

1
29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



INCREMENTO DEL APROVECHAMIENTO PARA AGUA POTABLE DE LA CUENCA DEL RIO CUTZAMALA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
CARLOS ALEXIS AGUILAR AREVALO

MEXICO, D. F.

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-079/96

Señor
CARLOS ALEXIS AGUILAR AREVALO
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. FERNANDO GONZALEZ VILLARREAL**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

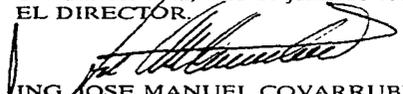
**"INCREMENTO DEL APROVECHAMIENTO PARA AGUA POTABLE DE LA CUENCA
DEL RIO CUTZAMALA"**

- I. **INTRODUCCION**
- II. **LA DEMANDA Y OFERTA DE AGUA DEL AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE MEXICO**
- III. **EL SISTEMA CUTZAMALA**
- IV. **AMPLIACION DEL SISTEMA CUTZAMALA**
- V. **CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 21 de junio de 1996.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*jbr

**A mis papás, con todo mi cariño
y agradecimiento por darme la
oportunidad de llegar a este
gran momento. Es suyo.
Gracias.**

**A mis hermanos, Alejandra
Dora y Alexis.**

A mis abuelitos, tíos y primos.

A los amigos.

INDICE

INTRODUCCION.....	5
1 LA DEMANDA Y OFERTA DE AGUA DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO	8
1.1 GENERALIDADES DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	8
1.1.1 El Valle de México.....	8
1.1.2 Clima, lluvias y ríos.....	8
1.1.3 Geología y agua subterránea.....	9
1.1.4 Balance Hidrológico.....	11
1.1.5 Problemas actuales.....	12
1.2 COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	13
1.2.1 Evolución histórica de la demanda.....	13
1.2.2 Demanda de la zona Toluca - Lerma.....	14
1.2.3 Proyección de la demanda.....	15
1.3 FUENTES DE ABASTECIMIENTO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	16
1.3.1 Evolución histórica del abastecimiento de agua potable.....	18
1.3.2 Abastecimiento de agua a través de fuentes externas.....	23
1.4 LA PLANEACIÓN DE LA SATISFACCIÓN DE LA DEMANDA.....	25
2. EL SISTEMA CUTZAMALA.....	31
2.1 ANTECEDENTES.....	31
2.2 HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CUTZAMALA.....	31
2.2.1 Aspectos generales.....	31
2.2.2 Afluentes de la Cuenca del Río Cutzamala.....	33
2.2.3 Rendimiento de la cuenca del río Cutzamala.....	35
2.2.4 Corrientes aprovechadas por el Sistema Cutzamala.....	35
2.2.5 Volúmenes de escurrimiento al Sistema Cutzamala.....	36
2.2.6 Precipitación y evaporación en los almacenamientos del Sistema Cutzamala.....	37
2.3 CONCEPCIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.....	38
2.3.1 Variables analizadas.....	39
2.3.2 Capacidades de conducción.....	39
2.3.3 Localización de la planta potabilizadora.....	40
2.3.4 Demandas de energía eléctrica.....	40
2.4 OBRAS HIDRÁULICAS QUE INTEGRAN EL SISTEMA CUTZAMALA.....	40
2.4.1 Presas de almacenamiento y derivación.....	41
2.4.2 Acueducto.....	41
2.4.3 Plantas de bombeo.....	43
2.4.4 Torres de sumergencia y oscilación.....	44
2.4.5 Planta potabilizadora.....	45
2.4.6 Vaso regulador Donato Guerra.....	45
2.4.7 Caja de distribución Donato Guerra.....	46
2.4.8 Tanques de almacenamiento.....	46
2.4.9 Estructuras vertedoras.....	46
2.4.10 Suministro de energía eléctrica.....	46
2.5 ETAPAS Y FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.....	47
2.5.1 Etapa I.....	47
2.5.2 Etapa II.....	47
2.5.3 Etapa III.....	47
2.5.4 Etapa IV.....	47

2.5.5 Captación Villa Victoria.....	47
2.5.6 Captación Valle de Bravo.....	48
2.5.7 Captación Chilesdo.....	48
2.5.8 Captación Colorines.....	48
2.5.9 Proceso de potabilización.....	49
2.5.10 Conducción Planta potabilizadora - Zona Metropolitana de la Ciudad de México.....	50
2.6 PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS UTILIZADOS EN EL SISTEMA.....	51
2.6.1 Túneles.....	51
2.6.2 Líneas de conducción.....	52
2.6.3 Plantas de bombeo.....	53
2.6.4 Torres de oscilación y sumergencia.....	53
2.7 CAPACIDAD DEL SISTEMA CUTZAMALA PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.....	53
2.7.1 Simulación hidrológica del Sistema Cutzamala.....	53
2.7.2 Resultados obtenidos.....	57
2.8 OBRAS COMPLEMENTARIAS REQUERIDAS PARA UNA OPERACIÓN CONTINUA Y CONFIABLE.....	59
2.9 DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS QUE INTEGRAN EL SISTEMA HIDROELÉCTRICO MIGUEL ALEMÁN.....	61
3. AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.....	64
3.1 APROVECHAMIENTO DEL RÍO TEMASCALTEPEC.....	64
3.1.1 Antecedentes.....	64
3.1.2 Hidrología de la cuenca del río Temascaltepec.....	65
3.1.3 Planteamiento de alternativas y dimensionamiento de obras.....	68
3.1.3.1 Alternativa 1: Derivación del Río Temascaltepec.....	69
3.1.3.2 Alternativa 2: Derivación del arroyo Quelite en el sitio Quelite.....	78
3.1.3.3 Alternativa 3: Derivación del arroyo Quelite en el sitio San Lucas.....	83
3.1.3.4 Alternativa 4: Derivación del río Temascaltepec en el sitio El Tule.....	85
3.1.3.5 Alternativa 5: Derivación La Comunidad.....	86
3.1.4 Estimación de costos y evaluación económica de las alternativas.....	87
3.1.5 Selección de las alternativas.....	89
3.1.5.1 Sitio de proyecto Temascaltepec.....	89
3.1.5.2 Sitio de proyecto El Quelite.....	90
3.1.5.3 Sitio de proyecto San Lucas.....	90
3.1.5.4 Sitio de proyecto El Tule.....	90
3.1.5.5 Sitio de proyecto La Comunidad.....	90
3.2 OPCIONES DE INCREMENTO DEL APROVECHAMIENTO PARA AGUA POTABLE DEL SISTEMA CUTZAMALA.....	91
3.2.1 Restricciones y cambio en la infraestructura para la ampliación del Sistema.....	91
3.2.2 Planteamiento de alternativas.....	93
3.2.2.1 Modificaciones en la infraestructura actual necesarias para cada alternativa.....	95
3.2.3 Estimación de costos y evaluación económica de las alternativas.....	100
4. CONCLUSIONES.....	114
BIBLIOGRAFIA.....	117
ANEXO DE REGISTROS HIDROLOGICOS	
ANEXO DE TABLAS DE CALCULO.	

INDICE DE TABLAS DE CONTENIDO

TABLA 1 TARIFAS PROGRESIVAS BIMESTRALES PARA TOMAS DOMÉSTICAS EN EL D.F.	27
TABLA 2 COMPARACIÓN DEL COSTO POR CONSUMO DE UNA FAMILIA CON 5 INTEGRANTES.	27
TABLA 3 PRINCIPALES AFLUENTES DEL RÍO CUTZAMALA	33
TABLA 4 RENDIMIENTO POR KM ² Y PORCENTAJE DE APORTACIÓN DE SUBCUENCAS DEL RÍO CUTZAMALA.	35
TABLA 5 CORRIENTES APROVECHADAS Y VASOS DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA CUTZAMALA	36
TABLA 6 PERÍODO DE REGISTROS DE ESCURRIMIENTOS AL SISTEMA	37
TABLA 7 PERÍODO DE REGISTROS DE PRECIPITACIÓN Y EVAPORACIÓN A LOS EMBALSES DEL SISTEMA.	38
TABLA 8 CARACTERÍSTICAS DE LAS PRESAS DE ALMACENAMIENTO Y DERIVACIÓN.	41
TABLA 9 LONGITUDES DE CONDUCCIÓN EN LAS ESTRUCTURAS PRINCIPALES.	42
TABLA 10 CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS DE BOMBEO.	43
TABLA 11 CAPACIDAD ACTUAL DE LAS PLANTAS DE BOMBEO.	44
TABLA 12 CARACTERÍSTICAS DE LAS TORRES DE OSCILACIÓN.	45
TABLA 13 CARACTERÍSTICAS DE LAS TORRES DE SUMERGENCIA.	45
TABLA 14 VOLÚMENES DE ALMACENAMIENTO Y PORCENTAJES DE DEMANDA DE LAS PRESAS PARA LA SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA CUTZAMALA	57
TABLA 15 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA PARA LAS CONDICIONES DEL SISTEMA CUTZAMALA ETAPAS 1, 2 Y 3.	58
TABLA 16 CAPACIDAD INSTALADA ORIGINAL Y ACTUAL DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO MIGUEL ALEMÁN.	62
TABLA 17 INFORMACIÓN DISPONIBLE DE LAS ESTACIONES HIDROMÉTRICAS DE LA CUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	66
TABLA 18 RENDIMIENTOS DE LAS SUBCUENCAS DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	66
TABLA 19 RENDIMIENTOS ASIGNADOS A LAS SUBCUENCAS DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	67
TABLA 20 ALTERNATIVAS DE DERIVACIÓN DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	70
TABLA 21 ALTERNATIVAS DERIVACIÓN RÍO QUELITE SITIO QUELITE.	79
TABLA 22 ALTERNATIVAS DERIVACIÓN RÍO QUELITE EN SITIO SAN LUCAS	83
TABLA 23 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ALTERNATIVAS DE LA CUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	87
TABLA 24 COSTOS NIVELADOS DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC.	89
TABLA 25 EQUIPO DE BOMBEO REQUERIDO EN LAS PLANTAS 2, 3 Y 4 PARA DIFERENTES AMPLIACIONES DEL SISTEMA CUTZAMALA.	92
TABLA 26 SITIOS DE CAPTACIÓN Y OPCIONES DE GASTO.	94
TABLA 27 ALTERNATIVAS PARA EL INCREMENTO DEL APROVECHAMIENTO PARA AGUA POTABLE DEL SISTEMA CUTZAMALA.	94
TABLA 28 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	95
TABLA 29 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	96
TABLA 30 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	97
TABLA 31 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	98
TABLA 32 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	99
TABLA 33 OBRAS Y MODIFICACIONES NECESARIAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA.	100
TABLA 34 AFECTACIÓN ANUAL A LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO.	103
TABLA 35 IMPACTO DE LA AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	104
TABLA 36 CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR ALTERNATIVA.	105
TABLA 37 COSTOS DE REPOSICIÓN DE LA ENERGÍA CONSUMIDA Y NO GENERADA.	106
TABLA 38 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA.	107
TABLA 39 ALTERNATIVAS VIABLES PARA ESTUDIARSE A NIVEL FACTIBILIDAD.	111

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.....	10
FIGURA 2 CRECIMIENTO POBLACIONAL DE LA ZMCM.....	14
FIGURA 3 REQUERIMIENTOS DE AGUA Y FUENTES DE ABASTECIMIENTO (1995 - 2000).....	16
FIGURA 4 FUENTES DE SUMINISTRO DE AGUA EN EL AÑO DE 1995.....	17
FIGURA 5 HUNDIMIENTOS PRESENTADOS EN EL SUELO DE LA CIUDAD DE MÉXICO.....	22
FIGURA 6 FUENTES EXTERNAS POSIBLES PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA A LA ZMCM.....	24
FIGURA 7 CONSUMO DIARIO POR PERSONA EN LITROS.....	25
FIGURA 8 TOTAL DE EGRESOS Y RECAUDACIÓN 1994, CIUDAD DE MÉXICO.....	26
FIGURA 9 CUENCA DEL RÍO CUTZAMALA.....	32
FIGURA 10 HIDROGRAFÍA DE LA CUENCA DEL RÍO CUTZAMALA.....	34
FIGURA 11 PLANTA Y PERFIL DEL SISTEMA CUTZAMALA.....	51
FIGURA 12 BALANCE HIDROLÓGICO DEL SISTEMA CUTZAMALA, ETAPAS 1, 2 Y 3.....	59
FIGURA 13 SISTEMA HIDRELÉCTRICO MIGUEL ALEMÁN.....	63
FIGURA 14 CUENCA DEL RÍO CUTZAMALA Y SUBCUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC.....	64
FIGURA 15 SUBCUENCAS DEL RÍO TEMASCALTEPEC.....	67
FIGURA 16 ALTERNATIVA 1.1.1.....	72
FIGURA 17 ALTERNATIVA 1.1.2.....	73
FIGURA 18 ALTERNATIVA 1.1.3.....	74
FIGURA 19 ALTERNATIVA 1.2.1.....	75
FIGURA 20 ALTERNATIVA 1.2.2.....	76
FIGURA 21 ALTERNATIVA 1.2.3.....	77
FIGURA 22 ALTERNATIVA 2.1.1.....	80
FIGURA 23 ALTERNATIVA 2.1.2.....	81
FIGURA 24 ALTERNATIVA 2.2.2.....	82
FIGURA 25 ALTERNATIVA 3.2.....	84
FIGURA 26 ALTERNATIVA 4.....	85
FIGURA 27 ALTERNATIVA 5.....	86
FIGURA 28 ESQUEMA DE LAS ALTERNATIVAS SELECCIONADAS DEL APROVECHAMIENTO DE LA CUENCA DEL RÍO TEMASCALTEPEC.....	91
FIGURA 29 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GW/h POR M ³ /S EN LA CUENCA DEL RÍO CUTZAMALA.....	102
FIGURA 30 COSTO NIVELADO INCREMENTAL ALTERNATIVA SHMA.....	108
FIGURA 31 COSTO NIVELADO INCREMENTAL ALTERNATIVA LA COMUNIDAD.....	108
FIGURA 32 COSTO NIVELADO INCREMENTAL ALTERNATIVA SAN LUCAS.....	109
FIGURA 33 COSTO NIVELADO INCREMENTAL ALTERNATIVA EL TULE.....	110
FIGURA 34 COSTO NIVELADO Y COSTO NIVELADO INCREMENTAL DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO.....	111
FIGURA 35 ESQUEMA DEL PROYECTO LA COMUNIDAD.....	112
FIGURA 36 ESQUEMA DEL PROYECTO SAN LUCAS.....	113

Introducción

El abastecimiento de agua potable para los 18.5 millones de habitantes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México es un reto permanente que involucra aspectos sociales, ambientales, de ingeniería, de afectaciones, de costo y de financiamiento.

Mientras las grandes civilizaciones del mundo nacieron generalmente en las márgenes de algún río, la de los aztecas se situó entorno a una laguna, y este hecho marcó el inicio de una incesante lucha por y contra el agua, ya que las características físicas de la cuenca del Valle de México y la distribución temporal de sus lluvias no hacen posible su regulación en almacenamientos superficiales, provocando su desaprovechamiento y el desalojo de grandes volúmenes de agua en cortos periodos de tiempo.

Al no poder regular los escurrimientos superficiales, las fuentes de abastecimiento aprovechables fueron el agua proveniente de los manantiales y el agua del subsuelo del Valle, mismas que han sido explotadas hasta el punto de agotarias.

El agotamiento de las fuentes de abastecimiento de agua y la necesidad de dar este servicio a la creciente ciudad, marcó el inicio de la búsqueda de fuentes de abastecimiento de agua fuera de la propia cuenca del Valle de México, comenzando con una serie de evaluaciones de las posibles cuencas que pudieran satisfacer los requerimientos actuales y futuros del líquido.

En esta búsqueda y dentro de la práctica de la ingeniería, se presenta la necesidad de elegir entre diferentes proyectos y diversas alternativas aquellas que, desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social puedan ser consideradas como las mejores soluciones a dichos proyectos.

La evaluación de proyectos permite al ingeniero contar con los elementos necesarios para determinar entre diferentes opciones, aquellas que reúnan las mejores condiciones para poder llevar a cabo un proyecto.

Dentro de la evaluación de proyectos existen tres etapas en las que, paso a paso se jerarquizan los proyectos con el fin de descartar aquellos técnica y/o económicamente no viables de llevarse a cabo, o bien, sean menos viables que otros.

La primera etapa llamada de Prefactibilidad, permite ubicar a los proyectos y sus alternativas en un nivel donde es posible realizar consideraciones e hipótesis necesarias para tener elementos de cálculo y diseño de estructuras.

La razón de estas consideraciones e hipótesis, se debe a que no se cuenta con la información necesaria o ésta es muy vaga, quedando a criterio del ingeniero la interpretación de la información y la valoración de dichas hipótesis en la elaboración de sus diseños.

En esta etapa se realizan los análisis necesarios para lograr adquirir una idea de la magnitud de las obras y sus costos, quedando claro que al no contar con información detallada, dichos valores podrán ser menores o mayores a los reales, cuestión que no debe inferir sobre los resultados finales ya que se debe dar el mismo tratamiento a cada una de las alternativas, esto es, asignar el mismo criterio de evaluación en todos los casos.

Finalmente, mediante una evaluación económica basada en los análisis realizados y los costos de los proyectos obtenidos, es posible obtener índices económicos que permitan jerarquizar las alternativas y encausar la siguiente etapa de evaluación hacia un número menor de alternativas.

La segunda etapa denominada Factibilidad, tiene por objeto analizar más detalladamente las alternativas seleccionadas en la etapa de Prefactibilidad. En esta etapa, se deben realizar estudios con el fin de avalar las hipótesis y consideraciones tomadas con anterioridad, para que en caso de no corresponder, se lleven a cabo las modificaciones necesarias y de ser necesario volver a evaluar.

Una vez contando con los elementos necesarios, el procedimiento de selección de alternativas es similar al de la etapa de Prefactibilidad, pero el resultado obtenido marcará la pauta final de la decisión a tomar, ya que de esta etapa solamente sobresalen los proyectos o alternativas que hayan logrado conjuntar más eficazmente los factores técnicos, ambientales, sociales y económicos en los que valdrá la pena invertir el tiempo y dinero para llevarse a cabo.

La tercera etapa corresponde a la realización de los Proyectos Ejecutivos de los proyectos o alternativas que resultaron viables una vez superadas las etapas de Prefactibilidad y Factibilidad. En esta etapa, se realizan los últimos estudios, los diseños finales y se obtienen los costos y tiempos reales de las obras.

El presente trabajo corresponde a la etapa de Prefactibilidad del Incremento del Aprovechamiento para Agua Potable de la Cuenca del Río Cutzamala, en el que se evaluarán diferentes alternativas propuestas para lograr incrementar el caudal de agua potable a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México para su abastecimiento futuro mediante la incorporación de los escurrimientos de la cuenca del río Temascaltepec, concluyendo con estas obras la cuarta etapa del Sistema Cutzamala.

El objetivo del trabajo no es encontrar fuentes de abastecimiento externas que logren satisfacer la demanda una vez que se haya rebasado la capacidad del Sistema Cutzamala y terminado con toda fuente de abastecimiento dentro de la cuenca del Valle, sino determinar cuáles son las mejores alternativas de solución para incrementar el gasto del Sistema Cutzamala y concluir la cuarta etapa del mismo ya que desde su concepción se planteó la posibilidad de abastecer a la ZMCM con 24 m³/s.

El Capítulo 1 hace referencia a la composición de la demanda de agua potable en la ciudad de México y su área conurbada, así como a su evolución a través de los años. De la misma manera se hace mención a las fuentes de abastecimiento con las cuales se ha tratado de satisfacer dichas demandas. En este apartado, se hacen algunas observaciones acerca de la necesidad de preservar los acuíferos y reducir el deterioro

ecológico que genera la sobreexplotación de los mismos, así como a medidas que conduzcan a una reducción efectiva de los caudales extraídos del subsuelo, la administración y comercialización del agua potable y en general un "Uso Racional y Eficiente del Agua".

El Capítulo 2 describe el entorno del Sistema Cutzamala, iniciando con una descripción de la hidrología de la cuenca del río Cutzamala. Más adelante se mencionan las obras que conforman al Sistema, así como el funcionamiento de las tres primeras etapas del mismo, además de una breve descripción del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, el cual es una parte medular del Sistema Cutzamala.

En este capítulo se lleva a cabo la simulación hidrológica del Sistema con el fin de conocer su capacidad real para abastecimiento de agua potable. Finalmente se hace un análisis de los problemas que sufre actualmente el Sistema y se proponen las obras complementarias requeridas para su operación continua y confiable.

El Capítulo 3 presenta las alternativas de las obras para el incremento del gasto en el Sistema mediante la incorporación de los escurrimientos en la cuenca del río Temascaltepec. Se describe la hidrología de la cuenca del río Temascaltepec, las alternativas de solución y las obras necesarias para su aprovechamiento, así como una estimación de costos y evaluación de las alternativas, para terminar con la selección y recomendación de las mejores.

El Capítulo 4 contiene las conclusiones a las que se llegó en el trabajo, así como las recomendaciones para que uno de los sistemas de abastecimiento de agua más importantes del mundo tenga un funcionamiento adecuado y a la par de las demandas que impone una ciudad tan grande y compleja como lo es la Ciudad de México.

Capítulo 1

1 LA DEMANDA Y OFERTA DE AGUA DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO

1.1 Generalidades de la cuenca del Valle de México.

1.1.1 El Valle de México.

El Valle de México, asiento de la ZMCM se encuentra completamente rodeado por montañas, las altitudes de su planicie central oscilan entre los 2240 y 2390 metros sobre el nivel del mar y constituye una cuenca cerrada con un área de 10,000 Km², sin salidas naturales para los escurrimientos que se generan dentro de la misma.

1.1.2 Clima, lluvias y ríos.

El clima del Valle de México se clasifica como subtropical de altura, templado, semiseco y sin estación invernal bien definida. La temperatura media anual es de unos 15°C. En general las lluvias ocurren de mayo a octubre, y la época de secas abarca todo el resto del año. La precipitación media anual equivale a una lámina de 700 milímetros.

La distribución temporal de la lluvias en el Valle de México es muy desfavorable desde el punto de vista de su aprovechamiento y regulación ya que casi la totalidad de la precipitación anual se concentra en un número muy reducido de tormentas. Así, durante una sola tormenta es posible que se precipite entre el 7% y el 10% de la lluvia media anual; de este volumen, mas del 50% se precipita en tan solo 30 minutos², lo que provoca avenidas que deben integrarse al drenaje para evitar inundaciones ya que no cuenta con sitios suficientes para regularizar el agua de lluvia, por estar asentada la población en la parte mas baja del Valle y por la necesidad de desalojarla rápidamente con el fin de evitar problemas viales.

Desde el punto de vista hidrográfico, el Valle de México puede dividirse en once zonas:

La zona I comprende las cuencas de los ríos que descienden de la sierra del Chichinautzin, la cual presenta formaciones basálticas de gran permeabilidad. Las corrientes de esta zona las forman los ríos San Gregorio, San Lucas, Santiago y San Buenaventura.

² "El Sistema Hidráulico del Distrito Federal, Un Servicio Público en Transición" DGCOH, México D.F., 1982.

Las zonas II y III incluyen el área urbanizada de la ciudad de México y los ríos que bajan hacia ella desde el poniente del Valle. Estas corrientes son intermitentes, salvo los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya, Hondo y Tlanepantla, los cuales tienen escurrimientos perennes.

La zona IV abarca las cuencas desde los ríos Tepoztlán y Cuautitlán, que se originan en el noroeste del Valle. Las zonas V y VI corresponden básicamente a las cuencas de los ríos de las Avenidas de Pachuca y San Juan Teotihuacán, respectivamente.

En la zona VII se incluyen los ríos que desembocan en el lago de Texcoco por el oriente. La zona VIII, localizada también en el oriente, comprende los ríos que se sitúan entre el San Francisco y el Milpa Alta. Finalmente, las zonas IX, X y XI se extienden desde la cuenca del río Tizar hasta las corrientes alimentadoras del río Tecocomulco; en un principio estas zonas no formaban parte de la cuenca, pero se incorporaron a ella en forma artificial.

En la figura 1 se muestra la hidrografía de la cuenca del Valle de México.

1.1.3 Geología y agua subterránea.

Las características espaciales y temporales del agua superficial han impedido que este recurso se aproveche en mayor medida para satisfacer las necesidades de las poblaciones ubicadas dentro del Valle de México, en especial la del Distrito Federal. Por ello, los manantiales y los acuíferos, íntimamente ligados entre sí, han jugado un papel fundamental en la tarea de saciar la sed de la ciudad.

El abastecimiento de agua se resolvió en un principio mediante el empleo de los manantiales del Valle, pero estos fueron desapareciendo al abatirse el nivel piezométrico por causa del bombeo al que fueron sujetos los acuíferos para tratar de aumentar el caudal. La extracción de agua del subsuelo se inició a mediados del siglo pasado², lo que ocasionó el hundimiento del terreno. Este problema se relaciona con la hidrología de los acuíferos, con los fenómenos geológicos de estratigrafía tectónica y sedimentología que determinaron las fronteras de dichos acuíferos, y con las características físicas de los materiales que los conforman.

Desde el punto de vista geohidrológico, la cuenca del Valle de México es una gran olla cuyas paredes y fondo impermeables están constituidos por rocas volcánicas (andecitas y dacitas) del Terciario Medio y del Terciario Superior. Dicha olla está rellena de sedimentos fluviales, lacustres y volcánicos que se produjeron en el Cuaternario Reciente al cerrarse la cuenca por el sur, y contiene rocas y clásticos de erupciones basálticas de todo el periodo cuaternario. Estas últimas son formaciones permeables y de alta porosidad, incluyendo a la sierra del Chichinautzin, por lo que geohidrológicamente es probable que la cuenca no sea cerrada hacia el sur y que el Valle de México esté conectado con el de Cuernavaca. Sobre las andecitas localizadas al este, oeste y norte de la ciudad de México, descansa la formación Tarango, constituida en el Plioceno por clásticos sedimentados, depósitos de pie de monte, piroclásticos conglomerados fluviales y horizontes de piedra pómez; su constitución es muy variada y tiene alguna cementación, por lo que no es muy permeable².

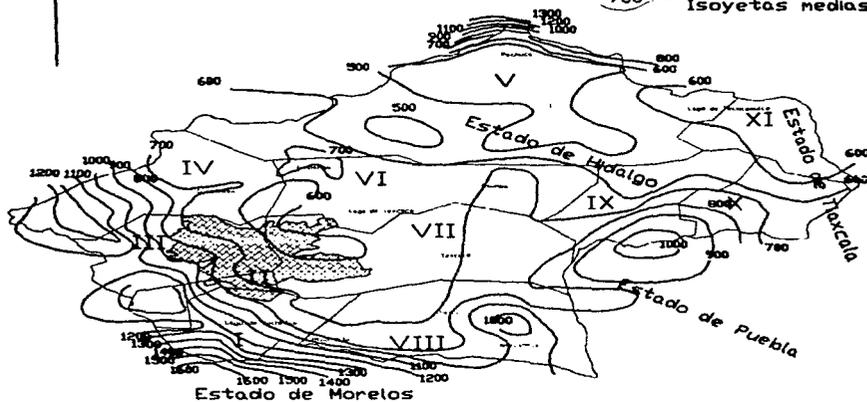


Figura 1
Hidrografía de la Cuenca del
Valle de México

 Ciudad de México

 Limite de zonas hidrologicas

 700 Isoyetas medias anuales



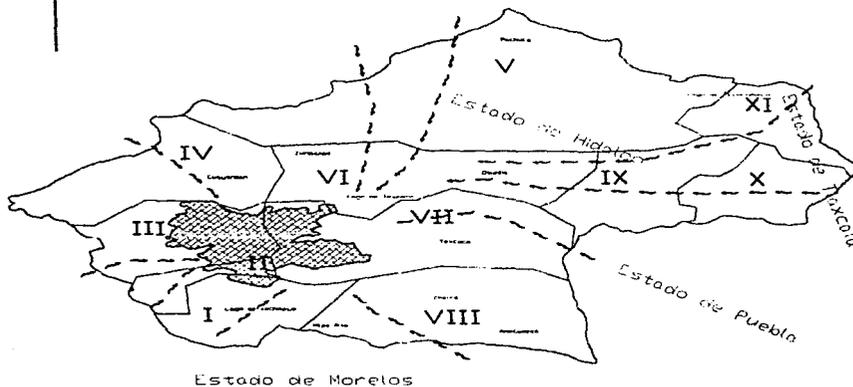
ISOYETAS ANUALES EN LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO



 Ciudad de México

 Limite de zonas hidrologicas

 Sentido del escurrimiento



HIDROLOGIA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

En la parte central del Valle los depósitos son de origen fluvial o lacustre muy reciente. En esta porción la permeabilidad depende principalmente del tamaño del sedimento, el cual varía desde arenas gruesas hasta arcillas, como consecuencia de las variaciones climáticas producidas por el crecimiento y reducción de la superficie de los lagos situados en el centro del Valle. Los últimos 100 mil años fueron de mucha humedad y actividad volcánica; en este período se formaron los depósitos potentes de arcillas de origen volcánico cuya estructura, formada en un ambiente húmedo se compone de grandes huecos rellenos de agua. Estos depósitos son impermeables, están cubiertos por una capa de suelo vegetal o relleno artificial muy reciente y descansan sobre intercalaciones de arenas, limos y arcillas más permeables en el fondo de la olla geohidrológica².

Los estratos de arcilla superior e inferior del subsuelo juegan un papel muy importante para la ciudad de México ya que, por un parte, son el lugar donde descansan los cimientos de sus construcciones, y por otra, constituyen mantos que ceden agua, lo cual implica que estos estratos sufran asentamientos al abatirse las presiones en el acuífero profundo por causa del bombeo.

A mediados del siglo pasado se inició la explotación de agua subterránea mediante pozos someros carecientes de control de los que se extraía un caudal importante². Más tarde, a principios de este siglo comenzó la extracción de agua a partir de pozos profundos, dando inicio a otro de los problemas más graves en la ciudad, el hundimiento del terreno.

La sobreexplotación de los acuíferos también ha producido cambios en la calidad físico-química del agua subterránea que se extrae, puesto que se llegan a explotar mantos de agua subterránea que han estado muchos años en contacto con minerales que se disuelven en esta.

1.1.4 Balance Hidrológico.

En la época en que se fundó la Gran Tenochtitlan, el funcionamiento hidrológico del Valle de México había producido una serie de lagos y lagunas. Extensos bosques cubrían las laderas montañosas y mantenían fijo el suelo de estas áreas, por lo que los escurrimientos contenían poco azolve. Los depósitos subterráneos, llenos a su capacidad, mantenían el flujo de numerosos manantiales. El suelo era relativamente estable; la evaporación y transpiración de los lagos, así como la vegetación, propiciaban un clima confortable y menos variable que el actual. En esa época, el balance hidrológico permanecía prácticamente inalterado por los pobladores del Valle. El volumen de lluvia que no se perdía por evapotranspiración, se depositaba en los lagos y lagunas y posteriormente se evaporaba durante la época de secas². Con el transcurso del tiempo, los habitantes del Valle han modificado el funcionamiento descrito: la cubierta vegetal se ha alterado, las zonas de recarga han disminuido por la creciente urbanización; se aprovecha una pequeña parte del agua superficial que se regula mediante presas y el resto se desaloja fuera de la cuenca, se contamina el agua y desde 1951 ha sido necesario traerla desde otras cuencas, ya que la existente en el

Valle ha resultado insuficiente para satisfacer las necesidades impuestas por el crecimiento demográfico.

El volumen de lluvia media anual, arroja un caudal medio equivalente a 213 m³/s. Se estima que de este caudal se evapotranspiran 171 m³/s que, por lo tanto, no son susceptibles de aprovechamiento². De los 42 m³/s restantes, 23 recargan el acuífero² y 19 escurren superficialmente; de estos últimos se regulan 1.6 m³/s para su aprovechamiento² y se desalojan los 17.4 restantes a través de los drenajes del Valle para evitar inundaciones ya que, como se ha mencionado, la mayor parte del escurrimiento superficial ocurre en períodos muy cortos durante los cuales se concentran grandes caudales, los cuales no pueden regularse.

En el año de 1995 el balance hidrológico presentó las siguientes características:

Por lo que respecta al abastecimiento de agua, para satisfacer los requerimientos de 67.6 m³/s de los usuarios en la cuenca³, se importaron 5.9 m³/s de agua de los acuíferos de la cuenca del río Lerma³ y 13.5 m³/s de la cuenca del río Cutzamala⁴. De los acuíferos sobreexplotados del Valle de México, se extrajeron 37.6 m³/s; de ellos, 23 m³/s provinieron del caudal que se renueva anualmente mediante el proceso de infiltración, y 14.6 m³/s del volumen almacenado en el subsuelo durante los milenios en que no se explotaban los acuíferos. Para completar el abastecimiento, se emplearon 5.5 m³/s de aguas residuales tratadas³, 1.6 m³/s de aguas superficiales reguladas y una reducción de 3.5 m³/s según el Programa de Uso Eficiente del Agua³.

De los 64.1 m³/s el 63% son destinados al Distrito Federal y el 37% restante a los municipios conurbados del Estado de México.

En cuanto al consumo, el 67% del caudal suministrado es destinado a uso habitacional, el 17% a las industrias y el 16% restante se emplea en los comercios y servicios³.

1.1.5 Problemas actuales.

La extracción de agua del subsuelo del Valle de México es superior a la que se infiltra. Esto provocó abatimientos de los niveles freáticos en algunos sitios hasta de 7 metros en el período de (1986 - 1992) y la disminución paulatina de los caudales extraídos². Además, la sobreexplotación induce la degradación de la calidad físico-química del agua en algunas zonas, y en otras, se requiere del saneamiento para evitar la contaminación con aguas residuales, cuyas consecuencias serían incalculables.

Durante la explotación del acuífero se han presentado hundimientos del terreno, en promedio de 10 centímetros anuales², aunque existen valores extremos de 40 centímetros. Los hundimientos afectan el funcionamiento de la infraestructura

³ "Agua 2000, Estrategia para la Ciudad de México", DDF, DGOH, México D.F., 1994.

⁴ Registros de entrega de agua al Sistema Cutzamala de las presas Villa Victoria, Valle de Bravo y bombeo Chilesdo proporcionados por la Comisión Nacional del Agua, abarcando el período (1982-1994).

hidráulica y provocan daños en las edificaciones. Para el caso particular del drenaje, han obligado la construcción de plantas de bombeo e infraestructura compleja y costosa para evacuar las aguas residuales y pluviales.

La distribución de agua aún no es uniforme en toda la ciudad. Generalmente en zonas de crecimiento desordenado el suministro es problemático y costoso, jugando un papel importante la ubicación de las fuentes de abastecimiento, el derroche del recurso, la falta de infraestructura para conducir mayores volúmenes de agua a las zonas donde se presentan las mayores deficiencias, así como una defectuosa comercialización y administración del agua.

1.2 Composición de la demanda y evolución histórica.

La demanda de agua potable en el Valle de México ha sido y será una función del número de habitantes que en ella habitan, así como del tipo de actividad que desarrollan, ya que dependiendo del nivel de desarrollo o nivel socioeconómico, esta demanda puede variar y acrecentarse provocando que las fuentes de abastecimiento sean insuficientes ya que son sometidas a explotaciones mayores a las planeadas, además de repercutir directamente en problemas como lo son el hundimiento del terreno y la degradación de la calidad del agua.

Como resultado de la sobreexplotación y mal manejo del agua, esta ha tenido que importarse desde fuentes externas a la cuenca del Valle dando solución a una parte del problema ya que han incrementado el caudal proporcionado a la ZMCM, sin embargo el crecimiento demográfico desmesurado ha creado nuevas necesidades de servicios siendo el más importante el suministro de agua potable.

1.2.1 Evolución histórica de la demanda.

En la época prehispánica y colonial la demanda de agua de la población era totalmente satisfecha por manantiales, los que se recargaban año con año gracias a que el balance hidrológico se mantenía en equilibrio. Lo anterior fue debido a que el crecimiento de la población durante este período se mantuvo constante o empezaba a dar luces de desarrollarse a una mayor velocidad debido a la concentración de la actividad económica en el Valle.

Durante el siglo XIX, el crecimiento demográfico ocasionó que la demanda fuera superior al abastecimiento proporcionado por los manantiales, provocando que se tuvieran que perforar los primeros pozos someros², comenzando así la explotación del acuífero. Cabe mencionar que con la explotación del acuífero comenzaron los problemas de hundimientos, así como la disminución en los niveles freáticos, cuya consecuencia fue la reducción en los caudales de los manantiales.

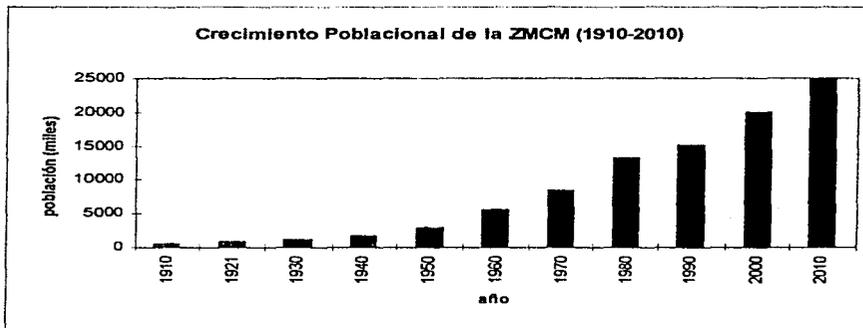
El presente siglo se ha caracterizado por tener la mayor tasa de crecimiento que se haya presentado jamás debido a la alta concentración de la actividad económica. El área urbana del Distrito Federal se ha incrementado llegando a formar la ZMCM, la cual incluye a 11 municipios del Estado de México.

La demanda de agua en los inicios del siglo XX se logró satisfacer mediante la intensificación de la explotación del acuífero y la perforación de los primeros pozos profundos², lo cual agravó los problemas de hundimientos y abatimiento de niveles y pasado algunos años llegó a ser insuficiente frente a la demanda de la población.

A mediados del presente siglo entró en funcionamiento el Sistema Lerma, primer fuente de abastecimiento externa a la cuenca del Valle. Asimismo, la explotación del acuífero continuó mediante la perforación de pozos profundos, pero debido al crecimiento demográfico fue necesario buscar otras fuentes externas para abastecimiento, de las cuales se eligió la cuenca del río Cutzamala, iniciándose la operación del Sistema que lleva su nombre en el año de 1982.

Actualmente en la ZMCM viven 18.5 millones de habitantes. De ellos residen en el Distrito Federal 9.1 millones, más la población flotante que entra y sale diariamente de esta entidad³.

Figura 2 Crecimiento Poblacional de la ZMCM ²



1.2.2 Demanda de la zona Toluca - Lerma.

Además de la demanda de la ZMCM, es posible contemplar la demanda futura de la Ciudad de Toluca y sus municipios conurbados, ya que dependiendo del gasto que se obtenga de la cuarta etapa del Sistema Cutzamala y por las limitaciones físicas del mismo al tener como gasto de diseño 24 m³/s, sería factible incrementar el abastecimiento a esta zona en 1 m³/s sin afectar la infraestructura actual y hasta en 2 m³/s mediante modificaciones en su infraestructura de distribución.

En el año de 1995 los requerimientos de agua para estos municipios se estima que fueron del orden de 2.7 m³/s, de los cuales el 81% (2.2 m³/s) provienen del acuífero del Lerma y el resto (19%) 0.5 m³/s los aporta en forma emergente el Sistema Cutzamala⁵.

A partir de 1999 y dependiendo del costo, podría disponerse de agua adicional del Sistema Cutzamala para Toluca y sus municipios. Si su demanda crece a una tasa anual del 2%, 1 m³/s de agua adicional cubriría hasta el año 2011 y con 2 m³/s aseguraría el suministro hasta el año 2023.

Dependiendo de las alternativas de ampliación que se analizarán más adelante, los requerimientos de agua para el Sistema Cutzamala se pueden ubicar entre 24 y 26 m³/s, 24 m³/s para el Valle de México y de 1 a 2 m³/s para Toluca.

1.2.3 Proyección de la demanda.

En el futuro, será necesario contar con agua suficiente para cubrir la demanda que se derive del incremento en la población y en la actividad económica, así como la que se requiera para reducir la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento subterráneas del Valle de México.

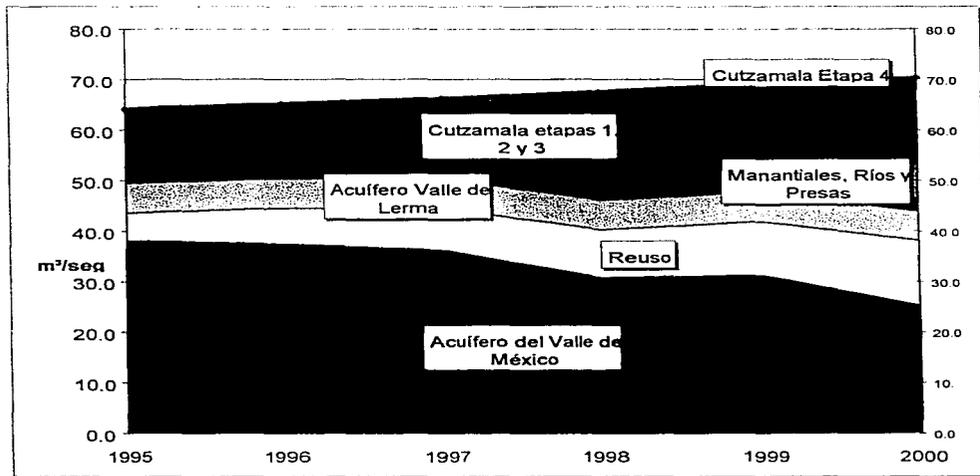
De acuerdo con las proyecciones publicadas por el Departamento del Distrito Federal³, la demanda de la ZMCM pasaría de 67.6 m³/s estimados en 1995 a 79.4 m³/s para el año 2000. Si se considera que el Programa de Uso Eficiente del Agua (PUEDA) plantea ahorros del orden de 9.1 m³/s hacia el año 2000, la demanda neta disminuiría a 70.3 m³/s. Para atender esta demanda y reducir la explotación del acuífero a su nivel de recarga, se ha planteado la siguiente estrategia:

- Continuar con el Programa de Uso Eficiente de Agua (PUEDA).
- Incrementar el reuso de aguas residuales tratadas hasta llegar a casi 13 m³/s.
- Un ligero incremento en el aprovechamiento de manantiales, ríos y presas.
- La incorporación completa de la etapa 3 del Sistema Cutzamala y la ejecución de la cuarta etapa con la que se agregan 5 m³/s, completando con esta fuente 24 m³/s, para una participación del 34% del suministro total.

⁵ Censo de Población y Vivienda. Varios años. INEGI. Plan Maestro Edo. de México.

Según lo planeado, el Sistema Cutzamala aportará para el año 2000 el 34% del agua de la ZMCM, y un porcentaje muy importante al Distrito Federal.

Figura 3 Requerimientos de agua y fuentes de abastecimiento³ (1995 - 2000)



1.3 Fuentes de abastecimiento y evolución histórica.

La tarea hidráulica de abastecer de agua a la ZMCM, debe atender por una parte, la demanda que provoca el incremento poblacional anual estimado en novecientos mil habitantes³, y por otra reducir la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento subterráneas en el Valle de México.

El abasto de agua en la ciudad se logra con una de las infraestructuras más grandes y complejas del mundo desde el punto de vista operativo, construida a lo largo de varias décadas y una gran inversión acumulada. Tan solo en el Distrito Federal se cuenta con 514 Kilómetros de acueductos a 279 tanques de almacenamiento, con capacidad conjunta de 1,700 millones de litros, de donde se distribuye a los usuarios mediante mas de 10,700 Kilómetros de redes primaria y secundaria (red secundaria es aquella cuyos diámetros son menores a 0.5 metros y en la red primaria sus diámetros varían de 0.5 a 1.83 metros)². Adicionalmente, se utilizan 227 plantas de bombeo para incrementar la presión en la red y dotar de agua a los habitantes de las partes altas³.

Para preservar la calidad del agua, se utilizan 16 plantas potabilizadoras, de las cuales 12 funcionan a pie de pozo, y 360 dispositivos de cloración³. Asimismo, se efectúan constantes inspecciones sanitarias a las instalaciones del sistema y se lleva a cabo un programa permanente de muestreo, el cual comprende anualmente la realización de mas de 50,000 análisis físicos, químicos y biológicos³. La Secretaría de Salud certifica la calidad del agua suministrada mediante un muestreo suplementario, lo que ha permitido obtener anualmente el certificado de calidad del agua en el Distrito Federal desde 1982, fecha en que fue establecido en la ley de salud³.

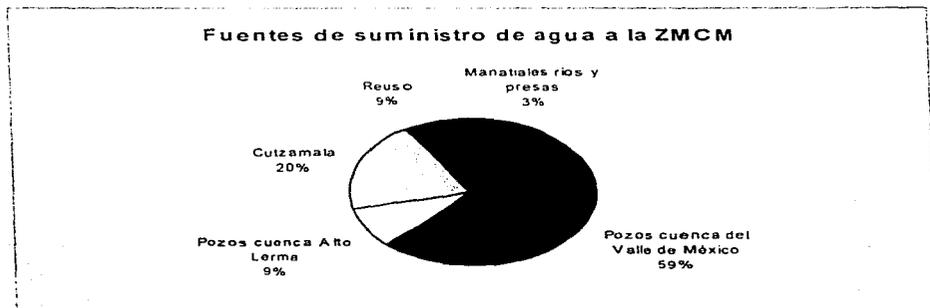
Se cuenta con un laboratorio de control de calidad del agua, donde es posible analizar más de 250 parámetros físicos, químicos y biológicos. Lo que puede permitir la detección de virus, bacterias y metales pesados en muestras de agua potable, residual, pluvial y residual tratada³. El porcentaje de las muestras que cumplen con los criterios de Secretaría de Salud en cuanto a cloro residual y bacteriología en la red de distribución, es de 94% y 91%, respectivamente, lo que es superior al 80% establecido por dicha Secretaría³.

En el año de 1995 el suministro de agua potable fue de aproximadamente 64 m³/s, provenientes de las siguientes fuentes:

- 37.6 (58.7%) m³/s Subsuelo del Valle de México.
- 5.9 (9.2%) m³/s Sistema Lerma.
- 13.5 (21.1%) m³/s Sistema Cutzamala.
- 1.6 (2.5) m³/s Aprovechamientos Superficiales.

Independientemente de los caudales de reuso de agua que fueron del orden de 5.5 (8.6%) m³/s, para cubrir ciertas necesidades de servicio público, riego de parques y jardines y algunos usos industriales³.

Figura 4 Fuentes de suministro de agua en el año de 1995.



El problema más importante de las fuentes de abastecimiento de agua de la Ciudad de México, es que se ha basado en la sobreexplotación del acuífero del Valle de México. A la obtención de 38 m³/s para agua potable, se debe agregar una extracción adicional de alrededor de 7 m³/s para otros usos², principalmente para riego, lo que implica una sobreexplotación de un poco más del 100%, ya que la recarga anual es del orden de 23 m³/s.

1.3.1 Evolución histórica del abastecimiento de agua potable.

En el año de 1325 el pueblo de los aztecas fundó, a 2240 metros sobre el nivel del mar, en un llano rodeado por lagos y por sierras de más de 5,000 metros de altura, una ciudad que en poco tiempo se convirtió en el centro indígena más importante de la región: la Gran Tenochtitlán, hoy Ciudad de México, Distrito Federal, cuya historia guarda una estrecha relación con las características hidrológicas del Valle de México descritas anteriormente.

Desde la época prehispánica fue necesario responder con obras de gran envergadura a situaciones en las que, por abundancia o escasez de agua, muchas veces alternadas, se convertían en inundaciones, sequías y hambrunas. El sistema hidráulico actual es producto de acciones realizadas durante 657 años, a partir de la fundación de México - Tenochtitlán².

Época prehispánica y colonial.

Esta primera etapa, que se extendió hasta fines del siglo XVIII, se caracterizó por las fluctuaciones en los niveles de los lagos que concentraban los escurrimientos del Valle de México².

En un principio, aunque no ocurriesen tormentas extraordinarias, bastaba que en varios años sucesivos se presentaran veranos relativamente lluviosos para que el nivel de los lagos se elevase progresivamente a causa de que se trataba de una cuenca cerrada, sin desagües naturales. Los islotes y riberas de los lagos ofrecieron a los primeros asentamientos indígenas condiciones inmejorables de seguridad y supervivencia. Sin embargo, conforme se desarrolló el predominio de los aztecas, el asentamiento de Tenochtitlán se extendió hacia las superficies disponibles o hacia aquellas que se ganaban a los propios lagos. Por ello, el valor de los terrenos se elevó al acumularse la riqueza humana y material, y la fluctuación en los niveles de los lagos comenzó a ocasionar daños cuantiosos. El problema se enfrentó mediante bordos y diques de contención; en 1450, Netzahualcóyotl, rey de Texcoco, por encargo del rey Azteca Moctezuma, diseñó y dirigió la construcción de un albaradón o dique de 16 Kilómetros de longitud para proteger la Gran Tenochtitlán del azote frecuente de inundaciones².

Por otra parte, el abastecimiento de agua provenía en esa época de manantiales, y Netzahualcóyotl fue quien construyó también el acueducto de Chapultepec para conducir el agua hasta la ciudad².

Después de la conquista de México, consumada por los españoles en 1521, las autoridades coloniales siguieron el sistema de los aztecas para contener las aguas mediante diques, algunos de los cuales servían también como calzadas, y con manantiales y acueductos para el abastecimiento de agua; sin embargo, las lluvias torrenciales continuaban ocasionando graves inundaciones. En 1604 y 1607 ocurrieron inundaciones provocadas principalmente por los escurrimientos del río Cuautitlán, las cuales ocasionaron cuantiosas muertes y daños materiales. Para resolver este problema, Enrico Martínez propuso a las autoridades la construcción de un túnel en la zona de Nochistongo, localizada al noroeste del Valle de México, con lo cual dejó de ser una cuenca cerrada al contar con su primer salida artificial. Sin embargo, poco tiempo después quedó inutilizable debido a derrumbes por falta de revestimiento, por lo que se decidió cambiarlo por un gran tajo o zanja que se terminó después de 160 años de trabajo; así, a partir de 1789 se dio salida permanente a las aguas del río Cuautitlán².

El siglo XIX.

La salida de la cuenca por el tajo de Nochistongo empezó a alterar la ecología del Valle e inició un nuevo proceso. En esta segunda etapa, el nivel de los lagos ya no crecía como en la primera; por el contrario, los diques crearon áreas seguras, propias para que la ciudad se extendiese por las planicies lacustres. La población y la riqueza se concentraron aún más en las orillas de los antiguos lagos; sin embargo, estas zonas resintieron cuantiosos daños al ser afectadas por inundaciones cuando los ríos que atravesaban la ciudad se salían de su cauce y ocupaban las áreas bajas.

El abastecimiento de agua proporcionado por los manantiales resultó insuficiente, por lo que se empezaron a perforar pozos someros; en 1847 existían casi 500 pozos y más de 1,000 en 1886. Posiblemente el hundimiento de la ciudad haya empezado en esas fechas a juzgar por las nivelaciones realizadas de 1891 a 1895, las cuales registraron un descenso de 5 centímetros por año. Además, el nivel freático disminuyó a causa de la extracción y, en consecuencia, también se redujo el caudal de los manantiales de Chapultepec².

Los primeros 75 años del siglo XX.

La construcción del Gran Canal y del Túnel de Tequisquiácán propició nuevos asentamientos humanos y mayor concentración de la población y de la riqueza; estas condiciones, junto con el desarrollo industrial, hicieron crecer las necesidades de abastecimiento de agua.

La extracción de los pozos debió incrementarse poco hasta 1936, a juzgar por la evolución de los hundimientos, los cuales se mantuvieron en alrededor de 5 centímetros por año, posiblemente gracias a que en 1913 se terminó el acueducto que captaba las aguas de los manantiales de Xochimilco, con un caudal de 2.6 m³/s. De 1936 a 1944 se advierte una deficiencia en las fuentes de agua para satisfacer la demanda de una población que crecía rápidamente, y en ese lapso el gobierno de la ciudad inició la perforación de los primeros 93 pozos profundos; lo anterior ocasionó que el hundimiento en el centro de la ciudad se incrementara a 18 centímetros por año entre 1938 y 1948².

El déficit en el abastecimiento de agua a la ciudad, hizo que en 1942 se iniciaran las obras para captar los manantiales del río Lerma en el Valle de Toluca. Estas obras se retrasaron hasta 1951, año en el que todavía se perforaron otros 10 pozos municipales profundos.

En 1947 Nabor Carrillo presentó un trabajo técnico en el que, con datos cuantitativos, dejaba claro que la Ciudad de México se hundía principalmente por el abatimiento de las presiones en el acuífero localizado debajo de ella. Este trabajo creó conciencia de la necesidad de no agravar el problema, sobre todo en el centro de la ciudad, y hacia 1954 se suspendieron los permisos para perforar pozos particulares.

No obstante, en 1955 hubo necesidad de perforar unos 10 pozos municipales y, a pesar de que en 1957 se inauguró el acueducto de los pozos de Chiconautla con un caudal de 3 m³/s, y en 1958 el de los pozos de Peñón, con un caudal de 1 m³/s, entre 1960 y 1967 se perforaron alrededor de otros 50 pozos municipales, esta vez alejados del centro de la ciudad, pero muchos de ellos situados en zonas arcillosas, por lo que también causaron hundimientos; sin embargo, gracias a su ubicación los hundimientos en el centro, se redujeron notablemente entre 1960 y 1970².

Ante el aumento de la demanda de agua y en los costos para satisfacerla, se vio la conveniencia de tratar las aguas residuales para evitar el empleo de agua potable en los usos que no requieren de esa calidad.

En 1954 se comenzó a operar la primera planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en el Bosque de Chapultepec; las aguas residuales tratadas se emplean en el riego de áreas verdes y en el llenado de lagos.

A pesar de todas las acciones tomadas, la demanda de la ciudad no quedaba satisfecha. Los manantiales de Xochimilco debieron bombearse hasta agotarlos y en 1964 hubo que perforar en esa zona baterías de pozos para suplir el caudal de los manantiales.

En 1967 se incrementó la aportación proveniente del Lerma en 4 m³/s mediante nuevas baterías de pozos; en 1973 se perforaron más pozos en el área de Xochimilco; en 1977 entró a la red de abastecimiento el caudal de los pozos perforados por la CAVM en el sur de la ciudad (a lo largo del Anillo Periférico y en Tláhuac - Netzahualcóyotl) y al norte del Valle (en la zona Los Reyes - Teoloyucan), los cuales aportan al ZMCM 3.0 m³/s y 6.5 m³/s, respectivamente².

Por otra parte, el asentamiento del subsuelo ocasionado por la sobreexplotación de los acuíferos, deterioró el drenaje y disminuyó su capacidad para desalojar las aguas

residuales y pluviales del Valle de México, lo que motivó la ampliación del Gran Canal y la construcción del segundo túnel de Tequisquiac.

En el centro del Distrito Federal los hundimientos hicieron que el drenaje, proyectado para trabajar por gravedad, requiriera de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del Gran Canal. De 1952 a 1966 se instalaron 29 plantas de bombeo en diversas zonas de la ciudad, lo que implicó un notable incremento en los costos de operación y mantenimiento².

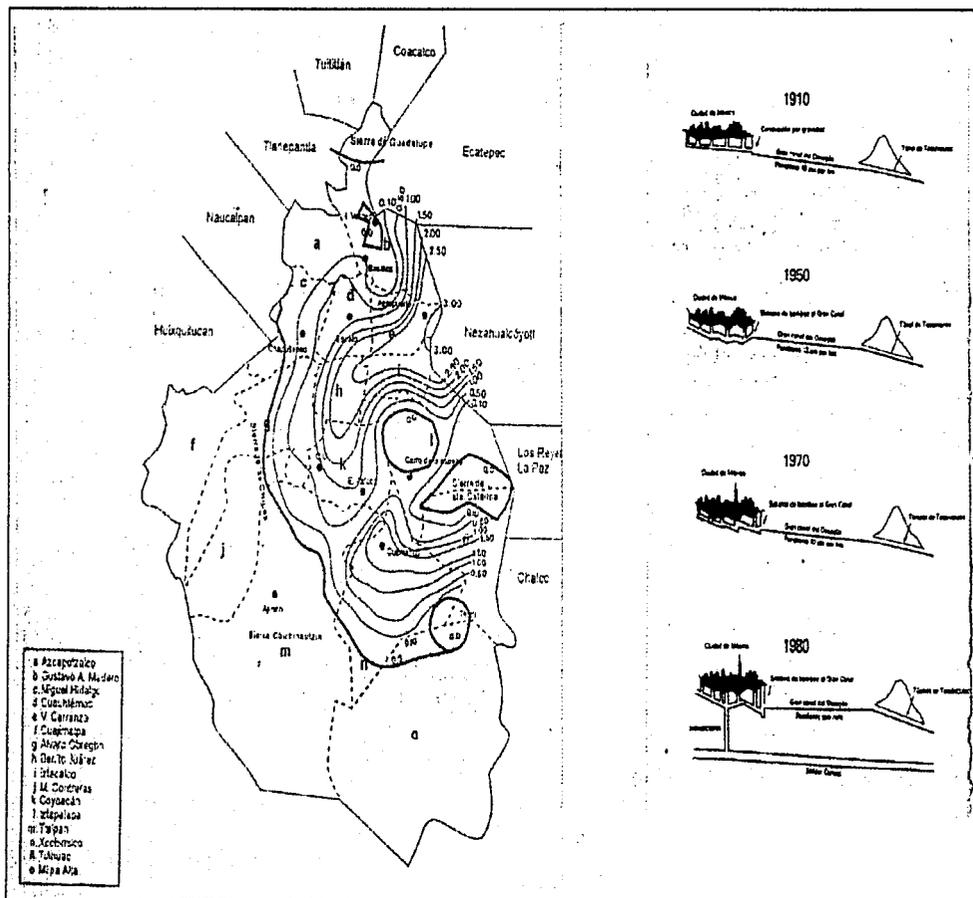
El Gran Canal, que a principios del siglo tenía una pendiente de 19 cm/Km, en la actualidad es prácticamente horizontal.

En 1910, el nivel del lago de Texcoco, que regulaba las aguas del Gran Canal, se encontraba a 1.90 metros por debajo del centro de la ciudad; en 1970, el hundimiento había sido tal que el lago de Texcoco ya se encontraba a 5.50 metros por encima del centro de la ciudad².

El desmesurado crecimiento urbano del Distrito Federal demandaba más superficie para extenderse; esto, aunado a los problemas del hundimiento, volvió insuficientes las capacidades de drenaje del Gran Canal y del Emisor Poniente. Por ello, se hizo necesario construir el drenaje profundo, el cual consiste en instalar conductos a profundidades tales que no sean afectados por los asentamientos del terreno; además de no requerir de sistemas de bombeo, ya que con su solo desnivel transportan el agua en épocas de lluvias y la expulsan por la cuarta salida del Valle de México construida por el hombre.

A continuación se presenta un esquema de la evolución de los hundimientos en la Ciudad de México:

Figura 5 Hundimientos presentados en el suelo de la Ciudad de México²



²Los valores de las curvas están en metros y son representativas período (1983 - 1994).

Hundimiento del Gran Canal durante el período (1910-1980)

El momento actual.

El momento actual, se caracteriza por el inicio de transferencias de aguas al Valle de México desde cuencas lejanas, como lo es el Sistema Cutzamala que entró en operación en el año de 1982, y en un futuro el posible aprovechamiento de las cuencas de los ríos Oriental, Amacuzac y Tecolutla.

Cabe mencionar que el aprovechamiento de las cuencas de los ríos Oriental, Amacuzac y Tecolutla son una posible fuente de abastecimiento y que técnicamente es factible llevarlas a cabo. Sin embargo, la finalidad no debe ser demostrar la capacidad de crear grandes obras de ingeniería con enormes inversiones e ir acabando con el agua de las diferentes regiones del país, sino por el contrario se requiere encontrar la manera de aprovechar al máximo el agua con la que se dispone y en lugar de incrementar la demanda, disminuirla hasta llegar a un punto de equilibrio que permita desarrollar las actividades cotidianas dentro de un marco ambiental.

Ahora, más que antes, las soluciones derivadas del enfoque de ingeniería deben complementarse con otras disciplinas, para lograr un enfoque más amplio y complejo, que considere aspectos de planeación y desarrollo urbano a largo plazo, con el fin de seguir abasteciendo de agua potable y con una mayor eficiencia a la gran ciudad.

1.3.2 Abastecimiento de agua a través de fuentes externas.

El agotamiento y la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento propias de la cuenca del Valle de México debidas al desmesurado crecimiento demográfico, indujo a la búsqueda de nuevas fuentes localizadas fuera del Valle con la finalidad de seguir dotando de agua a la población.

El Sistema Lerma se inició con 4 m³/s y para 1974 llegó a aportar 14 m³/s, explotación que con el transcurso del tiempo ocasionó un severo abatimiento de los acuíferos de los valles de Toluca e Ixtlahuaca⁸, por lo que fue necesario reducir su explotación estabilizándose actualmente en 5.9 m³/s.

A principio de la década de los 70's, en el Valle de México se vio la necesidad de abastecer al Distrito Federal, así como a los 11 municipios del Estado de México que para ese entonces ya se encontraban conurbados a la Capital, mediante fuentes externas diferentes a la del Lerma ya que esta ya presentaba signos de sobreexplotación.

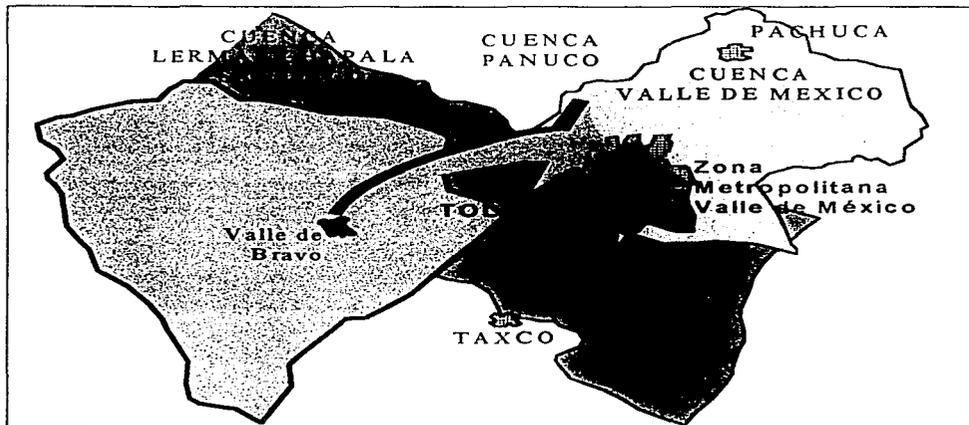
Ante esta situación, en 1972 se constituyó la Comisión de Aguas del Valle de México, con el objeto de programar, proyectar, construir, operar y conservar las obras necesarias para aprovechar los recursos hidráulicos del Valle de México, así como aquellas que fueran necesarias para traer el líquido desde otras cuencas.

⁸ "Sistema Cutzamala" SARH, Folleto CAVM, México, D.F., Diciembre 1987.

A partir de entonces se continuaron con los estudios de abastecimiento de agua potable iniciados por la extinta Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, que incluían diversas alternativas, desde captaciones cercanas al Valle de México, hasta cuencas hidrológicas tan lejanas como la del Río Papaloapan, prevaleciendo en estos análisis el dejar reservas para los usos locales presentes y futuros, analizándose su factibilidad hidrológica, técnica, política, social, económica y financiera. Se correlacionaron caudales disponibles, longitud de recorrido, desniveles respecto a los puntos de captación y entrega, energía para su operación, topografía, calidad del agua, tenencia de la tierra, aspectos tecnológicos, cambio de uso del agua y sus consecuencias⁵.

Las regiones más viables para este abastecimiento con fuentes externas, correspondieron a las cuencas de: Cutzamala y Temascaltepec al oeste, Tecolutla y Oriental Libres al este, Amacuzac al sur y Tula (Taxhimay) al norte, con caudales de 19, 5, 14.7, 7, 14.2 y 2.8 m³/s respectivamente⁵, con lo que se estimó podrían cubrirse las demandas del vital líquido hasta el año 2000, combinándose con las acciones contenidas en el programa de control de pérdidas y uso eficiente del agua.

Figura 6 Fuentes externas posibles para el abastecimiento de agua a la ZMCM



La utilización del agua de estas cuencas no debe verse desde un punto de vista exclusivo de abastecimiento de agua a la ZMCM, ya que desde su origen y lo largo de la conducción, deben satisfacer en primer lugar las necesidades locales, actuales y futuras.

Se requiere desde luego, el cuidado de las zonas de captación y la preservación de la calidad del agua, efectuando obras que no solo eviten dañar el sistema hidrológico, sino que tiendan a mejorarlo, pero fundamentalmente habrán de tomarse en cuenta los problemas socio - políticos que surjan, motivados por la transferencia y/o cambio del uso del agua, entre habitantes de una misma entidad, o entre diversas entidades federativas y aún entre dependencias que manejan distintos usos del agua, para su adecuada y oportuna solución.

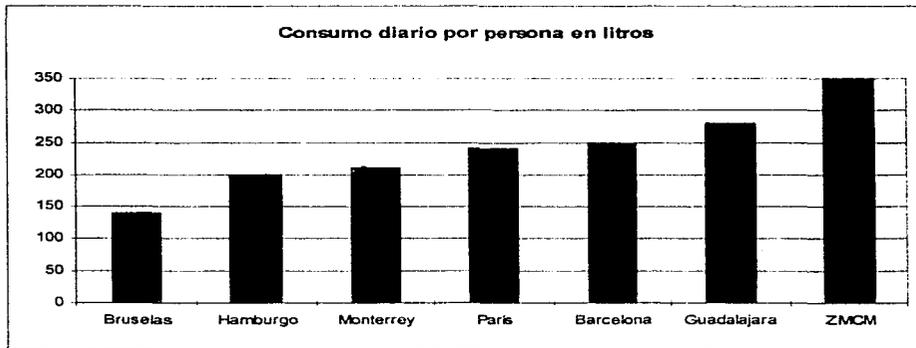
1.4 La planeación de la satisfacción de la demanda.

Tradicionalmente se había planteado resolver el problema de abastecimiento mediante la incorporación de caudales adicionales provenientes de fuentes externas. En la actualidad, este planteamiento no es suficiente y se requiere además incidir de manera directa en la demanda.

La estrategia para atender los requerimientos de la población se basa en el uso eficiente del agua, que tiene como premisa la disminución del consumo sin deterioro del nivel de bienestar y de las actividades productivas de la población, así como de un manejo más eficiente de la infraestructura del sistema de conducción, distribución, comercialización y administración del agua.

El consumo actual en la ZMCM asciende en promedio a 350 lt/hab/día ⁷, aunque existen marcadas diferencias entre zonas. Este gasto es excesivo, si se considera que otras ciudades que manejan eficientemente el agua, satisfacen sus necesidades cotidianas con 200 lt/hab/día.

Figura 7 Consumo diario por persona en litros ⁷



⁷ "Agua, una nueva estrategia para el Distrito Federal" Comisión de Aguas del D.F., México D.F., Mayo 1994.

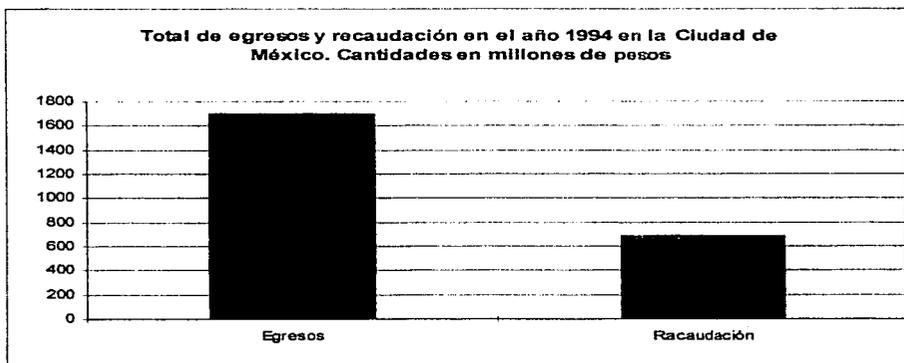
La ZMCM debe consumir menos agua con el fin de evitar el riesgo de agotar definitivamente su fuente principal de abastecimiento, ya que además del acuífero del Valle de Lerma y del Sistema Cutzamala, las posibles fuentes de abastecimiento externas representan elevados costos difícilmente sufragables para el país.

Existen dos razones principales del por qué del elevado consumo de agua en la ZMCM:

1. La red de distribución del Distrito Federal cuenta con 10,700 kilómetros de tuberías y los primeros tramos de la red se instalaron hace más de 100 años. La mayor parte de las tuberías son de asbesto-cemento, material que es vulnerable a los movimientos del subsuelo. Se estima que más del 30% del agua se pierde por fugas antes de llegar a los domicilios⁷.
2. El sistema de cobro del agua, basado mayoritariamente en cuotas fijas independientes de la cantidad que se consume, ha contribuido a que los habitantes de la ciudad no hayamos desarrollado una cultura de conservación y consumo racional del agua.

En el año de 1994, con el fin de asegurar el abastecimiento de agua, una capacidad adecuada de drenaje y el tratamiento de aguas residuales, la ciudad gastó 1,700 millones de pesos⁷ y se estima que esta cifra aumentará considerablemente en los próximos años. Sin embargo, la recaudación correspondió solamente al 40% del gasto efectuado.

Figura 8 Total de egresos y recaudación 1994, Ciudad de México⁷.



Una consecuencia directa de que la ciudad no cuente con los recursos financieros suficientes, es que no puede dar un mantenimiento adecuado a su infraestructura. El mal estado de las redes de distribución ocasiona que el agua se desperdicie antes de llegar a las tomas domiciliarias.

El pago del consumo de agua por metro cúbico es una medida eficaz para que los usuarios del servicio tomen conciencia ya que el abuso del consumo repercute directamente en su economía. Para ello, primeramente es necesario contar con un padrón confiable y completo de los usuarios, así como con medidores precisos en cada toma.

Tabla 1 Tarifas progresivas bimestrales para tomas domésticas en el D.F. *

CONSUMO M3		T A R I F A (\$)	
Limite inferior	Limite Superior	Cuota Mínima	Cuota adicional por m3 excedente del limite inferior
0.00	10.00	10.00	0.00
10.10	20.00	10.00	1.00
20.10	30.00	20.00	1.00
30.10	60.00	30.00	2.40
60.10	90.00	102.00	4.75
90.10	120.00	244.00	6.55
120.10	240.00	440.00	8.35
240.10	420.00	1441.00	10.10
420.10	660.00	3260.00	11.90
660.10	960.00	6116.00	13.70
960.10	1500.00	10225.00	15.45
1500.1	en adelante	18567	17.25

* Tarifas vigentes (1997)

CONSUMO M3		T A R I F A (\$)	
Limite inferior	Limite Superior	Cuota mínima	Cuota adicional por m3 excedente del limite inferior
0.00	10.00	0.00	0.00
10.10	20.00	5.05	0.55
20.10	30.00	12.60	0.60
30.10	60.00	43.40	1.40
60.10	120.00	103.70	1.70
120.10	240.00	278.30	2.30
240.10	420.00	528.60	2.60
420.10	660.00	1263.00	3.00
660.10	960.00	2214.35	3.35
Más de 960		3651.00	3.80

* Tarifas en el año 1994

Haciendo una comparación entre el año de 1994 en el que las tarifas estaban altamente subsidiadas, con el presente año donde se concesionará el servicio a particulares, se presenta a continuación el cálculo del monto a pagar por una familia formada por cinco personas:

Tabla 2 Comparación del costo por consumo de una familia con 5 integrantes.

Año	Consumo 350 l/hab/día	
	Consumo Bimestral m3	Monto a Pagar \$
1994	105	180.2
1997	105	342.25
Futuro	Consumo 200 l/hab/día	
	Consumo Bimestral m3	Monto a Pagar \$
	60	102

* Cifras calculadas a partir del Código Financiero del D.F.

* Código Financiero del Distrito Federal. México, D.F., 1997

Como se puede observar en la tabla anterior, si el consumo de una familia continua siendo de 350 lt/hab/día el monto a pagar bimestralmente será el doble del que se pagaba en el año de 1994. Por el contrario, si esta familia le da un uso correcto al agua podrá ahorrar el 70% de su pago bimestral con respecto al que se tendría si su consumo no cambia.

Para lograr que el consumo de agua potable en la ciudad disminuya a niveles que permitan llevar a cabo las labores cotidianas sin detrimento de la calidad de vida de los usuarios, así como revertir los efectos negativos a los que se han sometido las fuentes de abastecimiento se deben realizar las siguientes acciones:

1.- Fuentes de Abastecimiento.

Para mantener los caudales de suministro, se deben llevar a cabo la rehabilitación, reposición y equipamiento de pozos no sólo para mantener, sino para aumentar la capacidad instalada de los pozos que, en caso de fallas del abastecimiento de las fuentes externas, resuelvan las deficiencias de suministro como fuente alterna de emergencia.

Con el fin de reducir los efectos colaterales asociados con la explotación del acuífero del Valle de México, se debe disminuir el caudal de extracción en la medida que las fuentes externas del Valle incorporen caudales adicionales y las acciones del Programa de Uso Eficiente del Agua lo permitan, de tal forma que en 20 años se logre reducir la extracción actual a 23 m³/s gasto de recarga anual por infiltración del agua de lluvia, para mantener el equilibrio al acuífero³, según se establece en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, lo cual es también función de la recarga artificial que se pueda lograr mediante la inyección o infiltración del agua residual tratada a niveles de calidad que permitan recargar el acuífero sin contaminar tanto al agua como al subsuelo.

Por otro lado, aún cuando en el Distrito Federal solo se utiliza agua residual tratada para el riego y algunas labores industriales y comerciales, en el Valle de México todavía se requieren 7.0 m³/s del agua del subsuelo para este fin³, lo que contribuye a la sobreexplotación del acuífero. En el corto plazo se debe eliminar la extracción para este uso y en caso de ser factible, realizar su reemplazo total por agua residual tratada.

2.- Mejoramiento de la operación y distribución.

Se debe continuar con la construcción de redes de distribución, tanques de almacenamiento, rehabilitación y reposición de pozos, que den una mayor cobertura a la ciudad para entregar caudales suficientes que satisfagan las demandas. Asimismo, en la red existente se debe seguir y mejorar su mantenimiento continuo con el fin de reducir las fugas de agua, en las que actualmente se pierden caudales de importancia. Dada la magnitud del sistema, se requiere continuar con el desarrollo de una base geográfica de datos computarizada que permita mantener actualizada la información de la infraestructura.

Referente a la calidad del agua, los muestreos y los análisis que se aplican deben continuar y de ser posible abarcar mayores zonas de muestreo, con el fin de tener mayor información de las fuentes de las que provienen, para poder actuar cuando sea necesario.

3.- Programa de instalación de muebles sanitarios y accesorios de bajo consumo de agua.

Este programa se inició en el Distrito Federal en 1989 y consiste en la sustitución de muebles sanitarios convencionales, que usan en promedio 16 litros por descarga, por muebles de bajo consumo que solamente requieren de 6 litros. Para 1994 se habían sustituido 640 mil muebles, lo que representó un ahorro de 128 millones de litros diariamente. Para el año 2000 se concluirá el programa con la instalación de 2 millones de muebles, con lo que se obtendrá un ahorro de 400 millones de litros diarios (4.6 m³/s).

En el Estado de México el programa abarca la sustitución de 1.7 millones de muebles, con lo que se ahorrarán 340 millones de litros diariamente (3.9 m³/s).

Al concluir este programa, se habrá logrado disminuir el consumo en 740 millones de litros diarios (8.5 m³/s).

4.- Uso de agua residual tratada.

El uso de agua residual tratada es una medida eficaz para reducir la necesidad de agua potable. Actualmente las 21 plantas de tratamiento que operan en el Distrito Federal producen 6.25 m³/s.

El nivel tratamiento depende del destino de las aguas tratadas, siendo estos destinos principalmente para: el uso industrial, comercial, servicios, agricultura y recarga del acuífero.

Por ejemplo, el tratamiento terciario de la planta Cerro de la Estrella permitió llevar a cabo la recarga artificial del acuífero con agua de excelente calidad. Así, durante 1994 se realizó la recarga con 1.0 m³/s a través de lagunas de infiltración, en las estribaciones de la sierra de Santa Catarina.³

Cabe mencionar que para tener un adecuado uso de los caudales provenientes del agua residual tratada, es necesario contar con una red de distribución especial para este servicio, la cual facilite su uso y logre satisfacer las demandas de los usuarios.

5.- Preservación del acuífero.

Continuar llevando a cabo las acciones de expropiación de terrenos, donde sea factible crear zonas verdes para preservar las áreas de recarga en el Distrito Federal, fundamentalmente en Xochimilco, el Ajusco, Cerro de la Estrella y las sierras de Guadalupe y Santa Catarina.³

6.- Fuentes de suministro externas al Valle de México.

En el año de 1994 entró en operación la tercera etapa del Sistema Cutzamala con una aportación de 1.0 m³/s, hasta alcanzar 8.0 m³/s en 1998, en tanto que la cuarta etapa completará el total aportando 5 m³/s. Por lo que respecta al Sistema Lerma, este continuará proporcionando un caudal de 5.9 m³/s a la ZMCM.³

7.- Comercialización y administración

Se está llevando a cabo el proceso de privatización para los servicios de facturación y mantenimiento de las redes de agua potable con lo que se espera mejorar la eficiencia de la red, así como el servicio proporcionado a los usuarios.

8.- Reglamentación.

A partir de marzo de 1990, entró en vigor en el Distrito Federal el reglamento de los servicios de agua potable y drenaje, que aunado a la ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, publicada en 1988, permitirán lograr un uso eficiente del agua y preservar la infraestructura hidráulica y los recursos existentes.

9.- Crear conciencia en los usuarios.

La participación de los usuarios es importante en términos del uso eficiente del agua, ya que asumiendo un papel más responsable en la detección y eliminación de fugas interdomiciliarias, además de hacer caso a las recomendaciones para eliminar los consumos de agua innecesarios y minimizar los requeridos, lograrán por una parte preservar su hábitat y mejorar las condiciones ambientales de la ciudad y por otra disminuir el gasto familiar ya que a menor consumo el monto a pagar también será menor.

La difusión en los medios de comunicación masivos, sobre la importancia del buen uso del agua potable y su preservación debe ampliarse y dispersarse para que todos tengan acceso a ella.

Capítulo 2

2. EI SISTEMA CUTZAMALA.

2.1 Antecedentes.

La Comisión de Aguas del Valle de México y la Comisión del Plan Nacional Hidráulico, tras analizar los estudios realizados por la Comisión Hidrológica de La Cuenca del Valle de México, determinaron que las cuencas más viables para satisfacer a la ZMCM desde el punto de vista de su factibilidad hidrológica, técnica, política, social, económica y financiera eran las correspondientes a las cuencas altas de los ríos Cutzamala, Tecolutla y Amacuzac.⁹

Una vez realizados los estudios correspondientes a cada una de estas cuencas, como lo fueron los caudales disponibles, desniveles entre captación y entrega, la energía eléctrica necesaria para su operación, la calidad del agua, la tenencia de la tierra, los aspectos tecnológicos, el cambio de uso del agua de generación de energía eléctrica a agua potable y las repercusiones económicas, se determinó que el proyecto más viable era el de la Cuenca Alta del Río Cutzamala, pues brindaba la posibilidad de aprovechar la infraestructura existente del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán y permitía satisfacer, en menor plazo, la demanda de agua potable en la ZMCM.¹⁰

Es importante señalar que la planeación para la utilización del agua de esta cuenca consideró tanto el abastecimiento a la ZMCM como la satisfacción de las necesidades de las regiones de captación y de las poblaciones ubicadas a lo largo de la conducción, estableciendo un programa de obras de compensación y beneficio social en los sitios afectados por la construcción de las obras.

2.2 Hidrología de la cuenca del río Cutzamala.

2.2.1 Aspectos generales.

El río Cutzamala es uno de los principales afluentes del río Balsas. A lo largo de sus 262 Km de recorrido recibe los siguientes nombres: Tajimaroa, Turundeo, Río Grande, Tuxpan, Zitácuaro y Cutzamala.¹⁰

⁹ "El Sistema Cutzamala, Agua para Millones de Mexicanos". CNA, México D.F., Octubre 1994.

¹⁰ "Actualización al Boletín Hidrológico Num. 49, Región Hidrológica Num. 18 (Parcial), Cuenca del Medio y Bajo Balsas", Tomo IV, SARH. México, D.F., 1980.

Se origina de la confluencia de dos ríos principalmente, el río Zitácuaro y el río Tilostoc, ambos originados por escurrimientos provenientes de subcuencas que finalmente drenan al río Cutzamala.

El río Zitácuaro es formado por la confluencia de diversos ríos a lo largo de su recorrido, entre los que se encuentran: el río Tuxpan, Agostitlán, Chiquito, Salitre, Chinapa, etc.

El río Tilostoc se forma por la confluencia de tres ríos principales que son: el río Ixtapan del Oro, el río Malacatepec y el río Temascaltepec.

En el sitio donde los escurrimientos mencionados se unen para formar el río Cutzamala se encuentra ubicada la estación hidrométrica El Gallo, generándose un área de cuenca de 10,738.7 Km².¹⁰

Después de esta estación el río recibe las aportaciones del río Ixtapan y finalmente el río recorre 31 Km hasta derivar su caudal al río Balsas.¹⁰

Figura 9 Cuenca del río Cutzamala.



2.2.2 Afluentes de la Cuenca del Río Cutzamala.

Dentro de los afluentes del río Cutzamala se encuentran una serie de ríos y arroyos, los cuales se forman de los escurrimientos provenientes de cuencas con altitudes hasta de 4,500 m.s.n.m., como es el caso del río Temascaltepec, el cual se origina por la unión de los ríos Verde y del Vado que descienden del Nevado de Toluca desde una elevación de 4,500 y 3,500 m.s.n.m., respectivamente.

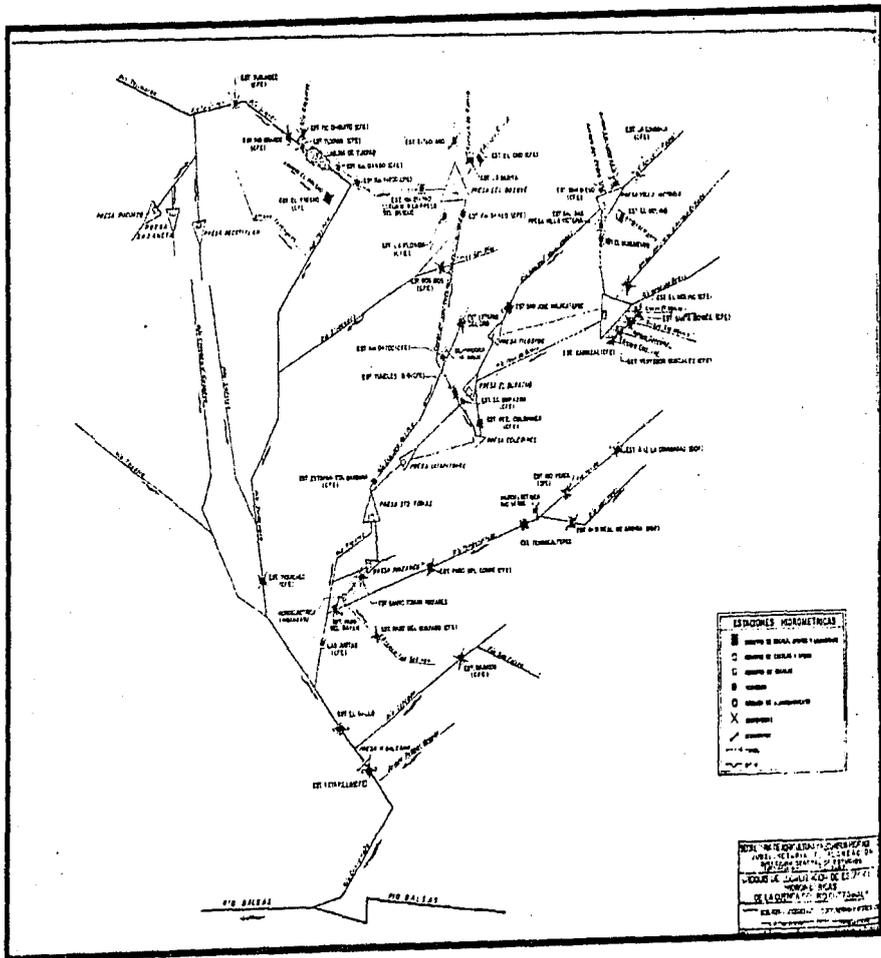
Dentro de los afluentes más importantes al río Cutzamala se encuentran:

Tabla 3 Principales afluentes del río Cutzamala ¹⁰.

Afluente	Origen m. s. n. m.	Afluente	Origen m. s. n. m.	Afluente	Origen m. s. n. m.
1.-Río Agostillán	2,700	9.-Arroyo Compañía	3,000	17.-Arroyo Carrizal	2,300
2.-Río Pocuato	2,600	10.-Arroyo el Molino	2,600	18.-Río Ixtapan del Oro	3,250
3.-Río Aporo	2,550	11.-Arroyo San Diego	3,000	19.-Río Temascaltepec	4,500
4.-Río Chiquito	2,950	12.-Río Amanalco	3,500	20.-Río Verde	4,500
5.-Arroyo el Fresno	2,900	13.-Río Valle de Bravo	2,700	21.-Río del Vado	3,100
6.-Río Zitácuaro	2,700	14.-Arroyo el Molino	3,300	22.-Arroyo los Sabinos	1,500
7.-Arroyo la Garita	2,100	15.-Arroyo Sta. Mónica	2,600	23.-Río Ixtapan	3,000
8.-Río Tilostoc	2,700	16.-Arroyo González	2,600	24.-Arroyo San Lucas	1,250

En la siguiente figura se muestra un esquema de la hidrografía de la cuenca del río Cutzamala:

Figura 10 Hidrografía de la cuenca del río Cutzamala 10



2.2.3 Rendimiento de la cuenca del río Cutzamala.

El rendimiento de una cuenca es una medida que indica la aportación de agua por kilómetro cuadrado que la cuenca drena por sus diferentes corrientes o subcuencas.

En el caso de la cuenca del río Cutzamala se tomará como parámetro el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca correspondiente a la estación El Gallo, ya que es en esta donde se tienen los registros de las corrientes que son aprovechadas por el Sistema en su totalidad, para después compararla con el porcentaje aportado por las subcuencas que la conforman.

Tabla 4 Rendimiento por Km² y Porcentaje de aportación de subcuencas del río Cutzamala.¹⁰

Presa / Corriente	Area de la cuenca Km ²	Volumen medio anual miles de m ³	Rendimiento miles m ³ /km ²	% de aportación
El Gallo	10,738.7	3,287,000	306.1	100%
P. Valle de Bravo	546.9	213,262	389.9	6.49%
P. Villa Victoria	617.7	155,248	251.3	4.72%
P. Del Bosque	408.8	142,400	348.3	4.33%
Canal Tuxpan-Bosque	1,199.6	185,739	154.8	5.65%
R. Ixtapan del Oro	201.1	44,106	219.3	1.34%
R. San José Malacatepec	399.3	87,899	220.13	2.67%
R. Tilostoc	3,306.9	1,222,000	369.5	37.18%
R. Zitácuaro	3,740.7	1,585,000	423.7	48.22%

Los ríos Tilostoc y Zitácuaro, conforman el total del aprovechamiento ya que son el destino final de todas las corrientes de la cuenca hasta la estación El Gallo, aportando el 37.18% y 48.22% respectivamente del escurrimiento medio anual.

En cuanto a la aportación proveniente de las presas, se observa que la presa Valle de Bravo es la que mayor porcentaje entrega a la cuenca.

2.2.4 Corrientes aprovechadas por el Sistema Cutzamala.

Para la ejecución del Sistema Cutzamala se aprovechó la infraestructura del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, así como sus principales corrientes, de las cuales se tiene información hidrológica obtenida a partir de estaciones hidrométricas localizadas en la cuenca.

Actualmente, la gran mayoría de las estaciones hidrométricas correspondientes a las corrientes que aportan agua al Sistema están fuera de operación, provocando el manejo de otra forma de medición que se basa en el funcionamiento del vaso con el objeto de determinar las entradas por cuenca propia de una presa. Sin embargo, este tipo de medición implica que los datos obtenidos no tengan un parámetro de

comparación con el cual se pueda llegar a tener la suficiente información para su estudio y manejo veraz.

A continuación se presentan las corrientes aprovechadas por el Sistema, los vasos de almacenamiento y el área de las subcuencas correspondientes:

Tabla 5 Corrientes aprovechadas y vasos de almacenamiento del Sistema Cutzamala¹⁰

Presa / corriente	Área de la cuenca Km ²
Presa Valle de Bravo	546.9
Arroyo Amanalco	242.9
Arroyo El Molino	153.1
Arroyo Santa Mónica	13.4
Arroyo González	35.8
Arroyo Carrizal	8.2
Presa Villa Victoria	617.7
Arroyo El Ramal	24.9
Arroyo El Molino	25.2
Arroyo La Compañía	293.7
Arroyo San Diego	89.7
Presa del Bosque	408.8
Río Zitácuaro	372.5
Arroyo La Garita	0.9
Arroyo El Oro	4.4
Laguna de Tuxpan	44.6
Río Tuxpan	1199.6
Río Ixtapan del Oro	133.5

2.2.5 Volúmenes de escurrimiento al Sistema Cutzamala.

Los volúmenes de escurrimiento en la cuenca son medidos de tres formas distintas, dependiendo del tipo de control que se tenga en la zona de medición.

1.- En el caso de las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y del Bosque, la forma en que se lleva el control de los escurrimientos es mediante la aplicación de la ecuación de continuidad en el funcionamiento del vaso, de esta ecuación se obtienen los volúmenes de entradas a las presas.

La ecuación de continuidad es la siguiente:

$$\Delta s = V_e - V_s + Pr - Ev$$

donde:

Δs = diferencia de almacenamiento en el vaso medida en el periodo.

V_e = volumen de entradas al vaso proveniente de escurrimientos y transferencias.

V_s = volumen de salidas del vaso según políticas de extracción y excedencias.

Pr= precipitación medida en el periodo.

Ev= evaporación estimada en el vaso de almacenamiento.

2.- La captación y bombeo Chilesdo cuyo objetivo es captar las filtraciones de la presa Villa Victoria, así como las aportaciones por cuenca propia entre ambos aprovechamientos, permite conocer la cantidad de agua entregada al Sistema, mediante los dispositivos de medición de gasto con los que cuenta en su planta de bombeo.

3.- Las aportaciones de la presa Tuxpan a la presa del Bosque son medidas en la estación hidrométrica Km 21+740, de la misma manera las entradas a la presa Tilostoc son obtenidas a partir de los aforos realizados en la estación hidrométrica San José Malacatepec, finalmente las aportaciones de la presa Ixtapan a la presa Colorines son medidas en la estación hidrométrica Km 0+700.

Tabla 6 Periodo de registros de escurrimientos al Sistema^{1o}

Estación	Periodos de registro
Presa del Bosque	1958 - 1986
Presa Valle de Bravo	1958 - 1986
Presa Villa Victoria	1958 - 1986
Presa Chilesdo	1992 - 1995
Canal Tuxpan - Presa del Bosque	1958 - 1986
San José Malacatepec	1955 - 1985
Km 0+700	1955 - 1985

Como se observa en la tabla anterior los registros de escurrimiento tienen un atraso de 10 años debido principalmente a que las autoridades encargadas de la recopilación y manejo estadístico de la información hidrológica, no han llevado a cabo una actualización constante a los boletines hidrológicos, razón por la cual el análisis manejará la información correspondiente a los periodos registrados.

Los registros se presentan en el ANEXO de REGISTROS HIDROLOGICOS.

2.2.6 Precipitación y evaporación en los almacenamientos del Sistema Cutzamala.

Con el fin de poder determinar el volumen de entradas a los vasos de almacenamiento, es necesario conocer la altura de precipitación que corresponde a un área de almacenamiento determinada, así como estimar la evaporación que se haya presentado en el periodo de medición.

Mediante el empleo de pluviómetros y pluviógrafos es posible calcular la altura de precipitación que se haya presentado en el embalse. Del mismo modo con el uso de evaporímetros colocados en el embalse se calcula el total de evaporación en el periodo de medición.

Una vez que se tiene la información de la altura de precipitación y la evaporación, el volumen correspondiente se calcula multiplicando las láminas obtenidas por el área media correspondiente a la elevación que se haya presentado en el embalse. La determinación de las áreas se realiza mediante el empleo de las curvas elevaciones - áreas - capacidades de cada uno de los almacenamientos.

Los registros de precipitación y de evaporación correspondientes a las presas Valle de Bravo, Villa Victoria y del Bosque fueron obtenidos en la CAVM, con los siguientes periodos de registro:

Tabla 7 Periodo de Registros de Precipitación y Evaporación en los Embalses del Sistema

Presas	Periodos de registro
Valle de Bravo	1969 - 1989
Villa Victoria	1961 - 1990
Del Bosque	1952 - 1989

Como puede observarse en la tabla anterior los registros tienen un atraso de 6 años debido a la falta de actualización, pero para fines del análisis se utilizará la información referente a los periodos registrados.

Los registros se presentan en el ANEXO de REGISTROS HIDROLOGICOS.

2.3 Concepción del Sistema Cutzamala.

El proyecto para el aprovechamiento de la cuenca alta del río Cutzamala contempló una parte importante de los recursos hidráulicos superficiales utilizados en la generación de energía eléctrica por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán a elevaciones superiores a los 1,400 m.s.n.m. mediante captaciones en las presas de almacenamiento Villa Victoria y Valle de Bravo, así como en el Vaso Regulador de Colorines, alimentado por un sistema de presas interconectadas que comprende a Tuxpan, El Bosque e Ixtapan del Oro.⁹

Para transportar los caudales de los aprovechamientos mencionados en el párrafo anterior al Valle de México, fue necesario cruzar el Valle de Toluca, la zona más alta de la cuenca del río Lerma, y atravesar la sierra de las Cruces por un túnel.

Los estudios hidrológicos realizados por la CAVM indicaron que de la Presa Villa Victoria se podía aprovechar para agua potable un gasto medio de 4 m³/s, de Valle de Bravo 6 m³/s y de Colorines 8 m³/s. Para la utilización de las aguas del río San José Malacatepec antes de su escurrimiento a la presa Colorines, se planeó la construcción de la presa Chilesdo, con vista a captar un gasto medio de 1 m³/s.

Además de las fuentes mencionadas, se contempló la posibilidad de aprovechar los escurrimientos del río Temascaltepec con un caudal medio anual del orden de los 5 m³/s.

Por otra parte, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) planteó a la CAVM la necesidad de dejar reservas para la generación de energía eléctrica en horas pico en el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, con un gasto a utilizar del orden de 3 m³/s a la altura de Colorines, lo que ofrecería la posibilidad de que las plantas de generación de Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato continuaran operando.⁹

2.3.1 Variables analizadas.

Con el objeto de fundamentar técnica y económicamente la selección más conveniente del acueducto, se analizaron varias posibilidades definidas por variables como: rutas posibles, tiempos de bombeo, gastos por conducir y tipo de conducción.

Se identificaron las diversas rutas factibles atendiendo a: características topográficas, posible ubicación de las obras de toma, plantas de bombeo y planta de potabilización; vías de comunicación; tenencia de la tierra; conducciones existentes y, en general, la infraestructura disponible que facilitara la construcción, operación y mantenimiento del acueducto y de las principales estructuras del Sistema.

El trazo del acueducto mostró que la conducción de agua podía realizarse en base a conducciones superficiales y subterráneas, empleándose las últimas en lugares donde lo abrupto del terreno hacía imposible la conducción superficial. De esta manera, la conducción superficial en canales o a presión se proyectó en función de las condiciones de cada tramo.

La conducción con canales abiertos se utilizó en los tramos donde se consideró poco probable la existencia de extracciones clandestinas de agua, es decir, en zonas donde no se tienen superficies para riego. Para las zonas donde existen áreas de cultivo o localidades de cierta importancia se planteó la necesidad de cubrir la conducción.

Para los tramos de conducción a alta presión, así como las zonas de succión y descarga de las plantas de bombeo se proyectó el empleo de tubería metálica, en tanto en los tramos de baja presión se consideró el empleo de tubería de concreto reforzado.

Para el cruce del macizo de San Martín se proyectó la construcción del túnel Agua Escondida y en la zona de la sierra de las Cruces la construcción de un túnel paralelo al del Sistema Lerma ubicado entre los puntos Atarasquillo y Dos Ríos. Esta ubicación facilitaba la construcción del nuevo túnel, aprovechando el conocimiento previo de las condiciones geológicas de la zona y la posibilidad de contar con acceso a través de las lumbreras del túnel ya existente.

2.3.2 Capacidades de conducción.

Para dimensionar las obras del Sistema, sus capacidades de bombeo y de conducción, se consideró la existencia de una variación estacional en la disponibilidad del recurso,

elaborándose un modelo de simulación que consideraba el óptimo aprovechamiento de los vasos de almacenamiento de Valle de Bravo, Villa Victoria y El Bosque, tanto en época de lluvia como en estiaje, así como la posibilidad de aprovechar al máximo los caudales de avenidas que se derivan de las presas Ixtapan del Oro y Chilesdo, para dar flexibilidad a la operación combinada de la infraestructura del Sistema.⁹

Así, por ejemplo, en época de lluvias es posible enviar hasta 20 m³/s de la presa Colorines a la presa Valle de Bravo con el objeto de incrementar el volumen almacenado o bien enviar hasta 24 m³/s de la presa Valle de Bravo a la ZMCM para conservar el volumen almacenado en la presa Villa Victoria.⁹

2.3.3 Localización de la planta potabilizadora.

Para la localización de la planta potabilizadora se eligieron preliminarmente dos sitios, uno en la cercanía de la presa Villa Victoria, por ser la fuente de abastecimiento que se utilizaría en primer término, y otro en las cercanías de la Ciudad de México. Dichas alternativas de localización se evaluaron económicamente tomando en cuenta los procesos de potabilización, el ahorro en el transporte de productos químicos, el costo del terreno y los problemas para su adquisición.

Después de analizar estos aspectos se llegó a la conclusión de que lo más conveniente era localizar la planta potabilizadora en la vecindad de la presa Villa Victoria, con un proceso de clarificación para las aguas mezcladas de todas las captaciones.⁹

2.3.4 Demandas de energía eléctrica.

Para determinar los requerimientos eléctricos del Sistema se tomaron en cuenta las estaciones de bombeo de Colorines y Valle de Bravo operando a 20 horas/día y la estación de bombeo de Villa Victoria a 24 horas/día, el voltaje de los motores eléctricos a 13.2 KV; la eficiencia de las bombas se estimó en 85% y se consideró un factor de potencia de 0.9. De la suma de los requerimientos eléctricos de los diferentes elementos del Sistema se obtuvo una carga de 291 MW.

En función de los estudios previos realizados sobre las afectaciones al Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, se determinó eliminar las plantas Martínez Meza, Agustín Millán y el Durazno, con lo que la capacidad de este sistema se redujo de 377.2 MW a 316 MW, potencia que no podrá considerarse como carga base, ya que se dispondrá únicamente de un gasto medio de 3 m³/s para las plantas hidroeléctricas de Ixtapantongo y Santa Bárbara y de 5.5 m³/s en Tingambato para generar energía eléctrica exclusivamente en las horas pico.⁹

Conociendo la demanda de energía eléctrica requerida por el Sistema y sus efectos sobre el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán se definió que el suministro de energía a las plantas de bombeo fuera a través de la interconexión de los Sistemas Hidroeléctricos Miguel Alemán e Infiernillo, así como otros del Sistema Interconectado Nacional.

2.4 Obras hidráulicas que integran el Sistema Cutzamala.

2.4.1 Presas de almacenamiento y derivación.

El Sistema utiliza las aguas de las presas de almacenamiento Villa Victoria, Valle de Bravo y El Bosque, así como de las presas derivadoras Tuxpan, Ixtapan del Oro, Colorines y Chilesdo, y se estudia una estructura de este tipo para aprovechar los escurrimientos del río Temascaltepec.

Tabla 8 Características de las presas de almacenamiento y derivación.⁸

Concepto	Villa Victoria	Valle de Bravo	Colorines	Tuxpan	El Bosque	Ixtapan del Oro	Chilesdo
Municipio	Villa Victoria	Valle de Bravo	Valle de Bravo	Tuxpan	Zitácuaro	Ixtapan del Oro	Villa de Allende
Estado	México	México	México	Michoacán	Michoacán	México	México
Elev. Corona m.s.n.m.	2,562.04	1,788.11	1,630.31	1,764.00	1,745.00		2,359.20
Elev. NAME m.s.n.m.	2,560.37	1,785.61	1,629.21	1,762.00	1,743.00	1,635.00	2,359.05
Capacidad útil mill. de m ³	176.51	390.66	1.72	20.00	211.47	0.50	0.80
Año de terminación	1944	1944	1944	1957	1954	1954	1962

2.4.2 Acueducto.

La conducción principal del Sistema parte de la obra de toma de la presa Colorines y llega hasta el portal de salida del túnel Analco-San José con un desarrollo total de 127 kilómetros integrado por 98.5 km de tuberías de concreto y acero, 7.5 km de canal abierto y 21 km de túneles.⁹

La conducción a través de tuberías se integra por 90.5 km de doble tubería de concreto presforzado de 2.51 m de diámetro interior y 8 km de tubería de acero, con diámetros que fluctúan entre 1.37 m y 3.50 m, utilizados en las líneas de presión y en la succión y descarga de las plantas de bombeo.⁹

El canal abierto Donato Guerra inicia en la caja distribuidora Donato Guerra y termina en la entrada del túnel Agua Escondida, es de sección trapezoidal y está revestido de concreto, con plantilla de 3 m de ancho, taludes de 1.5:1, pendiente de 0.0002 y altura libre de 3 m, con un gasto de diseño de 24 m³/s.

El trayecto de la línea principal del acueducto requirió la rehabilitación del túnel el Durazno construido por CFE, que se localiza entre la obra de toma de la presa

Colorines y la Planta de Bombeo No. 2, con una longitud de 2,238 m, así como de la construcción de los túneles Agua Escondida de 3,000 m, localizado entre los municipios Donato Guerra y Villa de Allende, Estado de México, y el túnel Analco-San José de 16,052 m, que atraviesa la Sierra de las Cruces, entre los valles de Toluca y México.⁹

El túnel Agua Escondida, con una capacidad de conducción de 24 m³/s, inicia a continuación del canal abierto, tiene sección herradura de 3.85 m de diámetro revestida de concreto y cuenta con estructuras de transición en los portales de entrada y salida.⁹

El túnel Analco-San José, cuya construcción se inició en 1976, tiene el portal de entrada en el poblado de Atarasquillo, Municipio de Lerma y el de salida en el poblado de Dos Ríos, Municipio de Huixquilucan, ambos en el Estado de México.⁹

Para este túnel se habilitaron dos lumbreras pertenecientes al Sistema Lerma de 210 m de profundidad cada una, y se excavó una tercera de 30 m de profundidad que permitieron tener mayor número de frentes de trabajo.⁹

En la lumbrera No. 3 se alojaron los mecanismos de control para distribuir el agua hacia el Macrocircuito del Norte y el Acuaférico del Sur, que la conducen hacia los municipios conurbados del Estado de México y al Distrito Federal respectivamente.⁹

La sección hidráulica de este túnel es de tipo portal, revestida de concreto, tiene 4.60 m de diámetro, 4.25 m de altura, pendiente de 0.00067 y puede conducir un gasto de hasta 34 m³/s.

Adicionalmente, el Sistema cuenta con una línea de 12 km de longitud que parte de la presa Chilesdo para conectarse con la tubería principal del acueducto, en las aproximaciones de la planta potabilizadora. Esta línea se integra de doble tubería de concreto presforzado de 1.22 m de diámetro con 8.5 km de longitud y de tubería de acero con diámetros que fluctúan entre 1.52 y 2.51 m en una longitud de 3.5 km.⁹

Al utilizar la infraestructura del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, se aprovechan también 73.50 km de canales, túneles y sifones en la conducción de la presa Tuxpan a la presa Colorines, así como 13 km del canal Héctor Martínez Meza, que conduce el agua de la presa Villa Victoria a la planta potabilizadora.⁹

En la siguiente tabla se hace la diferenciación de las obras de conducción que originalmente pertenecieron al SHMA y pasaron a formar parte del Sistema Cutzamala, así como las conducciones construidas especialmente para este Sistema.

Tabla 9 Longitudes de conducción en las estructuras principales.⁹

ORIGINAL SISTEMA HIDROELECTRICO MIGUEL ALEMÁN		longitud
C O N D U C C I O N		de conducción (m)
Obra de toma de la presa Tuxpan	a presa el Bosque	22,000.000
Obra de toma de la presa El Bosque	a presa Ixtapan del Oro	39,500.00
Presas Ixtapan del Oro	a presa Colorines	12,000.000
TOTAL		73,500.00
ADICIONAL SISTEMA CUTZAMALA		
C O N D U C C I O N		
Obra de toma de la presa Colorines	a torre de sumergencia 2	8,381.66
Planta de bombeo 2	a torre de sumergencia 3	3,947.98
Planta de bombeo 3	a torre de sumergencia 4	2,891.37
Planta de bombeo 4	a vaso regulador "Donato Guerra"	5,775.00
Canal "Donato Guerra"		7,586.52
Túnel "Agua Escondida"		3,000.00
Portal de salida de túnel "Agua Escondida"	a planta potabilizadora "Los Berros"	3,131.96
Planta potabilizadora "Los Berros"	a portal de entrada túnel "Analco-San José"	76,095.00
Túnel "Analco-San José"		16,052.00
Obra de toma de la presa "Chilesdo"	a conexión al acueducto principal del sistema	12,031.52
Obra de toma de la presa "Villa Victoria"	a planta potabilizadora "Los Berros"	12,951.24
TOTAL		151,844.25

2.4.3 Plantas de bombeo.

El Sistema cuenta con seis plantas de bombeo que alojan en su interior conjuntos motor-bomba, válvulas de mariposa en la succión, válvulas esféricas en la descarga, juntas de compensación, conexiones, piezas especiales, tableros de control, compensadores estáticos (en las plantas de bombeo No. 3, 4 y 5), grúas viajeras, subestaciones eléctricas en el exterior y múltiples de succión y descarga.⁹

Las seis plantas de bombeo en su conjunto están integradas por 35 bombas, teniendo 29 de ellas una capacidad unitaria de 4m³/s y las 6 restantes una capacidad unitaria de 1.7 m³/s. Todas estas bombas son centrifugas horizontales de doble succión, de dos pasos en las plantas de bombeo No. 2 y 3, y de un paso en las plantas de bombeo No. 1, 2, 5 y 6, y están conectadas con motores eléctricos de inducción a 13.8 y 4.16 kV.⁹

Para alimentar los motores se requirió de equipo eléctrico especial integrado por 6 tableros con tensión de 13.8 kV, uno por cada planta, 36 tableros para servicios

especiales en baja tensión, 38 controladores electrónicos programables y 6 subestaciones eléctricas.⁹

Tabla 10 Características de las plantas de bombeo.⁹

Planta No.	Elev. Eje de Descarga m.s.n.m.	Gasto por Unidad m ³ /s	Número de Unidades	Gasto por Planta m ³ /s	Carga m	Potencia Unitaria		Potencia Planta	
						KW	Hp	KW	Hp
1	1,571.30	4.0	5	20.0	157.3	7,960	10,670	39,800	53,350
2	1,723.00	4.0	6	24.0	121.6	5,550	7,440	33,300	44,640
3	1,833.95	4.0	6	24.0	349.3	16,500	22,118	99,000	132,708
4	2,177.75	4.0	6	24.0	349.3	16,500	22,118	99,000	132,708
5	2,497.00	4.0	6	24.0	174.2	7,960	10,670	47,760	64,020
5A	2,497.00	1.7	3	5.1	*174.20	3,170	4,249	9,510	12,747
6	2,323.13	1.7	3	5.1	*275.00	4,200	5,630	12,600	16,890
TOTAL					1151.90			340,970	457,063

*No se incluyen en el bombeo total.

Tabla 11 Capacidad actual de las plantas de bombeo.⁹

Planta No.	Número de Unidades	Gasto por Unidad m ³ /s	Capacidad actual m ³ /s			
			Sin equipo de reserva		Con 1 equipo de reserva	
			Horas de operación		Horas de operación	
			24	20	24	20
1	5	4	20	16.7	16	13.3
2	6	4	24	20	20	16.7
3	6	4	24	20	20	16.7
4	6	4	24	20	20	16.7
5	6	4	24	20	20	16.7
5A	3	1.7	5.1	4.3	3.4	2.8
6	3	1.7	5.1	4.3	3.4	2.8

2.4.4 Torres de sumergencia y oscilación.

Cada planta de bombeo cuenta con una torre de sumergencia y una de oscilación que son estructuras cilíndricas de concreto reforzado.

La función de las torres de oscilación y de sumergencia es minimizar el fenómeno del golpe de ariete, que se produce tras el arranque o paro de los equipos de bombeo, provocando en las tuberías, grandes variaciones de la presión que de no ser controladas producirían graves daños en éstas. Adicionalmente, las torres de

sumergencia proporcionan la carga y la cantidad de agua que necesitan los equipos de bombeo para su arranque.

Como casos especiales en la función de estas estructuras cabe mencionar que la sumergencia en los equipos de la Planta de bombeo No. 5 es proporcionada por el tanque de aguas claras de la planta potabilizadora. En el caso de la Planta de bombeo No. 6, para controlar el fenómeno del golpe de ariete, se instaló una tubería de concreto presforzado de 2.50 m de diámetro y 270 m de longitud que siguiendo la inclinación de la ladera funciona como estructura de oscilación.⁹

Tabla 12 Características de las torres de oscilación.⁹

CONCEPTO	1	2	3	4	5	6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	2.50
Espesor de pared (m)	2.25	1.60	1.20	1.20	1.50	
Altura total (m)	62.00	51.00	37.00	37.00	45.80	45.00
Elevación de plantilla de la torre (m.s.n.m.)	1,740.00	1,885.00	2,200.00	2,528.00	2,665.00	2,524.00

Tabla 13 Características de las torres de sumergencia.⁹

CONCEPTO	1	2	3	4	5	6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00	Tanque	6.00
Espesor de pared (m)	0.65	1.50	1.50	1.00	de	0.45
Altura total (m)	20.00	47.00	47.00	32.00	Aguas	19.00
Elevación de plantilla de la torre (m.s.n.m.)	1,620.24	1,751.00	1,862.00	2,206.00	Claras	2,349.00

2.4.5 Planta potabilizadora.

La planta potabilizadora Los Berros recibe los caudales captados por el Sistema y logra que el agua suministrada a la ZMCM cumpla con la calidad requerida. El proyecto integral de esta planta contempla un tanque de recepción de aguas crudas, 6 canales Parshall, 6 módulos de potabilización, un tanque de recepción de aguas claras, un edificio de dosificación de sulfato de aluminio, una planta de cloración, un sistema de tratamiento de lodos y un laboratorio para análisis físicos, químicos y bacteriológicos, donde se toman muestras cada dos horas del agua en las diferentes etapas del proceso, logrando con este conjunto de elementos una capacidad para procesar hasta 24 m³/s, una vez que se concluya la cuarta etapa.⁹

Actualmente la planta potabilizadora cuenta con 5 módulos de 4 m³/s para una capacidad total de 20 m³/s, encontrándose en etapa de construcción el sexto módulo.

2.4.6 Vaso regulador Donato Guerra.

Los estudios de factibilidad técnica y económica del Sistema consideraron una operación de 20 horas día para las Plantas de bombeo No. 1, 2, 3 y 4 con el propósito

de facilitar la generación de energía eléctrica en las horas de mayor demanda y de permitir a su vez el mantenimiento y la reparación de las estructuras y equipos.

Esto motivó la construcción del vaso regulador Donato Guerra para el suministro ininterrumpido de agua a la planta potabilizadora mediante un almacenamiento que cambiara de un régimen de bombeo de 20 horas/día a un régimen de 24 horas/día, con una capacidad total de 770,000 m³ y una capacidad útil de 300,000 m³, una cortina de sección homogénea y protección de enrocamiento con altura máxima de 17 m, longitud de 410 m, corona de 8 m de ancho y taludes 3:1.⁹

2.4.7 Caja de distribución Donato Guerra.

Es una estructura derivadora de concreto formada por dos cámaras; una principal con vertedor lateral y otra de conexión al vaso Donato Guerra. Está controlada por ocho compuertas deslizantes que permiten enviar agua tanto al canal Donato Guerra como al vaso regulador Donato Guerra y a su vez recibirla del vaso para continuar la conducción por el canal.

2.4.8 Tanques de almacenamiento.

Con objeto de asegurar el suministro de agua potable a la ZMCM durante posibles interrupciones esporádicas, se construyó el tanque Pericos, que se encuentra situado entre la Planta de bombeo No. 5 y el túnel Anaico-San José, cerca de la Ciudad de Toluca. Este tanque, con una capacidad de 200,000 m³, fue construido a base de concreto reforzado y cuenta para su operación con 4 válvulas de mariposa de 2.50 m de diámetro.⁹

Con el mismo objetivo se tienen en proyecto 3 tanques con capacidad de 100,000 m³ cada uno, localizados uno en el municipio de Huixquilucan y dos en el municipio de Naucalpan.⁹

2.4.9 Estructuras vertedoras.

El funcionamiento hidráulico del Sistema, basado en bombeos en serie, requiere de sistemas de seguridad en sus instalaciones, siendo de éstos las estructuras vertedoras localizadas en el túnel El Durazno y en las torres de sumergencia No. 3 y 4. Estas estructuras tienen por objeto encauzar segura y adecuadamente el derrame de la columna de agua en caso de parar el bombeo de una estación mientras operan las plantas localizadas aguas abajo de ésta.

2.4.10 Suministro de energía eléctrica.

El Sistema se alimenta por una línea doble de 400 KV que va desde la Planta Hidroeléctrica Infiernillo, en el Estado de Michoacán, hasta la subestación eléctrica de Nopala, en el Estado de México. Para esto se construyó la subestación reductora

Donato Guerra de 400 a 115 KV que suministra la energía a las seis Plantas de bombeo del Sistema.⁹

En cada una de las seis Plantas de bombeo se construyó una subestación eléctrica reductora de 115 KV a 13.8 KV tipo intemperie, para obtener el voltaje de operación de los motores de las bombas.⁹

2.5 Etapas y funcionamiento del Sistema.

A partir de las fuentes de aprovechamiento de agua conformadas por las presas Villa Victoria, Valle de Bravo, Chilesdo, Colorines y la cuenca del río Temascaltepec (en estudio), se ha desarrollado la infraestructura requerida para captar, elevar, potabilizar y conducir 24 m³/s hasta la ZMCM.

2.5.1 Etapa I.

Las obras del Sistema se iniciaron en 1976 con la construcción del túnel Analco-San José, para continuar tres años después con las correspondientes a la captación de Villa Victoria, que entró en funcionamiento en 1982, con un gasto medio de 4 m³/s.

2.5.2 Etapa II.

En 1987 se concluyen y entran en operación las obras para aprovechar 6 m³/s provenientes de los escurrimientos de la cuenca de la presa Valle de Bravo, cuya conducción requirió la puesta en marcha del túnel Analco-San José.

2.5.3 Etapa III.

Hacia 1992 inicia la operación de captación en la presa Chilesdo para obtener un gasto medio de 1 m³/s y en 1994 se dispone de la infraestructura para el aprovechamiento de 8 m³/s en promedio de la presa Colorines.

2.5.4 Etapa IV.

Con la ejecución del proyecto para el aprovechamiento de 5 m³/s de la cuenca del río Temascaltepec, se alcanzará la capacidad de diseño de las obras del Sistema en conjunto con un gasto de 24 m³/s.

2.5.5 Captación Villa Victoria.

El agua de la presa Villa Victoria es conducida por gravedad a través del canal Héctor Martínez Meza a la planta potabilizadora Los Berros. En esta presa, la única del Sistema que puede abastecer por gravedad a la planta potabilizadora, se conserva un volumen permanente de agua suficiente para abastecer la demanda total por un mes en caso de falla, principalmente en la conducción Valle de Bravo-Planta potabilizadora.

2.5.6 Captación Valle de Bravo.

El agua de la presa Valle de Bravo es conducida por gravedad a través de tuberías de concreto presforzado y acero a la conexión con la torre de sumergencia No. 2 y al múltiple de succión de la Planta de bombeo No. 2. Desde aquí el agua es impulsada por esta planta a su correspondiente torre de oscilación a través de una tubería doble de acero venciendo una carga de 122 m. De este punto, el agua continúa por dos tuberías de concreto presforzado conectadas, antes de llegar al múltiple de succión de la Planta de bombeo No. 3, y a su respectiva torre de sumergencia. Después el agua es bombeada por esta planta hacia la torre de oscilación No. 3 por dos tuberías de acero, venciendo un desnivel de 350 m. De esta torre, mediante una tubería doble de concreto, el agua fluye por gravedad hacia la Planta de bombeo No. 4, conectándose como en el caso de la Planta de bombeo No. 3 a la torre de sumergencia.

Con la planta de bombeo No. 4 se vence una carga de 350 m hasta la torre de oscilación mediante una tubería doble de acero, de donde el agua es conducida por otra tubería doble de concreto presforzado hasta la caja distribuidora Donato Guerra que alimenta durante el tiempo de bombeo tanto al canal abierto Donato Guerra como al vaso regulador del mismo nombre. El agua conducida por el canal abierto llega al túnel Agua Escondida, de cuya terminación parten dos tuberías de concreto hasta la estructura de conexión con las tuberías provenientes de la presa Chilesdo, donde se combinan para entrar al tanque de recepción de aguas crudas de la planta potabilizadora.

2.5.7 Captación Chilesdo.

El agua captada mediante la presa Chilesdo es conducida por una tubería de acero a la Planta de bombeo No. 6 y a su torre de sumergencia, que la impulsa hacia la estructura de oscilación venciendo una carga de 275 m. A partir de esta continua por gravedad a través de una tubería doble de concreto que se conecta a la conducción precedente de Valle de Bravo a la planta potabilizadora.⁹

Con esta obra se reducen notablemente los costos de operación al evitar que las aguas del río Malacatepec escurran hasta la presa Colorines, ya que las cargas de bombeo desde su captación a la planta potabilizadora son 213 m para Chilesdo y 980 m para Colorines.⁹

2.5.8 Captación Colorines.

El agua de la presa Colorines proviene del sistema de interpresas Tuxpan-El Bosque-Ixtapan del Oro, mediante el cual la presa derivadora Tuxpan envía el agua por un canal a la presa El Bosque, donde es almacenada y enviada a la presa Colorines mediante túneles y canales, incorporándose en el trayecto las aportaciones de la presa derivadora Ixtapan del Oro.

En la presa Colorines se construyó un canal de llamada revestido de concreto y una estructura que aloja ocho compuertas deslizantes para regular las extracciones. De la obra de toma a la torre de sumergencia No. 1 el agua es conducida por dos líneas de

tubería de concreto presforzado y de esta torre a la Planta de bombeo No. 1 por una tubería de acero. Desde aquí el agua es bombeada a la torre de oscilación venciendo una carga de 157 m por medio de una tubería de acero que constituye la rampa de presión más larga del Sistema y cruza dos barrancas por medio de tubos puente. A partir de esta torre el agua es conducida por gravedad mediante dos líneas de tubería de concreto hasta su conexión con el túnel El Durazno, para continuar por tuberías de acero y concreto hasta la torre de sumergencia No. 2 y la Planta de bombeo No. 2 ó bien a la presa Valle de Bravo.⁹

2.5.9 Proceso de potabilización.

La potabilización se realiza por un proceso de clarificación mismo que contempla las unidades de: desinfección y mezcla rápida, floculación, sedimentación y filtración.

El agua proveniente de las presas que integran el Sistema llega a un tanque de concreto formado por dos cámaras donde se mezclan las aguas crudas; a partir del tanque las aguas se conducen a través de los canales Parshall, donde se mide el caudal y se inicia el proceso de potabilización al adicionar sulfato de aluminio como coagulante y cloro como desinfectante y para controlar el desarrollo de organismos en las siguientes unidades del proceso.

Posteriormente, el agua se conduce a 6 módulos de potabilización con capacidad de 4 m³/s cada uno, continuando el proceso en la unidad de floculación, donde el agua se agita lentamente con paletas de eje horizontal, pasando a la unidad de sedimentación, cuyos tanques están equipados con placas paralelas de asbesto cemento separadas 5 cm entre sí y con una inclinación de 60 grados.⁹

Estas placas propician la precipitación de los grumos en suspensión, depositándolos en forma de lodo en el fondo de los tanques, de donde son extraídos mediante un succionador suspendido de un flotador que los recoge longitudinalmente y descarga a un canal lateral para finalmente llevarlos a la planta de tratamiento de lodos.

Después de la sedimentación de lodos, el agua es conducida al área de filtración que consiste en 8 tanques conformados por lechos de grava y arena sílica con un fondo falso de losas con boquillas microranuradas.⁹

La eficiencia de estos lechos es mantenida periódicamente mediante un proceso de retrolavado que consiste en inyectar agua y aire a presión en sentido inverso al flujo normal de filtrado de agua.

El agua descargada por los filtros es conducida al tanque de recepción de aguas claras que es una estructura de concreto reforzado dividida en dos cámaras con una capacidad de 48,000 m³ cada una.⁹

El agua de lavado de filtros, así como los lodos extraídos de los sedimentadores son conducidos por gravedad a los concentradores de lodos, donde se acelera su espesamiento mediante la dosificación de polímeros; de aquí el lodo es bombeado a un tanque de lodos para almacenarlo y el agua decantada se envía por bombeo a la entrada de la planta potabilizadora.

2.5.10 Conducción Planta potabilizadora - Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Una vez potabilizada, el agua se descarga en el tanque de aguas claras que sirve de regulador y da sumergencia a los equipos de la Planta de bombeo No. 5 mediante una tubería de acero.

La Planta de bombeo No. 5 cuenta con 6 equipos de 4 m³/s y 3 equipos de 1.7 m³/s que permiten bombear distintos caudales de agua potable para su envío a la Ciudad de México.⁹

Con esta planta y mediante una tubería de acero se vence una carga de 174 m hasta la Torre de oscilación No. 5, el punto más alto de la conducción del Sistema.

A partir de la torre de oscilación No. 5 el agua fluye por gravedad a través de dos tuberías de concreto presforzado que terminan en el portal de entrada del túnel Analco-San José.

En este tramo de la conducción se cruza la barranca Los Berros y el río Lerma mediante dos tubos puente de acero con longitud de 210 y 63 m respectivamente; aquí también se localizan las cajas rompedoras de presión denominadas Santa Isabel y Pericos.⁹

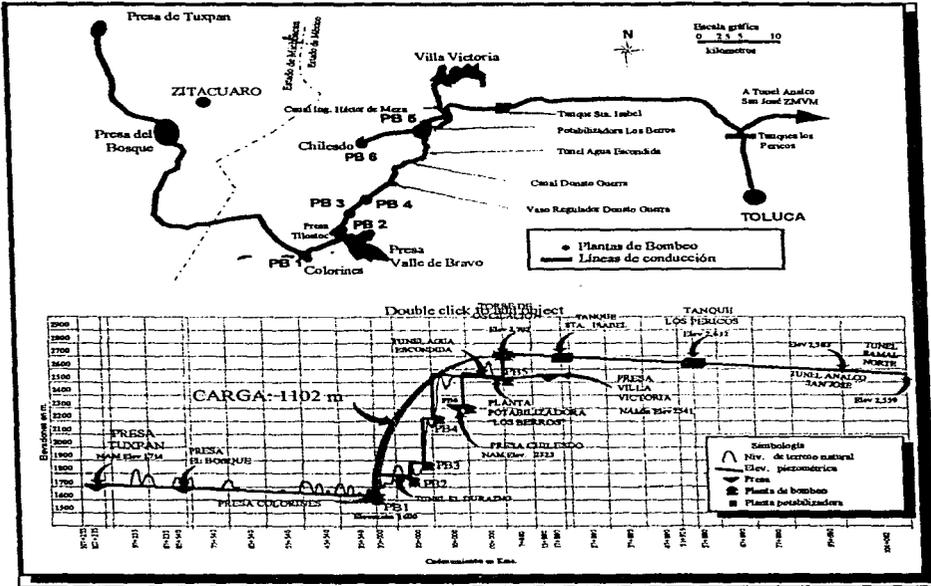
Contiguo a esta última caja se construyó el tanque de almacenamiento de agua potable Pericos de 200,000 m³ de capacidad, del que parte una derivación con capacidad de 1 m³/s hacia la Ciudad de Toluca.⁹

Asimismo, se construyó en el sitio denominado Cruz de la Misión una derivación hacia el acueducto Lerma.

A continuación el agua fluye por el túnel Analco-San José hasta la lumbrera No. 3. A partir de este punto se inicia la distribución del líquido a la ZMCM.

En la siguiente figura se presenta la planta general y el perfil del Sistema Cutzamala conteniendo algunos datos básicos de proyecto.

Figura 11 Planta y perfil del Sistema Cutzamala.



2.6 Procedimientos constructivos utilizados en el Sistema.

Los procedimientos constructivos del Sistema abarcaron la excavación de túneles, la instalación de tuberías de concreto y acero, el montaje de los motores y las válvulas de las plantas de bombeo, la construcción de torres de oscilación y de sumergencia, la ubicación de la planta potabilizadora y la construcción de tanques de almacenamiento, entre otras.

2.6.1 Túneles.

Los túneles del Sistema son: Agua Escondida, Analco-San José y Ramal Norte de 3,000, 16,000 y 12,500 m respectivamente, haciendo un total de 31.5 Km.⁹

Estos túneles fueron excavados mediante el método tradicional de barrenación, voladura, carga y rezaga. En los tramos donde se presentaron fallas geológicas se colocaron marcos de acero con tornapuntas como ademe, anclajes con barras de acero y concreto neumáticamente lanzado para estabilizar las paredes y el techo.⁹

El retiro del material de rezaga producto de la excavación se efectuó generalmente con cargadores frontales, góndolas de ferrocarril o camiones de volteo. En algunos casos esta actividad se desarrolló elevando el material 200 metros a través de las lumbreras por medio de malacates y torres de manto.⁹

El desalojo del agua de filtración se efectuó comúnmente a través de los portales de salida y entrada, y en ocasiones por las mismas lumbreras por las que se extraía el material de rezaga.

El revestimiento de los túneles consistió en la colocación de concreto hidráulico por medio de bombas que reciben el concreto de camiones revolvedores, provenientes de plantas premezcladoras .

2.6.2 Líneas de conducción.

El Sistema ha requerido 200 Km de tuberías de concreto presforzado de 2.50 m de diámetro para cargas de hasta 150 metros de columna de agua, atravesando serranías, planicies y lagunas; necesitándose estructuras especiales para cruzar ríos, barrancas e instalaciones existentes y utilizándose en algunos casos piloteado y tubos-puente de acero.⁹

En las rampas de baja y alta presión y los múltiples de succión y descarga, se utilizaron tuberías de acero con diámetros variables desde 1.37 m hasta 3.50 m. Estas líneas de tubería fueron fabricadas con acero de importación A-514 en múltiple de descarga y rampa de alta presión para la Planta de bombeo No. 5. El resto del acero fue de manufactura nacional, utilizándose A-299 en los múltiples de descarga, A-516 en partes de rampas de alta presión y A-285 en otros conductos.⁹

El proceso constructivo de las líneas de conducción se inicia con la localización y en trazo, considerando una faja suficientemente ancha que permita alojar el camino de construcción y operación, las áreas de almacenamiento e instalación de tubería y las áreas para las maniobras del equipo de excavación e instalación.

Para la excavación de zanjas se utilizaron retroexcavadoras y en presencia de roca explosivos; por el contrario, en los tramos de terreno de baja capacidad de carga, como la laguna de Lerma, se construyeron terraplenes de material granular capaces de soportar el peso de la tubería llena de agua.⁹

Las líneas de tubería de concreto presforzado se probaron físicamente junta por junta e hidrostáticamente en tramos completos empleando la carga específica de diseño.

En las tuberías de acero las pruebas no destructivas, tanto de soldadura como de la pintura de acabado, fueron realizadas por el Instituto Mexicano del Petróleo,

empleándose radiografías en el 100% de las uniones, excepto en lugares inaccesibles en cuyo caso las pruebas se realizaron mediante ultrasonido.⁹

2.6.3 Plantas de bombeo.

Excepto la Planta de bombeo No. 5, cuya estructura es de concreto reforzado, el resto de las plantas se construyeron con estructura metálica, muros y techos de elementos prefabricados y entresijos de concreto.⁹

En cada planta de bombeo se instaló una grúa viajera con capacidad suficiente para maniobrar adecuadamente los equipos en el caso de montaje y desmontaje.

2.6.4 Torres de oscilación y sumergencia.

El procedimiento constructivo de las torres de oscilación y sumergencia fue similar para todas las torres, con variaciones en casos particulares.

La cimentación de las torres consiste en una zapata de concreto reforzado, diseñadas para resistir las presiones ejercidas por la columna de agua y las fuerzas sísmicas que se puedan presentar. En el caso de las Torres de sumergencia No. 2 y 4 hubo necesidad de efectuar un tratamiento al terreno a base de lechada con cemento-arena con el fin de proporcionar mayor resistencia al mismo y garantizar la estabilidad de la cimentación, así como una transmisión uniforme de cargas.

Los cuerpos de las torres fueron construidos de concreto reforzado, empleando en su ejecución el procedimiento de cimbra deslizante para obtener un cuerpo monolítico, sin presencia de juntas frías que en un momento determinado puedan ser superficies de falla. Lo anterior debido a la magnitud y uso de las estructuras que deben soportar las presiones generadas por la columna de agua, además de impedir la ocurrencia de filtraciones hacia el exterior.⁹

2.7 Capacidad del Sistema Cutzamala para abastecimiento de agua potable.

2.7.1 Simulación hidrológica del Sistema Cutzamala.

El objetivo del análisis de la simulación hidrológica es encontrar un conjunto de decisiones asociado a cada alternativa propuesta que minimice la probabilidad de falla del aprovechamiento. La comparación de alternativas que cumplan con este requisito permite, finalmente, decidir cuál es la más conveniente a la vista de uno o más criterios de ordenamiento.

Para determinar el caudal aprovechable de la cuenca del río Cutzamala, se realizó una simulación hidrológica con la información disponible de las distintas estaciones hidrométricas. Los escurrimientos de las corrientes más importantes de esta cuenca se pueden aprovechar a través de las captaciones que se tienen en las presas de almacenamiento Villa Victoria, Valle de Bravo y El Bosque, así como de las presas derivadoras Tuxpan, Ixtapan del Oro, Colorines y Chilesdo. El conjunto de presas logran almacenar un total de 800 millones de metros cúbicos de agua.

2.7.1.1 Información Disponible.

a) Presas de almacenamiento.

Se cuenta con los levantamientos batimétricos de las presas Villa Victoria, Valle de Bravo y El Bosque. Estos levantamientos se realizaron en los años de 1991 y 1993. Se presentan las curvas elevaciones - áreas - capacidades para cada una de estas presas, ya que juegan un papel importante en la determinación de parámetros como la evaporación y la precipitación en el embalse analizado.

b) Escurrimientos de las corrientes aprovechadas.

Se cuenta con información hidrométrica de las entradas a los vasos Villa Victoria, Valle de Bravo y El Bosque durante el período 1958 a 1994; sin embargo en cálculo hidrométrico sólo cubre el período 1958 a 1985.

Para los ríos San José Malacatepec e Ixtapan del Oro, se dispone de registros hidrométricos para el período de 1955 a 1985.

c) Precipitación y evaporación mensuales.

Se cuenta con los registros de evaporación y precipitación mensuales de los vasos Villa Victoria, Valle de Bravo y El Bosque, de los cuales en promedio se tienen registros hasta de 30 años de antigüedad.

2.7.1.2 Descripción general del modelo de simulación.

El modelo de simulación SISIVA¹¹ está orientado al análisis de sistemas de aprovechamiento hidráulico constituidos por vasos de almacenamiento, centros de demanda y una red de acueductos que interconectan entre sí a los vasos de almacenamiento y a estos con los centros de demanda.

Mediante la utilización del modelo SISIVA es posible, a través de un proceso iterativo, definir la magnitud de los vasos de almacenamiento, la capacidad de los acueductos y las políticas de operación necesarias para lograr el aprovechamiento más eficiente de los recursos hidráulicos disponibles en los diferentes usos a que se pretenda dedicarlos.

La base del modelo la constituyen por una parte, la ecuación de continuidad de los volúmenes que entran y salen de un vaso de almacenamiento y, por otra, la intercomunicación entre dichos vasos y los centros de demanda, que impone modificaciones a las condiciones que existirían de tratarse de vasos operando en forma aislada.

¹¹ "SISIVA, Sistema de Simulación de Vasos", Elaborado por la empresa Análisis y Proyectos de Ingeniería, S.A. de C.V.

El modelo contempla la posibilidad de que uno o más vasos puedan auxiliar a otros en la satisfacción de sus demandas. Asimismo, se contempla la posibilidad de que ciertas salidas de un vaso puedan ser entradas a otro.

Cabe mencionar que el análisis de alternativas de aprovechamiento de las aguas de una cuenca involucra manejar dos tipos de variables: las primeras, son el resultado de fenómenos naturales sobre los que no se tiene control y las segundas que son decisiones que toma el hombre. Las primeras presentan un carácter aleatorio, lo que las hace impredecibles y sólo pueden manejarse en términos probabilísticos.

La variable natural más significativa en el análisis del aprovechamiento de una cuenca es el escurrimiento de los ríos, la cual se obtiene usualmente a partir del Registro Histórico de las corrientes, esto es cuando se tienen registros que comprendan períodos de medición mayores a 20 años, ya que cuando no se cuenta con períodos grandes es aconsejable proceder a generar registros sintéticos. Esta variable puede entenderse como el resumen de todas las variables naturales que concurren para producirla (lluvia, forma de la cuenca, red de drenaje, etc.). De esta manera para el análisis y empleo de la Técnica de Simulación que consiste en preparar un conjunto de datos (escurrimientos de los ríos) con ocurrencia simultánea, suponer la toma de un conjunto de decisiones a-priori (tamaño de presas, capacidades de acueductos, política de operación) y simular la operación del sistema observando los resultados obtenidos, para finalmente evaluar estos resultados para cada una de las alternativas analizadas.

Una descripción del funcionamiento del modelo se presenta en el ANEXO REGISTROS HIDROLOGICOS.

2.7.1.3 Planteamiento para el modelo hidrológico.

A continuación se enuncian las diferentes consideraciones tomadas para el planteamiento de las corridas de simulación:

La presa Villa Victoria únicamente cuenta con la entrada de los escurrimientos por cuenca propia.

Las entradas a la presa Valle de Bravo están conformadas por su escurrimiento por cuenca propia y por el gasto proveniente de la presa Colorines.

La presa Del Bosque cuenta con dos aportaciones, sus escurrimientos por cuenca propia y el gasto conducido por el canal Tuxpan - Bosque.

Los escurrimientos mensuales de los ríos Ixtapan del Oro y San José Malacatepec se consideraron llegando a Colorines, dado que la presa Chilesdo, que capta aproximadamente 2/3 partes de la cuenca del río San José Malacatepec, lleva 4 años en operación y se cuenta solamente con esos años de escurrimientos captados y conducidos de Chilesdo a Valle de Bravo.

Se sabe que en la presa Del Bosque se tienen infiltraciones que la Gerencia de Operación del Sistema Cutzamala estima entre 0.5 y 1 m³/s, dependiendo del

almacenamiento de la presa. Desafortunadamente no se contó para este análisis con registros de dichas infiltraciones.

La demanda total del Sistema se compone de: demanda de riego, demanda de agua potable y demanda para generación de energía eléctrica.

En todos los casos la demanda de riego se consideró de $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, la cual se satisface a partir de la presa Del Bosque.

A la presa Villa Victoria se le asigna solamente la demanda para agua potable.

La demanda de la presa Valle de Bravo está integrada por la correspondiente al abastecimiento de agua potable a la ZMCM y un caudal de hasta $3 \text{ m}^3/\text{s}$ para la generación de energía eléctrica comprometidos con el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Los niveles de agua en las presas con los que inició la simulación no fueron los correspondientes al total de la capacidad de almacenamiento, ya que para tener un panorama lo más cercano a la realidad se debía considerar que los niveles en las presas deberían ser diferentes para cada una de ellas, además de no estar completamente llenas.

Con la finalidad de aprovechar al máximo los derrames de la presa Del Bosque, en las épocas en que estos se presenten, se introdujeron a la conducción hacia Colorines hasta un máximo de $2.60 \text{ m}^3/\text{s}$, los cuales junto con la salida controlada de la presa Del Bosque y los escurrimientos no controlados de los ríos Ixtapan del Oro y San José Malacatepec pueden llegar a consumir la capacidad de bombeo en la planta de bombeo No. 1. La capacidad de bombeo instalada es de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ y se consideró que la máxima sería $18 \text{ m}^3/\text{s}$ con una operación diaria de 24 horas en las épocas de avenidas.

Otra razón de haber introducido los derrames a la conducción hacia Colorines, fue el considerar que al derramarse el agua en la presa Del Bosque pierde toda utilidad tanto para el Sistema Cutzamala, como para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. En cambio si los derrames son conducidos a la presa Colorines se tienen dos opciones de aprovechamiento: la primera mencionada anteriormente, corresponde a la capacidad del sistema de bombeo y en la segunda, los derrames conducidos desde la presa Del Bosque se convierten en derrames de la presa Colorines pasando a formar parte del agua aprovechada por el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Las demandas de cada presa al iniciar un año de simulación se fijaron en función del volumen almacenado en el año anterior con el objeto de estar del lado de la seguridad. Así, en caso de haberse presentado un año con escurrimientos medios o bajos no se pone en peligro al almacenamiento si se llegara a repetir un año seco. Estas demandas se disminuyeron en un porcentaje prestablecido variando en cada uno de los almacenamientos.

Tabla 14 Volúmenes de almacenamiento y porcentajes de demanda de las presas para la simulación del funcionamiento del Sistema Cutzamala

Presa	Volumen almacenado miles m ³	% Demanda	Volumen total miles m ³	Volumen muerto miles de m ³	Volumen inicial miles de m ³
Del Bosque	> 85,000	100	211,470	20,759	150,000
	85,000>V>60,000	95	211,470	20,759	150,000
	60,000>V>30,000	80	211,470	20,759	150,000
	<30,000	40	211,470	20,759	150,000
Colorines	>10	100	1,600	1	800
	10>V>5	100	1,600	1	800
	5>V>3	100	1,600	1	800
	<3	100	1,600	1	800
Villa Victoria	>73,000	100	176,511	64,000	100,000
	73,000>V>50,000	88	176,511	64,000	100,000
	50,000>V>30,000	75	176,511	64,000	100,000
	<30,000	50	176,511	64,000	100,000
Valle de Bravo	>200,000	100	390,655	30,000	210,000
	200,000>V>150,000	100	390,655	30,000	210,000
	150,000>V>120,000	100	390,655	30,000	210,000
	<120,000	97	390,655	30,000	210,000

2.7.1.4 Políticas de operación.

Los vasos de Villa Victoria y Valle de Bravo son considerados vasos terminales, esto es, que sobre ellos se ejerce la demanda de agua del Sistema. Las deficiencias mensuales y anuales, se calculan considerando la aportación sumada de ambas presas contra la demanda total. Cuando cualquiera de ambas presas no puede suministrar su demanda correspondiente, se aporta agua desde la otra. El déficit anual permitido en los vasos terminales no debe exceder al 5% de la demanda total anual.

En la presa Villa Victoria se trata de mantener niveles altos debido a que en esta presa se debe almacenar un volumen tal, que permita abastecer al Sistema durante un mes en caso de que la conducción Valle de Bravo - Planta Potabilizadora llegara a fallar.

La demanda de cada una de las presas del Sistema estará en función del volumen almacenado el año antecedente con el fin de prevenir el agotamiento de las mismas en caso de presentarse un año medio o bajo en escurrimientos.

Cuando por reducción de las aportaciones a las presas del Sistema, se presenten deficiencias en el abastecimiento de agua potable, se reduce la extracción de generación de energía eléctrica con el objetivo de mantener el almacenamiento de las presas Villa Victoria y Valle de Bravo, así como garantizar el suministro de agua potable a la ZMCM.

2.7.2 Resultados obtenidos.

Con base en la información disponible, el planteamiento del Sistema y las políticas de operación, se efectuaron diversas simulaciones en las que se variaron las demandas de las presas Del Bosque, Colorines, Valle de Bravo y Villa Victoria hasta encontrar la combinación que cumplió con un déficit máximo anual del 5% en los vasos terminales.

La demanda de agua potable y de generación de energía eléctrica se consideraron de la misma prioridad y mediante combinaciones de ambas se crean las opciones de aprovechamiento que se presentarán más adelante.

Los resultados obtenidos de la simulación para un período de 28 años de las tres primeras etapas del Sistema Cutzamala se muestran a continuación:

Tabla 15 Resultados de la simulación hidrológica para las condiciones del Sistema Cutzamala etapas 1, 2 y 3.

Presa	Almto. miles m3	Entrada por cuenca propia miles m3	Entrada por derrames miles m3	Entrada del sistema miles m3	Derrames miles m3	Salida al sistema miles m3	Salida de riego miles m3	Evaporación miles m3	Déficit miles m3
Bosque	201970	146895	8194	0	46601	257147	18345	8102	2417
Colorines	1	131728	0	257147	5728	391362	0	8	81678
Villa Victoria	162354	154465	0	0	11257	126730	0	14252	2042
Valle de Bravo	300942	212430	0	391362	5691	580262	0	14591	0

Valores medios anuales de la simulación hidrológica de las 3 primeras etapas del Sistema Cutzamala durante un periodo de 28 años.

Déficit en el periodo (%)	0.29
Máximo déficit anual (%)	5.07
Número de años con déficit máximo	1
Número de años con déficit continuo	2
Máximo déficit mensual (%)	14.92
Máximo déficit mensual (m ³ /s)	3.33
Número de meses con déficit máximo	2
Número de meses con déficit continuo	6
Gasto medio anual de abastecimiento de agua potable (m ³ /s)	19.47
Gasto medio anual para generación de energía eléctrica (m ³ /s)	3.00

Resultados del análisis de simulación para las 3 primeras etapas del Sistema Cutzamala para un periodo de 28 años, considerando el abastecimiento de agua potable y la generación de energía eléctrica.

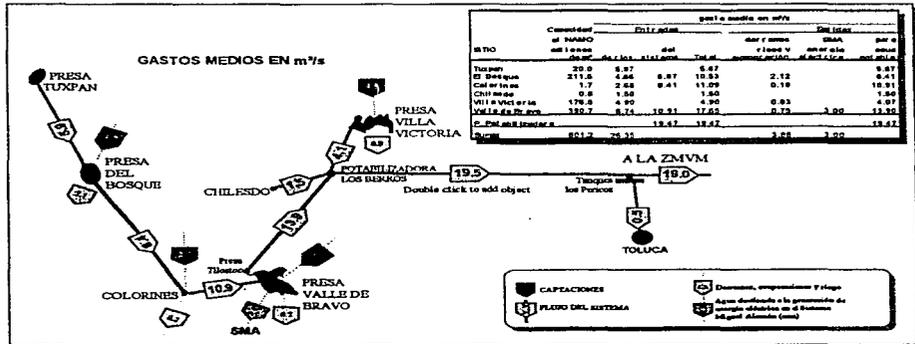
Sitio de captación	Capacidad al NAMO Mm ³	Gasto Medio en m ³ /s					
		Entradas			Salidas		
		De rios	Del sistema	Total	Derrames, riego y evap.	SMA, energía eléctrica	Para agua potable
Tuxpan	20	5.87	0	5.87	0	0	5.87
Del Bosque	211.5	4.66	5.87	10.53	2.12	0	8.41
Colorines	1.7	2.68	8.41	11.09	0.18	0	10.91
Chileado	0.8	1.5	0	1.5	0	0	1.5
Villa Victoria	176.5	4.9	0	4.9	0.83	0	4.07
Valle de Bravo	390.7	6.74	10.91	17.65	0.75	3	13.9
Planta Potabilizadora	*****		19.47	19.47			
Sumas	801.2	26.35			3.88	3	19.47

Balance hidrológico de las tres primeras etapas del Sistema Cutzamala

Los resultados muestran que con los aprovechamientos de las tres primeras etapas del Sistema se cuenta con una captación media anual de un poco más de 26 m³/s, cuyo destino es el siguiente:

- I. 3.9 m³/s en derrames, evaporación y riego.
- II. 3.0 m³/s reservados para la generación de energía eléctrica del Sistema hidroeléctrico Miguel Alemán.
- III. 19.5 m³/s para el abastecimiento de agua potable, con una deficiencia del 0.29% en todo el período de simulación. (la simulación hidrológica genera un gasto ligeramente mayor al normalmente asociado hasta la tercera etapa de 19 m³/s).

Figura 12 Balance hidrológico del Sistema Cutzamala, etapas 1, 2 y 3



2.8 Obras complementarias requeridas para una operación continua y confiable.

La simulación hidrológica realizada se basó en un funcionamiento adecuado del Sistema, es decir que sus instalaciones sean capaces de proporcionar los gastos de diseño para las que fueron planeadas.

Sin embargo, el Sistema sufre de diferentes problemas en sus conducciones y estructuras principales, así como elementos mecánicos como bombas y piezas especiales, originados principalmente por el uso continuo tras 15 años de operación.

Por lo tanto si se desea alcanzar la capacidad prevista en la tercera etapa del Sistema se deben realizar algunas obras y reparaciones, las cuales se mencionan a continuación:

1. La conducción del agua en el tramo caja reguladora Donato Guerra al portal de entrada del túnel Agua Escondida, se realiza a través de un canal que ha tenido problemas de asentamientos, con lo que disminuye notablemente su capacidad de diseño. Recientemente se tendió una tubería con capacidad de 12 m³/s con lo que se estará en condiciones de conducir, con el apoyo del canal, el agua requerida en las tres primeras etapas. Sin embargo, con el propósito de garantizar la operación en esta parte del Sistema, se planea construir una segunda línea de conducción, paralela a la primera con capacidad de 12 m³/s, con lo que se podrá manejar todo el gasto de diseño, relegando la utilización del canal a labores de emergencia y a periodos de mantenimiento de las nuevas conducciones.
2. Para poder pasar de un régimen de operación de 20 a 24 horas después de la PB4, se proyecta utilizar el vaso regulador Donato Guerra. Dado el costo que implica el bombear el agua hasta ese sitio, es primordial que el vaso se impermeabilice con el fin de minimizar las pérdidas por infiltración.
3. Para operar en forma continua, segura y confiable, se proponen varias medidas en todas las plantas de bombeo como: instalación de válvulas de seccionamiento a la descarga para evitar que ante una falla importante en cualquiera de las válvulas esféricas se tenga que suspender la operación de toda la planta; transformador adicional de potencia y cambios que aseguren que cualquier transformador pueda conectarse con cualquiera de los motores; fontanería, cuchillas de seccionamiento; bus de enlace y celdas de acoplamiento.
4. La Planta Potabilizadora cuenta con cinco módulos de 4 m³/s en operación y se construye un módulo más. Bajo una política de operación de mantener siempre un módulo de reserva para mantenimientos y salidas normales de la operación de los otros módulos, con los cinco módulos se podrán operar sólo 16 m³/s. Por esta razón para alcanzar el gasto previsto para la tercera etapa, será necesario concluir la construcción del sexto módulo.
5. La Planta Potabilizadora necesita, además, algunas modificaciones en varios de sus componentes. Las unidades de dosificación de cloro y sulfato de aluminio, así como las de floculación y sedimentación requieren de algunos cambios para que su operación sea más eficiente ya que en la sedimentación aún se presentan flóculos al final del proceso perjudicando al proceso de filtración.
6. En la PB5 se ha previsto instalar una línea adicional de conducción partiendo de esta y hacia su torre de oscilación, para agregar flexibilidad en la operación e incrementar la confiabilidad del suministro.
7. Actualmente la operación del sistema de bombeo se efectúa manualmente, con base en un sistema de comunicación por voz entre las diferentes plantas de bombeo, actividad realizada debido a que el Sistema se encuentra funcionando por debajo de su capacidad de diseño. Al entrar en operación el total de los equipos de bombeo en la planta de Colorines, las plantas de bombeo 2,3 y 4, comenzarán a

operar muy cerca de su capacidad de diseño, por lo que es conveniente modernizar la operación mediante la instalación de un sistema de comunicaciones y control que, haciendo uso de la tecnología actual, incremente la confiabilidad de la operación.

8. Se recomienda realizar protección catódica de todas las tuberías de acero.
9. Programar y realizar las obras de drenaje y saneamiento de aguas residuales de los poblados que descargan sobre las corrientes que alimentan a las presas de Valle de Bravo, Villa Victoria, Del Bosque, Chilesdo, Ixtapan del Oro y Tuxpan.

2.9 Descripción de las obras que integran el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

El sistema está ubicado en la zona noroeste del Estado de México y se encuentra integrado por tres plantas escalonadas. Estas plantas son fuente de energía eléctrica destinada a satisfacer las necesidades de energía en horas pico en la Ciudad de México y área conurbada.¹²

El SHMA aprovecha la corriente de los ríos Malacatepec e Ixtapan del Oro, pertenecientes al Estado de México y a los ríos Tuxpan y Zitácuaro, del Estado de Michoacán. Los ríos mencionados son afluentes del Cutzamala, que a su vez lo es del río Balsas. Para el aprovechamiento de las aguas de estos ríos se cuenta con diversas obras que en forma general se pueden citar como sigue:

Presa Villa Victoria.

Se encuentra ubicada en el río Malacatepec y tiene por objeto descargar hacia la presa Tilostoc.

Presa Valle de Bravo.

Ubicada sobre el río del mismo nombre, descarga al río Tilostoc. El agua es conducida para su aprovechamiento a la planta El Durazno.

Presa Tilostoc.

Ubicada en la confluencia de los ríos Malacatepec y Valle de Bravo (formadores del río Tilostoc), tiene por objeto regularizar y decantar las aguas de la cuenca libre del río Malacatepec, disminuyendo la acumulación de azolve en los vasos aguas abajo de Colorines, Ixtapantongo, Santo Tomás y Pinzones.

¹² "Clasificación del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, Cuenca del río Cutzamala", México D.F., Mayo 1979.

Presas el Durazno.

Recibe las aguas de la presa Tilostoc, así como de la planta El Durazno, descargando una parte del caudal hacia la presa Ixtapantongo y otra hacia la presa Colorines.

Presas Tuxpan.

Se encuentra ubicada sobre el río Tuxpan, y sus aguas son conducidas hasta la presa del Bosque.

Presas Del Bosque.

Ubicada sobre el río Zitácuaro, descarga al vaso regulador de Colorines y de aquí a las plantas de Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato.

Presas Colorines.

Presas reguladoras la cual recibe las aguas de las presas Valle de Bravo, Tilostoc y del Bosque, para después conducir las a la planta de Ixtapantongo.

Presas Ixtapantongo.

Este vaso recibe las aguas de la presa El Durazno y de la planta Ixtapantongo para su conducción y aprovechamiento en la planta Santa Bárbara.

Presas Santo Tomás.

Esta presa sirve de regularizadora principal, pues además de recibir las aguas ya reguladas que salen de la planta de Santa Bárbara, se controlan totalmente las aguas del río Ixtapan del Oro que confluye con el Tilostoc en el extremo aguas arriba del vaso formado. Las aguas de esta presa son conducidas a la presa de Los Pinzones.

Presas de Los Pinzones.

El caudal recibido por esta presa es conducido para su aprovechamiento en la planta Tingambato, descargando al río Temascaltepec, el cual se une con el río Tilostoc para finalmente confluir con en el río Cutzamala.

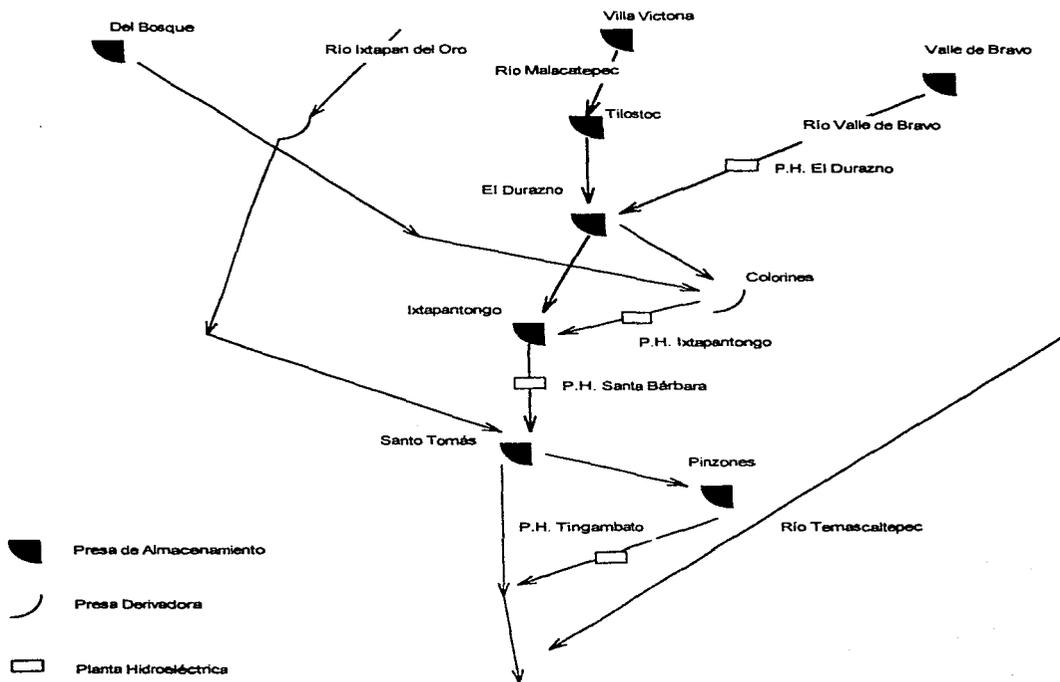
El Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán estaba formado en un principio por 6 plantas generadoras, las cuales en conjunto tenían una capacidad instalada de 370,675 KW.

Pero al aceptarse el proyecto del Sistema Cutzamala, únicamente las plantas Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato continuarían operando debido a que solamente se dejaría una reserva de agua para su operación, adicionalmente la operación de la planta El Durazno quedó condicionada para aprovechar los derrames de la presa Valle de Bravo en los periodos en que estos se presentaran.

Tabla 16 Capacidad instalada original y actual del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Planta	Capacidad Instalada Original K.W.	Capacidad Instalada Actual K.W.
Ing. Héctor Mtz. de Mesa	25,200	Fuera de Servicio
Agustín Millán	18,900	Fuera de Servicio
El Durazno	18,000	Variable
Ixtapantongo	106,000	104,000
Santa Bárbara	67,575	67,575
Tingambato	135,000	135,000
TOTAL	370,675	306,575

Figura 13 Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.



Esquema del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán

Capítulo 3

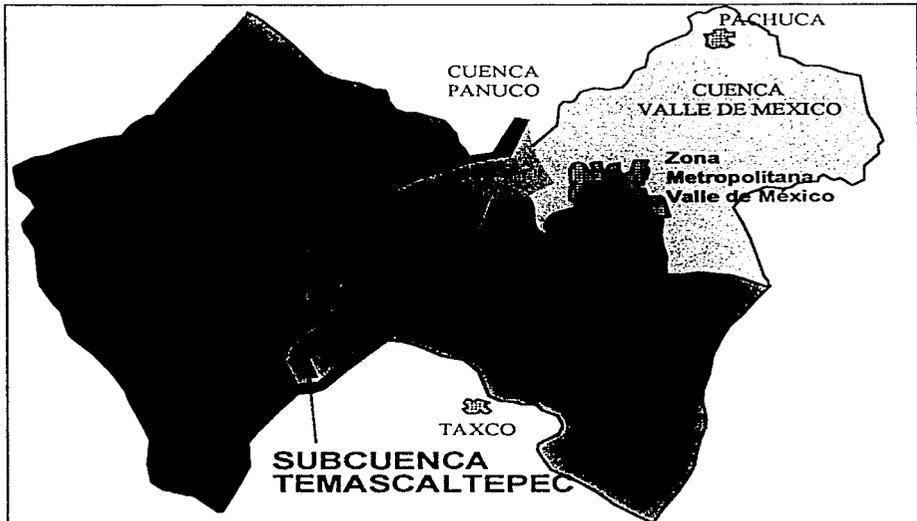
3. AMPLIACIÓN DEL SISTEMA CUTZAMALA

3.1 Aprovechamiento del Río Temascaltepec.

3.1.1 Antecedentes.

El proyecto de ampliación del Sistema Cutzamala surge, por una parte, de la necesidad de incrementar el suministro de agua a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y, por otra, de que la infraestructura instalada permite, con algunas adaptaciones, pasar de un gasto de $19 \text{ m}^3/\text{s}$ a $24 \text{ m}^3/\text{s}$. El incremento se planteó originalmente haciendo más grande el área de captación con la cuenca alta del Río Temascaltepec que aportaría un gasto medio de $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 14 Cuenca del río Cutzamala y subcuenca del río Temascaltepec.



Existen ahora dos elementos adicionales que deben tomarse en cuenta para proyectar la ampliación:

1. Adicionalmente a los 24 m³/s planteados como límite de la cuarta etapa del Sistema Cutzamala, se tiene la opción de abastecer con uno o dos metros cúbicos por segundo a la Ciudad de Toluca.
2. El gasto reservado de 3 m³/s para la generación de energía eléctrica en el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, puede utilizarse parcial o totalmente para agua potable si se asume el correspondiente costo de oportunidad.

3.1.2 Hidrología de la cuenca del río Temascaltepec.

El río Temascaltepec adopta ese nombre en la confluencia de los arroyos Los Quelites, Verde y Colorado. En esta zona se cuenta con cinco estaciones hidrométricas que son:

La Comunidad, Río Verde, Real de Arriba, Temascaltepec y Paso del Cobre (Ver Figura 10 Capítulo 2).

La estación de La Comunidad mide los escurrimientos del arroyo Los Quelites y cuenta con registros con cálculo hidrométrico en dos períodos, de 1959 a 1970 y de 1980 a 1986, reportando un gasto medio de 1.71 m³/s.¹³

La estación Real de Arriba mide el flujo del arroyo Colorado (Río Vado) y cuenta con registros con cálculo hidrométrico de los períodos 1958 a 1970 y 1981 a 1985, el gasto medio anual de esta estación es de 2.05 m³/s.¹³

La estación Temascaltepec mide los escurrimientos aguas abajo del poblado del mismo nombre y cuenta con registros desde la fecha de su instalación en 1973 hasta el año de 1994, sin contar con cálculo hidrométrico los años de 1991 y 1992 y parte de los años 1990 y 1993, el gasto medio anual reportado es del orden de 6.15 m³/s.¹³

La estación Paso del Cobre está ubicada aguas abajo de la estación Temascaltepec y mide los escurrimientos del río del mismo nombre, el área de la cuenca hasta el sitio es de 646.6 Km².

La precipitación y evaporación mensuales se determinaron con los registros de la estación Paso de Cobre. El período de registros cubre desde el año de 1970 hasta el año de 1988.¹³

El registro de escurrimiento de la estación Río Verde abarca el período 1942 a 1958 año en que fue cancelada.

¹³ "Registros de escurrimiento proporcionados por la Comisión Nacional del Agua. Actualización al Boletín Hidrológico Num. 49, Región Hidrológica Num. 18 (Parcial), Cuenca del Medio y Bajo Balsas", Tomo VI, SARH, México, D.F., 1980.

A continuación se presenta la información disponible de las estaciones hidrométricas tomadas en cuenta para el análisis del aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec.

Tabla 17 Información disponible de las estaciones hidrométricas de la cuenca del Río Temascaltepec.¹³

Estación	Corriente	Area (km ²)	Escurrencimiento miles m ³	Periodo Disponible
La Comunidad	Río Verde	122.3	53,890.56	1959-1970 1980-1985
Río Verde	Río Verde	222	57,307.53	1942-1958
Real de Arriba	Río Vado	112.6	64,755.00	1959-1970 1981-1985
Temascaltepec	Temascaltepec	415.2	194,086.00	1973-1994

Con base en los escurrimientos y las áreas contenidos en la tabla anterior, se estimaron los rendimientos de cada una de las subcuencas del Río Temascaltepec, mismos que se presentan a continuación:

Tabla 18 Rendimientos de las subcuencas del Río Temascaltepec.

Estación	Rendimiento miles m ³ /Km ²
La Comunidad	440.64
Río Verde	258.14
Real de Arriba	575.09
Temascaltepec	467.47

Observando los rendimientos anteriores, se observa que la subcuenca del Río Verde presenta rendimientos del orden de la mitad de las otras subcuencas, cuando debería presentar valores parecidos ya que se trata de una cuenca con escurrimientos proporcionales como lo muestran los rendimientos de las subcuencas La Comunidad, Real de Arriba y Temascaltepec.

Lo anterior se puede deber a un aforamiento defectuoso, y a que la estación tiene más de 35 años de haber sido suspendida y ningún año de su registro coincide con los de las otras subcuencas.

Para asignarle un rendimiento a la subcuenca del Río Verde, se estimaron los rendimientos de los diferentes periodos disponibles de registro de cada estación, resultando que la estación de La Comunidad presentaba la mínima diferencia entre periodos haciéndola la más uniforme, razón por la cual se le asignó su rendimiento a la subcuenca del Río Verde.

Para la estación hidrométrica Real de Arriba y con el fin de uniformizar los rendimientos, se estimó el correspondiente al segundo periodo de sus registros disponibles abarcando el periodo de 1981 a 1985, resultando un rendimiento de

485.98 miles m^3/Km^2 , mismo que se utilizó para la estimación de los escurrimientos aprovechables.

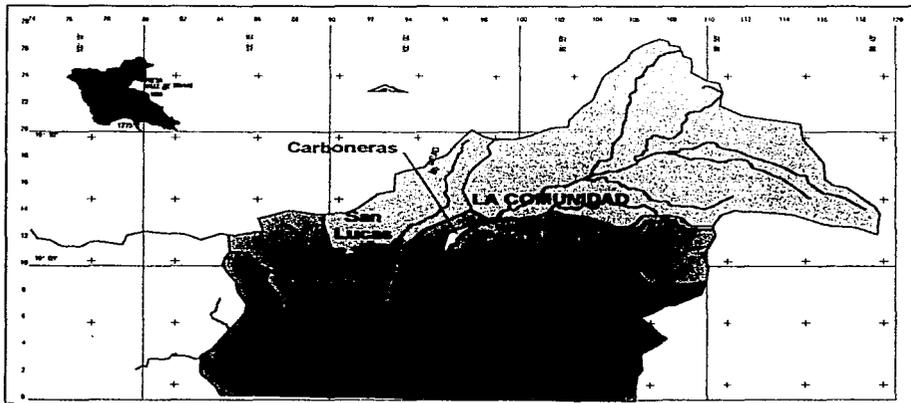
De esta manera los rendimientos correspondientes a cada una de las subcuencas del Río Temascaltepec tomaron los siguientes valores:

Tabla 19 Rendimientos asignados a las subcuencas del Río Temascaltepec.

Estación	Rendimiento miles m^3/Km^2	Gasto medio m^3/s
La Comunidad	440.64	1.71
Río Verde	440.64	3.10
Real de Arriba	485	1.72
Temascaltepec	467.47	6.15

Nota: Los gastos medios fueron obtenidos mediante la relación de áreas y rendimientos de las subcuencas.

Figura 15 Subcuencas del río Temascaltepec.



Para cada sitio de proyecto se calcularon sus áreas de cuenca, se generaron sus registros de escurrimiento en base a la subcuenca a la que pertenecían y a la relación de áreas con respecto a la estación de Temascaltepec.

La forma en que se generaron los registros de escurrimiento de cada una de las subcuencas es la siguiente:

i. = 1 a Número de años del registro de escurrimiento en la E.H. Temascaltepec

j. = 1 a 12 meses por año.

$$EMSC_{i,j} = \frac{ASC}{ATEM} * [EMTEM]_{i,j}$$

donde:

EMSC.- Esguerrimiento mensual de la subcuenca.

ASC .- Area de la subcuenca.

ATEM .- Area de la cuenca hasta la E.H. Temascaltepec.

EMTEM.- Esguerrimiento mensual en la E.H. Temascaltepec.

El cálculo de los rendimientos y registros por subcuenca se presenta en el ANEXO DE REGISTROS HIDROLOGICOS.

3.1.3 Planteamiento de alternativas y dimensionamiento de obras.

El aprovechamiento de los esguerrimientos de la cuenca del río Temascaltepec consiste básicamente en las obras necesarias para su captación y conducción a la presa de Valle de Bravo, que se encuentra en la elevación 1775 m.s.n.m., y de este sitio incorporarse a la infraestructura existente del Sistema Cutzamala para abastecimiento de agua potable a la ZMCM.

Para tal propósito se identificaron varios sitios de interés a diferentes elevaciones, así como distintos aprovechamientos. Esta identificación se llevó a cabo a partir de las cartas topográficas escala 1:50,000 del INEGI, ya que no se contaba con planos a menor escala.

La revisión de cada sitio, involucró aspectos hidrológicos, topográficos, y económicos, mismos que condujeron a la selección de las alternativas básicas de Captación - Conducción.

Las alternativas analizadas correspondieron a diferentes formas de aprovechar los esguerrimientos mediante obras que permitan alcanzar los 5 m³/s necesarios para llevar a cabo la cuarta etapa del Sistema Cutzamala y agotar la capacidad de diseño de las obras que lo integran.

El dimensionamiento de las obras como presas, canales, túneles y sistemas de bombeo, consistió básicamente en el cálculo de sus principales características hidráulicas y cantidades de obra sin profundizar en su diseño estructural, geotécnico y mecánico, aceptándose en estos algunas hipótesis como resistencia de las estructuras a las cargas actuantes, capacidades de carga del suelo, y eficiencias en los equipos de bombeo.

Cabe mencionar que para el diseño de las obras propuestas se tomaron como base proyectos semejantes contruidos con anterioridad, de esta forma en el caso de las presas; los taludes, anchos de corona, tipos de vertedor, calidad de materiales y costo de las obras fueron obtenidos a partir de la publicación "El Agua y su Aprovechamiento Múltiple, Infraestructura Hidroagrícola, Presas Construidas por la Comisión Nacional del Agua en el período 1989 a 1994".

Para los túneles, se obtuvo información de diámetros construibles y costos de la empresa Ingenieros Civiles Asociados (ICA).

Los canales se diseñaron según las recomendaciones de diseño para obras hidráulicas de la Comisión Nacional del Agua, de la misma fuente se obtuvieron costos índice de canales y tuberías.

3.1.3.1 Alternativa 1: Derivación del Río Temascaltepec.

El sitio de derivación se localiza en la elevación 1,650 m.s.n.m., después de la confluencia de los arroyos Quelite, Verde y Colorado, donde se presenta un gasto medio anual de 6.15 m³/s.

En este sitio podría pensarse en la construcción de una presa de almacenamiento con el fin de regular los escurrimientos del río, además de contar con una obra de toma, conducciones y equipos de bombeo de menor capacidad, mismos que influirían directamente en el costo de las obras. Sin embargo, este almacenamiento no es posible debido a que se tendría que inundar la población de Temascaltepec. Por esta razón fue necesario realizar un análisis hidrológico de los gastos medios diarios en la estación Temascaltepec con el fin de dimensionar la obra de toma de la derivación, misma que contemplara un aprovechamiento del 95% del recurso y un gasto medio anual de 5 m³/s.

A partir de la presa derivadora se localiza un túnel con una longitud total de 7,400 m, después de éste se encuentra ubicada una planta de bombeo que proporciona la carga dinámica necesaria para continuar el recorrido hasta la presa Valle de Bravo.

El recorrido dependerá de las variantes y subvariantes de cada alternativa definiéndose a continuación:

Para la diferenciación de las alternativas se optó por una clasificación decimal, donde: el primer dígito corresponde a la alternativa; el segundo dígito a la variante y el tercero a la subvariante.

Variantes del Sistema.

Variante 1. (Túnel)

Después de la planta de bombeo, la tubería a presión pasa por un túnel y continúa hasta descargar a la entrada del mayor túnel del Sistema, para finalmente entregar el agua a la presa Valle de Bravo.

Variante 2. (Tanque de cambio de régimen)

Después de la planta de bombeo, la tubería a presión descarga en un tanque de cambio de régimen localizado en la cima del trazo de la línea de conducción. A partir del tanque, una línea de tubería por gravedad conduce el agua hasta la entrada del túnel de mayor longitud del Sistema.

Subvariantes del Sistema.

Subvariante 1. (Sin presa de almacenamiento Quelite)

En este caso se consideran los escurrimientos naturales de los arroyos Quelite, Verde y Colorado, es decir, que no se tiene regulación de los escurrimientos, por lo que las obras de captación y conducción deberán diseñarse en función de los análisis de gastos medios diarios, dando como resultado gastos de diseño de mayor magnitud.

Subvariante 2. (Con presa de almacenamiento Quelite).

Al construir la presa El Quelite en la elevación 1,800 m.s.n.m., con una altura de 30 metros y capacidad de 30 mill de m^3 , es posible regular los escurrimientos del arroyo Quelite en un 95% a razón de $0.93 m^3/s$, de esta manera la captación en la derivadora Temascaltepec puede disminuir en $1 m^3/s$, obteniéndose así una reducción en las obras de conducción y bombeo.

Subvariante 3. (Con presa derivadora del río Verde)

La presa derivadora río Verde a la elevación 1,850 m.s.n.m., permite transferir los escurrimientos del río Verde hacia la presa El Quelite aprovechando la capacidad de regulación del vaso.

En este sitio existió la central hidroeléctrica Río Verde de tal forma que es posible utilizar la infraestructura existente como lo son la presa derivadora y el canal de conducción, a los que deben agregarse un sifón y un túnel para completar la transferencia del agua hacia la cuenca vecina del arroyo Quelite.

A continuación se presenta una tabla resumen de las diferentes variantes y subvariantes que conforman las alternativas de derivación del río Temascaltepec.

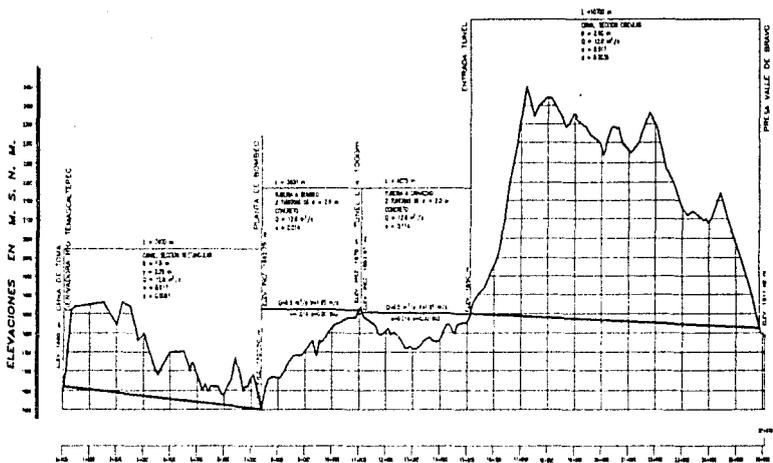
Tabla 20 Alternativas de derivación del río Temascaltepec.

Alternativa	Gasto de Diseño m^3/s	Observaciones:
1.1.1	12	Esta alternativa implica que las obras de toma, conducción y bombeo sean de mayor magnitud, pero no es necesaria la construcción de obras adicionales de regulación.
1.1.2	11	Con la adición de la presa El Quelite se logra disminuir a razón de $1 m^3/s$ las dimensiones de las obras de toma, conducción y bombeo, ya que se tiene regulación.
1.1.3	10	Adicionando las presas Río Verde y El Quelite es posible disminuir a razón de $2 m^3/s$ las obras de toma, conducción y bombeo.
1.2.1	12	La construcción del tanque, desplaza la alternativa del túnel, sin embargo la carga de bombeo es mayor.
1.2.2	11	Disminución en el gasto de diseño con la implicación del bombeo.
1.2.3	10	Disminución en el gasto de diseño con la implicación del bombeo.

Como se observa en la tabla anterior, algunas alternativas implicarán mayores inversiones en conducciones o plantas de bombeo, mientras que otras hacen combinaciones entre obras de regulación y/o derivación con obras de conducción y bombeo. La decisión de la alternativa a seleccionar quedará en función del costo asociado a cada una de estas alternativas.

A continuación se presentan los esquemas de las alternativas de aprovechamiento de la Derivación del río Temascaltepec.

Figura 16 Alternativa 1.1.1



ANALISIS DE ALTERNATIVAS			
E. PROYECTO DE OBRAS			
NO RECONSTRUYE			
PERFIL			
HDRAULICO			
FECHA	08/01/2007	PROYECTO	1.1.1

3.1.3.2 Alternativa 2: Derivación del arroyo Quelite en el sitio Quelite.

Esta alternativa se basa en la construcción de una presa derivadora a la elevación 1,800 m.s.n.m., de sección gravedad, 30 metros de altura y capacidad de 30 mill m³ en el sitio Quelite, ubicado aguas arriba del sitio Derivación Temascaltepec.

Al construir esta presa derivadora, el punto de partida de las obras de conducción corresponden a una cota mayor con respecto al sitio Temascaltepec, dando como resultado cargas de bombeo tres veces menores a la alternativa 1. Por otra parte implica mayores longitudes de conducción y en algunos casos una disminución en el gasto medio de aprovechamiento ya que el área de captación de la cuenca es menor.

La clasificación de las alternativas tiene la misma estructura que la alternativa 1, generándose en este caso dos variantes y tres subvariantes.

Variantes del Sistema.

Variante 1. (Túnel de conducción y planta de bombeo).

A partir de la derivación, el agua se conduce por un túnel y después por una tubería a gravedad hasta la planta de bombeo para continuar por una tubería a presión que descarga en un tanque de cambio de régimen y desde ahí se conduce por medio de una tubería a gravedad hasta el túnel que desemboca en la presa Valle de Bravo.

Variante 2. (Túnel de conducción directo a la presa Valle de Bravo).

A partir de la derivación en la presa El Quelite, da comienzo un túnel de 15.5 Km de longitud, mismo que descarga a la presa Valle de Bravo.

Subvariantes del Sistema.

Subvariante 1. (Derivación de los arroyos Quelite y Verde).

El gasto medio aprovechado del arroyo Quelite es de 1 m³/s, por lo que éste trabajando independientemente es insuficiente. Es por esto que se necesita la derivación del arroyo Verde hacia la presa El Quelite y así, aumentar el gasto del aprovechamiento.

Subvariante 2. (Bombeo del escurrimiento del arroyo Colorado).

Con el propósito de aumentar el gasto medio del aprovechamiento incluyendo al arroyo Colorado en la alternativa, se propuso bombear sus escurrimientos a la altura del sitio de derivación Temascaltepec hacia la presa El Quelite, debido a que este arroyo se encuentra a una elevación demasiado baja para alcanzar por derivación a la presa Quelite.

Subvariante 3. (Bombeo del escurrimiento del arroyo Colorado a la presa del río Verde).

Esta subvariante se configuró con un bombeo en la parte alta de la cuenca antes de alcanzar la confluencia con el arroyo Verde con el fin de no perder carga hidráulica y poder aprovechar su escurrimiento. La subvariante se complementa con un túnel para transferir el agua hacia la cuenca del río Verde, aguas arriba de la derivadora del mismo nombre.

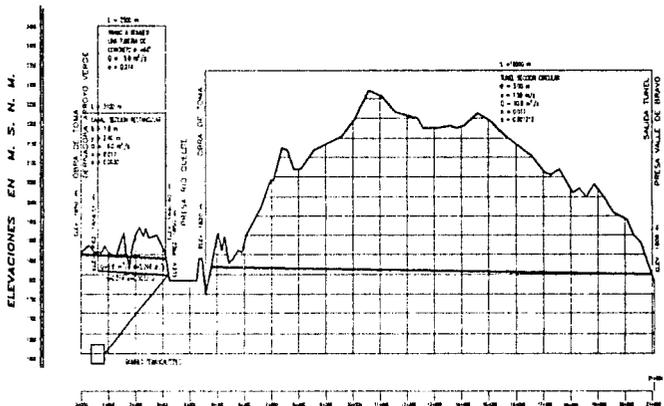
En la siguiente tabla se presenta el resumen con las diferentes variantes y subvariantes que conforman la alternativa de derivación del arroyo Quelite.

Tabla 21 Alternativas derivación río Quelite sitio Quelite.

Alternativa	Gasto de Diseño m ³ /s	Observaciones:
2.1.1	6	Esta alternativa proporciona un gasto medio de 3.5 m ³ /s, pero presenta una carga de bombeo 3 veces menor a la alternativa 1.
2.1.2	10	Al bombear los escurrimientos del arroyo Colorado el gasto medio es de 5 m ³ /s, pero deben realizarse las obras necesarias para dicho bombeo.
2.2.1	10	El gasto medio es de 3.5 m ³ /s, sin embargo en todo el sistema no se tienen bombesos.
2.2.2	10	Al incluirse el bombeo del arroyo Colorado el gasto medio es de 5 m ³ /s, pero deben realizarse las obras necesarias para el bombeo desde el sitio de derivación Temascaltepec.
2.2.3	10	Transfiriendo el agua de la cuenca del río Colorado hacia la derivadora del río Verde mediante un bombeo el gasto medio es de 5 m ³ /s, siendo este el único bombeo del sistema.

A continuación se presentan los esquemas de la alternativa de aprovechamiento de Derivación del arroyo Quelite en el sitio Quelite.

FIGURA 24 Alternativa 2.2.2



ANALISIS DE SECCIONES			
E. PROYECTO: 201			
NO TRANSV. 201			
PERFIL HIDRAULICO			
Fecha:	10/10 - 1987	Escala:	1:1

3.1.3.3 Alternativa 3. Derivación del arroyo Quelite en el sitio San Lucas.

Sobre el río Quelite, aguas arriba del sitio de proyecto El Quelite a una elevación de 2020 m.s.n.m., se forma un vaso de almacenamiento con capacidad aproximada de 15 millones de m³. En este sitio denominado San Lucas es posible derivar el agua hacia la presa Valle de Bravo. La cortina de la presa se ha propuesto de materiales graduados, con corazón impermeable y una altura de 40 metros. Las diferentes alternativas de transferencia tuvieron que ver con la combinación de longitudes de túneles y cargas de bombeo con el fin de obtener la más conveniente. De esta forma y mediante el análisis de costo mínimo, resultó que la mejor combinación de ambos factores estaba dada en la cota 2200, como se muestra en las tablas de comparaciones de longitud - carga, contenidas en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO. Esta alternativa presenta dos variantes siguiendo la metodología empleada anteriormente.

Variante 1. (Derivación de los arroyos Quelite y Verde).

La presa San Lucas, sobre el arroyo Quelite, recibe la aportación de su cuenca propia con un gasto medio de 1.3 m³/s. Al construir una presa derivadora sobre el arroyo Verde denominada Carboneras a la elevación 2,060 m.s.n.m., de sección gravedad y una altura de 25 metros, es posible transferir un gasto medio de 2.5 m³/s desde la cuenca del río Verde hacia la presa San Lucas por medio de un túnel de 1,800 metros de longitud. Al pie de la presa San Lucas, se ubica una planta de bombeo que proporciona la carga suficiente para elevar el agua a través de una tubería a presión hasta la entrada del túnel que la conduce para finalmente descargar en los arroyos que escurren a la presa de Valle de Bravo.

Variante 2. (Derivación de los arroyos Quelite, Verde y bombeo del arroyo Colorado)

Adicionalmente a la captación de la alternativa anterior, se incorpora el escurrimiento del arroyo Colorado. La captación y la transferencia se realiza mediante una derivación y una planta de bombeo localizadas aguas abajo de la población de Temascaltepec, bombeando el agua hasta la presa San Lucas incorporando un gasto medio de 1.5 m³/s.

En la siguiente tabla se presenta una tabla resumen con las diferentes variantes que conforman la alternativa de derivación del arroyo Quelite en el sitio San Lucas.

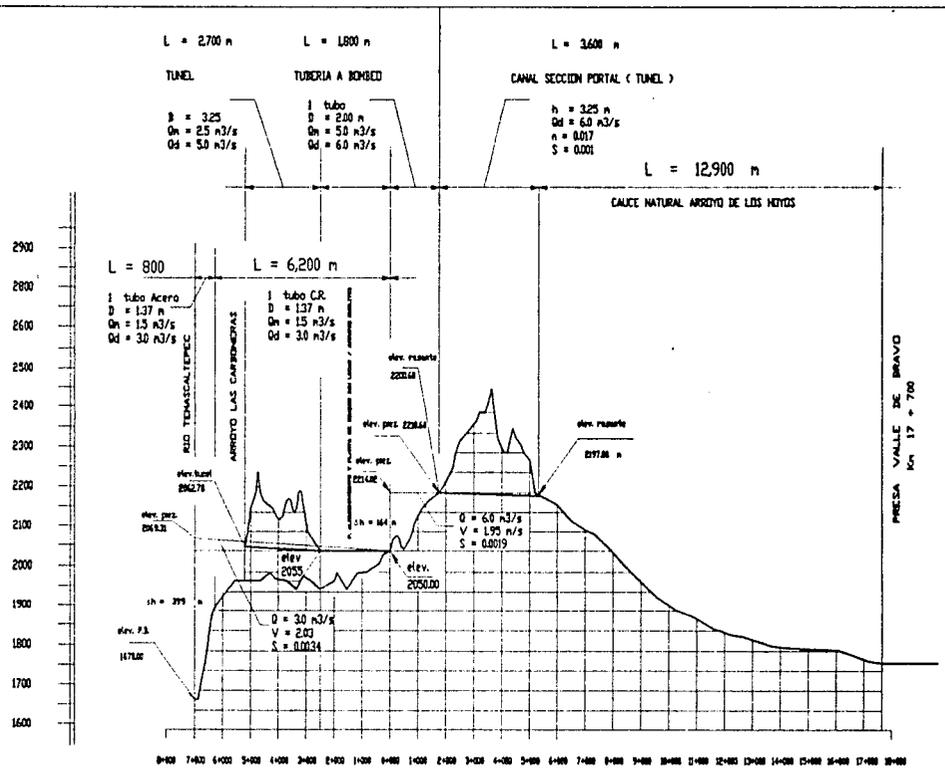
Tabla 22 Alternativas derivación río Quelite en sitio San Lucas

Alternativa	Gasto medio m ³ /s	Observaciones:
3.1	3.5	No obstante que el gasto medio es menor a 5m ³ /s, esta alternativa presenta longitudes de conducción y carga de bombeo menores a las anteriores, además de utilizar el cauce natural de las corrientes para incorporar el agua a la presa Valle de Bravo.
3.2	5	Esta alternativa proporciona un gasto de 5 m ³ /s mediante la adición de un bombeo siendo éste la única diferencia con la alternativa anterior.

A continuación se presenta el esquema de la alternativa de aprovechamiento Derivación del río Quelite en el sitio San Lucas.

Figura 25 Alternativa 3.2

ELEVACIONES EN m.s.n.m.



CADENAMIENTO EN Km

GASTO TRANSFERIDO

0 med = 5.0 m³/s
 0 ds = 6 m³/s

ANALISIS DE ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL RIO TEMASCALTEPEC			
PERFIL HIDRAULICO			
FECHA	HOJA N°	ALTERNATIVA	3.2

3.1.3.4 Alternativa 4. Derivación del río Temascaltepec en el sitio El Tule.

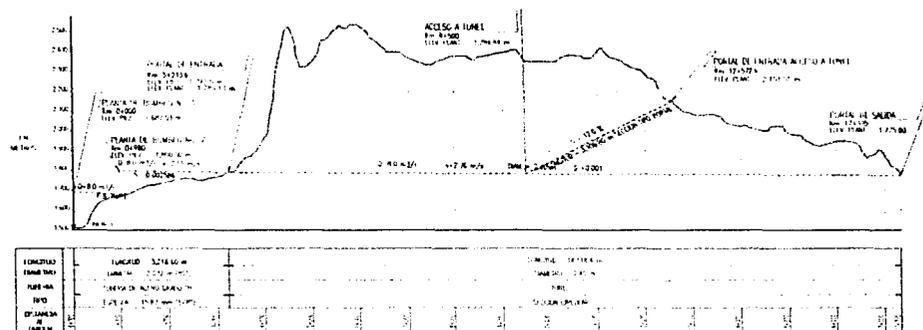
La alternativa de derivación del río Temascaltepec en el sitio El Tule, consiste en la derivación del río Temascaltepec en la elevación 1520 mediante la construcción de una presa de almacenamiento con capacidad de 55 mill m³ propuesta de materiales graduados y una altura de 70 metros denominada El Tule.

En este sitio se determina un escurrimiento medio anual de 8 m³/s, del cual se aprovecharían 5 m³/s.

A pié de presa se localiza una planta de bombeo con el fin de elevar el agua hasta la cota 1,800 mediante una tubería a presión. A partir de este punto comienza un túnel el cual descarga en las cercanías de la presa Valle de Bravo a la elevación 1,775 m.s.n.m.

A continuación se presenta el esquema de la alternativa de aprovechamiento Derivación del río Temascaltepec en el sitio El Tule.

Figura 26 Alternativa 4



3.1.3.5 Alternativa 5. Derivación La Comunidad.

El sitio de proyecto se ubica al sur de la población La Comunidad aguas abajo del río del mismo nombre, en la subcuenca del río Verde a una elevación de 2230 m.s.n.m.

El proyecto cuenta con dos captaciones. La primera corresponde a la presa derivadora La Comunidad con una cortina de sección gravedad de 30 metros de altura.

La segunda captación consta de una presa derivadora localizada en el sitio identificado como Carboneras sobre el río Palo Amarillo, con una cortina de 33 metros de altura de sección gravedad, la cual se incluye para captar los escurrimientos aguas abajo del sitio La Comunidad estimados en 0.8 m³/s.

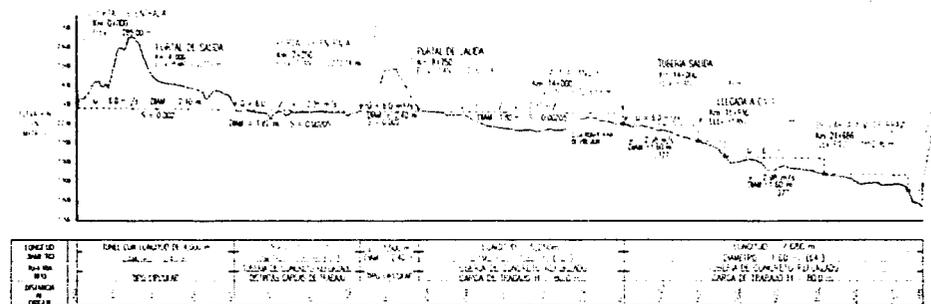
La presa Carboneras cuenta con una planta de bombeo con capacidad de 1m³/s y una carga dinámica de 222 metros, con el fin de descargar en La Comunidad.

La conducción entre Carboneras y La Comunidad es mediante una tubería de acero y otra tubería de concreto de 1,955 y 1,865 metros de longitud respectivamente.

La conducción desde La Comunidad hasta Valle de Bravo, tiene una longitud total de 21,686 metros, contando con 2 túneles y 2 tramos de tubería. Los túneles tienen una longitud de 5,500 metros y la longitud de tubería es de 16,186 metros.

A continuación se presenta el esquema de la alternativa de aprovechamiento Derivación La Comunidad.

Figura 27 Alternativa 5



En la siguiente tabla se presentan las características generales de las alternativas que conforman el aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec.

Tabla 23 Características generales de las alternativas de la cuenca del río Temascaltepec.

Alternativa	Descripción	Gasto		Longitud		Carga
		Medio m ³ /s	Diseño m ³ /s	Tuberías m	Túneles m	Dinámica Total m
1	Derivación río Temascaltepec					
1.1.1	Variante Túnel	5	12	7675	19100	255
1.1.2	Variante túnel, subvariante almacenamiento Quelite	5	11	7675	19100	255
1.1.3	Var. Túnel, sub. almacen. Quelite y derivación a. Verde	5	10	7675	22200	255
1.2.1	Variante Tanque de cambio de régimen	5	12	7675	18100	270
1.2.2	Var. Tanque de cambio de régimen, sub. Alm. Quelite	5	11	7675	18100	270
1.2.3	Var. Tanque, sub. almac. Quelite y derivación a. Verde	5	10	7675	21200	270
2	Derivación del arroyo Quelite					
2.1.1	Var. Túnel y bombeo, sub. derivación a. Verde	3.5	5	11675	19300	90
2.1.2	Var. Túnel y bombeo, sub. Verde y bombeo Colorado	5	10	14175	19300	299
2.2.1	Variante Túnel, sub. derivación a. Verde	3.5	10	0	19600	0
2.2.2	Var. Túnel, sub. der. Verde y bombeo Colorado 1	5	10	2500	19600	250
2.2.3	Var. Túnel, sub. der Verde y bombeo Colorado 2	5	10	600	21300	100
3	Derivación Arroyo Quelite en el sitio San Lucas					
3.1	Derivación arroyos Quelite y Verde	3.5	5	1800	6300	170
3.2	Der. arroyos Quelite, Verde y bombeo en Temascaltepec	5	8	8000	6300	563
4	Derivación del río Temascaltepec en el sitio El Tule	5	8	3200	14200	314
5	Derivación La Comunidad	3	6	20006	5500	222

3.1.4 Estimación de costos y evaluación económica de las alternativas.

A partir de las características de las alternativas y realizando el dimensionamiento y cuantificación de las obras, se calcularon los costos de cada alternativa basándose en precios Índice obtenidos del catálogo de conceptos para obras hidráulicas de la Comisión Nacional del Agua, la publicación "El Agua y su Aprovechamiento Múltiple CNA" y de información proporcionada por la empresa ICA referente a costos de túneles y presas.

Un ejemplo del cálculo de costos por alternativa se presenta en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO.

Una vez calculados los costos de inversión por alternativa, se planteó un panorama de construcción y operación de cada proyecto, que finalmente se consideró de tres años en la etapa de construcción y de 50 años en etapa de operación.

La siguiente etapa consistió en calcular el Valor Presente Neto correspondiente al total de las inversiones, conformadas por la inversión en la construcción y por el cargo anual de bombeo en la operación de los equipos.

La evaluación se realizó calculando el Costo Nivelado del metro cúbico por segundo, asociado a la ampliación del Sistema, de tal forma que se pueda conocer el costo del agua adicional, que se obtendría para cada alternativa. La deducción de este costo se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 VP N &= \sum_{t=1}^n \frac{Vf_t}{(1+i)^t} \\
 VP N &= \sum (p \cdot Q_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t}) = p \cdot \sum_{t=1}^n \left(Q_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \right) \\
 p &= \frac{VP N}{\sum_{t=1}^n \left(Q_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \right)}
 \end{aligned}$$

donde:

VPN = Valor Presente Neto de la inversión en construcción y operación (millones de pesos)

Vf = Valor futuro de la inversión en construcción y operación por año (millones de pesos)

Q = Gasto (m³/s)

p = costo nivelado del gasto (mill \$ / m³/s)

n = período anual.

i = tasa de descuento (%).

Un ejemplo del cálculo del costo nivelado del gasto de las alternativas se presenta en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO.

En la siguiente tabla aparecen los costos nivelados calculados de las alternativas de aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec.

Tabla 24 Costos nivelados de las alternativas de aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec..

Alternativa	Costo Total mill pesos	Inv. Anual mill pesos	VPN inversión mill pesos	Energía KW	Cargo Anual por Bombeo mill pesos	VPN Energía mill pesos	VPN Total mill pesos	Q medio m ³ /s	Costo Nivelado mill \$ / m ³ /s
1.1.1	711	237	569	18,315.14	39	232	801.293	5	27.112
1.1.2	933	311	747	18,315.14	39	232	979.566	5	33.144
1.1.3	1009	336	808	18,315.14	39	232	1040.549	5	35.207
1.2.1	685	228	549	18,315.14	39	232	780.914	5	26.422
1.2.2	908	303	727	18,315.14	39	232	959.217	5	32.455
1.2.3	938	313	751	18,315.14	39	232	982.983	5	33.26
2.1.1	680	227	544	5.036.46	11	64	608.283	3.5	29.402
2.1.2	710	237	569	20.931.80	45	266	834.229	5	28.226
2.2.1	515	172	412	****	0	0	412.004	3.5	19.915
2.2.2	635	212	508	3.139.40	7	40	547.837	5	18.536
2.2.3	593	198	475	1.081.27	2	14	488.751	5	16.537
3.1	278	93	2225	7.785.11	17	99	2323.606	3.5	15.528
3.2	441	147	353	18.970.61	41	241	593.831	5	20.09
4	847	315	758	19.623.84	42	249	1007.62	5	34.09
5	460	153	365	2.901.96	6	35	401.04	2.8	22.615

Costo KW hora 0.245
Tasa de descuento 12%

3.1.5 Selección de las alternativas.

Una vez realizado el análisis económico de las alternativas y partiendo de la tabla anterior, se aceptaron como factibles las alternativas cuyo costo nivelado fuera el mínimo de su grupo ya que estas representan las de menor inversión y costo de operación, con el fin de profundizar en el análisis de las mismas.

Como resultado se observó que algunas de las alternativas cuyo costo nivelado asociado las hacía ver como factibles por presentar los menores índices, tenían problemáticas técnicas y/o sociales que finalmente las hicieron descartar.

A continuación se presenta un resumen de las alternativas analizadas y seleccionadas.

3.1.5.1 Sitio de proyecto Temascaltepec.

La alternativa seleccionada (1.2.1) corresponde a la presa derivadora Temascaltepec, al tanque de cambio de régimen y al escurrimiento natural de los arroyos Quelite, Verde y Colorado. Esta alternativa presenta un índice de costo nivelado igual a 26.4, sin embargo fue descartada después de realizar una simulación hidrológica de la presa donde resultó que debido a la ubicación de la planta de bombeo, en época de avenidas y dada la falta de regulación en la presa podría sufrir de inundaciones afectando a los equipos.

3.1.5.2 Sitio de proyecto El Quelite.

La mayoría de las alternativas del sitio de proyecto El Quelite, presentan índices bajos de costo nivelado. Sin embargo al revisar la topografía del sitio a una escala menor y estudiar la actividad económica del lugar, se observó que el vaso formado no era tan viable debido a que las zonas de inundación correspondían a zonas de riego productivas, mismas que debían ser indemnizadas y reubicadas, elevándose el costo de las alternativas.

3.1.5.3 Sitio de proyecto San Lucas.

La alternativa seleccionada (3.1) tiene un índice de 15.5 lo que la hace altamente atractiva, sin embargo su gasto medio es de 3.5 m³/s teniéndose que obtener el gasto faltante de otra fuente como se verá más adelante. La otra alternativa (3.2) es capaz de proporcionar por sí misma los 5 m³/s, siendo su índice de costo nivelado igual a 20. Ambas alternativas ofrecen diferentes ventajas que se analizarán con el fin de seleccionar la mejor de ellas.

3.1.5.4 Sitio de proyecto El Tule.

La alternativa El Tule, es la de mayor área de captación y ofrece mayor confiabilidad en el suministro del gasto además de contar con volumen de regulación, sin embargo presenta un índice de costo nivelado igual a 34, el mayor de los seleccionados.

3.1.5.5 Sitio de proyecto La Comunidad.

Esta alternativa presenta la ventaja de no necesitar bombeos en un caso o de necesitar el mínimo de bombeo de las alternativas seleccionadas. Su índice de costo nivelado es igual a 22.6. Sin embargo, presenta un gasto medio de 2 a 2.8 m³/s, siendo necesario obtener el faltante del gasto de otra fuente.

Una vez descrito el proceso de selección, los sitios factibles resultantes para el aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec y susceptibles de ser estudiados como opciones de incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala corresponden a:

- San Lucas.
- La Comunidad.
- El Tule.

Presentándose a continuación un esquema con la ubicación de las tres alternativas seleccionadas.

De esta forma, las principales restricciones que existen en la infraestructura del Sistema y los cambios que habría que realizar para la ampliación son los siguientes:

El Sistema en conjunto, bombas, acueductos (con excepción del túnel Analco-San José) y planta potabilizadora, fueron diseñados considerando 24 m³/s como gasto máximo a enviar a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

En consecuencia, la infraestructura de bombeo y de conducción de las plantas de bombeo 5 y 5A localizadas en la planta potabilizadora y hasta el tanque Los Pericos, tienen un gasto medio de referencia de 24 m³/s, así como el sistema de tuberías, las torres de sumergencia y de oscilación que fueron diseñados para esta capacidad.

Aumentar el gasto en este punto del Sistema, implicaría realizar un estudio detallado para identificar los cambios y problemas en el bombeo y conducción. Por esta razón, si se desea abastecer con uno o dos metros cúbicos por segundo a la Ciudad de Toluca, se recomienda hacerlo mediante una planta de bombeo adicional independiente y una nueva línea de conducción a partir de la planta potabilizadora.

Las plantas de bombeo 2, 3 y 4 actualmente cuentan con una capacidad de 20 m³/s manteniendo un equipo de reserva de 4 m³/s, por lo que al entrar en operación la cuarta etapa del Sistema será necesario incrementar su capacidad con un equipo más si se desea mantener una política de operación de 20 horas diarias y un equipo de reserva.

La siguiente tabla muestra los requerimientos de bombeo en las plantas 2, 3 y 4, resultantes de la simulación aplicada al Sistema para diferentes gastos entregados.

Tabla 25 Equipo de bombeo requerido en las plantas 2, 3 y 4 para diferentes ampliaciones del Sistema Cutzamala.

Gasto medio anual en m ³ /s (A)		Gasto medio en época de estiaje en m ³ /s (A) Plantas 2, 3 y 4	Bombas adicionales (B) Para una operación diaria de	
Del Sistema	Plantas 2, 3 y 4		24 horas	20 horas
19.5	13.9	16	****	****
24	18.4	20.5	1	2
25	19.4	21.5	1	2
26	20.4	22.5	1	2

(A) Gastos en 24 horas diarias

(B) Considerando 1 bomba de reserva

La planta potabilizadora que actualmente cuenta con 5 módulos de 4 m³/s, tiene una capacidad de 20 m³/s. Al incrementar el gasto total y con una política de mantener siempre un módulo de reserva para mantenimientos y situaciones imprevistas, será necesario ampliarla en un módulo más para mantener la capacidad prevista en las tres primeras etapas; en dos módulos más para una adecuada operación con un gasto de 24 m³/s y en tres módulos más si el gasto total se incrementa a 25 ó 26 m³/s.

Las principales implicaciones en los componentes del Sistema Cutzamala son las siguientes:

- Adición de módulos en la planta de tratamiento de agua potable.
- Aumento en la capacidad de bombeo de las plantas 2, 3, 4 y 5.
- Incremento en la torre de oscilación 5, o en su defecto la construcción de una nueva.
- Incluir al Sistema un tramo de tubería a partir de la potabilizadora hacia la ciudad de Toluca.

3.2.2 Planteamiento de alternativas.

Las opciones para ampliar el Sistema Cutzamala resultan de combinar las siguientes fuentes:

- La disposición del agua reservada para generación de energía eléctrica en el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, suponiendo que se pueden utilizar 0, 1, 2 y 3 m³/s.
- La captación que se puede obtener en cada uno de los sitios evaluados y seleccionados anteriormente de la cuenca del río Temascaltepec.

La alternativa base que servirá como referencia para la evaluación corresponde al gasto que se puede obtener con las tres primeras etapas concluidas, es decir, considerando un gasto de 19.5 m³/s entregados y destinados a agua potable.

Para definir las opciones de ampliación se adoptó la siguiente estrategia de análisis:

- Identificar el efecto de utilizar el agua reservada para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán en 1, 2 y 3 m³/s, sin considerar ninguna obra en la cuenca del río Temascaltepec, incrementándose gradualmente el gasto entregado hasta llegar a 22.5 m³/s.
- Evaluar varias alternativas de captación en la cuenca del río Temascaltepec combinadas con el aprovechamiento del agua reservada para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán con lo que se pueden completar gastos de 24,25 y 26 m³/s.

Los sitios de captación en la cuenca del río Temascaltepec corresponden a los seleccionados de la evaluación de alternativas de aprovechamiento, presentándose en la siguiente tabla con las variantes consideradas en éste análisis.

Tabla 26 Sitios de captación y opciones de gasto.

Sitio de captación	Opciones para gasto medio de captación en m ³ /s		
La Comunidad	2.0	2.8	5.0
San Lucas	3.5	4.0	
El Tule	5.0	6.0	

De esta forma, fueron 20 las alternativas resultantes (considerando la base) de combinar las dos fuentes de aprovechamiento mencionadas anteriormente, de las cuales se presenta a continuación una tabla resumen con sus características de capacidad de entrega al Sistema Cutzamala.

Tabla 27 Alternativas para el incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala.

Alternativa	Variantes		Destino del agua total captada				
	Aprovechamiento del Temascaltepec m ³ /s	Aportación del SHMA m ³ /s	Total m ³ /s	Energía m ³ /s	Agua Potable		
					Total m ³ /s	ZMCM m ³ /s	Toluca m ³ /s
1 Situación Actual	0.0	0.0	22.5	3.0	19.5	19.5	0.0
Tomando el agua reservada para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán							
2 SHMA 1	0.0	1.0	22.5	2.0	20.5	20.5	0.0
3 SHMA 2	0.0	2.0	22.5	1.0	21.5	21.5	0.0
4 SHMA 3	0.0	3.0	22.5	0.0	22.5	22.5	0.0
Con 2.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción La Comunidad							
5 Comunidad 2.0, SHMA 2	2.0	2.0	24.5	1.0	23.5	23.5	0.0
6 Comunidad 2.0, SHMA 3	2.0	3.0	24.5	0.0	24.5	24.0	0.5
Con 2.8 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción La Comunidad							
7 Comunidad 2.8, SHMA 1	2.8	1.0	25.3	2.0	23.3	23.3	0.0
8 Comunidad 2.8, SHMA 2	2.8	2.0	25.3	1.0	24.3	24.0	0.3
9 Comunidad 2.8, SHMA 3	2.8	3.0	25.3	0.0	25.3	24.0	1.3
Con 3.5 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas							
10 San Lucas 3.5, SHMA 1	3.5	1.0	26.0	2.0	24.0	24.0	0.0
11 San Lucas 3.5, SHMA 2	3.5	2.0	26.0	1.0	25.0	24.0	1.0
12 San Lucas 3.5, SHMA 3	3.5	3.0	26.0	0.0	26.0	24.0	2.0
Con 4.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas							
13 San Lucas 4.0, SHMA 0	4.0	0.0	26.5	3.0	23.5	23.5	0.0
14 San Lucas 4.0, SHMA 1	4.0	1.0	26.5	2.0	24.5	24.0	0.5
15 San Lucas 4.0, SHMA 2	4.0	2.0	26.5	1.0	25.5	24.0	1.5
Con 5.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas							
16 San Lucas 5.0, SHMA 0	5.0	0.0	27.5	3.0	24.5	24.0	0.5
17 San Lucas 5.0, SHMA 1	5.0	1.0	27.5	2.0	25.5	24.0	1.5
Con 5.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción El Tule							
18 El Tule 5.0, SHMA 0	5.0	0.0	27.5	3.0	24.5	24.0	0.5
19 El Tule 5.0, SHMA 1	5.0	1.0	27.5	2.0	25.5	24.0	1.5
Con 6.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción El Tule							
20 El Tule 6.0, SHMA 0	6.0	0.0	28.5	3.0	25.5	24.0	1.5

3.2.2.1 Modificaciones en la infraestructura actual necesarias para cada alternativa.

A cada una de las alternativas propuestas le corresponden determinadas obras necesarias para poder llevarse a cabo, y dentro de éstas se encuentran los proyectos correspondientes a cada sitio de captación de la cuenca del río Temascaltepec, las afectaciones en la generación de energía eléctrica debidas al uso del agua reservada para este fin, así como los cambios requeridos en las obras de infraestructura actual que permitan ampliar el suministro de agua al Sistema.

Cabe mencionar, que las modificaciones deben ser congruentes con la capacidad misma del Sistema descrita anteriormente como "Restricciones y cambio en la infraestructura para la ampliación del Sistema", ya que éstas no pueden sobrepasar los límites físicos fijados originalmente.

En las siguientes tablas se presentan las obras requeridas y las modificaciones a la infraestructura actual, necesarias para llevar a cabo cada una de las alternativas planteadas para la ampliación del Sistema Cutzamala.

Tabla 28 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y afectaciones necesarias para la ampliación del Sistema
1	Situación Actual	Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2
Tomando el agua reservada para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán		
2	SHMA 1	Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 79.1 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5. Aumento en 1 módulo de la planta potabilizadora.
3	SHMA 2	Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 158.3 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.
4	SHMA 3	Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 237.4 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.

Tabla 29 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y afectaciones necesarias para la ampliación del Sistema
Con 2.0 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción La Comunidad		
5	Comunidad 2.0, SHMA 2	<p>Proyecto del sitio La Comunidad Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 188.1 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.</p>
6	Comunidad 2.0, SHMA 3	<p>Proyecto del sitio La Comunidad Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 287.3 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 No se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.</p>
Con 2.8 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción La Comunidad		
7	Comunidad 2.8, SHMA 1	<p>Proyecto del sitio La Comunidad Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 117.4 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.</p>
8	Comunidad 2.8, SHMA 2	<p>Proyecto del sitio La Comunidad Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 196.6 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 No se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5. Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.</p>
9	Comunidad 2.8, SHMA 3	<p>Proyecto del sitio La Comunidad Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 275.7 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5. Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5. Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca. Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>

Tabla 30 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y afectaciones necesarias para la ampliación del Sistema
Con 3.5 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas		
10	San Lucas 3.5, SHMA 1	<p>Proyecto del sitio San Lucas</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 121.8 GWH</p> <p>No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5.</p> <p>Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.</p>
11	San Lucas 3.5, SHMA 2	<p>Proyecto del sitio San Lucas</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 161.2 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5.</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5.</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>
12	San Lucas 3.5, SHMA 3	<p>Proyecto del sitio San Lucas</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 279.9 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5.</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>

Tabla 31 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y afectaciones necesarias para la ampliación del Sistema
Con 4.0 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas		
13	San Lucas 4.0, SHMA 0	Proyecto del sitio San Lucas Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 53 GWH No se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 y 5 Aumento en 2 módulos de la planta potabilizadora.
14	San Lucas 4.0, SHMA 1	Proyecto del sitio San Lucas Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 132.2 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5. Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5. Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca. Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.
15	San Lucas 4.0, SHMA 2	Proyecto del sitio San Lucas Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 211.3 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5 Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5. Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca. Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.

Tabla 32 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y afectaciones necesarias para la ampliación del Sistema
Con 5.0 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción San Lucas		
16	San Lucas 5.0, SHMA 0	<p>Proyecto del sitio San Lucas</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 61.5 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5.</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>
17	San Lucas 5.0, SHMA 1	<p>Proyecto del sitio San Lucas</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 131.9 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5.</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5.</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>
Con 5.0 m³/s de la cuenca del Temascaltepec - Opción El Tule		
18	El Tule 5.0, SHMA 0	<p>Proyecto del sitio El Tule</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 52.9 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5.</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>
19	El Tule 5.0, SHMA 1	<p>Proyecto del sitio El Tule</p> <p>Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2</p> <p>Se dejan de generar 131.9 GWH</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4</p> <p>Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5.</p> <p>Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5.</p> <p>Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca.</p> <p>Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.</p>

Tabla 33 Obras y modificaciones necesarias para la ampliación del Sistema Cutzamala.

No.	Alternativa	Obras, modificaciones y efectuaciones necesarias para la ampliación del Sistema
Con 6.0 m ³ /s de la cuenca del Temascaltepec - Opción El Tule		
20	El Tule 6.0, SHMA 0	Proyecto del sitio El Tule Obras complementarias para una operación continua y confiable mencionadas en el Capítulo 2 Se dejan de generar 63.3 GWH Se necesita aumento en la capacidad de las plantas de bombeo 2, 3, 4 Se necesita aumento en la capacidad de la planta de bombeo 5 Se necesita incrementar la altura de la torre de oscilación 5 Se necesita incluir un tramo de tubería de la Planta Potabilizadora a la Ciudad de Toluca. Aumento en 3 módulos de la planta potabilizadora.

3.2.3 Estimación de costos y evaluación económica de las alternativas.

El objetivo de la estimación de costos y evaluación económica de las alternativas para el incremento del aprovechamiento del Sistema, es calcular el costo de cada una de las alternativas para poder identificar la más conveniente desde el punto de vista económico.

De esta forma, una vez identificadas todas las alternativas y sus correspondientes obras, modificaciones y afectaciones, se procedió al cálculo de las diferentes erogaciones a realizar.

La metodología utilizada en la evaluación económica se enuncia a continuación:

El criterio de evaluación que se utilizó es el costo nivelado marginal o incremental asociado a la ampliación del Sistema, de tal forma que se pueda conocer el costo del agua adicional, que se obtendría con cada alternativa.

El Costo Nivelado Marginal es aquel que al multiplicarlo por el volumen incremental de agua a entregar y después de restarle los egresos incrementales, genera un flujo de efectivo con una tasa interna de rendimiento predefinida, que en este caso es del 12% anual. Este costo se obtiene directamente dividiendo el valor presente neto de los egresos incrementales a una tasa del 12% (VPN), entre el VPN del agua adicional programados durante un período de 20 años.

Los egresos que se incluyen para la evaluación son los siguientes:

- a) Inversiones.
- b) Costos de Operación, Mantenimiento y Administración, distintos de la energía eléctrica.
- c) Provisión para reemplazos y mantenimientos mayores.
- d) Las contribuciones establecidas por la Ley de Mejoras.
- e) Energía Eléctrica. La que se consume y la que se deja de generar.

a) Inversiones.

Las inversiones son principalmente las obras de captación o derivación; las plantas de bombeo; los túneles; las tuberías de conducción; compra de terrenos; obras sociales; indemnizaciones; provisión para la mitigación del Impacto Ambiental; el equipamiento y las obras adicionales que se deben realizar en los componentes actuales del Sistema, como resultado del incremento en el gasto o bien derivados de las acciones de modernización y rehabilitación total del Sistema.

En todas las alternativas se supone que la inversión se realizará durante el período de construcción y que el importe se distribuirá linealmente en dicho período.

b) Costos de Operación, Mantenimiento y Administración, distintos de la energía eléctrica.

Los principales componentes del costo directo de operación y mantenimiento, distinto de la energía eléctrica, son la mano de obra, materiales, refacciones y se dividen en Fijos y Variables.

1. Costos Fijos.

Los costos fijos, en los que se agrupan los sueldos, salarios y prestaciones del personal, materiales, suministros y servicios que no dependen directamente del volumen de agua. Se estiman en 59.2 millones de pesos anuales para las opciones que no incluyen el aprovechamiento del Temascaltepec y en 68.1 millones para las que si lo incluyen.

2. Costos Variables distintos de la energía eléctrica.

En este renglón, el costo más importante dependiente directamente de la cantidad de agua aprovechada, corresponde a los reactivos utilizados en la planta de tratamiento de agua potable aplicados a razón de \$0.24 por metro cúbico de agua.

La integración de los costos fijos y variables se presentan en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO.

c) Provisión para reemplazos y mantenimientos mayores.

Se considera un importe fijo de 120 millones de pesos anuales, más el 1% de la inversión de cada alternativa.

d) Contribuciones.

Las contribuciones establecidas por la Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica (Ley de Mejoras) se estiman en 150 millones de pesos anuales.

e) Energía Eléctrica.

Los costos variables se dividen en energía eléctrica y otros conceptos. El de la energía eléctrica se calcula determinando el consumo del Sistema en GWh y cuantificando el costo dependiendo del horario en el que se realice el consumo.

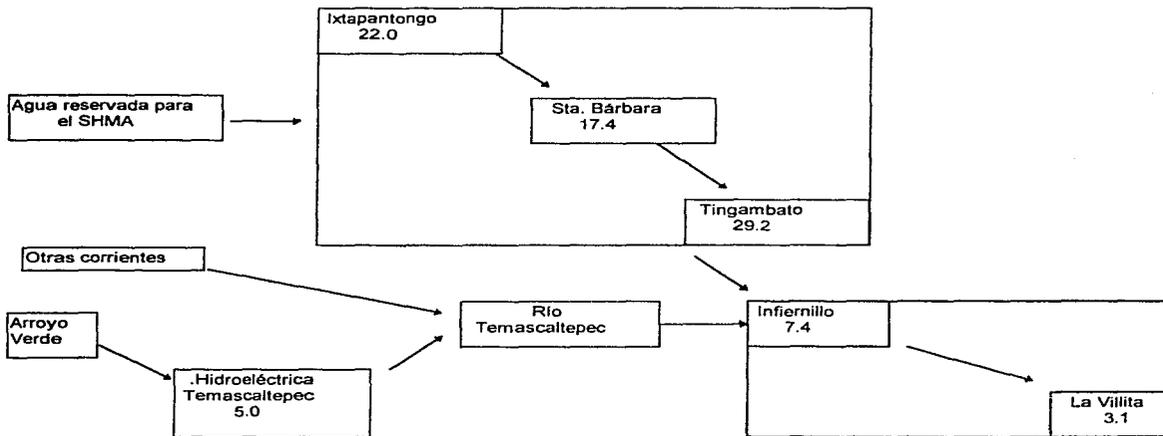
El costo de la energía eléctrica se constituye en el más importante del Sistema. En este, se distinguen dos conceptos de energía: la que se consume y la que se deja de generar. En cada concepto de energía es importante determinar si se trata de energía de base o de punta o alguna combinación de ambas. Para que la evaluación tenga una dimensión económica, el costo de dicha energía debe corresponder al costo de reemplazo, en lugar de utilizar las tarifas vigentes que están subsidiadas.

1. Energía que se deja de generar.

Con la ampliación del Sistema Cutzamala, al utilizar el agua reservada para la generación de energía eléctrica se estarían afectando tres plantas del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán. El uso del agua del río Balsas, por su parte, afecta a dos plantas de la región del río Balsas, mientras que en las alternativas La Comunidad y San Lucas, el uso del agua del arroyo Verde, afecta a la hidroeléctrica del mismo nombre, conocida también como Temascaltepec.

A continuación se muestra el esquema de las plantas de generación de energía eléctrica que utilizan el agua de la cuenca del río Cutzamala, así como la tabla que presenta la afectación anual a la generación de energía eléctrica para las alternativas planteadas.

Figura 29 Generación de energía eléctrica en GWh por m³/s en la cuenca del río Cutzamala.



Los números en cada una de las plantas indican la energía, en Gwh, que se genera con 1 m³/s

Tabla 34 Afectación anual a la generación de energía eléctrica para las alternativas de aprovechamiento.

No.	Alternativa	Sistema Total	Afectación anual a la generación de energía eléctrica para las alternativas de aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala											TOTAL	
		Gasto Tot. Agua Pot. m ³ /s	Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán					Río Verde	SHMA y Río Verde	Región del río Balsas					
			Gasto SHMA m ³ /s	Itapan-tongo 22.03 GWh	Sta Bárbara 17.4 GWh	Tingam-bato 29.17 GWh	Sub Total 68.6 GWh	Verde GWh	Río Verde GWh	Gasto Balsas m ³ /s	Infiernillo 7.43 GWh	3.12 GWh	10.55 GWh		Subtotal GWh
1	Base	19.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	SHMA 1	20.50	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	0.00	68.60	1.00	7.43	3.12	10.55	79.15	79.15
3	SHMA 2	21.50	2.00	44.06	34.80	58.34	137.20	0.00	137.20	2.00	14.86	6.24	21.10	158.30	158.30
4	SHMA 3	22.50	3.00	66.09	52.20	87.51	205.80	0.00	205.80	3.00	22.29	9.36	31.65	237.45	237.45
5	Comunidad 2.0	23.50	2.00	44.06	34.80	58.34	137.20	8.70	145.90	4.20	31.21	13.10	44.31	190.21	190.21
6	Comunidad 2.0	24.50	3.00	66.09	52.20	87.51	205.80	8.70	214.50	5.20	38.64	16.22	54.86	269.36	269.36
7	Comunidad 2.8	23.30	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	8.70	77.30	3.80	28.23	11.86	40.09	117.39	117.39
8	Comunidad 2.8	24.30	2.00	44.06	34.80	58.34	137.20	8.70	145.90	4.80	35.68	14.98	50.64	196.54	196.54
9	Comunidad 2.8	25.30	3.00	66.09	52.20	87.51	205.80	8.70	214.50	5.80	43.09	18.10	61.19	275.69	275.69
10	San Lucas 3.5	24.00	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	8.70	77.30	4.20	31.21	13.10	44.31	121.61	121.61
11	San Lucas 3.5	25.00	2.00	44.06	34.80	58.34	137.20	8.70	145.90	5.20	38.64	16.22	54.86	200.76	200.76
12	San Lucas 3.5	26.00	3.00	66.09	52.20	87.51	205.80	8.70	214.50	6.20	46.07	19.34	65.41	279.91	279.91
13	San Lucas 4.0	23.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.70	8.70	4.20	31.21	13.10	44.31	53.01	53.01
14	San Lucas 4.0	24.60	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	8.70	77.30	5.20	38.64	16.22	54.86	132.16	132.16
15	San Lucas 4.0	25.50	2.00	44.06	34.80	58.34	137.20	8.70	145.90	6.20	46.07	19.34	65.41	211.31	211.31
16	San Lucas 5.0	24.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.70	8.70	5.00	37.15	15.60	52.75	61.45	61.45
17	San Lucas 5.0	25.50	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	8.70	77.30	6.00	44.58	18.72	63.30	140.60	140.60
18	El Tule 5.0	24.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.00	37.15	15.60	52.75	52.75	52.75
19	El Tule 5.0	25.50	1.00	22.03	17.40	29.17	68.60	0.00	68.60	6.00	44.58	18.72	63.30	131.90	131.90
20	El Tule 6.0	25.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.00	44.58	18.72	63.30	63.30	63.30

El impacto que el uso del agua de las distintas fuentes tendría sobre la generación de energía eléctrica se muestra a continuación.

Tabla 35 Impacto de la ampliación del Sistema Cutzamala en la generación de energía eléctrica.

Planta Hidroeléctrica	Capacidad Instalada MW	Generación 83-92 GWh	Factor de Planta %	Generación Unitaria GWh/m ³ /s	Impacto de 1 m ³ /s	Energía Afectada
PH Temascaltepec (a) SHMA	2.34	9	42	5	57.10%	Punta
Ixtapantongo	104	228	25	22	9.70%	Punta
Santa Bárbara	67	191	29	17.4	9.30%	Punta
Tingambato	135	319	27	29.2	9.00%	Punta
Región del Balsas						
Infiernillo	1000	2803	32	7.4	0.30%	Base
La Villita	295	1137	44	3.1	0.30%	Base
TOTALES	1611	4687		84		

(a) La generación de esta planta corresponde al año de 1992

Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán.

Este Sistema consta actualmente de tres hidroeléctricas, Ixtapantongo, Santa Bárbara y Tingambato. Durante el período 1983 - 1992 estas plantas tuvieron una utilización del 25 al 30 %. Si se toman los 3 m³/s del agua reservada para generación, sería necesario su cierre.

Hidroeléctricas del Balsas.

El agua del río Temascaltepec alimenta, junto con otras corrientes, a dos hidroeléctricas del balsas, Infiernillo y La Villita. Estas plantas operaron en promedio con un factor de 32 y 44% respectivamente y el impacto que puede ejercer el agua que se tome del Temascaltepec es menor del 1%.

Hidroeléctrica de Temascaltepec (Río Verde).

En las alternativas de San Lucas y La Comunidad, se tomaría el agua que utiliza esta planta para generación. Como se observa en la tabla, el impacto es significativo por lo que se plantea pagar la energía que se deja de generar a su costo de reposición.

2. Consumo de Energía Eléctrica.

El costo más importante del Sistema Cutzamala es el que se deriva del consumo de Energía Eléctrica para subir el agua hasta la Torre de Oscilación 5, el cual dependiendo de la alternativa fluctúa entre 2,077 y 3,100 GWh por año.

En la siguiente tabla se muestra el resumen del consumo de energía eléctrica para cada alternativa analizada, presentando su cálculo en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO

Tabla 36 Consumo de energía eléctrica por alternativa.

No.	Alternativa	Consumo Total GWh
1	Base	2079
2	SHMA 1	2201
3	SHMA 2	2323
4	SHMA 3	2445
5	Comunidad 2.0	2567
6	Comunidad 2.0	2690
7	Comunidad 2.8	2587
8	Comunidad 2.8	2709
9	Comunidad 2.8	2831
10	San Lucas 3.5	2706
11	San Lucas 3.5	2767
12	San Lucas 3.5	2950
13	San Lucas 4.0	2771
14	San Lucas 4.0	2893
15	San Lucas 4.0	3015
16	San Lucas 5.0	2945
17	San Lucas 5.0	3067
18	El Tule 5.0	2935
19	El Tule 5.0	3057
20	El Tule 6.0	3094

3. Costo de reposición de la Energía Eléctrica.

El consumo anual de energía eléctrica más la que se deja de generar, dependiendo de la opción, se encuentra entre 2,077 y 3,226 GWh. Con estos niveles de magnitud el costo económico de reemplazo de la energía, y tomando la información del documento "Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico", de noviembre de 1992, publicado por la Comisión Federal de Electricidad, es el siguiente:

Tabla 37 Costos de reposición de la energía consumida y no generada

Tipo de Energía	Costo de reposición de la Energía \$/KWh
Energía Base	0.32
Energía de Punta	0.69

4. Índices de evaluación.

Una vez obtenidos todos los costos asociados a cada alternativa, se realizó el análisis de Costo Nivelado, de forma semejante al presentado en la "Estimación de Costos y Evaluación Económica" correspondiente al aprovechamiento del río Temascaltepec.

La determinación del Costo Nivelado se presenta en el ANEXO de TABLAS DE CALCULO.

Se calculó el Costo Nivelado Incremental de las alternativas con respecto a la tomada como Base, así como con respecto a ellas mismas al incrementar el gasto de abastecimiento.

A continuación se presenta la forma de obtener el Costo Nivelado Incremental:

$$CNI = \frac{Veg}{Ven} \text{ \$ / m}^3$$

donde:

Veg = Costo Nivelado de la alternativa (Cni) * Capacidad de entregas de la alternativa (Cex) **menos** Costo Nivelado de la alternativa Base (Cnb) * Capacidad de entregas de la alternativa Base (Ceb)

Ven = Capacidad de las entregas de la alternativa (Cex) **menos** Capacidad de las entregas de la alternativa Base (Ceb)

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la evaluación de las alternativas del incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala: El Costo Nivelado y el Costo Nivelado Incremental.

Tabla 38 Resultados de la evaluación económica.

No	Alternativa	Gasto del Sistema	Entregas Anuales	Costo Nivelado	Costo Incremental	Costo Incremental
		Total m ³ /s	Mill m ³	\$/m ³	Resp. Base \$/m ³	Inc. Gasto \$/m ³
1	Base	19.5	615	2.18		
2	SHMA 1	20.5	646	2.26	3.85	3.85
3	SHMA 2	21.5	678	2.33	3.79	3.74
4	SHMA 3	22.5	710	2.37	3.60	3.22
5	Comunidad 2.0, SHMA 2	23.5	741	2.45	3.77	3.77
6	Comunidad 2.0, SHMA 3	24.5	773	2.62	4.33	6.56
7	Comunidad 2.8, SHMA 1	23.3	735	2.8	5.98	5.98
8	Comunidad 2.8, SHMA 2	24.3	766	2.75	5.07	1.56
9	Comunidad 2.8, SHMA 3	25.3	798	2.73	4.58	2.25
10	San Lucas 3.5, SHMA 1	24.5	757	2.53	4.05	4.05
11	San Lucas 3.5, SHMA 2	25	788	2.7	4.55	6.85
12	San Lucas 3.5, SHMA 3	26	820	2.74	4.42	3.72
13	San Lucas 4.0, SHMA 0	23.5	741	2.58	4.53	4.53
14	San Lucas 4.0, SHMA 1	24.5	773	2.76	5.02	6.93
15	San Lucas 4.0, SHMA 2	25.5	804	2.78	4.73	3.28
16	San Lucas 5.0, SHMA 0	24.5	773	2.76	5.02	5.02
17	San Lucas 5.0, SHMA 1	25.5	804	2.77	4.69	3.02
18	El Tule 5.0, SHMA 0	24.5	773	2.94	5.90	5.90
19	El Tule 5.0, SHMA 1	25.5	804	2.93	5.37	2.68
20	El Tule 6.0, SHMA 0	25.5	804	2.91	5.29	5.29

Las gráficas que se presentan a continuación esquematizan la variación del costo total de cada alternativa analizada con respecto al gasto aprovechable para abastecimiento de agua potable.

Figura 30 Costo nivelado incremental alternativa SHMA.

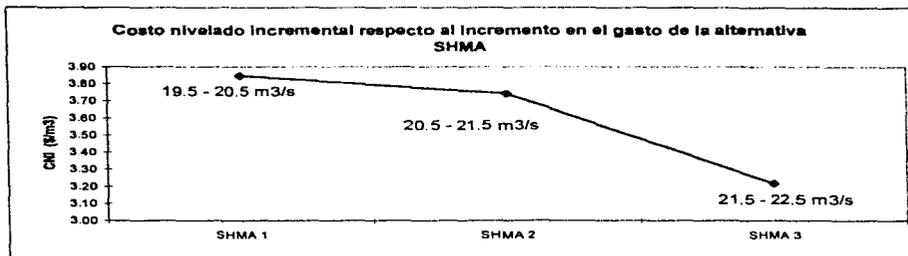


Figura 31 Costo nivelado incremental alternativa La Comunidad.

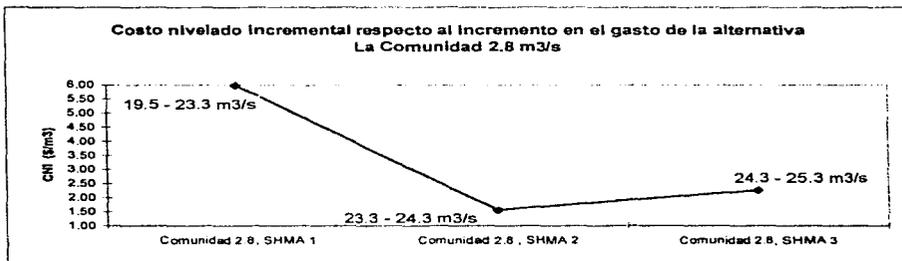
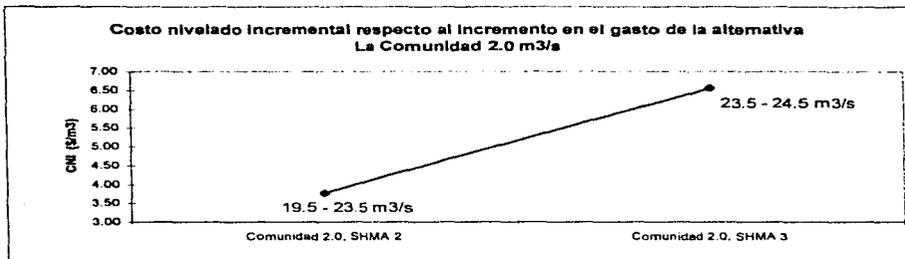


Figura 32 Costo nivelado incremental alternativa San Lucas.

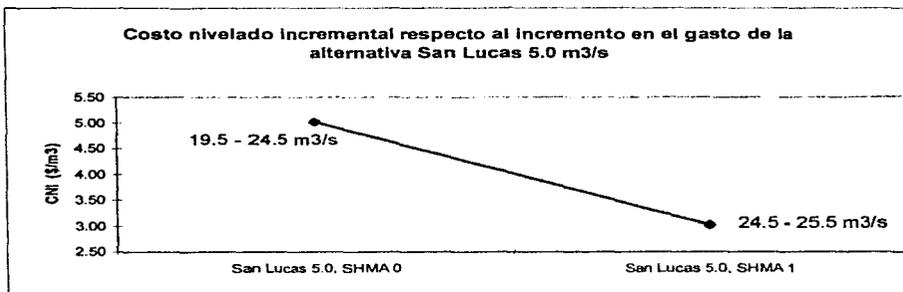
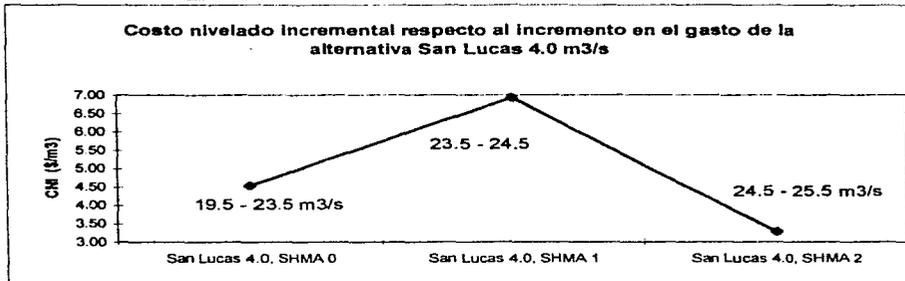
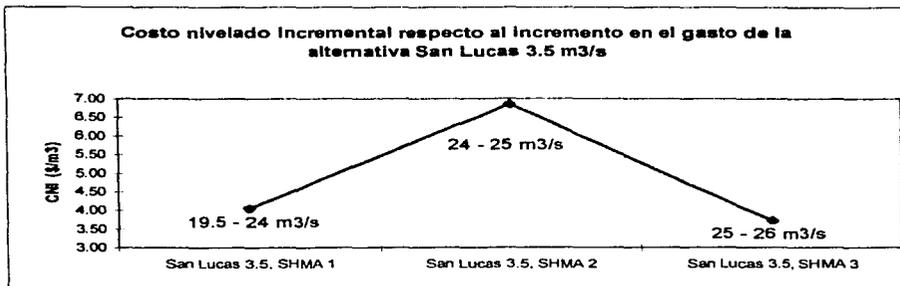
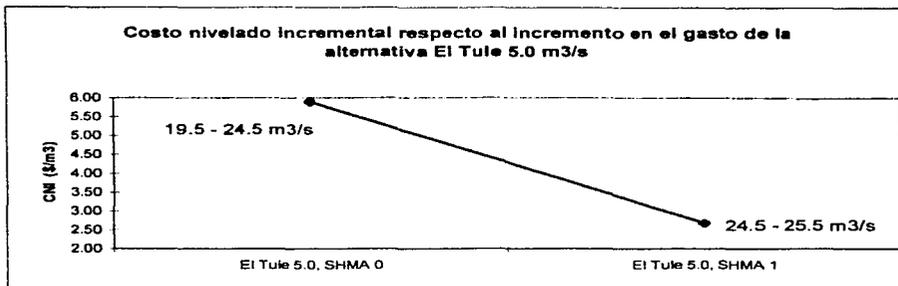


Figura 33 Costo nivelado incremental alternativa El Tule.



En todos los casos el primer punto de las gráficas corresponde al costo por metro cúbico que implica pasar de la alternativa Base, definida como el funcionamiento eficiente del Sistema al concluir la tercera etapa entregando un gasto de 19.5 m³/s, a un gasto incrementado al captar el agua de la cuenca del río Temascaltepec, así como por la utilización del gasto destinado al SHMA. Los puntos subsecuentes indican si la variación en el costo al incrementar el gasto aumenta o disminuye respecto al primer punto.

5. Resultado de la evaluación.

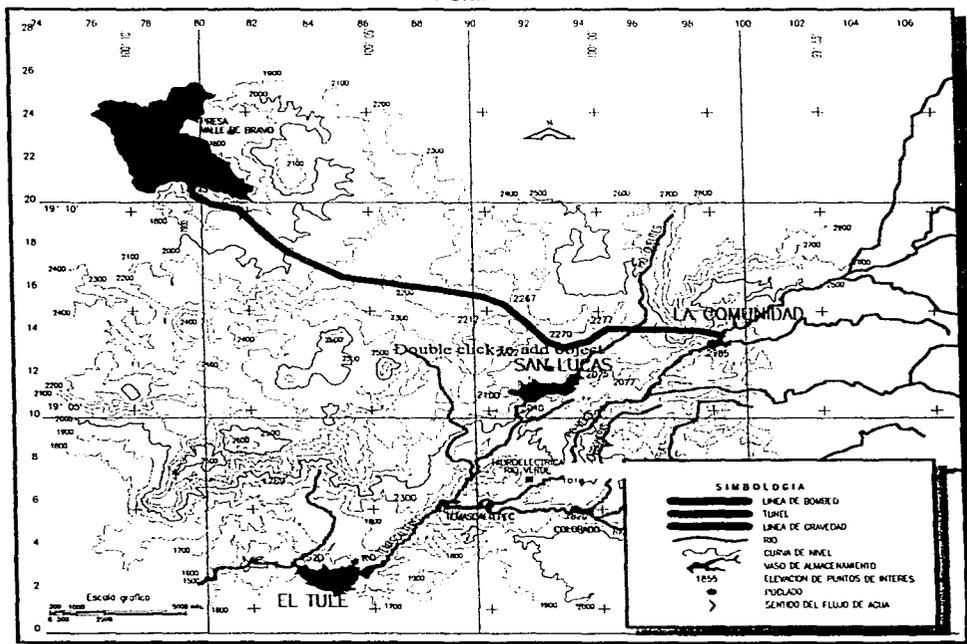
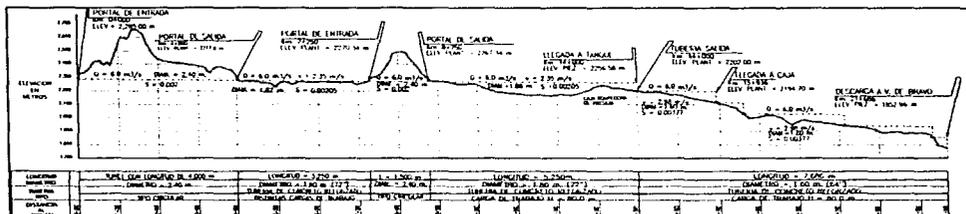
En términos marginales, los 3 m³/s adicionales que se envíen, como resultado de aprovechar el agua reservada del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, y sin incluir obra alguna de la cuenca del río Temascaltepec, tienen un costo incremental de 3.60 \$/m³ y el máximo gasto aprovechado sería de 22.5 m³/s.

Para alcanzar un gasto de 24 m³/s suficiente para agotar la capacidad de diseño de las obras del Sistema, la mejor opción es la alternativa 10 (San Lucas 3.5 m³/s y SHMA 1 m³/s), la cual presenta un costo nivelado de 2.53 \$/m³ y un costo nivelado incremental de 4.05 \$/m³.

Si el gasto se incrementa a 24.5 m³/s, se crea la posibilidad de abastecer a la Ciudad de Toluca con 0.5 m³/s siendo la mejor opción la alternativa 6 (Comunidad 2.0 m³/s y SHMA 3 m³/s), con un costo nivelado de 2.62 \$/m³ y el costo nivelado incremental de 4.33 \$/m³.

Incrementando el gasto a 25.5 m³/s, es posible abastecer con 1.5 m³/s a la Ciudad de Toluca mediante la alternativa 9 (Comunidad 2.8 m³/s y SHMA 3 m³/s), misma que presenta un costo nivelado de 2.73 \$/m³ y un costo nivelado incremental de 4.52 \$/m³.

Figura 35 Esquema del proyecto La Comunidad



Capítulo 4

4. Conclusiones.

El continuo crecimiento demográfico de la ZMCM ha provocado, que las fuentes de abastecimiento de agua por cuenca propia del Valle de México hayan sido sobreexplotadas como es el caso de los manantiales y el agua del subsuelo, además de contribuir directamente con el hundimiento en algunas zonas de la ciudad y los respectivos problemas que estos producen en las estructuras.

Para el año 2,000 se estima que la ZMCM estará habitada por 21.5 millones de personas, mismas que requerirán del servicio de agua potable.

Aunado al desmedido crecimiento poblacional, el consumo per cápita de agua que actualmente se estima en 350 litros diarios es excesivo, siendo 60% mayor al de otras ciudades del mundo que logran satisfacer sus necesidades con consumos diarios por habitante del orden de 200 litros sin que su calidad de vida se vea disminuida.

Ambos aspectos y la ausencia de sitios capaces para regular los escurrimientos superficiales, han provocado que sea necesaria la búsqueda y transferencia de agua desde fuentes externas al Valle debido a que los recursos propios son insuficientes para abastecer los 6 millones de metros cúbicos requeridos diariamente por la ZMCM.

El Sistema Lerma fue la primera fuente externa de abastecimiento a la ZMCM, pero fue sobreexplotado hasta el punto de afectar el subsuelo de la Ciudad de Toluca, el cual ha sufrido de agrietamientos. Actualmente este sistema abastece a la Ciudad de México con 5.9 m³/s.

El Sistema Cutzamala es la segunda fuente externa de abastecimiento de agua potable, contando actualmente con capacidad instalada para proporcionar 19 m³/s, límite de la tercera etapa de las cuatro previstas, que en conjunto abastecerán con 24 m³/s a la ZMCM.

Mediante obras que permitan aprovechar los escurrimientos de la cuenca del río Temascaltepec es posible obtener los 5 m³/s requeridos para completar la cuarta etapa del Sistema Cutzamala, así como para abastecer a la Ciudad de Toluca.

De los análisis de las alternativas estudiadas para incrementar la capacidad del Sistema Cutzamala, se observó que las mejores opciones desde el punto de vista técnico y económico corresponden a las que combinan como fuentes de abastecimiento, tanto al agua reservada para el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, como a diferentes aprovechamientos en la cuenca del río Temascaltepec.

La decisión de cuál de las alternativas es la más indicada para ser estudiada a un nivel de factibilidad, corresponderá a factores sociales, políticos, económicos y ambientales; ya que será necesario determinar si se abastecerá de agua potable o no a la Ciudad de Toluca mediante el Sistema Cutzamala.

De los análisis realizados se identifican cuatro alternativas básicas de incremento de aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala:

1. Si la decisión final corresponde a no abastecer a la Ciudad de Toluca, la alternativa del sitio "San Lucas" con un aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec de 3.5 m³/s y utilizando 1 m³/s del agua reservada para el SHMA, incorpora un gasto de 4.5 m³/s al Sistema Cutzamala, suficiente para completar la cuarta etapa.
2. Si se desea abastecer con 0.5 m³/s a la Ciudad de Toluca, la alternativa del sitio "La Comunidad" que aprovecha 2.0 m³/s de la cuenca del río Temascaltepec y los 3 m³/s del SHMA, representa la mejor opción.
3. Abasteciendo de agua potable a razón de 1.5 m³/s a la Ciudad de Toluca, la alternativa del sitio "La Comunidad" con un aprovechamiento de la cuenca del río Temascaltepec de 2.8 m³/s y el gasto total del SHMA, corresponde a la mejor opción.
4. Incrementar el gasto a la Ciudad de Toluca en 2 m³/s, implica seleccionar a la alternativa correspondiente al sitio "San Lucas" que aprovecha un gasto de 3.5 m³/s de la cuenca del río Temascaltepec, así como los 3 m³/s del SHMA.

Alternativa	Gasto Total m ³ /s	Costo Nivelado \$/m ³
San Lucas 3.5 m ³ /s, SHMA 1m ³ /s	24.0	2.53
La Comunidad 2.0 m ³ /s, SHMA 3m ³ /s	24.5	2.62
La Comunidad 2.8 m ³ /s, SHMA 3m ³ /s	25.5	2.73
San Lucas 3.5 m ³ /s, SHMA 3m ³ /s	26.0	2.74

La elección de cualquiera de estas alternativas, tiene como función principal servir de guía para la elaboración de un estudio a nivel factibilidad de la alternativa seleccionada y seguir su desarrollo hasta la ejecución del proyecto ejecutivo que logre completar la cuarta etapa del Sistema Cutzamala.

El abastecimiento de agua a la ciudad más grande del mundo es un reto permanente, mismo que técnicamente es posible resolver mediante la importación de agua de cuencas cada vez más lejanas. Esto implica obras de mayor magnitud e inversión, sin embargo la utilización de estas fuentes no debe verse como una solución a la escasez del líquido una vez que hayamos agotado las fuentes actuales (incluyendo en estas a la cuarta etapa del Sistema Cutzamala), sino como una consecuencia del desmesurado crecimiento poblacional y el consumo irracional que ha provocado su búsqueda.

Mediante acciones tales como, el uso de agua residual tratada, la aplicación de programas de uso eficiente del agua, la privatización de los servicios de facturación y mantenimiento de las redes, así como hacer conciencia en la población de lo costoso que resulta abastecerla de agua; será posible ahorrar del orden de 2 millones de metros cúbicos diarios de agua potable, suficiente para abastecer a la ZMCM durante los próximos diez años, suponiendo que seguiremos creciendo a razón de 900 mil personas por año y que el consumo se reduzca a 200 lit/hab/día.

Por el contrario, si el consumo se mantiene igual para el año 2,000 tendremos un déficit diario en volumen del orden de 2 millones de metros cúbicos.

Ahora más que nunca, es necesario tratar el problema desde su raíz incidiendo directamente sobre "EL CONSUMO y EL CRECIMIENTO POBLACIONAL" mediante acciones que conduzcan hacia un equilibrio social, económico y ambiental.

BIBLIOGRAFIA

"El Sistema Hidráulico del Distrito Federal, Un Servicio Público en Transición", Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México D.F., 1982.

"Agua 2,000, Estrategia para la Ciudad de México", Departamento del Distrito Federal, Secretaría General de Obras, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, México D.F., 1994.

"Agua, una Nueva Estrategia para el Distrito Federal", Fundación para la Conservación del Agua en México, Comisión de Aguas del Distrito Federal, México, D.F., Mayo 1994.

"Sistema Cutzamala", Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Folleto Comisión de Aguas del Valle de México, México D.F., Diciembre 1987.

"Sistema Cutzamala, Agua para Millones de Mexicanos", Comisión Nacional del Agua, México D.F., Octubre 1994.

"Clasificación del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, Cuenca del Río Cutzamala", Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica, Subdirección de Normas y Vigilancia, Departamento de Clasificación de Cuerpos Receptores, México D.F., Mayo 1979.

"Actualización al Boletín Hidrológico Num. 49, Región Hidrológica Num. 18 (Parcial), Cuenca del Medio y Bajo Balsas", Tomo VI, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Planeación, Dirección General de Estudios, Subdirección de Hidrología. México D.F., 1980.

"El Agua y su Aprovechamiento Múltiple, Infraestructura Hidroagrícola, Presas Construidas por la Comisión Nacional del Agua 1989 - 1994", México, D.F., Noviembre 1994.

ANEXO DE REGISTROS HIDROLOGICOS

Descripción del funcionamiento del modelo de simulación.

El modelo utilizado recibe el nombre de SISIVA (Simulación de Sistemas de Vasos) y fue realizado por la empresa consultora Análisis y Proyectos de Ingeniería S.A de C.V por encargo de la Dirección General de Estudios de la CAVM, con el objeto de contar con medios de cómputo que permitieran el análisis de alternativas de aprovechamiento para fundar en sus resultados las decisiones acerca de cuáles debían ser los aprovechamientos prioritarios, así como las obras a realizar y su magnitud.

- Estructura general.

El modelo SISIVA se conforma con los siguientes elementos:

Programa principal: cuya función principal es llevar el control general del modelo definiendo la manera en que cada una de las rutinas LECTUR, PRIDEM, FUNC, AUXI y TANTEO deben entrar en funciones, así mismo lleva a cabo la impresión de los resultados.

1.- Subrutina LECTUR: esta subrutina tiene por objeto leer información que define al sistema tanto desde el punto de vista físico como operativo. La información proporcionada se conforma de los siguientes elementos:

a) Información general del sistema.

Número de vasos que conforman el sistema, manera de interconectarse y los criterios de deficiencias que definirán si se acepta o no el resultado de un ejercicio de simulación.

b) Información particular de cada vaso.

Número de entradas por escurrimientos, su magnitud y distribución; número de salidas, su magnitud, distribución y prioridad; capacidad total, capacidad mínima y la capacidad de los acueductos que parten de cada vaso.

2. Subrutina PRIDEM: esta subrutina, a partir de la información leída en LECTUR relativa al número de salidas de cada vaso, su magnitud y prioridad, genera arreglos en los que se ordenan estos datos para definir las demandas anuales y mensuales de cada vaso asociados a prioridades.

3.- Subrutina FUNC: su función es realizar el balance de un vaso dado, en un mes específico. En esta rutina se define si un vaso es capaz de satisfacer las demandas que se le imponen, se definen deficiencias si las hay y las condiciones en que el vaso queda tras tratar de satisfacer las demandas que se le impusieron.

4.- Subrutina INTER: esta subrutina realiza las interpolaciones necesarias para el cálculo de las evaporaciones mensuales a partir de las curvas elevaciones-áreas-capacidades.

5.- Subrutina AUXI: esta subrutina llamada por el programa PRINCIPAL cuando un vaso no puede satisfacer su demanda, busca cuáles de los vasos del sistema pueden auxiliario y en caso de ser posible se le proporciona el auxilio solicitado.

6.- Subrutina AJUSTE: esta subrutina, cuando un vaso proporciona auxilio a otro, ajusta los resultados del funcionamiento mensual del primero para tomar en cuenta que tuvo una salida adicional.

7.- Subrutina TANTEO: cuando se decide realizar tanteos, esta subrutina lleva el control del proceso de tanteos y define cuando termina y en que forma. Esto es, si se tiene una solución factible o no y emitir en su caso el diagnóstico.

8.- Resultados de SISIVA: de acuerdo con un control de impresión el programa SISIVA puede arrojar información mensual, anual y por período de simulación de cada uno de los vasos del sistema. En todos los casos se proporcionan:

- a) Almacenamiento.
 - b) Entradas por vaso.
 - c) Salidas por demandas.
 - d) Derrames.
 - e) Evaporaciones.
 - f) Deficiencias en volumen por demanda.
 - g) Deficiencia en por ciento por demanda.
- Definición de variables para la aplicación del programa SISIVA.

Almacenamientos:

Los almacenamientos correspondieron a niveles fijados previamente en cada uno de los vasos, estos tomaron un valor intermedio entre la capacidad total y la capacidad muerta. De esta forma la simulación inició considerando que en cada uno de los vasos se contaba con dicho volumen inicial de almacenamiento.

Entradas por vaso:

Se definen tres entradas, las cuales corresponden a:

1. Entradas por cuenca propia.
2. Entradas por interconexión de vasos.
3. Entradas provenientes de los derrames de un vaso.

Las entradas por cuenca propia corresponden a los escurrimientos que cada uno de los vasos pueden captar.

Las entradas por interconexión de vasos, corresponden al arreglo general del sistema y se conforman de la siguiente manera:

1. Las salidas de la presa Del Bosque entran a la presa Colorines.
2. Las salidas de la presa Colorines entran a la presa Valle de Bravo.

En el caso de las entradas por derrames, estos solamente se aplican a los derrames provenientes de la presa Del Bosque y son conducidos hasta la presa Colorines.

Salidas por demandas:

Las salidas por demandas corresponden a los volúmenes de extracción que se solicitan a cada presa. Cabe mencionar que la única presa a la cual se le proporcionaron dos demandas fue Del Bosque, ya que se tiene un compromiso de riego con campesinos de la zona.

En el caso de Valle de Bravo, no se proporcionaron dos salidas ya que la correspondiente a la generación de energía del Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán puede obtenerse simplemente restando al total extraído el volumen necesitado.

Evaporación:

La evaporación se cuantifica como una salida ya que es una pérdida de agua que se genera en función del área del embalse y es calculada a partir de la curva elevaciones-áreas-capacidades para cada uno de los períodos que se llevan a cabo en la simulación.

Déficit:

Cuando en el funcionamiento del vaso en un cierto período, las demandas son mayores que las entradas al vaso se produce un déficit, el cual toma un valor igual a la resta de las entradas menos las salidas. Este déficit puede llegar a tomar valores hasta un cierto límite prestablecido. La deficiencia en los vasos terminales se tomó como la deficiencia asociada a la suma de las salidas en Villa Victoria y Valle de Bravo.

Una vez que las variables se han definido, el programa aplica la ecuación de continuidad a cada vaso y a cada período analizado, tomando dicha ecuación la siguiente forma:

$$\text{Alm2} = \text{Alm1} + \text{Ent1} + \text{Ent2} + \text{Ent3} - \text{Derr} - \text{Sal1} - \text{Sal2} - \text{Evap} + \text{Déf}$$

donde:

Alm2: almacenamiento inicial del siguiente período.

Alm1: almacenamiento final del período antecedente.

Ent1: Entradas por cuenca propia.

Ent2: Entradas por derrames.

Ent3: Entradas por interconexión.

Derr: Derrames.

Sal1: Salidas para el abastecimiento de agua a la ZMCM.

Sal2: Salidas de riego.

Evap: Pérdidas por evaporación en el período.

Déf: Déficit ocurrido en el período.

- Listado del resultado de la simulación realizada a las tres primeras etapas del Sistema Cutzamala.

A continuación se presentan los resultados del funcionamiento para cuatro meses, dos correspondientes a meses sin derrames y otros dos en los que se presentan derrames, con el objetivo de mostrar el funcionamiento de los vasos en dos épocas distintas, lluvia y estiaje.

	Nombre	Almto. miles m3	Ent1 miles m3	Ent2 miles m3	Ent3 miles m3	Derr miles m3	Sa11 miles m3	Sa12 miles m3	Evap miles m3	Def miles m3	Dér %
año1	Bosque	150000	6372	8339	0	0	21825	1577	931	0	0
mes1	Colorines	800	12900	0	21825	0	35521	0	3	3899	9.9
	V. Victoria	100000	7317	0	0	0	10775	0	1557	0	0
	V. Bravo	210000	15153	0	35521	0	48355	0	1644	0	0
año1	Bosque	139378	5039	4756	0	0	21825	1577	1258	0	0
mes2	Colorines	1	6104	0	21825	0	27929	0	0	11491	29.2
	V. Victoria	94985	5020	0	0	0	10775	0	2178	0	0
	V. Bravo	210675	13175	0	27929	0	48335	0	2199	0	0
año1	Bosque	211470	35506	24100	0	35209	21825	1577	995	0	0
mes11	Colorines	1600	20700	0	21825	3095	39420	0	10	0	0
	V. Victoria	176511	34353	0	0	21450	10775	0	2128	0	0
	V. Bravo	301692	34066	0	39420	0	48355	0	1653	0	0
año1	Bosque	211470	17045	32407	0	24883	21825	1577	1167	0	0
mes12	Colorines	1600	13291	6912	21825	2597	39420	0	12	0	0
	V. Victoria	176511	19289	0	0	5842	10775	0	2653	0	0
	V. Bravo	325170	26430	0	39420	0	48355	0	1804	0	0

Funcionamiento de los vasos del Sistema Cutzamala

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	2.42	1.54	1.35	1.31	1.94	4.41	7.36	9.46	9.72	8.08	4.00	2.61	4.52
Evaporación Neta (mm)	113.29	160.03	228.64	244.35	176.76	-85.76	-64.22	-46.38	-45.40	55.00	104.41	122.44	
Precipitación (mm)	32.24	5.72	4.56	9.31	64.37	239.92	181.74	164.53	156.23	79.90	28.09	9.59	978.04

Valores medios anuales correspondientes a la presa Del Bosque.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	5.13	4.17	3.63	3.14	3.75	5.32	7.32	9.19	12.57	11.41	8.83	6.68	6.76
Evaporación Neta (mm)	106.75	143.66	209.22	229.89	175.01	-27.65	-83.62	-75.05	-60.87	34.63	95.26	101.26	839.00
Precipitación (mm)	18.16	4.68	5.27	6.55	47.16	164.03	187.49	181.20	158.58	80.74	15.02	9.05	871.80

Valores medios anuales correspondientes a la presa Valle de Bravo.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	2.63	1.85	1.72	1.61	2.40	3.77	6.57	9.94	11.18	8.89	5.26	3.26	4.92
Evaporación Neta (mm)	74.70	108.30	165.50	162.80	101.00	-37.00	-82.80	-78.50	-36.70	32.10	72.50	69.30	562.60
Precipitación (mm)	19.60	11.30	12.20	22.20	63.30	158.00	188.90	184.70	138.10	71.20	16.20	10.90	893.10

Valores medios anuales correspondientes a la presa Villa Victoria.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	2.42	1.34	0.73	0.70	1.52	4.36	10.10	13.60	14.58	10.92	6.80	3.62	5.89

Valores medios anuales correspondientes al Canal Tuzpan - Bosque

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	0.19	0.15	0.14	0.12	0.16	0.24	0.34	0.36	0.36	0.32	0.22	0.18	2.79

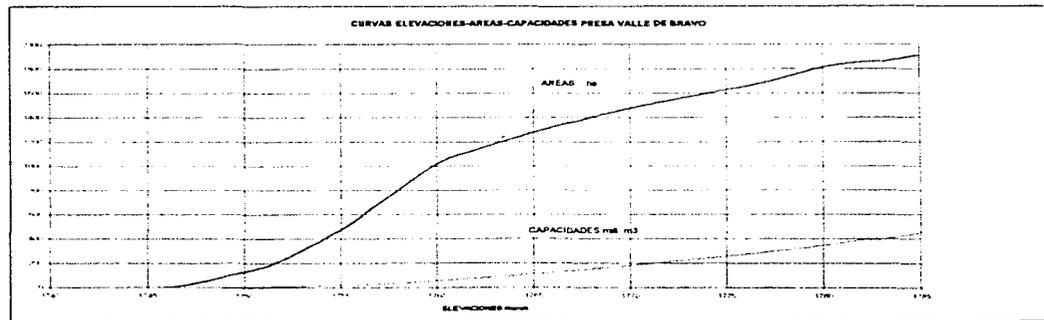
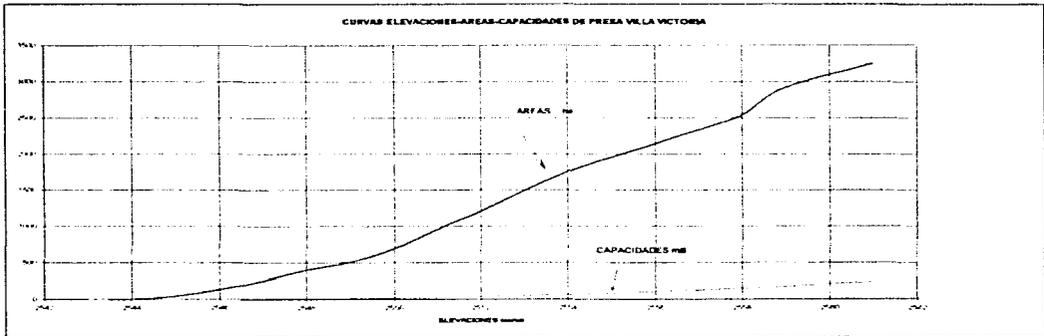
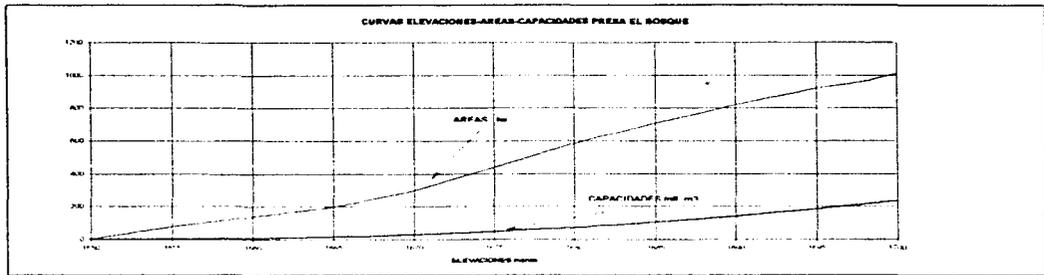
Valores medios anuales correspondientes a la E.H. San José Malacatepec

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	1.07	0.91	0.95	0.90	1.03	1.40	1.78	1.98	2.33	1.88	1.48	1.09	1.40

Valores medios anuales correspondientes a la E.H. Km 0+700 del río Itzapán del Oro

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Gasto (m ³ /s)	1.48	1.46	1.16	1.39	1.36	1.77	2.51	2.38	3.02	2.61	2.19	1.51	1.90

Valores medios anuales correspondientes al bombeo Chilesdo.



ANÁLISIS DE RENDIMIENTOS DE LAS SUBCUENCAS
RIO TEMASCALTEPEC
Escurrimientos anuales en miles de m3

AÑO	ESTACION			
	LA COMUNIDAD	RIO VERDE	REAL DE ARRIBA	TEMASCALTEPEC
42		62,955		
43		59,487		
44		43,599		
45		42,373		
46		51,298		
47		54,747		
48		55,527		
49		44,678		
50		39,388		
51		41,972		
52		62,282		
53		54,396		
54		67,609		
55		72,473		
56		75,092		
57		59,462		
58		66,690		
59	83,041		79,988	
60	58,077		48,444	
61	60,351		57,489	
62	68,999		45,971	
63	71,553		83,413	
64	57,083		75,674	
65	47,097		69,603	
66	33,640		58,164	
67	42,263			
68	32,821		69,615	
69	36,596		81,266	
70	59,036		80,430	
71				
72				
73				242,426
74				196,904
75				184,479
76				210,414
77				219,854
78				
79				180,633
80	53,322			203,429
81	64,546		77,574	229,021
82	49,457		39,050	159,194
83			42,377	164,841
84	50,822		55,698	166,744
85	52,325		58,908	196,671
86	49,001			199,973
87				170,676
88				186,619
89				167,376
90				186,582
91				
92				
93				
94				201,611
				210,184
Media (miles de m3)	63,890.56	57,307.63	62,479	194,086
Media (m3/a)	1.71	1.82	1.98	6.45
Area cuenca (Km2)	122.30	222	112.6	415.18
Rendimiento (Mm3/Km2)	440.64	258.14	554.87	467.47

Si en la estación Real de Arriba se toman solo los últimos años :

Media (miles de m3)

Media (m3/a)

Rendimiento (miles m3/km2)

54,721

1.74

485.86

Se propone par este rio

un rendimiento de 530.0 Mm3/Km2

**ESTIMACIÓN DE ESCURRIMIENTOS ALTERNATIVAS
EL QUELITE Y SAN LUCAS**

Estimación de escurrimientos en los sitios
El Quelite y derivaciones de los ríos Verde y Colorado

Utilizando el rendimiento promedio general:				
QUELITE	COLORADO	VERDE	TOTAL	
32,863	49,333	103,798	185,994	Media (miles de m3)
1.04	1.56	3.29	5.90	Media (m3/s)
70.3	105.53	222.04	397.87	Area cuenca (Km2)
467.47	467.47	467.47	467.47	Rendimiento (Mm3/Km2)
Utilizando rendimientos asociados a cada cuenca:				
30,977	55,931	97,840	184,748	Media (miles de m3)
0.98	1.77	3.10	5.86	Media (m3/s)
70.30	105.53	222.04	397.87	Area cuenca (Km2)
440.64	530.00	440.64	464.34	Rendimiento (Mm3/Km2)

Rendimiento

Propuesto:

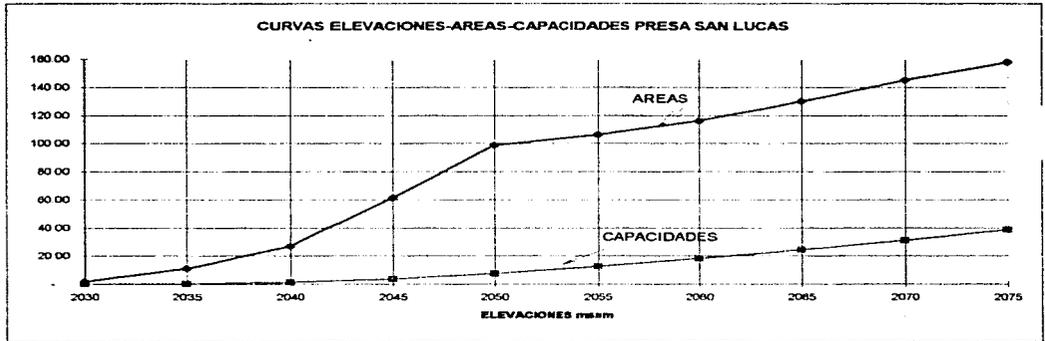
Relación de escurrimientos y áreas respecto a estación Temascaltepec				
0.160	0.288	0.504	0.952	Relación de esc.
0.169	0.254	0.535	0.958	Relación de Area

Escrurrimientos aprovechables en los sitios de captación Quelite, Verde y Colorado (m3/s)				
0.98	1.68	2.95	5.61	Escrurrimiento
0.15960	0.27377	0.47890	0.91227	Relación con Temascaltepec

Aprovechamiento quelite+verde+colorado=	5.11
Aprovechamiento quelite+verde=	3.54

AREA Y ESCURRIMIENTO DE CUENCAS CAPTADAS PROYECTO SAN LUCAS			
CUENCA PROPIA	35.8	Km2	ESC TEMASC/SLUCAS
CUENCA RIO VERDE	213.8	Km2	0.5667
	249.6	Km2	
Rendimiento por Km2:	440.64		
ESC. MEDIO ANUAL	109,984	Miles m3	
ESC. MEDIO ANUAL	3.49	m3/s	ARE TEMASC/SLUCAS
			0.6012

ALTERNATIVA LA COMUNIDAD			ESCURRIMIENTO
AREA RIO QUELITE	15	Km2	EN EL SITIO EL TULE
AREA LA COMUNIDAD	164	Km2	
AREA AMARILLO	49.8	Km2	Estación Temascaltepec
SUMA	228.8	Km2	+
Rendimiento por Km2:	440.64		Cuenca propia (135 km2)
			= 6.15+135*460/31.5
			8.12 m3/s
ESC. MEDIO ANUAL	100,818.43	Miles m3	
ESC. MEDIO ANUAL	3.20	m3/s	



Alternativa m3/s	Area de las cuencas aprovechadas Km2	Escurremientos en las cuencas aprovechadas m3/s	Gasto para agua potable aprovechado	
			m3/s	% del escurr.
La Comunidad 2.0	224.40	3.14	2.00	70.17
La Comunidad 2.8	224.40	3.14	2.80	89.30
San Lucas 3.5	249.60	3.49	3.50	91.75
San Lucas 4.0	415.20	6.15	4.00	68.29
San Lucas 5.0	415.20	6.15	5.00	81.30
El Tule 5.0	550.00	8.12	5.00	61.58
El Tule 6.0	550.00	8.12	6.00	73.89

Alternativas de aprovechamiento en la cuenca del Temascaltepec.

PORCENTAJE DE APROVECHAMIENTO

Derivación en el sitio Temascaltepec

	CAPACIDAD DE DERIVACION m ³ /s				Q ANUAL m ³ /s
	12	13	14	15	
	Capacidad de derivación entre Q medio anual				
	2.19	2.37	2.55	2.74	

1973	89.62	92.10	94.40	96.30	6.84
1974	100.00	100.00	100.00	100.00	5.47
1975	98.30	98.96	99.32	99.62	5.40
1976	96.43	97.42	98.13	98.67	5.84
1977	94.28	95.04	95.56	96.16	6.10
1978	97.17	97.94	98.51	98.94	5.37
1979	98.48	99.08	99.29	99.44	5.02
1980	98.67	99.25	99.62	99.80	5.65
1981	95.02	96.50	97.70	98.49	6.36
1982	100.00	100.00	100.00	100.00	4.42
1983	98.03	98.61	99.03	99.28	4.58
1984	99.17	99.60	99.86	99.94	4.76
1985	96.06	98.75	99.22	99.54	5.46

Promedio	97.17	97.94	98.51	98.94	5.48
----------	-------	-------	-------	-------	------

GASTOS DERIVADOS

Derivación en el sitio Temascaltepec

	CAPACIDAD DE DERIVACION m ³ /s			
	12	13	14	15
	Capacidad de derivación entre Q medio anual			
	2.19	2.37	2.55	2.74

6.13	6.30	6.45	6.58
5.47	5.47	5.47	5.47
5.31	5.34	5.36	5.38
5.63	5.69	5.73	5.76
5.76	5.80	5.83	5.87
5.22	5.26	5.29	5.31
4.94	4.97	4.98	4.99
5.57	5.61	5.63	5.64
6.04	6.14	6.21	6.26
4.42	4.42	4.42	4.42
4.49	4.51	4.53	4.54
4.72	4.75	4.76	4.76
5.36	5.39	5.42	5.44

5.31	5.36	5.39	5.42
------	------	------	------

ESTACION TEMASCALTEPEC SOBRE EL RIO VERDE
 Sitio de la derivadora Temascaltepec
 ESCURRIMIENTOS MENSUALES EN MILES DE METROS CUBICOS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
													miles de m ³	m ³ /s
1973	11,939	9,837	8,416	9,569	11,962	12,393	20,065	32,098	40,848	45,504	25,495	17,975	246,252	7,839
1974	13,925	10,400	10,616	9,812	10,717	15,419	23,734	25,641	23,954	21,637	17,024	14,026	196,905	6,244
1975	11,938	9,747	7,354	6,297	10,354	16,246	19,792	24,767	30,805	26,537	16,918	13,134	154,479	6,167
1976	11,037	9,536	8,412	9,556	9,484	12,512	22,135	24,510	28,012	35,900	20,345	19,423	210,412	6,672
1977	13,256	9,508	6,378	8,058	14,669	16,356	20,941	29,957	37,401	22,260	22,274	17,797	219,855	6,972
1978	11,929	9,837	8,737	7,542	10,009	14,627	20,957	25,464	28,442	23,931	17,466	14,334	193,336	6,131
1979	11,940	9,725	8,079	7,420	9,518	13,131	19,471	28,092	25,207	17,759	14,822	15,479	180,633	5,729
1980	15,514	14,338	11,669	8,352	8,893	13,638	16,634	25,585	29,969	25,033	19,940	13,604	203,428	6,451
1981	12,606	10,432	11,582	9,307	8,979	19,371	23,458	36,063	33,525	23,516	19,854	14,327	229,020	7,252
1982	12,534	9,235	9,300	8,045	11,720	12,960	15,204	18,572	19,661	17,763	12,954	11,227	159,195	5,048
1983	10,404	7,966	7,369	5,462	6,203	12,404	24,893	25,380	24,148	15,351	13,559	11,662	164,841	5,227
1984	9,364	9,837	5,931	4,659	8,365	12,862	22,811	18,553	27,364	24,976	15,365	11,414	171,581	5,441
1985	9,311	7,455	7,352	6,839	10,578	15,975	21,452	23,997	32,820	26,441	19,070	15,382	196,672	6,236
1986	12,237	7,966	7,526	6,748	11,617	18,910	21,374	24,137	30,616	23,306	15,688	13,848	199,973	6,341
1987	9,856	7,771	8,143	7,065	8,142	12,971	19,511	20,898	29,300	21,599	13,429	12,002	170,676	5,412
1988	sd	6,408	7,652	5,406	5,792	11,680	26,038	30,922	33,865	27,091	sd	sd	153,544	4,882
1989	8,076	6,471	6,425	5,574	7,018	10,468	16,021	20,397	30,484	25,567	16,381	sd	152,872	4,848
1990	9,430	6,933	5,595	5,590	sd									
1991	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd		
1992	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd	sd		
1993	sd	sd	sd	sd	7,297	12,236	21,239	21,722	30,121	32,503	24,164	16,224		
1994	12,178	9,634	7,325	7,567	8,660	14,306	16,479	23,338	26,029	35,443	22,322	sd		

Media (miles de m ³)	11,535	9,056	8,211	7,303	9,505	14,131	20,643	25,167	30,240	26,533	18,171	14,504	195,058	13
Media (m ³ /s)	4.39	3.45	3.12	2.78	3.62	5.38	7.85	9.58	11.51	10.12	6.91	5.52	6.19	

APORTACIONES A LA FRESA SAN LUCAS
ESCURRIMIENTOS EN MILES DE METROS CUBICOS

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	
													Miles de m ³	m ³ /s
1973	6626	5437	4652	5283	6011	6650	11090	17741	22577	25205	14092	9335	135.105	4.32
1974	7696	5748	5867	5423	5923	6522	13118	14172	13239	11959	9409	7752	108.828	3.45
1975	6598	5387	4065	3475	6054	8979	10339	12689	17026	14667	9351	7253	107.489	3.41
1976	6128	5271	4643	5005	5242	8915	12234	13547	15482	19842	11245	10735	116.295	3.63
1977	7327	5255	4631	4454	8108	9040	11574	16005	20672	12303	12311	9836	121.516	3.85
1978	6626	5437	4829	4168	5532	8084	11583	14074	15720	13227	9653	7923	105.856	3.39
1979	5569	5375	4465	4101	5261	7258	10762	15521	13932	9815	8192	8555	93.836	3.17
1980	8575	7825	6449	4616	4915	7538	9194	14141	16563	13869	11021	7629	112.435	3.57
1981	6367	5766	6401	5144	4963	10706	12965	19332	18529	16313	10973	7919	126.578	4.01
1982	6928	5104	5140	4446	6478	7174	8403	10255	10967	9918	7160	6205	87.959	2.79
1983	5760	4413	4073	3019	3428	6856	13759	14029	13347	8490	7494	6446	91.108	2.89
1984	5175	5437	3311	2575	4634	7109	12609	10254	15124	13604	8492	6309	94.832	3.01
1985	5146	4120	4063	3780	5846	8629	11657	13263	18140	14614	10540	8502	108.700	3.45
Media (miles de m ³)	6626	5437	4815	4283	5615	7393	11545	14356	16248	14148	9595	8077	109.120	3.460
Media (m ³ /s)	2.521	2.069	1.832	1.624	2.137	3.040	4.393	5.463	6.182	5.384	3.803	3.074	3.460	

ANEXO DE TABLAS DE CALCULO

**COMPARACION LONGITUD TUNEL - CARGA DE BOMBEO
TRANSFERENCIA TEMASCALTEPEC**

ALTERNATIVA 3.1

NAMO = 2050 gasto med 3.5 Diam tubo 1.83 Diam tunel 2.60 costo tunel 30000 N\$/m

ELEVACION TUNEL (mascm)	LONGITUD TUBERIA (m)	CARGA ESTATICA (m)	PERDIDAS FRICCION (m)	CARGA TOTAL (m)	POTENCIA MEDIA (KW)	CAPACIDAD INSTALADA (MW)	LONGITUD TUNEL (m)	ENERGIA ANUAL Gwh	COSTO ENERGIA M\$/kwh	COSTO PTA BOMBEO M/\$	COSTO TUNEL M/\$	COSTO TUBERIA M/\$	COSTO INVERSION M/\$	costo ANUALIZADO M\$/año	COSTO TOTAL M\$/año
2050	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	12000	0	0.0	0.0	360	0.0	360.0	43.3	43.3
2100	800	50	7.2	57.2	2.6	4.5	11000	23	5.7	11.3	330	2.3	343.7	41.4	47.1
2150	1400	100	12.7	112.7	5.2	8.8	7000	45	11.3	22.3	210	4.1	236.4	28.5	39.8
2200	1800	150	16.3	166.3	7.6	13.1	3000	67	16.7	33.0	90	5.2	128.2	15.4	32.1
2250	2100	200	19.0	219.0	10.0	17.2	2500	88	22.0	43.4	75	6.1	124.5	15.0	37.0
2300	2400	250	21.7	271.7	12.4	21.3	1800	109	27.2	53.9	54	7.0	114.8	13.8	41.1
2350	3000	300	27.2	327.2	15.0	25.7	1000	131	32.8	64.9	30	8.7	103.6	12.5	45.3
2400	3300	350	29.9	379.9	17.4	29.8	500	152	38.1	75.3	15	9.6	99.9	12.0	50.1
2450	3500	400	31.7	431.7	19.8	33.9	0	173	43.3	85.6	0	10.2	95.7	11.5	54.8

No.	Alternativa	Energía que se deja de generar				Energía consumida por las alternativas del Sistema						TOTAL GWh
		SHMA GWh	Rio Verde GWh	Balsas GWh	Subtotal GWh	Temascal GWh	PB 1 GWh	PB 2,3,4 GWh	PB 5 GWh	PB 6 GWh	Subtotal GWh	
1	Base	0	0	0	0	0	210.4	1399.1	416.8	50.6	2076.9	2076.9
2	SHMA 1	68.6	0	10.55	79.15	0	210.4	1499.7	438.1	50.6	2198.8	2277.95
3	SHMA 2	137.2	0	21.1	158.3	0	210.4	1600.4	459.5	50.6	2320.9	2479.2
4	SHMA 3	205.8	0	31.65	237.45	0	210.4	1701.1	480.9	50.6	2443	2680.45
5	Comunidad 2.2, SHMA 2	137.2	8.7	44.31	190.21	0	210.4	1801.7	502.3	50.6	2565	2755.21
6	Comunidad 2.2, SHMA 3	205.8	8.7	54.86	269.36	0	210.4	1902.4	523.6	50.6	2687	2956.36
7	Comunidad 2.8, SHMA 1	68.6	8.7	40.09	117.39	19.2	210.4	1801.7	502.3	50.6	2584.2	2701.59
8	Comunidad 2.8, SHMA 2	137.2	8.7	50.64	196.54	19.2	210.4	1902.4	523.6	50.6	2706.2	2902.74
9	Comunidad 2.8, SHMA 3	205.8	8.7	61.19	275.69	19.2	210.4	2003	545.0	50.6	2828.2	3103.89
10	San Lucas 3.2, SHMA 1	68.6	8.7	44.31	121.61	77	210.4	1852	512.9	50.6	2702.9	2824.51
11	San Lucas 3.2, SHMA 2	137.2	8.7	54.86	200.76	77	210.4	1902.4	523.6	50.6	2764	2964.76
12	San Lucas 3.2, SHMA 3	205.8	8.7	65.41	279.91	77	210.4	2053.3	555.7	50.6	2947	3226.91
13	San Lucas 4.2, SHMA 0	0	8.7	44.31	53.01	142	210.4	1852	512.9	50.6	2767.9	2820.91
14	San Lucas 4.2, SHMA 1	68.6	8.7	54.86	132.16	142	210.4	1952.7	534.3	50.6	2890	3022.16
15	San Lucas 4.2, SHMA 2	137.2	8.7	65.41	211.31	142	210.4	2053.3	555.7	50.6	3012	3223.31
16	San Lucas 5.0, SHMA 0	0	8.7	52.75	61.45	194	210.4	1952.7	534.3	50.6	2942	3003.45
17	San Lucas 5.0, SHMA 1	68.6	8.7	63.3	140.6	194	210.4	2053.3	555.7	50.6	3064	3204.6
18	EI Tule 5.0, SHMA 0	0	0	52.75	52.75	184	210.4	1952.7	534.3	50.6	2932	2984.75
19	EI Tule 5.0, SHMA 1	68.6	0	63.3	131.9	184	210.4	2053.3	555.7	50.6	3054	3185.9
20	EI Tule 6.0, SHMA 0	0	0	63.3	63.3	220.8	210.4	2053.3	555.7	50.6	3090.8	3154.1

Energía que se deja de generar y consumida por las alternativas analizadas para la ampliación del Sistema Cutzamala

No	Alternativa	Consumo anual de energía de las alternativas analizadas para la ampliación del Sistema Cutzamala					Energía consumida desde Colomes hasta Pericos										CONSUMO TOTAL
							Colomes		PB 2.3.4		Chiteso		PB 5		SUBTOTAL		
		Carga en metros		Carga en metros		Carga en metros		Carga en metros									
		Q1 m3/s	H1 m	Q2 m3/s	H2 m	Energía GWh	Q m3/s	Energía GWh	Q m3/s	Energía GWh	Q m3/s	Energía GWh	Q m3/s	Energía GWh	GWh	GWh	
1	Base	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	13.9	1399.1	1.5	50.6	19.5	416.8	2076.9	2076.9	
2	SHMA 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	14.9	1499.7	1.5	50.6	20.5	438.1	2198.8	2198.8	
3	SHMA 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	15.9	1600.4	1.5	50.6	21.5	459.5	2320.9	2320.9	
4	SHMA 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	16.9	1701.1	1.5	50.6	22.5	480.9	2443.0	2443.0	
5	Comunidad 2.2. SHMA 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	17.9	1801.7	1.5	50.6	23.5	502.3	2565.0	2565.0	
6	Comunidad 2.2. SHMA 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.9	210.4	18.9	1902.4	1.5	50.6	24.5	523.6	2687.0	2687.0	
7	Comunidad 2.8. SHMA 1	0.0	0.0	0.7	223.0	19.2	10.9	210.4	17.9	1801.7	1.5	50.6	23.5	502.3	2565.0	2584.2	
8	Comunidad 2.8. SHMA 2	0.0	0.0	0.7	223.0	19.2	10.9	210.4	18.9	1902.4	1.5	50.6	24.5	523.6	2687.0	2706.2	
9	Comunidad 2.8. SHMA 3	0.0	0.0	0.7	223.0	19.2	10.9	210.4	19.9	2003.0	1.5	50.6	25.5	545.0	2809.0	2828.2	
10	San Lucas 3.2. SHMA 1	3.2	196.0	0.0	0.0	77.0	10.9	210.4	18.4	1852.0	1.5	50.6	24.0	512.9	2625.9	2702.9	
11	San Lucas 3.2. SHMA 2	3.2	196.0	0.0	0.0	77.0	10.9	210.4	18.9	1902.4	1.5	50.6	24.5	523.6	2687.0	2764.0	
12	San Lucas 3.2. SHMA 3	3.2	196.0	0.0	0.0	77.0	10.9	210.4	20.4	2053.3	1.5	50.6	26.0	555.7	2870.0	2947.0	
13	San Lucas 4.2. SHMA 0	3.2	196.0	1.0	530.0	142.0	10.9	210.4	18.4	1852.0	1.5	50.6	24.0	512.9	2625.9	2767.9	
14	San Lucas 4.2. SHMA 1	3.2	196.0	1.0	530.0	142.0	10.9	210.4	19.4	1952.7	1.5	50.6	25.0	534.3	2748.0	2890.0	
15	San Lucas 4.2. SHMA 2	3.2	196.0	1.0	530.0	142.0	10.9	210.4	20.4	2053.3	1.5	50.6	26.0	555.7	2870.0	3012.0	
16	San Lucas 5.0. SHMA 0	3.2	196.0	1.8	530.0	154.0	10.9	210.4	19.4	1952.7	1.5	50.6	25.0	534.3	2748.0	2942.0	
17	San Lucas 5.0. SHMA 1	3.2	196.0	1.8	530.0	154.0	10.9	210.4	20.4	2053.3	1.5	50.6	26.0	555.7	2870.0	3064.0	
18	El Tule 5.0. SHMA 0	5.0	309.0	0.0	0.0	184.0	10.9	210.4	19.4	1952.7	1.5	50.6	25.0	534.3	2748.0	2932.0	
19	El Tule 5.0. SHMA 1	5.0	309.0	0.0	0.0	184.0	10.9	210.4	20.4	2053.3	1.5	50.6	26.0	555.7	2870.0	3054.0	
20	El Tule 6.0. SHMA 0	6.0	393.0	0.0	0.0	220.8	10.9	210.4	20.4	2053.3	1.5	50.6	26.0	555.7	2870.0	3090.8	

Consumo de energía eléctrica de las alternativas analizadas para el incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala

C O N C E P T O	BASE	TEMASCALTEPEC
	Mill \$	Mill \$
Sueldos y Salarios	9.00	10.4
Mantenimiento preventivo plantas de bombeo	30.70	35.3
Mantenimiento preventivo tuberías, presas y otros	7.70	8.8
SUBTOTAL	47.40	54.50
25 % Imprevistos	11.85	13.63
TOTAL COSTOS FIJOS	59.25	68.13

Integración del costo fijo distinto de la energía eléctrica

C O N C E P T O		Costo Unitario \$/m3
Costo Variable (Excepto energía eléctrica)	Sulfato de Aluminio	0.068
	Gas Cloro	0.041
	Transportación de Reactivos	0.004
	Mantenimiento programado	0.040
	Derechos de agua.	0.040
	SUBTOTAL	0.193
	25 % Imprevistos	0.048
TOTAL COSTO VARIABLE		0.241

Integración del costo variable distinto de la energía eléctrica

No	Alternativa	Costo Total Agua Potable	Inversión en alternativa base	Prestos y Comenzos	Líneas de Conductores	Subest. Bomb. Comunc. y Control	Turbinas	Afectaciones	Obras Sociales	Obras de Saneamiento	Liquidación personal e Hidroelec.	Migración Impacto Ambiental	Subtotal	Ampliación PB 2 3 4	Ampliación PB 5	Línea de Conductores a Toluca	Ampliación Planta Potabilizada	Subtotal	Total Millones de		
																			\$	USD	
1	Base	195	1232	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1232	160	
2	SHMA 1	215	1232	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	0	0	0	0	130	130	1370	178
3	SHMA 2	215	1232	0	0	0	0	0	0	0	8	0	8	0	0	0	0	130	130	1370	178
4	SHMA 3	225	1232	0	0	0	0	0	0	0	32	0	32	0	0	0	0	195	195	1459	189
5	Comunidad 2 2 SHMA 2	237	1232	129	107	0	376	5	195	0	8	16	836	0	0	0	0	195	195	2263	294
6	Comunidad 2 2 SHMA 3	247	1232	129	107	0	376	5	195	0	32	16	860	114	0	0	0	195	309	2401	312
7	Comunidad 2 8 SHMA 1	233	1232	233	196	67	376	13	195	0	8	36	1097	0	0	0	0	195	195	2524	328
8	Comunidad 2 8 SHMA 2	243	1232	233	196	67	376	13	195	0	8	39	1097	114	0	0	0	195	309	2638	343
9	Comunidad 2 8 SHMA 3	253	1232	233	196	67	376	13	195	0	32	39	1121	114	31	46	0	195	386	2739	356
10	San Lucas 3 3 SHMA 1	237	1232	275	196	137	307	23	195	8	8	70	1129	0	0	0	0	195	195	2556	332
11	San Lucas 3 2 SHMA 2	247	1232	275	196	137	307	23	195	8	8	70	1129	114	31	46	0	195	386	2747	357
12	San Lucas 3 2 SHMA 3	257	1232	275	196	137	307	23	195	8	32	70	1153	114	31	46	0	260	451	2836	368
13	San Lucas 4 2 SHMA 0	237	1232	381	262	249	307	30	195	8	0	91	1513	0	0	0	0	195	195	2940	382
14	San Lucas 4 2 SHMA 1	247	1232	381	262	249	307	30	195	8	8	91	1521	114	31	46	0	195	386	3139	408
15	San Lucas 4 2 SHMA 2	257	1232	381	262	249	307	30	195	8	8	91	1521	114	31	46	0	260	451	3204	416
16	San Lucas 5 0 SHMA 0	245	1232	381	305	374	307	30	195	8	0	91	1651	114	31	46	0	195	386	3309	430
17	San Lucas 5 0 SHMA 1	255	1232	381	305	374	307	30	195	8	8	91	1659	114	31	46	0	260	451	3382	439
18	El Tule 5 0 SHMA 0	245	1232	555	196	278	307	30	195	14	0	51	2327	114	31	46	0	195	386	3547	513
19	El Tule 5 0 SHMA 1	255	1232	555	196	278	307	30	195	14	8	51	2337	114	31	46	0	260	451	4020	522
20	El Tule 5 0 SHMA 0	255	1232	555	196	278	307	30	195	14	0	51	2327	114	31	46	0	260	451	4012	521

Inversión total por alternativa para la evaluación económica del incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala

Evaluación económica de las alternativas de incremento del aprovechamiento para agua potable del Sistema Cutzamala.

Alternativa 6
 Inversión 2401
 Gasto 245
 No Gen 166
 Utilizada 1003
 i 0 12

Año	Gasto Total m3/s	Volumen Total Mill m3	VPN Vol Mill m3	Inversión Total Mill \$	Costo E. Eléctrica		Ley de Mejoras Mill \$	Mantenim Mayor Mill \$	Otros Costos Mill \$	TOTAL Mill \$	VPN Mill \$
					No Generada Mill \$	Utilizada Mill \$					
1				1200.5						1200.5	1072
2				1200.5						1200.5	957
3	24.5	773	550.2		166	1003	150	144	222	1685	1199
4	24.5	773	491.3		166	1003	150	144	222	1685	1071
5	24.5	773	438.6		166	1003	150	144	222	1685	956
6	24.5	773	391.6		166	1003	150	144	222	1685	854
7	24.5	773	349.7		166	1003	150	144	222	1685	762
8	24.5	773	312.2		166	1003	150	144	222	1685	681
9	24.5	773	278.8		166	1003	150	144	222	1685	608
10	24.5	773	248.9		166	1003	150	144	222	1685	543
11	24.5	773	222.2		166	1003	150	144	222	1685	484
12	24.5	773	198.4		166	1003	150	144	222	1685	432
13	24.5	773	177.2		166	1003	150	144	222	1685	386
14	24.5	773	158.2		166	1003	150	144	222	1685	345
15	24.5	773	141.2		166	1003	150	144	222	1685	308
16	24.5	773	126.1		166	1003	150	144	222	1685	275
17	24.5	773	112.6		166	1003	150	144	222	1685	245
18	24.5	773	100.5		166	1003	150	144	222	1685	219
19	24.5	773	89.8		166	1003	150	144	222	1685	196
20	24.5	773	80.1		166	1003	150	144	222	1685	175
21	24.5	773	71.5		166	1003	150	144	222	1685	156
22	24.5	773	63.9		166	1003	150	144	222	1685	139
23											
24											

TOTAL INVERSION	2401 Mill \$
VPN INVERSION	2029 Mill \$
TOTAL OPERACION	33700 Mill \$
VPN OPERACION	10034 Mill \$
VPN VOLUMEN TOT	4603 Mill \$
COSTO NIVELADO	2.62 Mill\$/Mill m3