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					498.49			

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	INGRE CHIL MILL M^3	POL+CHIL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2014-2015 *****								
NOV	165.60	5.81	.054	18.82	4.06	22.88	.00	.00
DIC	152.54	1.60	.046	6.92	4.47	11.39	.00	.00
ENE	147.17	.19	.047	10.48	4.43	14.91	.00	.00
FEB	136.83	-1.32	.071	11.70	5.69	17.39	.00	.00
MAR	123.74	.70	.114	10.36	6.73	17.09	.00	.00
ABR	113.96	-3.36	.104	11.16	3.75	14.91	.00	.00
MAY	99.34	7.33	.060	10.46	4.45	14.91	.00	.00
JUN	96.15	7.43	-.037	6.11	2.75	8.85	.00	.00
JUL	97.51	23.56	-.063	5.79	3.61	9.40	.00	.00
AGO	115.34	26.32	-.053	.00	7.04	7.04	.00	.00
SEP	141.71	47.08	-.045	9.47	5.44	14.91	.00	.00
OCT	179.36	8.49	.035	21.00	1.49	22.49	.00	.00
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					551.89			

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	INGRE CHIL MILL M^3	POL+CHIL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2015-2016 *****								
NOV	166.82	4.43	.054	17.41	5.40	22.80	.00	.00
DIC	153.79	.58	.046	11.57	5.91	17.48	.00	.00
ENE	142.76	.91	.046	18.39	5.62	24.01	.00	.00
FEB	125.23	-1.64	.068	18.51	3.69	22.20	.00	.00
MAR	105.01	1.96	.106	14.99	4.84	19.83	.00	.00
ABR	91.87	-3.70	.095	10.81	3.80	14.61	.00	.00
MAY	77.26	.30	.053	13.30	4.42	17.72	.00	.00
JUN	64.20	5.07	-.030	13.50	5.54	19.04	.00	.00
JUL	55.81	22.09	-.047	10.17	4.44	14.61	.00	.00
AGO	67.78	34.43	-.041	.00	3.14	3.15	.00	.00
SEP	102.25	25.11	-.039	.00	.77	.77	.00	.00
OCT	127.40	12.21	.029	14.23	4.10	18.32	.00	.00
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					525.57			

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	INGRE CHIL MILL M^3	POL+CHIL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2016-2017 *****								
NOV	125.34	8.94	.047	7.10	4.22	11.32	.00	.00
DIC	127.14	1.42	.043	10.59	3.84	14.43	.00	.00
ENE	117.92	-.61	.043	9.36	5.07	14.43	.00	.00
FEB	107.91	-2.53	.064	19.64	3.48	23.12	.00	.00
MAR	85.68	-1.29	.096	18.16	2.00	20.16	.00	.00
ABR	66.13	-1.87	.079	4.01	.16	4.17	.00	.00
MAY	60.17	.89	.047	10.11	1.49	11.60	.00	.00
JUN	50.90	.20	-.026	8.06	2.40	10.45	.00	.00
JUL	43.06	14.12	-.041	4.83	4.52	9.35	.00	.00
AGO	52.39	31.81	-.035	.00	5.94	5.94	.00	.00
SEP	84.24	35.49	-.036	9.85	4.58	14.43	.00	.00
OCT	109.91	12.16	.027	.00	3.25	3.25	.00	.00
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					515.84			

MES	ALM.INICIAL MILL M^3	INGRESO MILL M^3	VOL EVAP MILL M^3	EXT POL MILL M^3	INGRE CHIL MILL M^3	POL+CHIL MILL M^3	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3
***** 2017-2018 *****								
NOV	122.04	.60	.047	9.66	4.64	14.30	.00	.00
DIC	112.94	-1.11	.041	9.08	5.22	14.30	.00	.00
ENE	102.71	-1.01	.040	15.63	5.31	20.93	.00	.00
FEB	86.03	-.34	.058	9.27	4.31	13.59	.00	.00
MAR	76.37	-2.77	.090	9.45	2.12	11.57	.00	.00
ABR	64.06	-1.92	.078	1.30	1.96	3.25	.00	.00
MAY	60.76	1.66	.047	9.52	2.17	11.69	.00	.00
JUN	52.85	10.72	-.027	8.87	2.19	11.06	.00	.00
JUL	54.73	10.33	-.046	10.79	2.19	12.99	.00	.00
AGO	54.31	29.63	-.036	4.28	.30	4.58	.00	.00
SEP	79.69	52.58	-.035	2.00	4.36	6.35	.00	.00
OCT	130.30	28.58	.029	18.05	4.77	22.82	.00	.00
SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS					510.69			

***** RESUMEN ANUAL *****

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	60.48	112.3	129.50	2603.45
2000-2001	.00	.00	74.97	90.0	85.90	2601.57
2001-2002	.00	.00	78.23	72.4	81.88	2601.37
2002-2003	.00	.00	143.63	122.8	88.66	2601.71
2003-2004	.00	.00	170.99	133.1	118.49	2603.00
2004-2005	.00	.00	55.20	177.4	89.39	2601.74
2005-2006	.00	.00	100.42	44.3	57.07	2600.04
2006-2007	.00	.00	115.18	114.9	92.10	2601.88
2007-2008	.00	.00	20.64	67.7	71.75	2600.86
2008-2009	.00	.00	67.97	48.2	60.51	2600.28
2009-2010	.00	.00	124.04	72.6	106.24	2602.48
2010-2011	.00	.00	41.45	105.6	73.86	2600.96
2011-2012	.00	.00	42.73	44.1	58.70	2600.16
2012-2013	.00	.00	98.63	38.2	67.50	2600.64
2013-2014	.00	.00	133.02	99.8	120.63	2603.10
2014-2015	.00	.00	123.82	122.3	130.87	2603.50
2015-2016	.00	.00	101.76	142.9	103.23	2602.36
2016-2017	.00	.00	98.72	101.7	85.62	2601.56
2017-2018	.00	.00	126.95	107.9	84.63	2601.50
TOTAL			.00	.00		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÓNIMO REGISTRADO: 37.16 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

P R O M E D I O S

	ELEVACIÒN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	2472.18	94.84
FEB	2471.80	85.60
MAR	2471.32	74.36
ABR	2470.87	67.19
MAY	2470.44	57.87
JUN	2470.10	55.82
JUL	2470.28	64.75
AGO	2471.04	84.83
SEP	2472.14	111.39
OCT	2472.78	114.30
NOV	2472.76	109.54
DIC	2472.49	103.42

JUL	88.51			30.07	-.022	9.71	10.12	14.77	.00	.00
AGO	108.89			55.36	-.035	15.26	4.78	17.65	.00	.00
SEP	149.03	S	118.24	57.51	-.016	31.49	9.14	36.06	.00	.00
OCT	175.07	S	140.68	36.23	.014	22.79	7.51	26.54	.00	.00
				SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS		509.83				

***** RESUMEN ANUAL *****

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	149.84	177.8	149.42	1736.12
2000-2001	.00	.00	189.89	161.5	138.94	1735.00
2001-2002	.00	.00	105.59	163.8	136.70	1734.77
2002-2003	.00	.00	188.47	156.9	127.35	1733.77
2003-2004	.00	.00	151.37	168.7	128.47	1733.89
2004-2005	.00	.00	157.65	182.0	112.76	1732.11
2005-2006	.00	.00	181.40	135.7	106.34	1731.28
2006-2007	.00	.00	177.43	195.3	137.40	1734.84
2007-2008	.00	.00	160.28	172.2	108.92	1731.61
2008-2009	.00	.00	148.20	138.1	98.48	1730.25
2009-2010	.00	.00	266.44	246.3	161.20	1737.37
2010-2011	.00	.00	138.35	163.5	116.04	1732.54
2011-2012	.00	.00	160.10	168.1	107.10	1731.37
2012-2013	.00	.00	237.53	186.1	112.00	1732.01
2013-2014	.00	.00	204.93	247.3	157.71	1737.00
2014-2015	.00	.00	192.04	218.6	127.97	1733.84
2015-2016	.00	.00	209.16	183.5	114.38	1732.32
2016-2017	.00	.00	180.79	171.8	113.80	1732.25
2017-2018	.00	.00	225.30	197.7	120.04	1732.99
TOTAL	.00	.00	.00		3434.9	

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 63.55 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

P R O M E D I O S		
	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	1734.92	132.51
FEB	1733.63	122.71
MAR	1732.19	108.30
ABR	1730.55	96.05
MAY	1729.08	85.58
JUN	1728.59	89.04
JUL	1730.05	107.90
AGO	1732.79	133.31
SEP	1735.48	155.06
OCT	1737.07	162.53
NOV	1737.46	162.02
DIC	1736.51	145.01

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	147.68	161.8	360.09	1828.04
2000-2001	12.80	.00	178.06	150.3	359.34	1828.00
2001-2002	.00	.00	154.15	179.3	351.29	1827.54
2002-2003	30.86	.00	207.02	150.2	345.36	1827.20
2003-2004	2.28	.00	206.58	203.9	357.54	1827.90
2004-2005	.00	.00	148.89	215.1	326.56	1826.13
2005-2006	.00	.00	190.04	237.0	245.80	1821.10
2006-2007	.00	.00	159.01	92.3	282.49	1823.40
2007-2008	.00	.00	147.40	207.3	285.03	1823.56
2008-2009	.00	.00	139.30	243.2	197.24	1817.99
2009-2010	.00	.00	190.91	37.6	203.94	1818.42
2010-2011	.00	.00	140.22	159.9	301.26	1824.57
2011-2012	.00	.00	130.41	238.3	224.43	1819.73
2012-2013	.00	.00	165.69	186.0	141.54	1814.32
2013-2014	.00	.00	187.50	46.4	220.02	1819.45
2014-2015	.00	.00	195.29	165.1	321.34	1825.81
2015-2016	.00	.00	190.95	195.6	329.24	1826.28
2016-2017	.00	.00	181.81	195.9	309.80	1825.10
2017-2018	.00	.00	186.19	181.4	288.73	1823.79
TOTAL		45.94	.00		3246.8	

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 89.40 MILL M^3

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX RESUMEN MENSUAL XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
P R O M E D I O S

	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	1825.11	306.28
FEB	1824.43	294.47
MAR	1823.67	281.60
ABR	1822.69	263.17
MAY	1821.68	249.87
JUN	1821.20	248.14
JUL	1821.47	258.21
AGO	1822.29	274.44
SEP	1823.74	304.95
OCT	1825.19	321.82
NOV	1825.81	322.49
DIC	1825.60	317.32

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	60.48		97.7	136.59	2603.72
2000-2001	.00	.00	74.97		86.1	103.25	2602.36
2001-2002	.00	.00	78.23		91.4	96.61	2602.07
2002-2003	.00	.00	143.63		111.8	103.68	2602.38
2003-2004	.00	.00	170.99		139.6	127.38	2603.37
2004-2005	.00	.00	55.20		172.3	105.72	2602.46
2005-2006	.00	.00	100.42		50.9	57.67	2600.09
2006-2007	.00	.00	115.18		102.7	101.83	2602.30
2007-2008	.00	.00	20.64		72.7	81.58	2601.35
2008-2009	.00	.00	67.97		52.7	62.78	2600.40
2009-2010	.00	.00	124.04		84.2	110.54	2602.67
2010-2011	.00	.00	41.45		102.7	77.36	2601.14
2011-2012	.00	.00	42.73		33.7	54.28	2599.86
2012-2013	.00	.00	98.63		52.2	61.83	2600.36
2013-2014	.00	.00	133.02		84.7	122.80	2603.19
2014-2015	.00	.00	123.82		132.2	129.54	2603.45
2015-2016	.00	.00	101.76		135.7	112.96	2602.77
2016-2017	.00	.00	98.72		107.0	94.10	2601.97
2017-2018	.00	.00	126.95		104.0	88.31	2601.69
TOTAL		.00	.00			1814.4	

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 30.02 MILL M^3

RESUMEN MENSUAL

P R O M E D I O S

	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	2602.50	105.56
FEB	2602.17	97.68
MAR	2601.78	88.04
ABR	2601.29	76.86
MAY	2600.83	69.08
JUN	2600.61	68.67
JUL	2600.79	76.25
AGO	2601.43	94.56
SEP	2602.45	121.42
OCT	2603.11	125.04
NOV	2603.09	119.11
DIC	2602.78	112.75

OCT 174.43 S 146.99 36.23 .014 25.92 7.51 29.67 .00 .00
 SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS 502.59

***** RESUMEN ANUAL *****

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	EXT MILL M^3	TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	149.84		185.0	139.15	1735.03
2000-2001	.00	.00	189.89		154.3	138.89	1735.00
2001-2002	.00	.00	105.59		165.0	130.77	1734.13
2002-2003	.00	.00	188.47		148.0	135.09	1734.59
2003-2004	.00	.00	151.37		168.6	131.00	1734.16
2004-2005	.00	.00	157.65		188.6	117.71	1732.74
2005-2006	.00	.00	181.40		134.8	109.33	1731.67
2006-2007	.00	.00	177.43		196.1	136.55	1734.75
2007-2008	.00	.00	160.28		167.1	122.85	1733.29
2008-2009	.00	.00	148.20		141.2	105.53	1731.17
2009-2010	.00	.00	266.44		238.7	161.58	1737.41
2010-2011	.00	.00	138.35		162.9	127.18	1733.75
2011-2012	.00	.00	160.10		179.7	119.31	1732.91
2012-2013	.00	.00	237.53		183.4	110.55	1731.83
2013-2014	.00	.00	204.93		249.2	148.12	1735.98
2014-2015	.00	.00	192.04		198.9	136.51	1734.75
2015-2016	.00	.00	209.16		202.4	126.83	1733.71
2016-2017	.00	.00	180.79		170.2	124.46	1733.46
2017-2018	.00	.00	225.30		204.6	132.55	1734.32
TOTAL		.00	.00			3438.6	

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 63.12 MILL M^3

***** RESUMEN MENSUAL *****

	ELEVACIÓN MSNM	ALMACENAMIENTO MILL M^3
ENE	1735.81	139.49
FEB	1734.53	131.06
MAR	1733.18	115.47
ABR	1731.31	99.59
MAY	1729.51	87.31
JUN	1729.07	93.11
JUL	1730.45	108.71
AGO	1732.87	133.20
SEP	1735.44	154.15
OCT	1737.21	166.17
NOV	1737.93	166.99
DIC	1737.29	154.64

AYO	DERRAME		DEFICIT		ING HIST		EXT TOTAL	ALMAC PRO	ELEV PRO
	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	MILL M ³	(MSNM)	
1999-2000	14.35	.00	147.68		132.9		367.03	1828.44	
2000-2001	24.74	.00	178.06		152.9		364.37	1828.29	
2001-2002	.00	.00	154.15		161.1		357.58	1827.90	
2002-2003	36.48	.00	207.02		162.8		355.74	1827.79	
2003-2004	7.17	.00	206.58		199.0		361.62	1828.13	
2004-2005	.00	.00	148.89		215.7		326.87	1826.15	
2005-2006	.00	.00	190.04		201.8		258.84	1821.93	
2006-2007	.00	.00	159.01		106.4		309.52	1825.08	
2007-2008	.00	.00	147.40		192.8		303.03	1824.68	
2008-2009	.00	.00	139.30		212.0		248.10	1821.25	
2009-2010	.00	.00	190.91		44.8		267.99	1822.50	
2010-2011	.00	.00	140.22		161.7		353.78	1827.68	
2011-2012	.00	.00	130.41		212.1		289.59	1823.84	
2012-2013	.00	.00	165.69		174.8		228.31	1819.98	
2013-2014	20.50	.00	187.50		53.2		307.36	1824.94	
2014-2015	.00	.00	195.29		202.3		363.69	1828.25	
2015-2016	.00	.00	190.95		195.1		350.58	1827.50	
2016-2017	.00	.00	181.81		200.3		332.11	1826.45	
2017-2018	.00	.00	186.19		161.1		315.53	1825.45	
TOTAL		103.23	.00				3142.9		

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 183.77 MILL M³

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX RESUMEN MENSUAL XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

P R O M E D I O S
ELEVACIÓN ALMACENAMIENTO
MSNM MILL M³

ENE	1826.89	336.02
FEB	1826.14	320.40
MAR	1825.27	307.36
ABR	1824.48	294.04
MAY	1823.72	282.40
JUN	1823.29	280.18
JUL	1823.56	291.31
AGO	1824.59	313.98
SEP	1826.23	346.39
OCT	1827.52	357.80
NOV	1827.73	352.56
DIC	1827.38	345.95



MES	ALM.	INICIAL	CONDICIÓN	VALOR	INGRESO	VOL EVAP	EXT POL	INGRE CHIL	POL+CHIL	DERRAME	DEFICIT	
MILL M^3	CGA/	CGB	CGA/	CGB	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	MILL M^3	
***** 2014-2015 *****												
NOV	185.73	S	130.04	5.81	0.058	18.87	4.06	22.93	.00	.00		
DIC	172.61	S	151.18	1.60	0.050	21.00	4.47	25.47	.00	.00		
ENE	153.16			.19	0.048	2.74	4.43	7.18	.00	.00		
FEB	150.56			-1.32	0.073	4.30	5.69	9.99	.00	.00		
MAR	144.87			.70	0.121	3.26	6.73	9.99	.00	.00		
ABR	142.18			-3.36	.114	6.24	3.75	9.99	.00	.00		
MAY	132.47			7.33	0.068	5.54	4.45	9.99	.00	.00		
JUN	134.20			7.43	-0.042	7.24	2.75	9.99	.00	.00		
JUL	134.43	S	133.05	23.56	-0.072	8.51	3.61	12.11	.00	.00		
AGO	149.56	S	126.04	26.32	-0.059	14.54	7.04	21.58	.00	.00		
SEP	161.39	S	121.14	47.08	-0.048	4.55	5.44	9.99	18.24	.00		
OCT	185.73	S	101.67	8.49	0.035	21.00	1.49	22.49	.00	.00		
					SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS						519.33	
***** 2015-2016 *****												
NOV	173.18	S	130.04	4.43	0.055	19.57	5.40	24.97	.00	.00		
DIC	157.99	S	151.18	.58	0.047	12.88	5.91	18.78	.00	.00		
ENE	145.65			.91	0.047	4.27	5.62	9.89	.00	.00		
FEB	142.24			-1.64	0.072	8.48	3.69	12.17	.00	.00		
MAR	132.05			1.96	0.117	5.05	4.84	9.89	.00	.00		
ABR	128.84			-3.70	0.109	6.09	3.80	9.89	.00	.00		
MAY	118.94			.30	0.065	7.54	4.42	11.96	.00	.00		
JUN	111.63			5.07	-0.039	8.53	5.54	14.07	.00	.00		
JUL	108.21			22.09	-0.066	5.45	4.44	9.89	.00	.00		
AGO	124.93			34.43	-0.055	5.28	3.14	8.42	.00	.00		
SEP	154.13	S	121.14	25.11	-0.047	21.00	.77	21.77	.00	.00		
OCT	158.29	S	101.67	12.21	0.032	7.99	4.10	12.08	.00	.00		
					SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS						509.75	
***** 2016-2017 *****												
NOV	162.47	S	130.04	8.94	0.053	21.00	4.22	25.22	.00	.00		
DIC	150.36			1.42	0.046	6.01	3.84	9.86	.00	.00		
ENE	145.72			-.61	0.047	4.79	5.07	9.86	.00	.00		
FEB	140.28			-2.53	0.071	9.26	3.48	12.74	.00	.00		
MAR	128.42			-1.29	0.115	7.85	2.00	9.86	.00	.00		
ABR	119.16			-1.87	0.106	12.61	.16	12.76	.00	.00		
MAY	104.58			.89	0.062	11.93	1.49	13.41	.00	.00		
JUN	93.48			.20	-0.037	12.33	2.40	14.73	.00	.00		
JUL	81.38			14.12	-0.057	5.34	4.52	9.86	.00	.00		
AGO	90.22			31.81	-0.048	3.92	5.94	9.86	.00	.00		
SEP	118.16			35.49	-0.042	.00	4.58	4.58	.00	.00		
OCT	153.69	S	101.67	12.16	0.032	6.60	3.25	9.86	.00	.00		
					SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS						509.47	
***** 2017-2018 *****												
NOV	159.22	S	130.04	.60	0.053	19.19	4.64	23.83	.00	.00		
DIC	140.58			-1.11	0.045	4.60	5.22	9.81	.00	.00		
ENE	134.83			-1.01	0.045	4.50	5.31	9.81	.00	.00		
FEB	129.27			-.34	0.069	8.77	4.31	13.09	.00	.00		
MAR	120.09			-2.77	.112	7.69	2.12	9.81	.00	.00		
ABR	109.52			-1.92	0.102	12.78	1.96	14.73	.00	.00		
MAY	94.72			1.66	0.059	11.95	2.17	14.12	.00	.00		
JUN	84.36			10.72	-0.035	9.71	2.19	11.90	.00	.00		
JUL	85.41			10.33	-0.059	7.62	2.19	9.81	.00	.00		
AGO	88.18			29.63	-0.047	2.39	.30	2.69	.00	.00		
SEP	115.46			52.58	-0.041	.00	4.36	4.36	.00	.00		
OCT	168.08	S	101.67	28.58	0.033	21.00	4.77	25.77	.00	.00		
					SUMA PRESAS MAS DERIVADORAS						502.59	

***** RESUMEN ANUAL *****

AYO	DERRAME MILL M^3	DEFICIT MILL M^3	ING HIST MILL M^3	HIST MILL M^3	EXT TOTAL MILL M^3	ALMAC PRO MILL M^3	ELEV PRO (MSNM)
1999-2000	.00	.00	60.48		80.8	155.55	2604.44
2000-2001	.00	.00	74.97		67.0	131.10	2603.51
2001-2002	.00	.00	78.23		96.5	145.11	2604.04
2002-2003	10.13	.00	143.63		101.6	131.27	2603.51
2003-2004	36.27	.00	170.99		134.4	161.09	2604.63
2004-2005	.00	.00	55.20		142.2	119.84	2603.06
2005-2006	.00	.00	100.42		68.5	82.14	2601.38
2006-2007	.00	.00	115.18		74.1	132.24	2603.55
2007-2008	.00	.00	20.64		88.1	115.61	2602.88
2008-2009	.00	.00	67.97		65.0	82.05	2601.37
2009-2010	.00	.00	124.04		74.3	133.76	2603.61
2010-2011	.00	.00	41.45		97.6	110.00	2602.64
2011-2012	.00	.00	42.73		42.9	80.49	2601.30
2012-2013	.00	.00	98.63		67.5	76.59	2601.10
2013-2014	3.06	.00	133.02		72.8	137.97	2603.77
2014-2015	18.24	.00	123.82		117.8	152.86	2604.34
2015-2016	.00	.00	101.76		112.1	137.11	2603.74
2016-2017	.00	.00	98.72		101.6	123.72	2603.23
2017-2018	.00	.00	126.95		110.2	120.51	2603.09
TOTAL		67.70	.00			1715.0	

ALMACENAMIENTO INICIAL MÍNIMO REGISTRADO: 40.62 MILL M^3

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX RESUMEN MENSUAL XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

P R O M E D I O S
ELEVACIÓN ALMACENAMIENTO
MSNM MILL M^3

ENE	2603.45	129.07
FEB	2603.28	124.40
MAR	2603.04	117.03
ABR	2602.63	105.26
MAY	2602.22	98.68
JUN	2602.04	97.74
JUL	2602.24	107.97
AGO	2602.79	123.19
SEP	2603.57	145.83
OCT	2604.06	147.77
NOV	2603.97	141.09
DIC	2603.68	132.94