

01162

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**PROPUESTA DE UN MÉTODO PARA TRATAR DE
MANTENER EL EQUILIBRIO DEL ABASTECIMIENTO DE
AGUA POTABLE EJEMPLIFICADO EN LA ZONA
METROPOLITANA DE MONTERREY, NUEVO LEÓN**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

PRESENTA:

ING. SERGIO LOZANO TORRES

DIRECTOR DE TESIS: DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D. F., 2002



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.

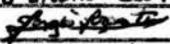
ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

¡Dedico este trabajo a mi preciosa esposa Gely Moncayo!

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: SERGIO LOZANO TORRES

FECHA: 6 ENERO 2004

FIRMA: 

Agradecimientos

El Doctor Carlos Escalante S. en sesiones de coordinación con otros estudiantes nos impulsó a cada uno a delimitar el alcance de nuestros trabajos. Mi director de tesis, Doctor Ramón Domínguez M. es realmente el autor de la idea y los procedimientos. Desde etapas muy tempranas conté con apoyo de información de un estudiante más avanzado, mi compañero Juan Pablo del Conde G. El Director de la empresa COINPRO, Ing. Héctor Bolívar V. fue muy amable en ponerme en contacto con el Organismo Operador del Agua en Monterrey, SADM. Fue muy valiosa la documentación producto de esta empresa y la que me proporcionó el Ingeniero Octavio Salinas, de SADM. Tuve la gracia de contar con el tiempo y la atención del Director de la empresa Planeación, Sistemas y Control, Ing. Arturo Jiménez R. Gracias a la disposición de los Ingenieros Guillermo Bautista y César Guerrero O., de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, en la Comisión Nacional del Agua (CNA). En el proceso de trabajo fue importante contar con el interés primero de mis padres, Sergio M. e Irma; y luego, además, de mi esposa Angélica. Por parte del Jurado Revisor, doy gracias a la Doctora Lilia Reyes Ch. por sus ánimos y correcciones respecto a la coherencia de la información básica, al Doctor Jesús Gracia S. porque procuró la mención de las condiciones de manejo de agua actuales en Monterrey, al Doctor Carlos Escalante S., al Doctor Oscar Fuentes M. por quien el trabajo pudo al final tener un soporte más robusto, al Maestro Víctor Franco encargado de dirigirme nada más ni menos que a concluir. Gracias al Señor Jesucristo, hay varias secciones de las que me sentí orgulloso. Y quedo agradecido con mis amigos de oficina en la Gerencia del PROMMA, de la CNA; muy en particular a mis jefes CP Juana Otero M., MI Adán Carro de la F., y Dr. Venancio Trueba L.

ÍNDICE

	Página
1. Introducción.....	iii
2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua.....	1
3. Metodología y suposiciones.....	39
4. Estimación de la recarga y deducción de la curva "elevaciones – capacidades" en los acuíferos.....	49
5. Modelo de manejo conjunto de fuentes superficiales y subterráneas y pruebas con diversas políticas de operación.....	67
6. Situación actual del manejo conjunto de agua en la ZMM y posible aplicación del método.....	97
7. Conclusiones.....	101
8. Bibliografía.....	103
9. Nomenclatura.....	105
10. Anexo. Método de Knisel en acuíferos cársticos.....	107

1. Introducción

Se presenta un método, basado en la programación dinámica, para tratar de mantener el equilibrio en el abastecimiento de agua potable procedente tanto de fuentes superficiales como subterráneas. Es flexible para adaptaciones generadas en el seno de las oficinas con la experiencia del manejo del agua en una población.

El método requiere de integrar a las diversas fuentes existentes en dos grupos: el superficial y el subterráneo, y a través de una función beneficio para cada uno de ellos se puede generar políticas de manejo conjunto. La implementación en el paquete de cómputo Excel, de uso común, libera al usuario del tener que conocer algún lenguaje particular de programación, y le facilita realizar ajustes.

Generado del interés de trabajar en aspectos del manejo integral del agua, pero habiendo delimitado el alcance debido a que tal manejo es tan amplio que implica la consideración de aspectos ambientales, económicos, de planeación, de coparticipación bien definida en las responsabilidades por parte tanto de la sociedad como de oficinas administrativas y técnicas del Estado, se eligió el trabajo que aquí se presenta, y se ejemplificó su aplicación con el caso del abastecimiento de agua a la Zona Metropolitana de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

Con información proporcionada en las oficinas del Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey, la Comisión Nacional del Agua, dos empresas privadas que ya antes habían realizado estudios de la zona; y también a trabajos y algunas tesis previas, fue posible llevar a cabo el proceso de recopilación de información y desarrollo del estudio.

Se presentan primero datos básicos de las fuentes de abastecimiento y la demanda en la Zona Metropolitana de la ciudad de Monterrey; en seguida, se plantea la metodología utilizada y comentarios acerca de las suposiciones que fueron necesarias para solucionar carencias de información; posteriormente se describen los cálculos y resultados de la estimación de variables en las fuentes subterráneas; y luego, se muestra la explicación del modelo de manejo conjunto y algunas pruebas con los datos de la zona. En la parte final se presentan las conclusiones del trabajo, entre las que destaca que el método podría ser una sencilla herramienta adicional de las oficinas encargadas del manejo del agua en una población, pero también de los grupos de usuarios, para encontrar políticas de operación mutua de acuíferos y presas.

2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua

En esta sección se describen las fuentes naturales de abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana de la Ciudad de Monterrey (ZMM), en especial sus datos básicos de manejo como son los registros de medición de ingreso por lluvia y caudal de ríos; y también los registros de evaporación y de extracciones; y en el caso de fuentes subterráneas, los registros de niveles freáticos. Se presentan tanto la demanda histórica de la ZMM, como la demanda de agua por parte de los otros usuarios de las mismas fuentes. Finalmente se muestra un cálculo de los límites de abastecimiento y capacidad de conducción en las diversas fuentes.

La ZMM satisface las necesidades de agua de sus habitantes extrayendo el líquido de fuentes superficiales y subterráneas. El conjunto de todas las fuentes se ha organizado en seis sistemas (ajustado de COINPRO -empresa Consultores en Ingeniería y Proyectos, SA-) para su administración. Cuatro sistemas contienen sólo fuentes subterráneas; uno, sólo superficiales; y el otro, una combinación de ambas. En la figura y tabla siguientes se muestra el esquema de los sistemas y la lista de las fuentes incluidas.

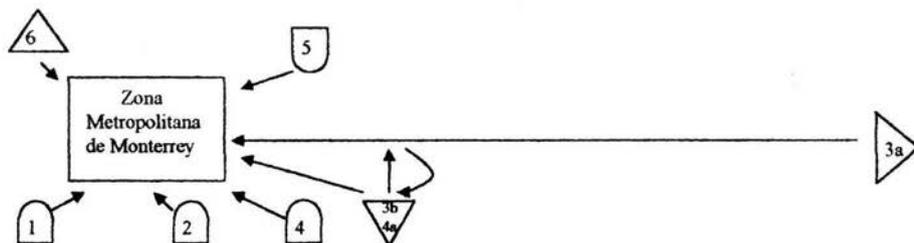


Figura 1. Esquema de los sistemas de aguas superficiales y/o subterráneas que utiliza la ZMM (modificado del de Loaiza y Jiménez, 1987).

Tabla 1. Fuentes de aguas superficiales y subterráneas más importantes contenidas en los seis sistemas de abastecimiento de agua a la ZMM.

Sistema	Fuentes importantes
1 Mina (aguas subterráneas)	a) pozos
2 Santa Catarina (aguas subterráneas)	a) galerías Huasteca b) galerías Morteros c) campo de pozos Buenos Aires
3 Linares – Monterrey (aguas subterráneas y superficiales)	a) presa Cerro Prieto b) presa La Boca (considerada como reguladora) c) pozos Guadalupe, y pozos de San Roque y Ciudadela
4 Santiago (aguas subterráneas y superficiales)	a) presa La Boca (considerada como no reguladora) b) túneles Cola de Caballo c) túnel San Francisco d) manantial La Estanzuela e) manantial y galería Los Elizondo
5 Monterrey (aguas subterráneas)	a) manantial Jacales b) manantial Apodaca c) pozos de Monterrey d) pozos de Topo Chico
6 El Cuchillo (aguas superficiales)	a) presa El Cuchillo

A continuación se presenta una descripción de los sistemas con énfasis en la información útil para el manejo conjunto del agua superficial y subterránea. Esta descripción fue tomada del trabajo de COINPRO, basado a su vez en datos proporcionados por el organismo operador del agua en la ZMM "Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey" (SADM). Los datos de mediciones de variables se tomaron del mismo trabajo, del estudio de CNA acerca de políticas de manejo de los ríos Bravo y San Juan, y del propio SADM. Sin embargo, es pertinente aquí hacer una

reflexión; parte del agua subterránea se obtiene mediante la extracción controlada de caudales bombeados desde los pozos que se han perforado a lo largo del tiempo; pero existen también fuentes que por la naturaleza geológica o topográfica no dependen tanto de la operación humana, tal es el caso de las galerías, los túneles y manantiales¹. También en alguna época, las obras de ampliación en el interior de las zonas de captación de estas fuentes han permitido elevar el volumen aprovechable. En un momento dado, no se puede graduar las cantidades extraídas de estas fuentes porque éstas no son controlables de forma inmediata sino que fluyen o manan de acuerdo con los niveles y volúmenes del agua almacenada en el acuífero y estos dos dependen, en un plazo mayor que el inmediato, de la recarga y de las políticas de extracción que se hayan llevado a cabo. Por lo anterior, el manejo conjunto de las fuentes superficiales y subterráneas puede llevarse a cabo mediante una planeación de extracciones en los pozos y las presas, pero las fuentes de flujo no controlado se les considera como una contribución no sujeta a manejo. Sería necesario contar con los valores de estas contribuciones y tratarlas separadamente como una constante. No fue posible disponer de datos específicos de cada fuente, sino sólo los referentes a la producción o extracción global de los sistemas subterráneos, que contienen implícitamente a todos sus pozos y en su caso las galerías y otras fuentes.

Sistema Mina

Área de recarga: 150 km²

Localización. Al norte de la Ciudad de Monterrey, entre los paralelos 23°59'30" y 26°02'00" N, y los meridianos 100°32'00" y 100°35'00" O.

Geología. El acuífero confinado por formaciones impermeables está constituido por rocas calizas interconectadas de las formaciones Aurora y Cupido que datan del cretácico inferior.

Este sistema se ha utilizado con pozos que comunican a un acueducto hacia Monterrey desde 1958. Entre los años 1967 y 1978, debido a que la recarga fue mayor que la extracción, el sistema experimentó derrames. Entre 1979 y 1985 se operó con sobreexplotación. El agua se conduce a la ciudad por dos tuberías con flujo regulado por cuatro tanques. El registro histórico de lluvia diaria en la estación Pozos Mina, entre los años 1982 y 1986 elegidos en este trabajo se muestra a continuación, y en seguida, los datos de extracción mensual a través de los pozos, en el mismo período. También se presentan, los niveles estáticos de pozos disponibles, pero sólo de los años 1996 y 1997, porque no se contó con más información.

¹ Galería: es una hoquedad más o menos amplia en el subsuelo a través de cuyas paredes o techo cae agua proveniente del acuífero la cual puede ser recolectada y conducida a través de túneles o tuberías hacia fuera de esta zona de captación para su aprovechamiento

Tabla 2. Datos de Lluvia diaria en mm de la estación "Pozos Mina" ubicada en: latitud= 26.17°N, longitud= 100.42°O. Fuente: base de datos ERIC. NOD= no hubo dato registrado.

AÑO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1982	ene	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	feb	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	mar	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	abr	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	may	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	jun	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	jul	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	nov	0	0	0	7.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	7	0	0	0	0
	dic	0	0	0	0	0	0	0	11	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	4.3	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	feb	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	mar	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	may	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	jun	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	jul	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	sep	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	2	2.5	5	23	0	0	1.5	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
	oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	ene	0	14	7	0	10	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	6	12.5	16	0	0	0	1	48	3	
	feb	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	mar	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																								
	abr	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																							
	may	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	4	10	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0	
	jun	0	0	0	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.4	

Capítulo 2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua

AÑO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
	jul	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	4	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	4	3	58	0	0	0	0	14.5	2	1	0
	ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	oct	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	nov	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
1985	ene	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	2	0	3	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0		
	feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	4	3	0	NOD		
	mar	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	abr	0	0	0	0	0	0	4	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	may	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4	7.5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	
	jun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0		
	jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13.5	0	0	0	0	0	
	ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	nov	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
1986	ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NOD	0	
	mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	abr	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5	3	0	0	
	may	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	jun	1.5	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	5.5	1	0	0	0	0	0		
	jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	oct	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	nov	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										
	dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																										

Tabla 3. Extracciones en el sistema Mina en millones de m³ entre 1982 y 1984 (según COINPRO).

	1982	1983	1984	1985	1986
ene	3.85	2.10	1.43	1.69	0.63
feb	3.32	2.01	1.39	1.73	0.59
mar	3.22	1.97	1.41	1.49	0.61
abr	3.09	1.78	1.49	1.74	0.60
may	3.08	1.71	1.40	1.71	0.64
jun	3.38	1.43	1.36	1.55	0.66
jul	3.50	1.49	1.61	1.73	0.67
ago	2.90	1.56	2.47	1.38	0.66
sep	2.95	1.50	2.40	1.26	0.63
oct	2.79	1.46	2.01	0.69	0.68
nov	2.46	1.47	2.01	0.62	0.66
dic	2.47	1.39	1.68	0.61	0.64

Tabla 4. Niveles Estáticos mensuales de nueve pozos del Sistema Mina durante 1996 y 1997 expresados como profundidad en metros respecto del suelo.

AÑO	MES	POZO 1	POZO 4	POZO 5	POZO 6	POZO 7	POZO 8
1996	ene	69.9			70.5	83.85	85.25
	feb	72.15			73.8		89.47
	mar	73.8			76.9	86.5	92.5
	abr	75.8	93.2		77.8		92.75
	may	78.8			80.27		96.25
	jun	78.84	95.65	84.95	79.85		95.25
	jul	78.6	94.25	84.5	79.42	100.9	94
	ago	72.75	90.52	79.64	64.55		
	sep	62	80.23	69.2	63.88		79.25
	oct	46.33			48	57.9	63.2
	nov	45.24	63.08		48.94	57.3	62.48
	Dic	46.52	64.28	53.42	49.33		63.77
1997	ene	47.8	65.25	54.6	50.5		64.95
	feb	49.23	67		51.98	60.93	66.48
	mar	50.25			51.96	62.11	67.56
	abr	46.2			48.5	58.6	63.3
	may	44.9		51.76	47.52	56.48	62.17
	jun	43.92	61.98		46.47	55.62	61.1
	jul	45.82			47.58		63.13
	ago	48	65.7	54.7	49.6		65.05
	sep	45.98	63.71		47.63		63.19
	oct	43.25	61.08		45.07		60.53
	Nov						
	Dic						

Sistema Santa Catarina (Buenos Aires o Huasteca)

Área de recarga: consta de dos; una de 450 km² y otra de 622.4 km²

Localización. Se extiende en la cuenca del río Santa Catarina, aguas arriba de Monterrey, está limitado por las coordenadas 25°29'30", 26°02'00"N y 100°20'00", 100°29'00" O, en una zona de cadenas de sierras pertenecientes a la Sierra Madre Oriental y valles estrechos.

Geología. La zona está conformada por tres acuíferos: el acuífero de calizas confinadas de las formaciones Cupido y Aurora del cretácico inferior; el acuífero de aluvión (arenas y gravas de los lechos de las corrientes); y el acuífero de calizas del Jurásico perteneciente a la formación Zuloaga y que está interrelacionado con el acuífero de aluvión.

La lluvia se infiltra en el aluvión y las calizas. De las sierras surgen a diferentes niveles los manantiales, como los de San Francisco y Cola de Caballo, y los pozos artesianos de Buenos Aires (que pertenece al acuífero de calizas Zuloaga). La explotación se realiza por medio de galerías (Huasteca, y Morteros en el acuífero de Aluvión), túneles y pozos (en los tres acuíferos).

El río Santa Catarina se utilizó como drenaje de la ciudad de Monterrey desde la época colonial, primero en canal y más tarde entubado. El agua de las fuentes superiores se conduce por gravedad al tanque del obispado; y por otra parte, se hace uso del bombeo desde los pozos hacia las zonas más altas, con regulación por tanques como el de Santa Catarina II y Valle III.

Las lluvias registradas diariamente en la estación El Pajonal durante el periodo 1975-1986, así como información disponible sobre extracciones totales en el sistema (pozos, galerías, túneles), y de niveles en los pozos disponibles quedan anotadas en las tablas que siguen.

Tabla 5. Datos de lluvia diaria en mm de la estación El Pajonal, ubicada en: latitud = 25.50° N longitud = 100.37° O. Fuente: base de datos ERIC. NOD= no hubo dato registrado.

ANO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1975	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jun	0	0	0	0	0	20	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	
	Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	20	13	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	
	Ago	0	0	0	0	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	15	80
	Sep	17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1976	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.8	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8	0
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.4	0.3	0.2	0.3	0	0	0	0	0.5	4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abr	0	3	0	2.5	0	5.5	0	1.3	0	3.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33.7	0
	May	0	30	0	10	0	0	0	0	7	0	3	12	0	0	0	11	21	15	5	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	
	Jun	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	7	6	2	0	0	0	0	2	2	1.5	0	0	0	0	0	
	Jul	0	0	0	60	30	30	17	5	14	7	4	8	0	2	7	0	0	0	0	0	3	18	0	2	0	0	0	0	0	0	
	Ago	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	20	5	0	0	0	3	0	4	0	0	11	0	0	
	Sep	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	11	25	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	
	Nov	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	17	56	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	5	9	18	0	
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	5	0	0	0	0	1	6	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	
1977	Ene	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0.9	0	0	0	0	0	0.5	0.2	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0		
	Feb	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0.6	0	0	0		
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.5	1	0	0	0	0	2	4	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jun	0	0	0	0	0	12	6	0	0	0	0	3	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	

Capítulo 2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua

ANO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
1978	Jul	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	16	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
	Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43	14	3	5	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	33	3	70
	Sep	113	65	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Oct	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Feb	0	5	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0
	Abr	6	10	2	0	2.5	0	0	2	0	4	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jun	0	59	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0.4	0	0	17	25	
Ago	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	16	26	12	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	8	
Sep	0	0	0	0	10	6	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	62	30	4	5	6	14	0	0	0	0	
Oct	0	0	0	38	8	21	41	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0	0	0	0	
Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	13	0	0	0	0	0	
Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	
1979	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	
	Feb	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5	5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jun	34	0	0	16	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jul	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	
	Ago	8	16	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8	12	0	
	Sep	0	4	34	0	0	14	39	28	38	0	0	0	0	6	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	5	0	0	0	0	
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dic	0	27	12	3	0	0	0	0	0	0	0	25	12	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1980	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	

ANO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31						
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
	Abr	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
	May	0	6	0	7	8	0	0	0	0	0	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.5	0	0	0	3	0	0	0	0	0					
	Jun	0	0	0	0	0	0	0	0	40.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9.4	0	0	0					
	Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	6.3	0	0	0	0	0	0	0	0	3.5	53.5	32	12.6	23.3	13.4	0	0	0	4	0	0	0	0	0					
	Ago	0	0	0	0	5	0	4	98.3	0	0	0	6	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	18.5	4	0	0	0	0					
	Sep	0	0	0	0	8	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	60	40	0	0	0	0	71	0	0					
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	16	0	15	0	2	0	0	0	0	14	10	14	36	0	1	2	0	0	0	0	0	24	3	0	0					
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1981	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	10	4	0	0	10	9	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0					
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
	Mar	0	2	0	0.6	0	0	0	0	2	3	4	2	0	0	1	5	0	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	12.6	0	0	0	0	0	29.3	36.5	23	0	0	0	4.2	4	0	5.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	May	28.2	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16.5	0	0	15.1	0	10.3	0	0	0	0	15.1	10.3	40	0	0	0				
	Jun	0	0	0	11	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72.5	0	0	0	0	0	0	3.2	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Jul	0	0	0	0	20	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32.2	2.1	0	0	0	8	16.3	18.2	21.1	0	0	0	0	0	0	0			
	Sep	6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	85	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20.5	22.1	8.5	0	0	0	0				
	Oct	3	0	0	0	0	3.1	0	0	0	0	0	0	3.1	0	0	0	0	20.5	0	0	0	4	3	0	0	0	0	0	0	0	3.1	5	0	0			
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0			
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1982	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.3	0	0	0	0	30	15	16	0	0	0	0	0	10	22	0	0	0	0	0		
	May	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	14	4	0	0	0	16	4	17	14	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Jun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jul	39	0	10	17	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	22	21	0	0	0	0	0	10.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Sep	0	0	40	12	0	0	8.5	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	69	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Oct	0	0	8	0	0	18.5	0	0	4	7	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ANO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	20.5	0	0	0	0		
	Dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
1983	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	4	0	NOD	NOD	4	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0		
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	May	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Jun	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Jul	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Oct	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Nov	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
1984	Ene	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Feb	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	May	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Jun	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Jul	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	0	4	0	0	12	4	0
	Ago	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Sep	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Oct	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Nov	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Dic	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
1985	Ene	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0	4	2	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0		
	Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	0		
	Mar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	4	7	0	0	0	3	0	
	May	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																											
	Jun	0	0	16	6	0	14	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	5	15	2	0	0	0	

Capítulo 2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua

AÑO	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
	Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	27	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	Ago	0	0	0	2	0	0	0	0	8	0	0	0	22	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0
	Sep	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	7	0	8	10	0	0	0	0	12	3	0	0	0	0	0	0	0	24	10	4	0
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	34	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dic	NOD																														
1986	Ene	NOD																														
	Feb	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mar	NOD																														
	Abr	NOD	0																													
	May	NOD																														
	Jun	NOD	0																													
	Jul	NOD																														
	Ago	NOD																														
	Sep	NOD	0																													
	Oct	NOD																														
	Nov	NOD	0																													
	Dic	NOD																														

Tabla 6. Extracciones en millones de m³ del sistema Santa Catarina (según COINPRO).

	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
Ene	6.59	6.90	7.03	7.27	9.40	6.21	4.82	5.55	4.59	4.54	5.05	4.58
Feb	6.44	6.85	7.28	8.18	9.32	6.00	5.03	4.53	4.75	4.25	4.80	4.12
Mar	5.96	6.86	7.72	8.45	8.71	5.61	4.98	6.04	4.76	4.32	4.55	3.92
Abr	6.41	7.25	7.55	8.29	8.47	5.53	5.22	5.90	5.11	4.74	4.87	3.81
May	6.79	6.92	7.29	7.98	7.79	5.05	5.06	5.60	5.02	4.74	4.88	3.89
Jun	6.44	6.83	7.84	7.75	7.49	4.65	5.63	5.42	5.11	4.88	5.07	3.82
Jul	6.33	6.82	7.66	7.07	7.05	4.80	5.94	6.04	5.02	4.85	4.75	3.88
Ago	6.51	6.67	7.61	6.67	7.99	5.14	5.74	5.11	4.94	4.90	4.83	4.01
Sep	6.24	6.59	7.71	6.55	7.27	5.05	6.18	5.01	4.62	5.04	4.92	3.86
Oct	5.77	6.63	9.38	9.10	6.96	4.91	4.98	4.96	4.60	5.05	4.69	3.68
Nov	6.73	6.50	7.43	8.89	6.32	4.88	5.55	4.80	4.65	5.03	4.68	3.52
Dic	6.87	6.10	7.07	9.18	6.32	4.95	5.77	4.66	4.73	4.72	4.56	3.42

Tabla 7. Niveles estáticos de pozos del sistema Santa Catarina expresados como profundidad en metros respecto del suelo

	Número de pozo																	
	4	5	10	12	13	17	18	19	26	27	28	33	35	36	39	Gal 4	6	30
1996 ene		85.02	9.85	42.86	5.28	35.38			0	25.75	33.15		66.63	42.41	31.14			30.26
feb		92.07	13	46.25	13.7	38.4	22.83	3.68	30.17	37.7		66.62	52	35.56				
mar		92.24	18.2	51.57	17.4	43.83		7.44	34.2	42	81.52	65.24	55.25	39.36				
abr		96.4	20.7	54.78	20.5	46.32	30.88	10.25	36.88	44.73		64.65	57.22	42.35				
may		95.92	23.4	56.95	23.9	49.1	33.72	13.5	40.38	48.08		64.4	59.2	45.86				
jun		100.7		61.52	26.9	53.66	37.8	16.53	43.39	51.24	80.9	64.5	61.45	48.9				
jul		102.7		66.5	29.8	58.48	42.75	19.32	46.19	53.98	80.07	63.93	63.91	51.73				
ago							47.85				79.84	63.56						
sep		105.3		70.62	12.6	62.7	47.36	2.57	28.98	36.23	79.8	63.63	67.9	34.6				
oct	36.88	67.35		36.7	0	15.98	0	3.28	9.4	78.7		41.83	8.4		22.7			
nov	33	63.6		31.56	0	24.91	9.89	0	10.66	17.47	78.4	62.42	37.7	16				
dic	32.7	62.75		31.85	0	24.84	9.59	0	14.95	21.89	77.8	61.78	36.71	20.26	54			
1997 ene	30.22	61.54		35.74	4.48	28.46		0	20.9	28.18	75.97	60.37	35.26	26.3				
feb	31.7	63		39.55	7.75	32.04		0	24.32	31.5	75.75	59.17	36.75	29.58				
mar	34.11	62.22		43.74	10.9	35.86	20.65	1.2	27.35	34.82	73.6	57	39.88	32.77	49			
abr	34.83	66		46.42	12.5	38.5	23.15	2.4	28.84	36.35	72.7	56.2	41.28	34.33	48			
may	35.1	66.55		48.96	14.1	41.1	25.4	3.98	30.35	37.94	72.21	55.87	41.91	36	48			
jun	37.55	68.33	16.9	51.1	15.3	43.65		4.85	31.6	39.12	72.97	56.57	43.35	36.87				
jul	37.94	68.95	20.2	53.92	18.1	46.3	100.3	7.63	34.38	42.02			44.4	39.78				
ago	39.25			55.97	20.7	48.2		10.32	37.13	44.94	75.22		45.22	42.9				7
Sep	41	72		59.55	23.4	51.87		13.02	39.92	47.58	76.17		47.24	45.31				9
Oct	41.58	72.83		60.73	23.3	52.63		12.95	39.74	47.39	76.56		46.87	45.23				10

Tabla 8. Nivel de agua en msnm del pozo 5BA del sistema Santa Catarina (en la bibliografía no es claro cuáles niveles son estáticos y cuáles dinámicos)

	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
ene	756.8	763.7	765.7	765.1	767.2	720.04	691.24	692.84	693.84			676.84
feb	764.8	763.6	764.6	764.6	765.1	701	690.74	697.94	684.6			
mar	764.3	762.3	764.9	764.2	765.1	698.2	688.07	703.04	685.18			
abr	763.8	762.5	764.6	762.8	764.8	683.2	684.06	694.42	667.84			
may		760	764.6	760.2	763.9	692.2	681.42	688.68	663.84		676.84	
jun		759.8	763.2	762.2		696.5	689.14	667.52	664.84		676.84	671.84
jul			758		747.3	689.8	688.89	666.29	662.34		679.84	
ago					746.3	695.8	699.14	660.24	664.84			
sep		722.5	767.5		747	693.2	701.34	699.04	666.84			
oct	762.8		767.7	772.8		692.2	686.34	688.11	657.34			670.84
nov	764.1		766.9	768.9		691.99	691.88	691.04	659.84			670.84
Dic	763.9	762.9	765.6	767.9		691.64	692.84				647.27	666.84

Sistema Linares – Monterrey

Este sistema abastece de agua a Monterrey a partir de los almacenamientos de líquido en las presas Cerro Prieto y La Boca y también de los pozos someros que contribuyen con volúmenes hacia el acueducto por el que se conduce toda el agua mediante bombeo hacia las cotas superiores en que se localiza la ciudad. El acueducto tiene longitud de 131.865 km hasta la planta potabilizadora (San Roque) y vence un desnivel de 255.76 m.

Presa José López Portillo (Cerro Prieto)

Localización. Sobre el río Pablillo, pero también recibe aguas del río Camacho.

Área de la cuenca: 1,610 km² (621 km² del río Pablillo y 989 km² del río Camacho).

Capacidad de almacenamiento al NAMO: 300 Mm³.

Capacidad muerta (de azolve): 25 Mm³.

Nivel mínimo para operación de la planta de bombeo PB1: 265.60 msnm.

Nivel de la compuerta 2: 271.60 msnm.

Nivel de la compuerta 3: 278.65 msnm.

Capacidad máxima de obra de toma: 6.0 m³/s

Comenzó a operar en julio de 1984. A continuación se presentan: i) los ingresos (calculados por COINPRO); ii) los datos de elevación y capacidad; y iii) los registros de evaporación neta (diferencia entre la evaporación medida menos la lluvia propia en el vaso de almacenamiento, con el ajuste por el factor 0.7; cálculos de la CNA).

Tabla 9. Ingresos a la presa Cerro Prieto, en millones de m³ (fuente: COINPRO)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1952	15.8	6.7	4.5	6	4.2	10.5	6.1	2.3	16.8	23.3	5.3	4.4	105.9
1953	3.2	1.2	2	0.7	0.3	2.2	3.6	73.9	22.5	16.9	5.1	4.6	136.2
1954	1.9	1.9	0.6	0.5	1.4	0.4	0.2	3.4	5.1	61.4	17.1	8.6	102.5
1955	5.5	1.6	0.7	0.3	0.8	0.2	27.7	13.7	209.2	135.4	35.4	21.1	451.6
1956	11.9	5.7	4.6	3.1	14.5	3.7	2.2	2.2	2.8	1.2	2.2	1.9	56
1957	2.1	0.9	1.1	12.5	14.4	4.8	0.9	0.6	2.7	12.9	2.3	1.6	56.8
1958	3	1.3	1.2	0.6	2.4	0.9	1.3	2.1	18.8	159	71.6	24.7	286.9
1959	14.5	7.6	6.1	3.5	3.1	3.4	1.7	2.1	3.7	2.1	1.7	1.4	50.9
1960	2.6	1.8	1.4	1.5	1	0.7	0.3	5.5	45.7	29.3	15.5	10.1	115.4
1961	5.7	2.7	1.3	0.6	0.6	27.5	7.4	12.8	8.5	6.7	4.4	4	82.2
1962	3	0.7	0.5	0.6	0.7	8.7	1.1	4.5	14.7	20.1	4.8	4.9	64.3
1963	3.2	0.6	0.4	0.2	4.3	2	0.3	0.7	23	7.3	4	2.7	48.7
1964	2.5	0.5	0.9	0.8	19.1	9.2	3	0.4	22.4	17.6	5.8	2.7	84.9
1965	1.2	0.8	0.7	0.5	0.5	0.9	0.3	8.3	14.6	17.4	10.4	6.8	62.4
1966	4	6	3.2	7.3	9.8	58.6	52.8	28.6	31.4	58.1	27.1	8.9	295.8
1967	2.4	1.2	4.2	1.4	0.6	1.4	2.6	96.9	231.9	129.8	62.2	41.3	575.9
1968	28.3	13.6	10	6.3	9.3	13	7.5	6.2	53.4	96	27.6	16.6	287.8
1969	10.3	5.5	5.5	5.9	4.7	5	3	9.9	110.1	117.5	64.7	27.7	369.8
1970	12.6	10.4	8.4	2.9	2.9	8.9	27.9	22.5	97.6	81.4	47.9	11.1	334.5
1971	8.6	4.9	2.1	1.8	2.4	3.6	5.7	8.5	32.7	117.2	24.3	8.4	220.2
1972	4.6	2.4	3.1	1.5	11.8	127.5	85.4	83.2	91.1	70	47.6	42.3	570.5
1973	37.3	4.5	1	1.2	2.8	163	121.6	96	61.7	79.3	47.4	29.7	645.5
1974	21.6	6.3	4.8	3.8	3	6.6	5	1.5	28.2	20	9.3	7.4	117.5
1975	2.7	2.6	1.1	0.7	1.9	4.5	54.1	34.3	96.9	35.7	21.8	15.2	271.5
1976	8.2	3.5	3.2	3.3	3.1	18.7	162.3	31.7	72.4	68.1	45.4	32	451.9
1977	23	14.7	11.5	6.7	9.2	5.6	2.3	2.1	120.1	34.6	16	10.2	256
1978	8.4	4.1	2.7	3	4.2	5.6	1.2	1.9	190.8	166.6	51.3	31.5	471.3
1979	18.1	9.6	7.1	5.6	4.3	6.6	2.8	9.9	41.3	8.6	6.5	10.6	131
1980	3.1	0.3	0	0	0	0	0.2	1.3	0	16	4.7	4.2	29.8
1981	4.5	1.6	0	2	12.5	53.7	24.9	31.5	68.5	62.5	20.7	15.8	298.2
1982	7.7	3.7	2.9	3.8	8	2.2	0.1	0.3	0	11	2	3.5	45.2
1983	3	0.2	0	0	5.2	1.4	6.1	21.7	52.6	33.4	11.6	7.4	142.6
1984	14	16.2	5.7	2.3	6.3	6.2	4.1	4.2	52.9	29.5	12.8	10.3	164.5
1985	8.3	5.3	2.4	6.3	4.8	7.5	7.4	9	24.5	6.1	3	3.2	87.8
1986	2.5	0.8	0.5	0.8	10.5	51.6	8.8	4.6	48.6	14.4	12.6	12.3	168
1987	13.9	8.2	4.7	2.5	3.6	43.3	14.6	46.9	53.1	34.2	14.5	10.6	250.1
1988	7.2	2.6	1	0.9	0.9	9.4	4	62.5	178.9	46.8	22.5	15.2	351.9
1989	10.3	6.2	3.4	2.2	2.4	1.1	2	6.1	8.1	12	2.9	5	61.7
1990	3.7	5.3	7	7.4	8.5	12	14.4	11	10.9	8	6.7	6.5	101.4
1991	7.3	5.9	1.9	0.7	2.4	1.1	26.8	6.1	26.1	9.4	4.2	4.1	96

Tabla 10. Datos de Elevaciones y capacidades en la presa Cerro Prieto (fuente: CNA)

Elevación /cm	Capacidad /10 ⁶ m ³	Área /ha
25,650.00	0.00	94.00
25,800.00	2.33	160.00
26,000.00	6.71	260.00
26,200.00	13.00	373.33
26,400.00	22.00	500.00
26,600.00	33.63	653.85
26,800.00	47.54	825.00
27,000.00	66.00	1,015.00
27,200.00	89.63	1,243.75
27,400.00	117.86	1,497.14
27,600.00	150.71	1,776.25
27,800.00	188.80	2,067.14
28,000.00	233.50	2,393.33
28,200.00	285.79	2,750.00
28,400.00	344.78	3,160.00
28,500.00	377.00	3,380.00

Tabla 11. Registro de evaporación neta en mm en la presa Cerro Prieto (fuente: CNA)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1960	51.44	68.68	85.03	107.30	152.56	117.29	87.01	65.15	-8.63	5.36	30.68	45.78	807.65
1961	52.65	81.56	65.26	113.09	154.32	-22.93	154.41	95.53	31.75	88.12	86.62	108.99	1009.37
1962	97.59	101.43	140.75	164.27	72.89	-89.93	194.02	198.67	65.66	126.11	29.15	42.81	1143.42
1963	71.84	91.33	141.34	122.72	40.29	136.08	107.07	153.53	-80.46	8.93	94.15	-1.62	885.20
1964	66.23	75.48	103.09	91.66	26.24	141.79	162.74	122.87	-13.76	63.12	84.56	53.47	977.49
1965	69.50	39.82	47.70	140.50	175.32	114.85	164.03	147.10	-15.24	26.58	43.36	48.88	1002.40
1966	39.23	11.99	55.64	-47.87	-88.84	-19.54	97.20	100.98	47.47	30.13	95.21	-9.40	312.20
1967	90.53	90.93	159.86	138.13	188.94	163.65	207.33	-87.77	-87.71	68.92	31.22	74.01	1038.04
1968	58.14	42.22	54.06	17.21	-12.58	103.31	96.27	83.22	119.37	53.29	59.69	71.75	745.95
1969	50.54	64.12	52.11	39.14	74.44	33.71	144.85	35.93	3.12	-58.22	24.84	84.85	549.43
1970	63.25	30.00	92.10	101.02	-14.61	86.05	30.60	80.34	-67.22	69.96	75.50	72.88	619.87
1971	80.48	67.46	114.77	122.81	106.15	89.47	113.14	13.75	-35.78	4.10	74.51	76.33	827.19
1972	86.29	57.04	19.02	24.38	-113.57	-143.37	-42.83	97.23	65.23	80.47	78.91	71.85	280.65
1973	37.23	55.53	96.73	101.28	65.96	-151.47	79.13	-84.59	-84.71	-43.91	66.61	66.13	203.92
1974	101.99	91.49	103.50	124.74	44.96	35.20	93.06	139.79	94.55	95.35	92.54	87.45	1104.62
1975	73.46	59.53	115.01	115.40	-178.38	42.34	-2.06	-28.22	-30.89	84.42	39.29	40.12	330.02
1976	71.19	102.73	62.94	7.59	11.14	70.45	43.90	20.96	-26.99	-2.90	-25.23	35.85	371.63
1977	46.35	34.81	114.15	52.43	11.49	100.82	108.03	131.38	-50.67	66.42	40.86	89.01	745.08
1978	59.30	35.89	123.18	115.72	63.49	96.60	77.41	80.92	-180.58	-142.20	67.24	67.75	464.72
1979	70.76	52.43	110.34	100.95	109.89	110.47	147.45	31.51	-114.15	102.31	86.44	-27.90	780.50
1980	56.65	68.69	115.64	90.92	-67.27	105.77	103.66	60.72	123.00	49.65	25.29	46.39	779.11
1981	-44.08	68.22	84.85	6.26	-187.92	-71.84	97.33	21.55	24.32	61.90	82.87	55.47	198.93
1982	110.40	65.98	91.90	95.91	44.69	157.92	103.66	71.22	53.35	43.62	95.43	53.15	987.23
1983	-30.09	61.38	69.41	108.61	-111.60	133.56	110.67	-69.50	26.20	3.03	9.26	63.74	374.67
1984	-103.51	90.52	134.08	179.84	76.15	110.44	60.26	90.45	-126.43	71.97	64.15	51.32	699.24
1985	11.23	26.07	103.77	-90.85	12.53	13.90	148.74	136.21	75.73	60.16	83.51	-6.49	574.51
1986	72.87	45.52	96.96	67.24	26.02	-46.40	145.83	77.78	64.12	7.76	60.66	4.49	622.85
1987	-14.80	44.29	46.19	72.69	41.93	-53.64	69.90	91.15	-46.62	71.29	50.52	36.75	409.65

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1988	6.75	42.98	82.35	91.55	14.18	-6.41	100.80	-63.18	-245.49	76.44	75.48	52.58	228.03
1989	34.13	49.36	115.78	89.28	161.52	99.40	125.41	83.08	58.28	56.82	63.04	-53.37	882.73
1990	52.87	63.96	53.82	115.51	143.49	155.91	171.21	198.81	-4.40	59.52	87.13	85.38	1183.21
1991	37.19	33.18	168.46	116.79	59.48	66.40	140.64	170.18	-22.24	-74.10	-18.20	-55.30	622.48
1992	-38.88	55.63	61.34	43.80	-40.32	127.71	234.30	145.98	125.42	66.88	35.17	30.94	847.97
1993	52.15	47.82	92.08	123.08	-4.56	49.37	229.23	216.64	-347.06	97.29	34.48	52.65	643.17

Presa Rodrigo Gómez (La Boca)

Localización. Se encuentra al sur del área metropolitana de Monterrey, pertenece a la parte alta de la cuenca del río San Juan. Tiene varios afluentes, pero la corriente principal es el arroyo La Chueca. Otros son los arroyos Escamilla (recibe aguas de la Cola de Caballo) y El Puerco, por el Sur; y San Antonio, Dolores, Cristalinas y Huajuquita, por el poniente.

Área de la cuenca: 269 km².

Capacidad de almacenamiento al NAMO: 42.5 Mm³.

Capacidad muerta (de azolve): 1 Mm³.

Capacidad máxima de obra de toma: 1.8 m³/s hacia Monterrey y 4.0 m³/s hacia la potabilizadora San Roque.

La presa cuenta con un sistema que permite enviar agua hacia el acueducto pero también extraer de él los excedentes de la presa Cerro Prieto para almacenarlos en La Boca. De esta manera, sirve en el Sistema Linares-Monterrey como un vaso regulador; y, en efecto, esta ha sido su función principal, aunque eventualmente ha enviado también volúmenes de agua. Entre 1986 y 1987 aportó líquido durante ocho meses; y tanto en 1988 como en 1989 funcionó así sólo por dos meses.

La presa cuenta para lo anterior con dos obras de toma. A través de una de ellas se envía agua a la planta potabilizadora y de allí a la ciudad de Monterrey; y con la otra obra se conecta al acueducto Linares-Monterrey. Esta presa ha tenido una evolución que ha permitido incrementar la capacidad de almacenamiento. La primera obra, con capacidad de 20 Mm³, comenzó a funcionar en julio de 1957. Entre mayo de 1958 y noviembre de 1962 se construyó la presa con capacidad de 41 Mm³ y entre 1883 y 1884 se aumentó el nivel de las compuertas en un metro, de modo que la capacidad subió a 45 Mm³.

A continuación se presentan: i) los ingresos (calculados por COINPRO); ii) los datos de elevación y capacidad; y iii) los registros de evaporación neta (diferencia entre la evaporación medida menos la lluvia propia en el vaso de almacenamiento, con el ajuste por el factor 0.7; cálculos de la CNA).

Tabla 12. Ingresos a la presa La Boca, en millones de m³ (fuente: COINPRO)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1955	3.8	3.5	3	1.8	1.8	0.9	18.7	4.2	10.4	10.5	5.7	4.5	68.8
1956	4.2	3.3	2.9	2.5	5	2.4	1.6	5.8	2.5	2.1	3.3	3	38.6
1957	2.4	2.5	2.1	2.5	4	2.3	2.4	1.4	1.3	9.5	5.2	2.6	38.2
1958	2.4	0.9	2.4	1.5	2.1	5	8.6	4.9	69.7	110	24.8	11.4	243
1959	7.6	6.5	4.9	4.2	4.2	3.7	3.6	5.3	10.8	7.5	3.2	3.6	65.1
1960	3.7	3.2	3.4	1.9	1.1	0.9	1.5	3.6	9.2	2.1	2.9	7.8	41.3
1961	4.3	2.9	2.3	1.8	1.6	1.8	2.1	3.8	3.9	5.9	2.8	2.5	35.7

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1962	2.5	1.8	2.2	1.5	1.7	12.9	3.5	1.9	7	2.2	0.6	0.6	38.4
1963	1.7	1.3	2.2	1.7	2.1	1.3	1.3	7.7	10.3	3	1.4	1.7	35.7
1964	1.5	1.5	1.4	1.5	1.4	0.9	2.1	1.1	3.7	2.6	1.2	1.2	20.1
1965	1.2	1.4	1	0.5	1	1.2	0.6	0.7	4.8	4.6	1.8	2	20.8
1966	1.5	3.7	2.3	1.8	5	25.4	10.8	24.2	12.3	8.2	14.8	4.8	115
1967	1.4	2	3.6	2.5	0.6	0.5	0.1	46.5	93	21.6	11.3	6.9	190
1968	3.2	3.2	3.3	2.4	2.2	3.8	4.1	2.9	17	12.8	4.8	3.4	63.1
1969	2.1	1.7	1.6	1.3	0.8	0.6	0.6	1.3	8.4	14	8.7	6.2	47.3
1970	5.6	3.5	2.2	1.6	0.9	1.1	4.7	1.8	15.1	14.3	6.9	5.3	63
1971	2.9	1.3	1.1	1.2	1.2	2.6	1.6	6.3	25.8	31.2	8	3.7	86.9
1972	4.8	2.6	2	1.7	3.2	23.5	13.5	6.2	7.8	9.6	3.5	3.5	81.9
1973	2.8	2	2.4	1.7	1.8	61.4	32.8	35.4	39.1	14.2	7	4.4	205
1974	4.8	2.6	2.5	1.8	2.1	2.8	2	1.3	37.3	7.6	4.6	3.7	73.1
1975	2.3	0	0.5	0.7	0.9	7.4	18.1	7	43.8	13.2	5.3	2.4	102
1976	2	1.2	1.6	0.3	0.7	1.8	47.3	8.9	15.1	17.2	17.6	13.5	127
1977	7.7	2.8	3.3	1.6	1.4	0.4	0.4	5.8	23.3	19.8	5	2.8	74.3
1978	1.1	0.7	1.4	1.5	3.8	0.1	0.4	6.9	66.3	56.6	13	10.5	162
1979	3.1	1.8	2.6	1.5	1.8	4.7	0.4	4	8.5	2.3	1.9	2.1	34.7
1980	1.3	0.7	0.4	1	2	0	3.4	3.9	8.2	5.9	2.7	2.6	32.1
1981	3.2	2.1	2	3.5	7.6	14.5	6.5	3.7	8.9	5.5	1.5	1.3	60.3
1982	1.5	2.6	0	1.8	1.8	0.8	3.7	0.7	8.1	4.5	1.8	1.9	29.4
1983	1.7	1.5	0.9	1.3	7.8	2.8	4.2	9.9	31.8	18.6	3.4	2.1	86
1984	4.6	3.5	0.4	3.6	5.8	1.8	3	6.4	14.7	7.7	3.5	1.6	56.6
1985	1.7	1.4	2.2	2.2	2.4	2.6	2	2.9	4.2	4.3	2.6	2.2	30.7
1986	2.1	1.7	1.7	1.6	6.7	4.2	1.9	16.6	7.5	4.1	6.3	6.8	61.2
1987	3.3	3	1.8	4.2	4.8	4.9	3.6	5.3	5.5	4.9	2.5	5.4	49.2
1988	4.3	0.5	4.4	2.6	4.8	3.6	4.2	16.8	34	8.8	5	0.8	89.8
1989	1.1	2.2	0	0	0	0.7	2.6	3.9	8.1	2.6	2.6	1.9	25.7
1990	2.1	1	2.1	1.6	2.2	2.8	2.6	4.2	10.9	5.7	2.3	2.2	39.7
1991	4.6	0.2	0.2	1	0.9	1.2	2.2	1.5	9.9	3.6	2.2	2.5	30

Tabla 13. Datos de Elevaciones y capacidades en la presa La Boca (fuente: CNA)

ELEVACIÓN / cm	CAPACIDAD / 10 ⁶ m ³	ÁREA / ha
42,200.00	0.00	0.54
42,400.00	0.14	7.04
42,600.00	0.49	17.04
42,800.00	0.99	28.80
43,000.00	1.70	43.60
43,200.00	3.01	64.60
43,400.00	4.61	89.90
43,600.00	6.70	122.90
43,800.00	9.36	163.90
44,000.00	12.82	210.80
44,200.00	16.91	266.80
44,400.00	22.18	329.80
44,600.00	28.74	405.00
44,800.00	38.16	505.20
44,900.00	44.30	552.42

Tabla 14. Registro de evaporación neta en mm de la presa La Boca (fuente: CNA)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1958	41.15	30.49	59.50	108.82	55.43	-58.35	30.11	-45.67	-434.99	-410.90	18.37	5.10	-600.94
1959	39.47	-14.29	66.62	77.34	72.09	-8.99	35.38	-38.48	-137.94	-62.39	38.76	45.35	112.92
1960	49.88	14.13	46.37	92.57	115.44	80.24	99.98	14.27	-69.95	2.03	-120.17	-3.55	321.24
1961	13.03	50.37	78.33	93.01	120.04	77.64	33.48	-62.54	-56.35	-62.01	32.14	37.76	354.90
1962	63.91	104.37	98.76	118.30	129.57	-236.28	183.59	115.08	-120.85	79.96	14.40	18.49	569.30
1963	30.70	78.47	-11.55	45.07	60.25	40.25	59.09	-158.35	-255.47	33.19	34.46	18.57	-25.32
1964	58.93	56.14	60.46	79.82	-3.62	40.66	73.21	95.56	-135.02	-16.21	41.60	49.11	400.64
1965	49.91	6.07	83.18	-10.69	74.14	-21.96	196.14	36.85	-215.32	-31.77	-1.01	14.66	180.20
1966	-27.91	-24.49	-41.75	0.15	-100.71	-336.35	-25.69	-268.70	-56.73	-41.91	-51.85	55.93	-920.01
1967	20.96	-4.09	28.56	49.83	115.33	49.80	106.97	-593.09	-513.16	3.37	38.31	42.90	-654.31
1968	17.17	26.42	47.57	18.65	28.92	-85.91	-85.91	-68.41	-107.92	-133.60	-25.73	20.35	86.66
1969	50.78	43.47	69.01	16.11	78.18	24.50	132.76	-103.00	-160.95	-181.38	-11.18	22.00	-19.70
1970	31.47	-2.91	73.86	48.22	93.14	32.47	-77.11	48.69	-234.74	-27.66	54.04	48.57	88.04
1971	1.98	67.98	103.20	64.29	11.22	-29.22	17.68	-76.81	-352.87	-125.52	41.60	17.06	-282.54
1972	29.12	37.45	5.08	74.11	-79.69	-147.85	-121.02	23.89	-83.51	-84.54	29.84	43.51	-273.61
1973	12.30	-26.27	102.77	75.13	74.44	-702.17	-61.05	-288.72	-133.78	-7.33	9.30	38.85	-906.53
1974	11.79	74.62	28.80	89.70	-5.36	-45.23	96.92	112.83	-386.68	11.00	35.76	31.19	55.34
1975	43.54	25.01	81.94	75.56	52.49	103.73	-210.84	-93.16	-184.45	24.60	49.46	14.93	-17.19
1976	43.72	72.78	21.74	-23.43	24.99	27.88	-365.35	-35.33	-204.73	-8.39	-113.64	6.78	-552.98
1977	13.62	34.75	81.74	28.83	29.66	71.59	102.73	-66.62	-125.34	-141.87	42.28	40.60	111.97
1978	20.81	30.24	86.66	38.19	-6.05	1.81	89.96	-246.11	-526.89	-168.65	10.61	28.24	-641.18
1979	25.40	44.12	27.32	9.95	28.46	-126.08	2.92	6.44	-172.83	79.10	20.18	-91.52	-146.54
1980	26.04	31.08	83.86	89.30	10.27	137.23	122.25	-126.78	-91.93	29.68	37.71	33.91	382.62
1981	-29.74	18.33	51.06	-108.05	-16.67	218.35	73.62	15.70	-101.82	38.62	60.23	53.74	273.37
1982	68.71	45.70	74.67	2.43	-15.62	134.33	165.50	172.54	-93.44	-213.27	43.32	-0.12	384.75
1983	-41.00	-48.20	-36.10	0.00	-213.70	-12.30	-198.50	-162.20	-534.30	-85.80	-2.20	-5.90	-1340.20
1984	-96.75	55.71	99.40	127.42	-144.64	78.69	-51.34	94.23	-141.15	31.61	16.60	18.73	88.51
1985	1.70	28.33	80.79	-10.76	34.83	73.11	149.95	145.10	-33.08	-65.62	52.82	43.01	500.18
1986	68.09	79.62	118.66	84.55	61.56	27.80	140.22	55.50	-228.14	-44.60	-12.06	-41.88	309.32
1987	16.11	-4.69	54.21	31.48	13.91	-109.34	7.67	79.57	-123.79	8.97	43.64	42.33	60.07
1988	-0.74	46.58	101.05	78.43	42.39	-8.31	52.18	-74.69	-320.28	42.40	80.12	40.03	79.16
1989	33.84	51.08	115.74	77.69	162.02	106.24	66.51	-45.10	-179.91	-25.69	52.33	0.41	415.16
1990	43.37	60.44	36.24	-34.14	52.51	102.72	65.21	13.78	-180.35	-106.86	31.68	48.25	132.85
1991	32.02	33.77	103.37	58.00	20.37	-19.47	92.89	134.01	-269.36	52.43	27.93	-33.62	232.34
1992	-82.98	37.13	82.65	-49.92	0.03	141.08	164.75	-40.55	-28.56	4.78	9.81	12.88	251.10
1993	38.23	28.16	69.99	86.30	23.60	-277.45	159.98	78.49	-418.14	46.99	25.06	33.52	-105.27
1994	-5.79	20.97	39.27	68.87	47.32	9.75	105.21	-103.04	-106.59	13.21	25.25	10.27	124.70

Pozos someros

Localización: a lo largo del acueducto Linares-Monterrey.

Comenzaron a operar en 1981 unos 46 pozos con caudales menores a los 10 lps; y, 64 con caudal promedio menor a 20 lps. En agosto de 1982 se incorporaron además los caudales de los pozos de Guadalupe, San Roque y Ciudadela mediante un acueducto provisional. Este subsistema aportó un gasto de 71 lps de agua en agosto; en octubre, de 150 lps; y finalmente dejó de operar en julio de 1984 ya que sus pozos solamente fueron perforados y conectados al

acueducto como una medida emergente para enfrentar la escasez de agua durante el tiempo que durara la sequia.

En la siguiente tabla se tienen los valores de extracción del sistema Linares – Monterrey completo.

Tabla 15. Producción media mensual en millones de m³, en el Sistema Linares-Monterrey.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1982	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.26	0.39	0.12	0.00
1983	0.00	0.22	0.10	0.04	0.13	0.24	0.24	0.27	0.25	0.00	0.00	0.00
1984	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	1.02	3.45	2.90	3.10	3.54	3.76
1985	3.46	3.68	3.86	4.28	4.87	5.23	5.32	6.06	6.77	7.65	7.50	7.21
1986	7.27	6.59	6.24	6.18	6.05	5.92	6.34	7.02	5.74	5.34	5.33	5.36
1987	5.45	5.48	6.14	5.97	6.60	7.01	7.63	8.06	8.21	7.08	6.99	7.92
1988	7.59	7.08	6.83	7.42	7.98	8.05	8.83	8.60	7.62	0.14	0.00	0.00
1989	4.22	5.18	6.29	7.35	8.49	9.06	8.81	9.69	8.89	9.15	8.40	8.61
1990	1.88	4.21	7.40	7.54	8.97	11.22	11.03	10.32	9.22	6.82	6.77	6.73
1991	3.67	4.68	5.36	6.37	7.40	7.44	6.87	7.10	7.21	5.50	4.97	5.34
1992	3.67	4.89	4.88	4.92	5.09	7.25	8.74	8.67	8.50	7.69	7.05	6.78

Sistema El Cuchillo

Este sistema consta de una presa cuyos volúmenes de agua se destinan tanto a Monterrey, como a entregar volúmenes a localidades urbanas y rurales de Nuevo León y Tamaulipas y también a cubrir necesidades para uso agrícola del Distrito de riego 031 "Las Lajas" y otras unidades. Cuenta con conductos separados para abastecimiento a la ciudad de Monterrey, al Distrito de Riego 031 y a otras comunidades (acueducto Los Aldamas-Arcabuz), así como para descargar volúmenes hacia la presa Marte R. Gómez.

Localización. Sobre el río San Juan, a la altura del pueblo de China

Área de la cuenca: 8,794 km².

Capacidad de almacenamiento al NAMO (incluye capacidad de azolve): 1,123 Mm³.

Capacidad muerta (de azolve): 100 Mm³.

Capacidad máxima de obra de toma: 5 m³/s.

A continuación se muestran: i) los ingresos (calculados por COINPRO); ii) los datos de elevación y capacidad; y iii) los registros de evaporación neta (diferencia entre la evaporación medida menos la lluvia propia en el vaso de almacenamiento, con el ajuste por el factor 0.7; cálculos de la CNA).

Tabla 16. Ingresos a la presa El Cuchillo, en millones de metros cúbicos (fuente: COINPRO).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1955	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3	0.0	41.7	34.9	218.5	104.1	18.8	2.8	425.1
1956	0.0	0.0	0.0	0.0	11.7	2.9	0.0	1.0	18.4	0.0	0.4	0.0	34.4
1957	0.0	12.7	17.7	104.1	42.9	26.5	0.0	0.0	3.3	75.9	2.0	0.0	285.1
1958	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	28.1	32.2	6.4	205.2	696.2	217.7	82.9	1280.1
1959	50.2	25.9	19.4	2.1	16.1	13.3	0.4	8.4	20.8	11.2	4.4	0.0	172.2
1960	0.0	0.0	0.0	0.8	1.4	1.1	26.1	39.8	85.9	150.0	36.7	13.8	355.6
1961	3.5	0.0	9.2	9.6	7.7	30.1	3.3	11.3	93.8	32.3	7.2	2.3	210.3
1962	0.0	0.0	0.0	12.2	0.4	42.1	3.3	0.6	40.9	72.3	8.9	2.1	182.8
1963	0.4	0.0	0.0	0.0	73.6	0.3	0.0	0.5	160.8	75.9	4.0	2.8	318.3
1964	1.8	0.0	0.0	15.7	96.4	7.6	2.8	0.0	74.6	48.9	1.7	1.5	251.0
1965	0.0	0.0	4.8	0.0	43.9	10.6	0.0	8.1	192.3	51.3	14.8	11.5	337.3
1966	7.1	27.0	29.7	55.6	170.3	220.9	117.1	55.5	82.5	107.7	58.1	19.8	951.3
1967	8.1	0.6	15.0	10.1	4.6	24.1	1.1	567.7	1094.2	349.6	146.0	92.6	2313.7
1968	68.9	41.4	36.9	27.8	48.1	57.8	52.9	50.6	261.1	220.7	94.1	56.4	1016.7
1969	30.1	7.6	6.5	8.0	7.4	39.2	1.1	9.0	184.0	209.7	106.1	76.1	684.8
1970	38.8	30.7	16.7	14.7	2.1	13.6	52.2	32.1	158.7	92.7	26.6	9.4	488.3
1971	5.1	0.9	0.5	0.1	0.0	6.5	8.3	56.7	176.1	275.0	71.9	33.8	634.9
1972	12.9	7.5	14.3	5.5	96.7	300.4	94.8	38.2	57.2	58.4	32.3	24.6	742.8
1973	20.2	9.5	11.7	1.1	19.8	562.2	191.3	214.1	252.5	182.8	109.1	69.5	1643.8
1974	47.6	16.3	22.5	8.7	4.5	7.0	3.6	0.1	179.1	75.9	28.0	12.3	405.6
1975	10.1	7.3	2.3	0.0	51.0	7.8	129.0	108.3	324.0	75.2	35.5	22.2	772.7
1976	15.8	4.9	3.1	8.0	20.5	10.3	291.1	52.8	104.3	108.1	133.2	107.7	859.8
1977	58.8	51.4	27.0	26.9	24.4	2.2	1.5	2.9	257.1	77.8	28.8	18.2	577.0
1978	13.1	8.7	2.1	2.7	8.8	21.9	0.0	8.5	946.5	600.5	127.3	66.6	1806.7
1979	44.2	26.5	15.4	14.8	13.3	87.8	16.3	4.0	108.8	15.5	5.7	24.4	376.7
1980	15.6	7.8	0.5	0.0	23.0	0.7	0.0	9.4	3.4	66.0	28.0	19.1	173.5
1981	26.4	22.6	13.4	66.2	120.4	135.9	70.2	64.4	133.7	77.6	35.1	20.6	786.5
1982	10.3	2.7	2.8	5.0	33.6	7.5	0.0	0.0	10.7	27.8	6.3	10.4	117.1
1983	12.9	10.5	5.4	0.0	45.5	54.7	122.0	76.7	275.0	108.3	44.6	28.6	784.2
1984	50.4	71.7	15.5	3.7	21.0	22.8	9.9	17.8	190.9	56.1	21.4	22.1	503.3
1985	21.8	13.2	11.9	59.8	20.1	50.0	20.4	4.0	4.0	71.9	16.0	7.8	300.9
1986	3.6	0.0	0.0	5.8	57.7	133.8	14.1	0.0	171.3	28.0	34.0	12.7	461.0
1987	37.7	18.6	18.4	11.7	24.9	125.6	30.1	20.4	241.6	98.4	37.7	20.5	685.6
1988	25.3	17.2	9.4	5.0	5.3	28.1	13.7	53.8	739.5	131.5	56.1	33.1	1118.0
1989	33.2	27.2	17.4	9.8	3.2	0.0	7.4	35.2	76.8	50.1	13.4	20.3	294.0
1990	19.2	4.0	0.1	10.4	4.5	0.7	0.5	6.1	71.8	62.1	25.8	13.9	219.1
1991	12.6	4.7	0.0	2.0	0.2	21.4	48.8	1.4	110.2	62.3	21.0	20.2	304.8

Tabla 17. Datos de Elevaciones y capacidades en la presa El Cuchillo (fuente: CNA)

ELEVACIÓN / cm	CAPACIDAD / 10 ⁶ m ³	ÁREA / ha
12,800.00	0.00	0.00
13,000.00	0.11	11.09
13,200.00	0.77	55.29
13,400.00	2.30	97.72
13,600.00	4.77	148.97
13,800.00	8.23	197.29
14,000.00	13.05	248.58
14,200.00	20.53	462.87
14,400.00	35.16	1,000.83
14,600.00	63.02	1,785.20
14,800.00	108.24	2,736.51
15,000.00	171.43	3,581.82
15,200.00	252.73	4,548.52
15,400.00	355.72	5,750.60
15,600.00	486.08	7,285.23
15,800.00	648.44	8,950.88
16,000.00	844.82	10,687.53
16,200.00	1,075.97	12,427.83
16,400.00	1,345.52	14,527.83
16,600.00	1,661.37	17,056.62
16,800.00	2,033.87	20,193.28
17,000.00	2,465.63	22,982.45

Tabla 18. Registro de evaporación neta en mm de la presa El Cuchillo (fuente: CNA)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1955	68.1	88.6	125.5	163.5	178.2	257.5	207.5	92.1	-27.1	141.1	70.0	83.2	1448.2
1956	95.3	118.3	164.3	169.1	224.1	270.6	258.6	190.8	116.2	167.3	96.5	93.5	1964.6
1957	86.4	35.1	97.7	-32.2	103.6	114.1	276.6	261.2	125.3	92.2	67.3	94.7	1322.2
1958	42.1	66.3	113.1	189.4	105.6	12.7	232.7	185.3	8.1	-105.3	42.2	49.7	941.8
1959	34.6	6.2	127.4	138.7	87.2	111.4	224.0	231.9	138.3	81.7	106.1	91.3	1378.7
1960	67.9	114.1	126.2	183.0	226.5	172.3	265.0	110.9	65.6	73.3	57.4	39.3	1501.4
1961	29.6	111.1	176.9	182.8	221.0	204.4	253.1	199.1	6.9	57.5	58.2	68.4	1569.1
1962	84.9	134.2	155.5	145.2	187.7	206.3	338.0	270.1	110.0	173.4	111.8	37.5	1954.4
1963	80.1	111.0	177.7	217.0	141.3	224.6	250.0	277.9	52.8	38.4	66.0	16.3	1653.1
1964	83.8	97.2	124.1	141.0	37.4	163.3	127.1	271.3	116.3	64.2	83.3	69.4	1378.2
1965	100.5	76.43	54.8	162.4	187.4	188.0	218.4	201.6	48.1	55.9	38.5	-33.6	1298.5
1966	33.7	43.7	82.3	126.0	-53.7	28.3	74.0	200.0	111.7	33.5	105.6	93.9	879.0
1967	72.4	108.4	145.7	146.6	213.4	221.6	277.1	11.6	-296.6	53.8	31.2	52.5	1037.6
1968	34.5	56.9	108.5	98.8	95.5	113.6	106.7	163.5	90.7	97.2	80.0	83.9	1129.7
1969	72.9	60.3	108.4	156.2	134.1	126.5	246.2	108.5	-66.1	61.5	38.0	62.5	1109.1
1970	62.8	54.4	128.6	163.9	124.9	88.5	140.9	130.0	-2.6	109.0	121.5	92.2	1214.0
1971	62.9	116.4	180.9	199.3	189.1	178.8	221.7	-3.3	-154.4	-12.5	77.9	69.7	1126.4
1972	79.7	87.7	130.1	115.6	-65.6	20.1	67.8	207.7	30.1	110.4	55.6	70.7	909.9
1973	29.5	22.0	150.1	159.1	134.4	-21.4	191.1	89.6	-39.0	-1.9	82.8	83.0	879.2
1974	69.4	135.3	94.1	147.8	208.6	169.5	221.9	256.2	139.5	136.9	103.6	63.8	1746.7
1975	92.0	103.7	170.5	179.2	94.0	184.2	-114.5	-21.3	12.3	98.5	108.0	41.4	948.1
1976	94.5	135.5	112.9	99.4	55.7	90.3	-2.8	135.1	-10.7	47.1	-29.8	32.3	759.5

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1977	9.2	61.8	119.1	82.8	103.1	192.7	252.8	115.7	58.7	87.1	93.3	76.9	1253.2
1978	20.3	57.6	158.1	131.2	112.2	189.8	225.4	151.2	-284.1	27.7	59.0	55.2	903.5
1979	70.0	70.2	130.7	109.2	145.3	102.9	173.6	211.5	61.4	172.1	110.7	-5.5	1352.0
1980	66.0	81.0	154.3	185.9	95.1	274.6	254.6	150.2	128.9	-29.0	22.2	50.2	1433.7
1981	-36.9	51.8	101.6	0.7	33.5	19.4	179.2	65.2	41.6	135.6	112.1	85.8	789.6
1982	102.0	72.8	117.5	68.9	7.8	203.4	275.4	179.0	192.1	73.7	73.1	26.1	1391.8
1983	37.6	28.8	108.1	189.3	38.3	100.1	119.2	54.2	-38.1	87.0	103.2	38.2	866.0
1984	-82.1	95.5	131.6	192.8	100.3	167.1	175.1	130.5	14.1	62.9	72.8	37.3	1097.7
1985	25.3	51.6	96.3	52.3	99.9	30.5	230.8	136.7	170.6	134.7	84.2	66.3	1179.2
1986	41.1	33.7	168.0	107.6	82.5	45.1	238.0	201.2	129.6	95.6	35.8	-46.9	1131.2
1987	33.1	43.5	83.1	109.1	67.2	29.9	104.1	195.6	55.2	98.7	74.3	-27.7	866.2
1988	22.7	68.3	140.0	112.3	71.0	139.4	117.1	225.9	-103.4	74.4	97.5	73.4	1038.5
1989	56.7	65.1	162.4	125.0	221.8	211.5	143.8	120.5	182.2	129.0	98.9	-12.3	1504.8
1990	95.6	72.7	103.4	137.0	199.6	268.4	182.0	127.2	69.4	142.1	93.1	86.6	1577.1
1991	31.9	65.7	186.1	144.9	121.6	187.0	181.3	231.6	27.3	94.6	68.1	63.1	1403.2
1992	31.87	47.59	125.53	61.72	56.75	220.65	279.09	38.99	121.95	29.07	11.24	20.89	1045.3
1993	52.54	62.52	118.71	174.38	55.08	-11.96	190.82	196.19	94.55	102.07	19.38	68.99	1123.3
1994	27.81	76.63	118.8	140.3	84.43	83.3	176.5	158.9	85.28	107.82	85.65	44.41	1189.8
1995	63.88	88.02	131.54	189.26	182.44	61.23	214.21	3.24	87.72	117.52	85.3	31.97	1256.3

Sistema Santiago

Está constituido por cinco fuentes de abasto: 1) presa La Boca, de aguas superficiales que tienen su origen en la cuenca del río San Juan; 2 y 3) los túneles San Francisco y Cola de Caballo, de aguas subterráneas pertenecientes también al río San Juan; 4 y 5) manantial La Estanzuela y la Galería Los Elizondo, de aguas subterráneas tributarias del río La Silla.

No se pudo conseguir el valor del **Área de Recarga** de las fuentes subterráneas; y tampoco fue posible contar con datos sobre registros de niveles estáticos. A diferencia del sistema Monterrey, en el sistema Santiago no fue posible estimar un valor de área debido a que no se contó con valores de niveles estáticos para hacer un comparativo de ingreso contra evolución de niveles (tal y como se explica en la sección Recarga, Volumen de almacenamiento y Curvas elevación – capacidad, en el capítulo 3).

A continuación se presenta una breve descripción de las fuentes con datos de su **Localización** y la **Geología** de las subterráneas.

Presa La Boca

Aporta en forma separada al sistema Santiago por un acueducto y al sistema Linares Monterrey con el ducto de flujo reversible mediante el que sirve de vaso regulador para las aguas que provienen de la presa Cerro Prieto.

Socavón de San Francisco

Consiste en un túnel que intercepta aguas subterráneas. El agua de San Francisco como la de Cola de Caballo proviene de descargas naturales de la zona sureste de la Sierra Madre Oriental. Sus cuencas de recarga están rodeadas de límites impermeables. Desde el inicio de las obras, en junio de 1957, se pudo aprovechar el caudal que se dirigió a Monterrey por medio

de una tubería provisional y en 1959 se concluyó el Socavón así como el acueducto Santiago-Monterrey.

Túneles Cola de Caballo

La constituyen dos túneles construidos en el acuífero de rocas calizas del cretácico inferior localizados en la Sierra Madre Oriental. En 1962 comenzó a operar con 90 lps hacia Monterrey. También se conducen sus aguas por el acueducto Santiago -Monterrey. El agua de la cascada turística del mismo nombre se incorpora, aguas abajo, a los túneles.

Estanzuela

La recarga tiene lugar en calizas del flanco norte del anticlinal de Los Muertos, y corresponde a las formaciones Cupido y Cuesta de Cura. Aporta desde 1909, inicialmente 30 lps; en 1982 se ejecutaron obras que permitieron incrementar la producción hasta 600 lps en época de lluvias abundantes y a veces supera los 2000 lps durante varias semanas.

Galería Los Elizondo

Construida en el acuífero de aluvión asociado al arroyo Los Elizondo, se conecta al acueducto de las fuentes San Francisco y Cola de Caballo. Su recarga se realiza en la zona de calizas que aportan a la Estanzuela.

A continuación se presenta la información de: lluvia diaria registrada en la estación San Francisco La Carrera de los años 1990 a 1993; y extracción mensual del sistema completo en el período 1982-1989.

Tabla 19. Datos de lluvia diaria en mm en la estación San Francisco la Carrera ubicada en: latitud 24°41'39"N, long 99°40'03"O. Fuente: CNA. NOD= no hubo dato registrado, inap= lluvia inapreciable (menor que 0.1 mm).

año	mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31							
1990	Ene	NOD	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.5	inap	0	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	inap					
	Feb	0	0	0	0	0	inap	inap	inap	1	0	0	0	0	0	0	0	inap	1.5	3	inap	inap	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	Mar	inap	3.5	inap	0	0	0	0	0	inap	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Abr	2	0	24	5.5	inap	inap	0	0	0	0	24	1	3.5	0	5	0	1	13	0	inap	0	0	0	0	0	3.5	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0		
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	Jun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Jul	3	45.5	17.5	0	0	inap	inap	15.5	7	0	5.5	inap	0	20.5	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Ago	0	inap	inap	0	0	inap	inap	inap	inap	4.5	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Sep	inap	14	21.5	28.5	2	3	inap	8	17.5	0	13	1.5	inap	86	0	0	0	0	15	inap	0	0	0	41	63	inap	50	0	inap	50	0	inap	50	65	0	0		
	Oct	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	20	0	0	0	7	0	21	0	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Nov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Dic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1991	Ene	0	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD																
	Feb	0	0	0	0	10	25	1	inap	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mar	inap	0	0	0	0	0	0	0	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Abr	20	inap	0	0	1.5	3	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	May	0	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jun	inap	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jul	64	38.5	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sep	19.5	7.5	40	28.5	5	17	9.5	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Oct	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Nov	2	0	inap	1.5	inap	1	inap	3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Dic	0	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD	NOD															
1992	Ene	NOD	5	2	2	1	inap	0	1	3	30	18.5	2	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Feb	0	inap	2.5	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Mar	0	0	0	1	6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Abr	4	1	7.5	1	1	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	May	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jun	4	0	inap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ago	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Sistema Monterrey

Área de recarga: No se contó con el dato. Se propuso un valor de 100 km², que resultó a partir del análisis de balance del sistema desarrollado en este trabajo (tal y como se explica en la sección Recarga, Volumen de almacenamiento y Curvas elevación – capacidad, en el capítulo 3).

Localización: Se ubica en el entorno de la ZMM.

Geología: El sistema está conformado por calizas permeables y la extracción se realiza a través de dos manantiales (Jacales y Apodaca), pozos profundos (Monterrey y Topo Chico) y de pozos someros.

A continuación se muestran los valores de lluvia diaria medida en el observatorio Monterrey, el registro de extracciones totales del sistema, y la información disponible de niveles de agua en los pozos. Todos estos datos corresponden al período 1988-1992.

Tabla 21. Datos de lluvia diaria en mm del observatorio Monterrey tomada de los cuadernos de registro. Ubicación del observatorio: latitud= 25.67°N, longitud= 100.44°O. Inap= lluvia inapreciable (menor que 0.1 mm).

año	mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31							
1988	Ene	9.0	inap	0.0	1.0	0.8	0.0	2.0	0.1	inap	1.2	inap	0.0	0.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
	Feb	0.0	inap	3.5	9	3.2	1.2	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	inap	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0						
	Mar	inap	0.9	0.0	inap	0.0	0.8	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0.7	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	inap	1.6	0.0	0.0					
	Abr	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	13.4	2.3	inap	1.2	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	inap	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.6	0.5	0.0	0.0	0.0				
	May	0.2	inap	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	3.16	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	27.0	0.0	inap	inap	inap	0.7	0.0	0.0	0.0				
	Jun	0.7	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.4	0.0	0.0	2.1	256	73.3	0.0	inap	inap	0.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
	Jul	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	inap	inap	inap	0.0	inap	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	5.5	9.3	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
	Ago	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	inap	8.1	58	13.2	48.9	12.4	0.3	3.6	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	52.7	2.8	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0		
	Sep	7.6	4.0	1.6	6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	214.0	86.3	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
	Oct	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	inap	0.0	8.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	4.4	inap	inap	inap	inap	inap	inap		
	Nov	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Dic	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	inap	0.0	inap	inap	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1989	Ene	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	inap	0.9	0.7	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.9	3.1	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	Feb	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	1.1	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.1	13.4	3.1	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	Mar	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Abr	inap	0.0	0.0	13.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	3.3	0.9	1.7	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	inap	1.1	inap							
	May	inap	inap	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Jun	0.0	0.0	0.0	No_D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	0.0	0.0	No_D	0.0	No_D	0.0	No_D	0.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Jul	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Ago	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	inap	0.3	27	36.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Sep	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	17.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Oct	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Nov	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.9	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Dic	1.1	7.6	16.7	1.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1990	Ene	2.3	1.1	0.0	0.0	inap	2.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	inap	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Feb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	inap	0.0	0.0	No_D	No_D	0.0	0.0	inap	0.8	0.5	No_D	0.3	inap	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Mar	5.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	inap	0.0	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	No_D	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	2.5	6.8	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	Abr	2.3	inap	17.3	0.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.2	inap	No_D	No_D	No_D	0.0	inap	5.6	inap	inap	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	May	0.0	0.0	0.0	5.0	inap	0.0	14.2	inap	0.0	0.0	inap	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	inap	4.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Jun	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Jul	4.4	1.7	0.0	0.0	0.0	10.3	inap	3.7	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	inap	inap	inap	0.0	0.0	1.1	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	Ago	inap	1.4	inap	0.0	0.0	0.0	21.6	0.2	3.8	33.0	0.0	0.0	inap	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Capítulo 2. Fuentes de agua superficiales y subterráneas de la Zona Metropolitana de Monterrey y demanda de agua

año	mes	1	5	6	10	13	15	16	17	18	19	21	22	24	25	26	27	28	29	63	69	70	71	78	79	80	81	82	83	84	85	86	88	89				
1981	mar	33	18	33	24	16	8	11	13	22	20	11	12	15	17	18	14	14						3	8	6	5	16	13	20	20	16						
	abr	18	45	27	18	8	11	13	22	20	11	12	12	12	17	16	15	14					3	8	6	5	16	13	20	20	16	29						
	may	41	30	18	6	19	8	14	8	16	23	2	15	12	12	17	16	15	12	18	14	12	10	8	3	5	16	13	20	20	16	30						
	jun	65	17	9	14	44	9	14	44	36	2	13	11	15	20	11	15	20					10	8	3	5	16	13	20	23	21	30						
	jul	65	17	9	14	44	9	14	32	40	2	12	11	18	18	11	18	18					10	9	6	6	16	13	20	22	31							
	ago	65	17	9	14	32	40	2	12	17	18	12	12	12	12	12	12	12					10	9	6	6	16	13	20	24	22	31						
	sep	29	18	6	5	11	11	3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12					2	9	5	5	14	15	22	22	19	29						
	oct	27	17	14	8	14	18	22	13	7	12	18	15	14	12	12	12	12					2	11	5	5	14	15	22	22	19	29						
	nov	40	20	13	9	13	29	33	2	15	12	18	12	13	12	12	12	12					15	1	7	7	16	15	21	21	23	27						
	dic	27	17	14	8	14	18	22	13	7	12	18	15	14	12	12	12	12					15	1	7	7	16	15	21	21	23	27						
	1981	ene	27	17	14	8	14	18	22	13	7	12	18	15	14	12	12	12					15	1	7	7	16	15	21	21	23	27						
	feb	48	17	30	8	14	46	54	14	16	9	13	20	25	15	15	15	15					18	1	6	6	20	16	21	23	20							
mar	61	15	9	14	46	54	14	16	9	13	20	25	15	15	15	15	15					18	1	6	6	20	16	21	23	20								
abr	84	15	9	14	46	54	14	16	9	13	20	25	15	15	15	15	15					2	2	5	6	16	16	5	26	24								
may	84	15	9	14	46	54	14	16	9	13	20	25	15	15	15	15	15					2	2	5	6	16	16	5	26	24								
jun	72	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6					3	5	5	1	3	15	17	23	23	21							
jul	72	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6					3	5	5	1	3	15	17	23	23	21							
ago	50	12	5	8	16	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					18	4	6	6	18	16	16	20	20	24							
sep	50	12	5	8	16	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15					15	14	2	5	18	4	17	20	24								
oct	75	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12					13	13	5	16	4	17	18	20	22								
nov	68	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12	16	9	12					13	15	1	6	5	16	16	19	22								
dic	81	81	14	12	14	12	14	12	14	12	14	12	14	12	14	12	14					15	2	2	18	6	17	abstido	21	22								
1982	ene	78	54	62	66	12	12	13	62	12	16	6	6	6	6	6	6					14	3	2	5	5	16	17	20	22								
feb	62	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
mar	58	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
abr	88	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
may	18	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
jun	18	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
jul	18	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
ago	18	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	2	17	6	6	16	16	20	22								
sep	17	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	14	15	2	5	15	15	21	19								
oct	15	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	14	15	2	5	15	15	21	19								
nov	19	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					15	14	15	3	6	5	16	24									
dic	19	66	12	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10	12	10					14	14	15	2	5	16	16	24									

Demanda de agua

Los habitantes de la ZMM constituyen sólo parte de los usuarios que se abastecen de agua proveniente de las fuentes superficiales y subterráneas agrupadas en los seis sistemas Mina, Santa Catarina, Linares-Monterrey, Santiago, Monterrey y El Cuchillo.

A lo largo de la historia del abastecimiento de agua a la ZMM se han incorporado cuerpos de agua que deben ser racionalmente compartidos inclusive, también cierto volumen de agua residual. Así, los usos municipales e industriales en la ZMM se interrelacionan con los agrícolas en los distritos de riego 026 (Bajo Río San Juan) del estado de Tamaulipas y el 031 (Las Lajas) del estado de Nuevo León y, finalmente, con los usos de diversas comunidades urbanas y rurales de Nuevo León y Tamaulipas que utilizan agua de la presa El Cuchillo.

A continuación se presenta una descripción de los volúmenes de compromiso con las fuentes involucradas.

Incorporación y ampliación de las fuentes de agua

La presa La Boca era una presa menor entre 1955 y 1957 y en 1967 se constituye como se conoce ahora.

La presa Cerro Prieto, en la cuenca del río San Fernando, terminada de construir en 1982, constituyó un auxiliar en el abastecimiento de agua para la ZMM. También destina hasta $9.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ a unidades de riego.

La presa El Cuchillo (que opera desde 1993) sobre el río San Juan, aguas arriba de la presa Marte R. Gómez y antes de la confluencia con el río Pesquería, se construyó porque las presas Cerro Prieto y la Boca, así como las fuentes subterráneas no eran suficientes para cubrir las demandas de agua de la ZMM en desarrollo. Pero el agua de esta presa que se destina a Monterrey, así como la evaporación en su embalse se desvían del aporte a la presa Marte R. Gómez y de ésta al distrito de riego 026 por lo que se acordó que, en compensación, a través del río Pesquería se condujera a la presa Marte R. Gómez el 60% de agua residual que haya usado Monterrey.

En los sistemas de captación de agua subterránea se han realizado obras que con el tiempo han incrementado la extracción como la ampliación de túneles o el incremento en el número de pozos hasta contar con las estructuras actuales.

Usuarios en la Zona Metropolitana de la ciudad de Monterrey

Se contó con información sobre el volumen de agua potable suministrada a la ZMM entre 1953 y 1991 (COINPRO, con datos de SADM) y se presenta en el primero de los cuadros siguientes.

Tabla 24. Suministro histórico de agua potable a la zona metropolitana de Monterrey en millones de m³ mensuales (COINPRO)

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1953	1.58	1.60	1.60	1.63	1.71	1.71	1.80	1.80	1.81	1.84	1.87	1.92	20.87
1954	2.05	2.03	2.16	2.21	2.11	2.23	2.11	2.25	2.22	2.22	2.06	2.10	25.75
1955	1.69	2.56	2.76	2.55	3.09	3.05	2.96	2.95	2.80	2.60	2.64	2.71	32.36
1956	2.82	2.83	2.88	2.91	3.06	3.16	3.09	3.08	2.95	2.76	2.73	2.58	34.85
1957	2.67	2.65	2.61	2.50	2.47	2.39	2.69	2.72	5.12	2.78	2.70	2.79	34.09
1958	2.74	2.82	2.92	3.04	3.18	3.17	4.34	4.68	4.70	5.17	5.02	4.99	46.77
1959	5.09	4.52	4.43	4.48	4.61	4.77	5.10	4.90	5.67	5.23	5.00	4.92	58.72
1960	4.64	4.69	4.65	5.39	5.39	5.45	5.39	5.07	4.92	4.94	4.49	4.47	59.49
1961	4.47	4.58	5.06	5.34	5.49	5.66	5.67	5.79	5.60	5.47	5.09	4.98	63.20
1962	5.10	5.52	5.54	5.65	6.23	6.27	6.75	6.41	5.86	5.63	5.66	5.16	69.78
1963	5.29	5.48	5.59	6.01	5.90	6.45	6.35	6.27	6.10	6.01	5.73	5.21	70.39
1964	5.46	5.56	5.74	6.19	6.73	6.80	6.72	6.46	6.30	5.92	6.06	5.89	73.83
1965	6.11	6.13	6.07	6.19	6.53	6.82	6.89	7.04	6.97	6.62	6.37	6.06	77.80
1966	6.17	6.33	6.31	6.84	7.16	7.02	7.48	7.55	7.57	7.05	7.15	7.25	83.88
1967	7.26	7.51	6.98	7.51	7.65	8.18	8.33	8.08	7.26	7.30	6.74	6.66	89.46
1968	6.95	6.59	6.60	7.24	7.42	7.39	7.82	7.47	7.20	7.43	7.03	6.90	86.04
1969	6.97	7.31	7.90	8.56	8.76	9.36	9.94	9.76	9.31	8.73	8.34	8.34	103.28
1970	8.38	8.49	8.87	9.65	10.15	10.26	10.22	10.86	10.15	9.70	9.76	9.42	115.91
1971	9.58	9.91	10.50	10.58	11.29	10.86	10.95	10.69	10.10	9.85	9.90	9.72	123.93
1972	9.84	10.20	10.67	11.53	11.12	11.71	12.01	12.45	12.24	11.56	11.51	11.56	136.40
1973	11.40	11.36	12.31	12.69	12.79	13.09	12.95	14.19	13.76	13.24	13.26	13.09	154.13
1974	12.32	12.58	12.90	13.05	13.94	14.70	14.72	14.10	13.87	13.35	12.77	12.50	160.80
1975	13.29	13.69	14.58	16.06	16.68	15.98	16.09	15.58	15.88	15.76	15.69	15.13	184.41
1976	15.09	15.78	16.07	16.33	16.41	16.76	16.55	17.81	17.44	16.69	16.41	16.35	197.69
1977	15.53	15.82	16.50	16.86	17.42	18.44	17.91	17.67	17.87	16.89	16.86	16.07	203.84
1978	16.24	14.37	18.29	18.41	18.05	17.91	17.00	16.36	16.35	18.65	17.68	17.97	207.28
1979	18.65	18.63	18.75	18.47	18.20	18.38	17.71	18.88	17.82	17.40	16.81	17.01	216.71
1980	17.50	17.52	17.08	17.48	15.89	18.02	15.30	16.13	16.55	16.35	16.25	15.95	200.02
1981	15.96	16.56	16.17	16.91	18.50	19.19	20.13	19.96	19.77	19.47	18.64	18.33	219.59
1982	18.14	16.93	16.98	17.55	18.09	17.98	17.61	16.34	16.81	15.99	14.92	14.39	201.73
1983	12.93	12.69	12.37	12.63	12.90	15.49	16.53	17.16	17.60	17.81	17.03	15.96	181.10
1984	15.97	15.62	15.41	17.35	17.45	17.68	18.41	21.79	21.66	20.70	19.81	19.77	221.62
1985	19.44	19.76	19.23	20.46	21.07	21.69	22.23	22.77	23.17	22.70	21.52	20.03	254.07
1986	19.22	17.75	16.69	16.13	15.98	16.64	17.30	17.51	19.24	18.41	18.09	17.97	210.93
1987	17.87	17.31	17.43	17.36	18.18	19.81	20.24	20.32	21.29	20.77	20.85	21.13	232.56
1988	20.73	19.92	19.24	19.35	20.81	20.68	21.45	20.31	20.81	18.86	21.11	20.87	244.14
1989	22.15	22.09	22.60	23.31	24.40	25.94	26.28	26.44	25.60	25.15	23.38	22.09	289.43
1990	19.99	21.04	22.24	21.82	22.46	23.06	22.69	22.27	22.10	21.24	19.74	20.16	258.81
1991	19.93	20.43	20.92	21.00	21.69	22.02	23.79	24.76	23.99	22.54	20.72	19.97	261.76

Los volúmenes de agua suministrada han ido en aumento, no sólo debido al crecimiento poblacional sino porque se ha incrementado la cobertura a la población, de modo que a partir de 1985 se ha tenido desde un 95% hasta un 96% de población servida, en contraste con un 60% servida en 1954 (COINPRO).

Otros usuarios

El distrito de riego 026 Bajo Río San Juan, en el estado de Tamaulipas (establecido el 26 de abril de 1939), requiere de hasta $553.8 \times 10^6 \text{m}^3$ anuales para el suministro de las 69,099 ha registradas en el padrón de usuarios y se abastece de las obras de toma de la presa Marte R. Gómez.

Sin embargo, actualmente depende en mucho del 60% de agua residual de ZMM que es conducida a la presa Marte R. Gómez debido a que al instalar la presa El Cuchillo se interrumpió el abastecimiento de agua del río San Juan a la presa Marte R. Gómez.

El distrito de riego 031 Las Lajas, en el estado de Nuevo León (establecido el 15 de septiembre de 1945), tiene una demanda de hasta $24 \times 10^6 \text{m}^3$ anuales (volumen consignado en el título de concesión) para regar sus 3,890 ha y toma agua de la presa El Cuchillo. Otras unidades agrícolas, que junto con el Distrito 031 conforman 4,500 ha de superficie, se abastecen de la presa El Cuchillo. Diversas comunidades se abastecen también de esta presa (hasta $6.93 \times 10^6 \text{m}^3$ anuales) a través del acueducto China-Los Aldamas-Arcabuz.

Las unidades de riego de Cerro Prieto, Leones y San Isidro, N. L. requieren de hasta $9.4 \times 10^6 \text{m}^3$ anuales de la obra de toma de la presa Cerro Prieto para abastecer sus 692 ha registradas en el padrón de usuarios.

Distribución de volúmenes por uso

A partir de información de CNA (basada en sus archivos y también en registros del INEGI), se obtuvieron los datos siguientes de la cuenca del río San Juan.

Para proveer de agua con uso público urbano se utilizan volúmenes que provienen en un 75.3% de fuentes superficiales. Con respecto al uso industrial, un 58.2% del volumen corresponde a fábricas no conectadas a la red sino que tienen fuentes subterráneas propias. El uso pecuario toma aproximadamente un 54% del agua de fuentes subterráneas. En cuanto al uso agrícola, la superficie de tierra se encuentra organizada en dos distritos, y en 1,116 unidades de riego de los estados de Coahuila y Nuevo León. Los distritos de riego tienen una superficie regable de 3,890 ha (distrito 031 Las Lajas) y 69,099 ha (distrito 026 Bajo San Juan). Las unidades de riego tienen una superficie regable en conjunto de 87,000 ha. Los distritos toman agua de fuentes superficiales, mientras que las unidades utilizan tanto esas fuentes (78.6%) como las subterráneas. Se muestra a continuación un cuadro resumen de los volúmenes para los diferentes usos.

Tabla 25. Volúmenes de agua según uso en la ZMM.

Uso	Volumen de agua, 10 ⁶ m ³
Público urbano	
-de fuentes superficiales	321.8
-de fuentes subterráneas	155.4
Industrial	
-conectado a red municipal	10.4
-autoabastecido de fuentes subterráneas	14.5
Pecuario	21.9
Agrícola	
Distrito de riego 026 Bajo San Juan (fuentes superficiales)	553.8
Distrito de riego 031 Las Lajas (fuentes superficiales)	24
Unidades de riego	
Fuentes superficiales	753.5
Fuentes subterráneas	205.4

Volumen de almacenamiento y gasto máximo de operación en los sistemas

La capacidad útil se calculó en las presas como la diferencia entre la capacidad al NAMO y la capacidad muerta; y en los casos de fuentes subterráneas, como la diferencia entre los volúmenes mayor y menor que fueron calculados en este trabajo. Para el gasto máximo de operación se contó con el dato (COINPRO y CNA) tanto de las presas como de los acuíferos (COINPRO). En seguida se presentan los valores en los sistemas.

Tabla 26. Capacidad útil y capacidad de extracción en fuentes superficiales y subterráneas.

Presas o sistemas de agua subterránea	Capacidad útil en 10 ⁶ m ³	Capacidad de extracción en m ³ /s
presa Cerro Prieto	300 - 25 = 275	6
Presas La Boca	42.5 - 1 = 41.5	1.8 hacia Monterrey y 4.0 hacia la potabilizadora San Roque
Presas El Cuchillo	1,123 - 100 = 1,023	•5 (acueducto a Monterrey) •0.22 (acueducto regional China-Los Aldamas-Arcabuz) •40 (toma para Distrito de Riego 031)
Sistema Mina	896.59 - 842.37 = 54.22	1.877 (registrado en julio de 1981)
Sistema Santa Catarina	893.41 - 362.20 = 531.21	3.574 (registrado en enero de 1979)

Presas o sistemas de agua subterránea	Capacidad útil en 10^6 m^3	Capacidad de extracción en m^3/s
Sistema Santiago	Su volumen medio en el año de 1989 (dato más reciente con que se contó en el presente trabajo) fue de 6.05	Gasto máximo observado en el periodo de 1954 a 1989: 3.344 (registrado en octubre de 1983)
Sistema Monterrey	En los manantiales, volumen medio en el 1992 (dato más reciente) de 0.03 En el sistema completo (incluyendo manantiales y pozos): $923.43 - 890.31 = 33.12$	En los manantiales, un valor máximo de gasto en el periodo 1983-1992 de 0.244. En los pozos someros, un valor máximo de 0.914 (agosto de 1983); y en los profundos, de 0.957 (en agosto de 1976)

3. Metodología y suposiciones

En este capítulo se describe primero el procedimiento que se eligió a fin de estimar la información básica necesaria para el manejo de las fuentes subterráneas. A diferencia de las fuentes superficiales, no se puede simplemente medir o tener todos los datos de ingreso o volumen útil de almacenamiento (aunque sí se puede contar con información de niveles freáticos, extracción y capacidad de conducción); así que se explica cómo se calcularon el ingreso, el almacenamiento y las curvas de elevación-almacenamiento. Más adelante, se explica brevemente el modelo de manejo conjunto de fuentes subterráneas y superficiales que se desarrolló (en el capítulo 5 se explica con mayor detalle).

Se ha procurado destacar las suposiciones que debieron ser hechas tanto por simplificación de cálculo, como por limitaciones en la información que se pudo recolectar

El cálculo del volumen de agua que se podría obtener de las fuentes que abastecen a la ciudad de Monterrey debe tomar en consideración, además del volumen existente en cada almacenamiento tanto superficial y subterráneo, cómo tratar de utilizar mayores cantidades de las fuentes que tengan un mayor nivel para dar tiempo a que se recuperen las otras fuentes que tengan niveles bajos, y también para minimizar el riesgo de desperdicio del líquido por derrames debidos al ingreso por lluvia en los almacenamientos próximos a sus niveles máximos. Sin embargo, resultaría muy complicado, aunque sería deseable, el manejar en el mismo esquema de cálculo a todos los siete sistemas de fuentes de abastecimiento, por lo cual estos fueron agrupados en dos, las superficiales y las subterráneas, y sus volúmenes de extracción se calculan con un método de programación dinámica mediante el cual se han probado diferentes políticas de operación.

Se presentará en seguida la información básica requerida, las suposiciones que se plantearon como simplificación del tratamiento, el procedimiento para la obtención de las curvas de niveles con volúmenes almacenados en acuíferos y el método de programación dinámica utilizado para distribuir las extracciones de las fuentes hacia la ciudad.

Información básica obtenida y supuesta

La lista de parámetros cuyos valores se requieren para el trabajo de cómputo incluye valores mensuales pero también diarios que debieron recabarse de la Comisión Nacional del Agua, del Organismo operador del agua en la ciudad de Monterrey (Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey), de la base de datos ERIC, del INEGI, y de estudios anteriores realizados por las empresas COINPRO y PSC. Algunos parámetros no se pudieron conseguir y se recurrió a hacer suposiciones. La siguiente tabla muestra la información recabada.

Información recabada

Tabla 27. Información básica de las fuentes de abastecimiento a la ZMM.

Estación, Sistema o Presa	Parámetro	Período	Observaciones
Monterrey SAD	Lluvia mensual	1900 1997	Pertenece al Sistema Monterrey
Mina NL SRH	Lluvia mensual	1956 1957	Pertenece al Sistema Mina
Huasteca Parshall (NL SAD)	Lluvia mensual	1956 1997	Pertenece al Sistema Santa Catarina
Cerro Prieto, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	
La Boca, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	
Monterrey, GASIR	Lluvia diaria	1990 1990	
Mina, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	
Sta. Catarina, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	
Comitas, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	
San Francisco La Carrera, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	En las inmediaciones del Sistema Santiago
San Francisco de Berlanga, GASIR	Lluvia diaria	1990 1993	En las inmediaciones del Sistema Santiago

Estación, Sistema o Presa	Parámetro	Periodo	Observaciones
Pozos Mina Eric	Lluvia diaria	1982 1986	Pertenece al Sistema Mina
Comitas Eric	Lluvia diaria	1942 1986	Pertenece al Sistema Santa Catarina
El Pajonal Eric	Lluvia diaria	1954 1986	Pertenece al Sistema Santa Catarina
Monterrey (Observ.,SMN)	Lluvia diaria	1988 1992	Pertenece al Sistema Monterrey
Presa El Cuchillo (GASIR)	Lluvia diaria	1993 1998	
Presa La Boca GASIR	Lluvia diaria	1993 1998	
Sistema Monterrey	Nivel estático	1988 1992	32 pozos; NE
Sistema Mina	Nivel estático	1996 1997	24 pozos; NE
Sistema Santa Catarina	Nivel estático y Nivel dinámico	1975 1990	25 pozos; no se distingue entre NE y ND
		1996 1997	23 pozos; NE
Sistema Monterrey (según COINPRO)	Extracción mes	1988 1992	
Sistema Mina (según COINPRO)	Extracción mes	1982 1986	
Sistema Santa Catarina (según COINPRO)	Extracción mes	1975 1986	
Sistema Santiago (según COINPRO)	Extracción mes	1954 1989	
Sistema Linares-Monterrey	Extracción mes	1982 1992	
Presa El Cuchillo	Elevación-capacidad		
	Evaporación neta mensual	1940 1995	
	Entrada mensual	1955 1991	
	Volumen almacenado mensual	1992 2002	
Presa Cerro Prieto	Elevación-capacidad		
	Evaporación neta mensual	1960 1993	
	Entrada mensual	1952 1991	
	Volumen almacenado mensual	1983 2002	

Estación, Sistema o Presa	Parámetro	Período	Observaciones
Presa La Boca	Elevación-capacidad		
	Evaporación neta mensual	1958 1994	
	Entrada mensual	1955 1991	
	Volumen almacenado mensual	1983 2002	
	Derrames y desfogues	1963 1991	

La descripción de las fuentes superficiales y subterráneas específicas de la ZMM se encontró en un estudio contratado por la CNA (COINPRO, 1993), de donde también se obtuvieron los valores de extracciones en los acuíferos y áreas de recarga, así como información sobre ingresos a las presas. La CNA proporcionó valores de lluvia diaria y también los datos de elevación con capacidad de las tres presas principales. Los niveles estáticos en pozos de los acuíferos los proporcionó el Organismo operador Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM, 1997). Los valores de lluvia diaria se obtuvieron de la base de datos ERIC. Se decidió utilizar una fórmula empírica para estimar la recarga subterránea a partir de valores de precipitación diaria. En paralelo a la obtención de la recarga se pudo estimar el volumen almacenado.

Suposiciones realizadas

Era necesario conocer datos primarios (lluvia, niveles de agua, extracciones y áreas de recarga) de las fuentes en los diversos sistemas, con los cuales se obtendría a su vez información secundaria (recarga en acuíferos y relaciones niveles-almacenamientos) que eran necesarios en el trabajo presente.

Se recurrió a hacer simplificaciones en algunas etapas de la investigación. Se pretendía que los datos de las diferentes variables que se requiere tener disponibles de cada una de las fuentes superficiales y subterráneas tuvieran un período histórico común para que el ejercicio del presente trabajo proporcionara información útil. Sin embargo, la dificultad para tener datos tan variados en los mismos años no permitió la recopilación completa de información y se procuró entonces tener un período propio para algunos sistemas aunque ya no coincidiera en tiempo con el de los demás; pero que permitiría conocer en cada sistema por separado la información secundaria. Aún esto fue imposible para los sistemas Mina, Santa Catarina y Santiago. Para poder avanzar en el desarrollo de un método de análisis conjunto de las fuentes superficiales y subterráneas, se decidió obtener de otra forma (como se explica en los siguientes tres párrafos) algunos datos faltantes, con los cuales se podría ya no probar el método contra datos históricos, sino contar con datos de entrada que si bien, rigurosamente no son reales, fueron los más correctos que se creyó posible obtener. Con esa información se continuó la implementación del procedimiento de análisis conjunto; y si bien es cierto que los resultados obtenidos no proceden completamente de los registros reales del pasado, aún así, son resultados que dan una idea de la utilidad potencial del procedimiento que aquí se presenta como una alternativa o una herramienta que podría ser calibrada con información histórica completa.

Para el sistema Mina se pretendía usar información de los años 1982-1986; pero no se pudo contar con datos de niveles estáticos en ese período, sino sólo en los años 1996 y 1997. Aunque se propuso utilizar este registro como datos de dos años dentro del período 1982-1986, se optó por utilizar los mismos coeficientes del sistema Monterrey para los cálculos de volúmenes del sistema Mina.

En el sistema Santa Catarina, el período de 1975-1986 era el planeado. La información reunida sobre niveles de agua subterránea era amplia y correspondía a los años 1975-1990 por una parte y a los años 1996 y 1997 por otra. Los datos de estos dos últimos años eran de niveles estáticos; pero en cuanto al otro período, la bibliografía no era clara como para distinguir entre niveles estáticos y dinámicos. Se podría haber hecho un traslado de información en el tiempo como se planeó como opción en el sistema Mina; en cambio, se prefirió usar los valores de los registros históricos de alquinos pozos como si fueran niveles estáticos.

El sistema Santiago carecía de información en niveles estáticos y acerca del área de recarga. No fue posible calcular sus volúmenes para algún período. Para el análisis de ingresos y salidas en los sistemas, que se presentan en la tercera sección del capítulo 5, se supuso que el registro histórico de producción (extracciones) de este sistema fuera considerado también como el registro de ingresos.

También se hicieron las siguientes simplificaciones: i) se tomó sólo una estación pluviométrica, como representativa del área de recarga (de entrada) al acuífero; ii) se propuso un gran volumen de agua presente en el acuífero inicialmente, por la imposibilidad de conocer el volumen almacenado; y iii) los datos de extracciones en la bibliografía disponible correspondía a un sistema completo, es decir que no se trabajó en forma separada con las fuentes particulares de cada sistema.

Para la recarga, se planeó obtener la lluvia en los sistemas de acuíferos a través de la técnica de polígonos de Thiessen; pero no fue posible conseguir el área de delimitación de los sistemas de acuíferos. Sin embargo, en las oficinas de SADM se proporcionaron los datos de una estación climatológica característica para algunos de los sistemas (Santa Catarina, Mina y Monterrey) y después se consiguió la estación correspondiente a los sistemas faltantes. Los datos de estas estaciones se consideraron como representativos en este trabajo.

Recarga, Volumen de almacenamiento y Curvas elevación - capacidad

Se consideró que un acuífero es como una presa y como tal, se necesitaba conocer su curva elevación - capacidad para fines de manejo. Las curvas elevación-capacidad de cada una de las presas se obtuvieron como datos de la CNA y las de los acuíferos se calcularon a partir de información de la evolución de nivel estático, lluvias y salidas (extracciones) y del ingreso o recarga calculada. Así fue posible intuir el volumen almacenado y la relación elevación-capacidad. Para encontrar las variables recarga y volumen se utilizó una sencilla ecuación de balance del sistema (como se explica en la sección siguiente) y el método de recarga de Knisel*.

* El método de Knisel se emplea para estimar con una ecuación empírica la recarga en acuíferos cársticos a partir de datos de lluvia diaria. La oficina encargada del manejo de agua en Monterrey lo utiliza. Originalmente, Knisel determinó los dos coeficientes de la ecuación para el acuífero de la Plataforma Eduards, en Texas, con apoyo en los resultados de estudios hidrológicos sobre recarga, lluvia y escurrimiento desarrollados por el Servicio de Investigación en Agricultura de los Estados Unidos. En el presente trabajo, se buscaron los coeficientes que mejor reprodujeran la expresión gráfica del volumen calculado con la recarga comparado con la gráfica de los niveles históricos de agua subterránea (tal y como se explica en el apartado siguiente).

Aunque en principio se decidió obtener la recarga o ingreso de agua por lluvia a los acuíferos mediante la ecuación de Knisel, los valores de los dos coeficientes que utiliza debían ser ajustados. Para el cálculo de recarga se requería contar con datos de lluvia diaria, extracciones y niveles de los acuíferos. Una primera aproximación de la recarga fue obtenida a partir de usar la ecuación de Knisel con algún valor para los coeficientes. La diferencia entre la recarga y la extracción es el cambio de almacenamiento en el acuífero y éste podía compararse con el nivel estático gráficamente. Si las dos gráficas no mostraban una similitud aceptable entre sí, se modificaban los valores de los coeficientes del cálculo de recarga comparando con los resultados gráficos hasta obtener que la evolución del volumen almacenado fuera parecida a la del nivel en el acuífero.

Todos los cálculos y las gráficas se hicieron en tablas del paquete de computadora Excel tratando que las tablas y gráficas estuvieran relacionadas unas con otras de tal modo que con sólo poner otros valores en los datos, automáticamente se hicieran las gráficas finales.

Se decidió trabajar primero con el sistema Monterrey porque tenía datos completos en el período común, posteriormente se hizo con los otros sistemas.

Los datos faltantes de lluvia diaria se sustituyeron por promedios: si no existía el valor del día 21 de marzo de 1983, se obtenía el promedio de todos los valores que existieran en los días 21 de marzo a lo largo del registro de años y ese promedio ocuparía el lugar del dato inexistente. Los valores desconocidos de los niveles estáticos se calcularon mediante interpolación y comparación con valores sí existentes de otros pozos. El área de recarga se obtuvo de la bibliografía. Las gráficas se harían con el paquete Excel fácilmente. Se requería tener un período (se acordó tener al menos dos años) con datos de todas las variables.

En cuanto a los pozos, se agruparon los que estaban cercanos entre sí y se graficó tanto el nivel estático de cada pozo como el nivel promedio de cada grupo de pozos, también se agruparon aquellos que mostraron una similitud en su gráfica.

En seguida se muestra un esquema del procedimiento que se ha descrito.

Esquema para el cálculo de la recarga, el volumen y las curvas elevación - capacidad

El procedimiento utilizado para la obtención de la curva elevaciones – capacidades de un sistema de agua subterránea es el siguiente:

1) Se necesitan valores históricos de 3 variables del sistema, a saber: lluvia diaria, extracciones mensuales y niveles estáticos mensuales en los pozos. Se requiere que exista un período de tiempo que tenga datos de todas las variables; es decir, un período común a todas las variables (ver la figura siguiente)

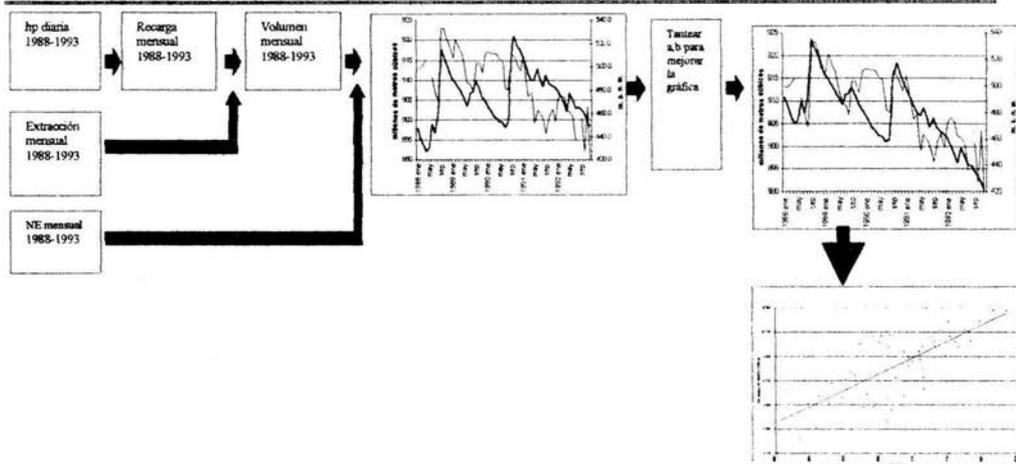


Figura 2. Esquema del procedimiento para obtener la curva Elevaciones – Capacidades en un sistema de agua subterránea

2) Con el registro de lluvias diarias se obtiene un registro de recargas diarias utilizando el método de Knisel. Antes de aplicar el método hay que completar los datos que tienen valor inapreciable y los faltantes del registro. Si el dato es inapreciable, se sustituye por 0.01; si no hay dato, por el promedio obtenido con los valores de ese número de día del mes a lo largo de todos los años, considerando para el promedio sólo los días que tienen datos. El método de Knisel se aplica a los valores de hp diaria. Utiliza la siguiente fórmula, donde la lámina de recarga es función de la lámina de lluvia:

$$R = \frac{a \cdot b \cdot hp^2}{a^2 + hp^2} \quad \text{si } hp > 6.5 \text{ mm}$$

$$R = 0 \quad \text{si } hp \leq 6.5 \text{ mm} \quad (2)$$

donde:

R lámina de recarga en mm

hp lámina de lluvia en mm

a primer coeficiente de ajuste con algún valor inicial, por ejemplo 76.44

b segundo coeficiente de ajuste, con cualquier valor inicial, por ejemplo 1.604

La recarga mensual, se calcula sumando los valores diarios del mes.

3) El volumen mensual se obtiene aplicando una ecuación de balance:

$$V_f - V_i = E - S$$

donde:

V_i volumen de agua subterránea en el inicio de un mes antes de considerar la entrada o la salida mensual. El V_i de un mes se toma como el V_f del mes anterior. El V_i del primer mes es un valor inventado suficientemente grande como para que no se obtengan resultados de V_f negativos.

- V_f volumen de agua que queda al final de mes después de considerar la entrada y la salida ocurridas en ese tiempo.
 E entrada (recarga) al acuífero. Se obtiene con el método de Knisel.
 S salida (extracciones) del acuífero. Es dato.

4) El registro de nivel estático mensual (NE) del sistema se obtiene a partir de los valores de NE mensual que existan en los múltiples pozos que existan en la región del sistema. Se deben tomar en cuenta sólo los pozos que muestren una variación sensible mes a mes en sus valores de NE porque algunos pozos tienen un valor constante o casi constante. Se obtienen valores promedio del NE mensual con los pozos elegidos para un período en que todos los pozos tengan información.

5) La gráfica de la evolución histórica del Volumen y la del NE durante el periodo común de información permite analizar si hay correspondencia en el aspecto de ellas. Es posible que no exista una total correspondencia entre los picos, ramas ascendentes y descendentes de las dos gráficas porque la recarga se obtuvo con valores iniciales para los coeficientes a y b .

6) Para mejorar la semejanza entre las dos gráficas se tantean valores de a y de b hasta lograr no una total correspondencia del volumen con el NE, porque sería imposible; pero sí una aceptable.

7) Si se representa en una gráfica los valores NE contra Volumen de cada mes se observará que existirán, a veces, más de un valor de NE que tengan el mismo valor de volumen y, a veces, más de un valor de volumen correspondientes al mismo NE. Se deberá buscar una curva que represente al conjunto de puntos de modo que sólo exista una relación uno a uno entre los valores de las dos variables. Esa curva es la de Elevaciones – Capacidades.

8) Un procedimiento alternativo, sólo aconsejable para los casos en que no se disponga de datos diarios de lluvia porque no es muy exacto, para obtener la recarga consiste en aplicar el método de Knisel a los datos mensuales de lluvia pero utilizando valores calibrados de los coeficientes a y b . Estos coeficientes calibrados se obtienen, necesariamente de una estación que tenga valores de lluvia diaria, extracción mensual y NE mensual. Es decir, que de alguna estación con información completa en algún periodo de tiempo se obtienen los coeficientes que podrán utilizarse directamente sobre los valores mensuales de lluvia en otra estación o en la misma estación en otros años en que quizás no existan datos diarios. Ahora bien, los coeficientes mencionados se obtienen como sigue a continuación (ver también la figura siguiente).

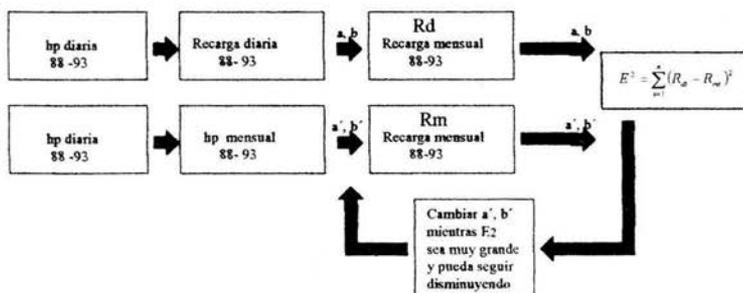


Figura 3. Esquema de la obtención de los coeficientes a' y b' calibrados con los que puede calcularse valores de recarga a partir de lluvia diaria.

Una vez que se tienen los coeficientes normales de Knisel que producen una aceptable correspondencia entre las gráficas de evolución de NE y de volumen, se aplican esos mismos coeficientes a los datos de lluvia mensual de los mismos años con los que se trabajó la lluvia diaria. En seguida se comparan las recargas mensuales obtenidas a partir de lluvia diaria y de lluvia mensual. Una forma útil de comparación es calcular el error cuadrático entre ambas series de recarga. Ese error se calcula mediante la expresión:

$$E^2 = \sum_{i=1}^n (Rd_i - Rm_i)^2$$

donde:

Rd_i valor iésimo de la recarga obtenidos con datos diarios

Rm_i valor iésimo de la recarga obtenido con datos mensuales

n número total de valores que tiene la serie de recarga (el número de años multiplicado por el número de meses en cada año)

E² error cuadrático

El siguiente paso consiste en ir variando el valor de los coeficientes de modo que se obtenga la disminución del valor del error cuadrático. La experiencia con los valores analizados indica que hay un momento en el que a pesar de que el error es grande, ya no puede bajarse su valor.

Modelo de manejo conjunto de aguas superficiales y subterráneas

El problema de asignación de volúmenes de agua a la ZMM a partir de sus diversas fuentes tiene un carácter combinatorio en tanto que se refiere a calcular las posibles combinaciones de la aportación de cada fuente a fin de que se asegure el abasto y de que se protejan los niveles seguros de operación en las fuentes.

La programación dinámica es un método de cálculo, un algoritmo para obtener soluciones óptimas, ya sean éstas máximas o mínimas, a problemas de combinaciones en los que intervienen varias variables.

El algoritmo consiste en descomponer el problema en etapas que secuencialmente van agregando variables al tiempo que se obtiene una solución óptima en cada etapa. La selección del orden de las variables es arbitraria. En el capítulo 5 se describe una aplicación de un algoritmo originalmente creado para distribución de un recurso hacia varios destinos, y que en el presente trabajo se adaptó para usarlo en la concentración de recursos procedentes de varias fuentes.

4. Estimación de la recarga y deducción de la curva "elevaciones – capacidades" en los acuíferos

En este capítulo se presentan el cálculo de la recarga y de la curva elevaciones-capacidades de los acuíferos Monterrey, Mina y Santa Catarina a partir de la estimación de i) la recarga realizada con la ecuación empírica adaptada de Knisel; y ii) el volumen almacenado obtenido con balance entre ingresos, extracciones y evolución de niveles freáticos. En cuanto al acuífero Santiago, no fue posible obtener la curva. Cabe aclarar que en el proceso se han hecho algunas suposiciones que se describen a detalle.

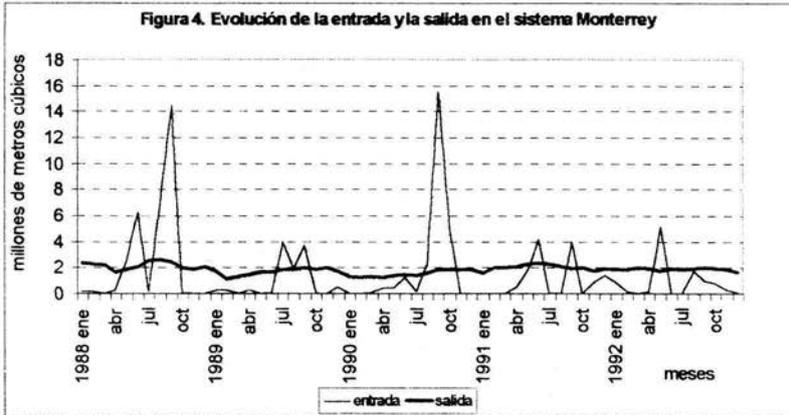
Sistema Monterrey

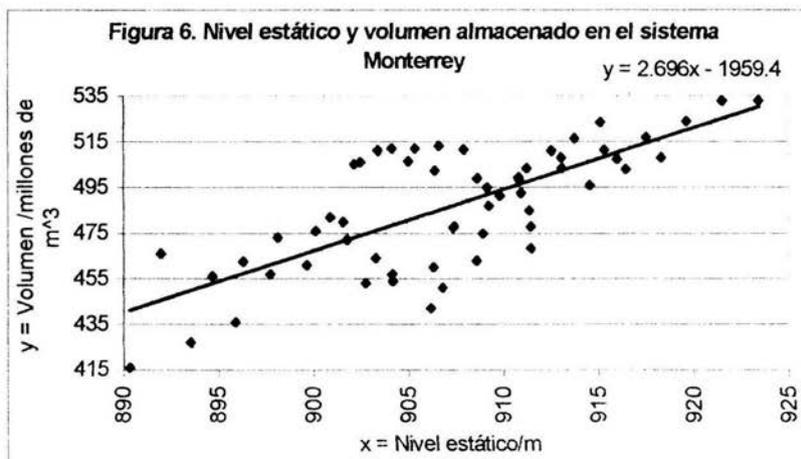
El Sistema Monterrey fue el primero en que se trabajó para poder obtener su relación entre niveles estáticos y volúmenes almacenados. De acuerdo con el procedimiento (que se explicó en el capítulo anterior), se eligió un período en el que se contara con datos de lluvia diaria y datos de extracciones y niveles estáticos mensuales; se estimó una primera versión de la recarga utilizando algún valor cualquiera para los coeficientes de Knisel a y b; en seguida, el volumen almacenado en los años del período se estimó como las diferencias entre las entradas y las salidas; después se representó en una misma gráfica la evolución del volumen mensual y los datos de todos los pozos del sistema. De esta manera se detectó que algunos pozos por alguna razón casi no presentaban variación en sus niveles en tanto que otros pozos mostraban variaciones notorias a través de los meses. Se eliminaron los primeros y se buscó elegir un promedio de datos para contar con un solo registro de niveles. Y dado que la gráfica de ese registro corresponde a mediciones reales, era necesario cambiar el trazo del volumen almacenado calculado para que fuera similar. Se modificaron los coeficientes a y b de modo de probar cómo influían en el volumen y finalmente se obtuvo una gráfica aceptable porque en general tenía cierto parecido con la gráfica de niveles; no se podía reproducir todos los ascensos y descensos de la evolución mensual de los niveles pero sí su aspecto global. Lo que restaba era mostrar en una gráfica la relación niveles estáticos contra volumen almacenado estimado y obtener una ecuación de tendencia que se calcula de manera sencilla en el mismo software Excel. Cabe aclarar que por no contar con el dato de área real se supuso y se ajustó un valor de área durante la prueba de los coeficientes a y b de Knisel. Por otro lado, los niveles estáticos expresados como profundidad respecto del suelo fueron tratados de referir gráficamente a elevación sobre el nivel del mar, aunque no se contó con los datos de las cotas de los brocales. Ver a continuación los valores de entrada y volumen estimados y las gráficas de entrada y salida; de volumen y nivel estático; y de nivel y almacenamiento.

Tabla 28. Propuesta de recarga y volumen del sistema Monterrey estimados con valores: área del acuífero=100 km² (no se contó con dato real); coeficientes de Knisel a=76.44, b=1.3; y volumen inicial=913x10⁶m³

año	mes	Nivel (est y din) pozos 5,6,19 prom. /msnm	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
1988	ene	499.5	0.1	2.4	-2.2		910.8
	feb	499.0	0.1	2.3	-2.2	910.8	908.6
	mar	502.5	0.0	2.2	-2.2	908.6	906.4
	abr	506.5	0.3	1.7	-1.4	906.4	905.0
	may		2.6	1.9	0.7	905.0	905.7
	jun	491.3	6.3	2.2	4.2	905.7	909.8
	jul	477.5	0.1	2.6	-2.4	909.8	907.4
	ago	468.5	6.7	2.7	4.1	907.4	911.4
	sep	533.0	14.5	2.5	12.0	911.4	923.4
	oct	533.0	0.1	2.0	-1.9	923.4	921.5
	nov	524.0	0.0	1.9	-1.9	921.5	919.6
	dic	517.0	0.0	2.1	-2.1	919.6	917.5
1989	ene	507.5	0.2	1.8	-1.6	917.5	915.9
	feb	523.5	0.3	1.2	-0.9	915.9	915.1
	mar	516.5	0.0	1.3	-1.3	915.1	913.7

año	mes	Nivel (est y din) pozos 5,6,19 prom.	Recarga (E)	Extracción (S)	(E-S)	Vi	Vf
		/msnm	/10 ⁶ m ³				
1990	abr	511.0	0.3	1.5	-1.2	913.7	912.5
	may	498.5	0.0	1.7	-1.7	912.5	910.8
	jun	487.0	0.1	1.7	-1.6	910.8	909.2
	jul	485.0	3.9	1.8	2.1	909.2	911.3
	ago	478.0	2.0	1.9	0.1	911.3	911.4
	sep	503.5	3.7	2.1	1.6	911.4	913.0
	oct	503.5	0.0	1.9	-1.9	913.0	911.2
	nov	495.0	0.0	2.0	-2.0	911.2	909.2
	Dic	511.7	0.5	1.8	-1.2	909.2	907.9
	ene	513.0	0.0	1.3	-1.3	907.9	906.6
	feb	512.0	0.0	1.3	-1.3	906.6	905.3
	mar	512.0	0.1	1.3	-1.2	905.3	904.1
abr	511.0	0.5	1.2	-0.7	904.1	903.4	
may	506.0	0.5	1.4	-0.9	903.4	902.4	
jun	505.3	1.2	1.5	-0.3	902.4	902.1	
jul	482.0	0.2	1.5	-1.3	902.1	900.9	
ago	480.0	2.3	1.6	0.7	900.9	901.5	
sep	511.5	15.6	1.8	13.8	901.5	915.3	
oct	508.0	4.8	1.9	3.0	915.3	918.3	
nov	503.0	0.0	1.9	-1.9	918.3	916.4	
dic	496.0	0.0	1.9	-1.9	916.4	914.5	
1991	ene	508.0	0.0	1.6	-1.6	914.5	913.0
	feb	492.5	0.0	2.1	-2.1	913.0	910.9
	mar	475.0	0.0	2.0	-2.0	910.9	908.9
	abr	478.0	0.6	2.1	-1.5	908.9	907.4
	may	451.0	1.7	2.3	-0.6	907.4	906.8
	jun	463.0	4.1	2.3	1.8	906.8	908.6
	jul	460.0	0.1	2.3	-2.3	908.6	906.3
	ago	454.0	0.0	2.2	-2.2	906.3	904.2
	sep	442.0	3.9	2.0	2.0	904.2	906.1
	oct	457.0	0.0	2.0	-2.0	906.1	904.1
	nov	464.0	0.9	1.8	-0.9	904.1	903.3
	dic	453.0	1.4	1.9	-0.5	903.3	902.7
1992	ene	472.0	0.9	1.9	-0.9	902.7	901.8
	feb	476.0	0.2	1.8	-1.7	901.8	900.1
	mar	473.0	0.0	2.0	-2.0	900.1	898.1
	abr	462.5	0.1	2.0	-1.8	898.1	896.3
	may	461.0	5.1	1.8	3.4	896.3	899.6
	jun	457.0	0.0	1.9	-1.9	899.6	897.7
	jul	436.0	0.0	1.9	-1.9	897.7	895.9
	ago		1.8	1.9	-0.2	895.9	895.7
	sep	456.0	1.0	2.1	-1.1	895.7	894.7
	oct	427.0	0.8	1.9	-1.1	894.7	893.5
	nov	466.0	0.2	1.8	-1.6	893.5	891.9
	dic	416.0	0.1	1.7	-1.6	891.9	890.3





Sistema Santa Catarina (Buenos Aires)

Por la influencia que entre sí guardan los acuíferos de Aluvión y Jurásico del Sistema Santa Catarina, su recarga se tendría que estimar a través de un coeficiente de infiltración sobre el área de 622.4 km² y no por medio de la fórmula de Knisel como en el acuífero del cretácico, sin embargo, por simplificación se consideró el área global de los tres acuíferos y se estimó la recarga a través de la expresión de Knisel.

En el período 75-86 se contó con datos de lluvia diaria, extracción y también información de niveles históricos en pozos de 1975 a 1990 (en msnm) y de 1996 a 1997 (en profundidad respecto del suelo); sin embargo, la información disponible de niveles en el período 1975 a 1990 no permite distinguir si son estáticos o dinámicos. Se propuso considerarlos como estáticos. Esto se hizo para tener todos los datos en un período común, en lugar de utilizar los niveles que de seguro son estáticos pero de los años 96 y 97. Se eligió el registro de sólo uno de los pozos, el cual era uno de los que en la gráfica del período 96-97 tenía un comportamiento parecido al valor promedio.

Posteriormente, se calculó el volumen almacenado para luego representar en una gráfica su evolución junto a los niveles del período 75-86. Sin embargo, los valores del volumen y del NE no eran coherentes. Conforme crecía el volumen, decrecía el NE. Se tenían como alternativas i) el probar con el registro de niveles de otro de los varios pozos que se tienen en el período 75-86; o ii) usar los niveles de los dos años 1996-1997 trasladados de modo que se ocuparan como si hubiesen ocurrido entre 1975 y 1986. Se eligió hacer lo primero, pero en paralelo usar los niveles del 96-97. Sin embargo, ¿qué explicación se podría tener frente a esta contradicción? Quizás pudiera en parte explicarse a priori como que el acuífero no tiene gran capacidad y el volumen en lugar de ser almacenado se perdió sin que esta pérdida formara parte de las extracciones.

En la gráfica de entradas contra salidas del acuífero se puede observar que los valores de las recargas (entradas) superaban con mucho a las salidas (extracciones). Se verificó que no hubiera errores en la información; ante ello se pensó que quizás los datos de extracciones eran valores medios pero no fue así; se confirmó que la ubicación de la estación elegida quedara dentro de la zona del acuífero, se revisaron datos de lluvia, de extracción y área de recarga. Sin embargo, los coeficientes de Knisel a y b podían ser manejados. En forma sorprendente, se vio lo sensible que es el sistema a la variación de esos coeficientes; tanto que se podía lograr que ahora los volúmenes decrecieran lo mismo que los niveles. A continuación, los valores de entrada y volumen estimados; y luego, las gráficas anteriores y posteriores al ajuste de coeficientes que muestran la evolución de recarga y extracción; de volumen y nivel de agua; y de nivel contra volumen almacenado. Es importante notar que en la gráfica del pozo hay una discontinuidad de valores porque en algunas fechas no se tenían datos registrados.

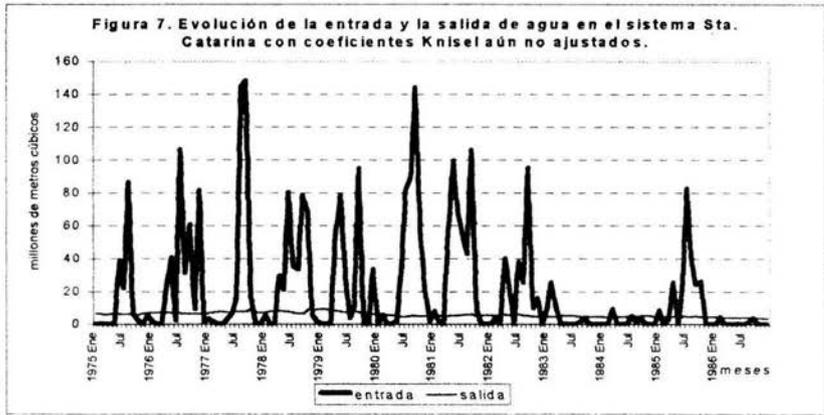
Tabla 29. Propuesta de recarga y volumen del sistema Santa Catarina estimados con valores: área del acuífero=1072.4 km²; coeficientes de Knisel a=250, b=0.4; y volumen inicial=900x10⁶m³.

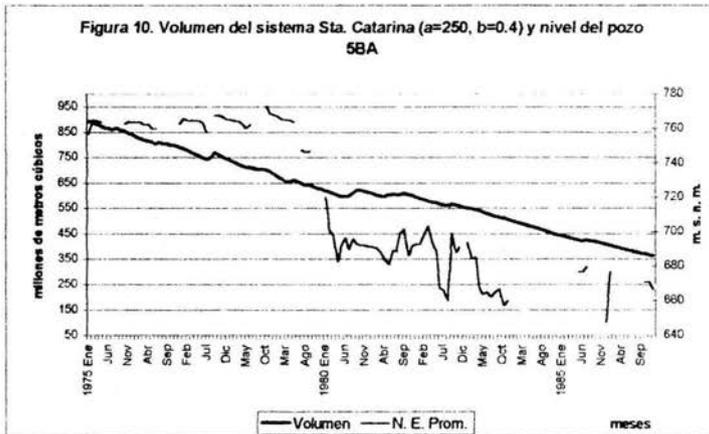
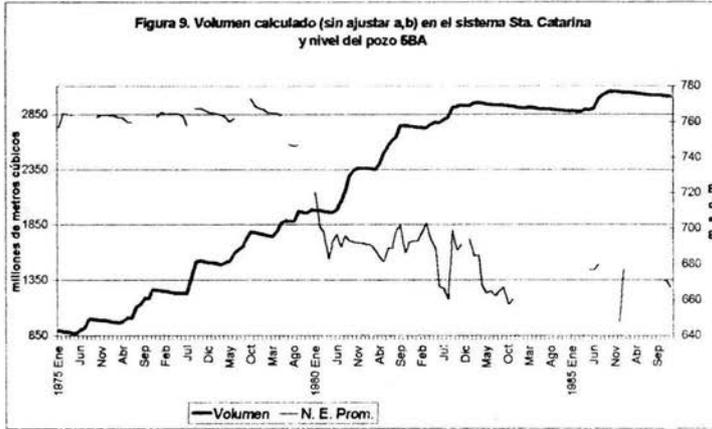
año	mes	Nivel (est y din) pozo 5BA /msnm	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
1975	Ene	756.8	0.0	6.6	-6.6	900.0	893.4
	Feb	764.8	0.0	6.4	-6.4	893.4	887.0
	Mar	764.3	0.0	6.0	-6.0	887.0	881.0
	Abr	763.8	0.0	6.4	-6.4	881.0	874.6
	May		0.0	6.8	-6.8	874.6	867.8
	Jun		3.5	6.4	-2.9	867.8	864.9

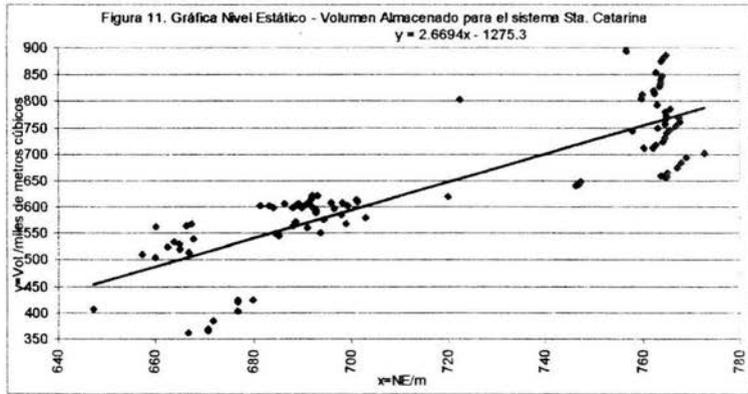
año	mes	Nivel (est y din) pozo 5BA /msnm	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	V _i /10 ⁶ m ³	V _f /10 ⁶ m ³
	Jul		1.8	6.3	-4.6	864.9	860.3
	Ago		11.4	6.5	4.9	860.3	865.2
	Sep		0.5	6.2	-5.7	865.2	859.4
	Oct	762.8	0.2	5.8	-5.6	859.4	853.8
	Nov	764.1	0.0	6.7	-6.7	853.8	847.1
	Dic	763.9	0.4	6.9	-6.4	847.1	840.7
1976	Ene	763.7	0.1	6.9	-6.8	840.7	833.9
	Feb	763.6	0.0	6.9	-6.9	833.9	827.0
	Mar	762.3	0.0	6.9	-6.9	827.0	820.2
	Abr	762.5	1.9	7.3	-5.3	820.2	814.8
	May	760.0	3.4	6.9	-3.6	814.8	811.3
	Jun	759.8	0.2	6.8	-6.7	811.3	804.6
	Jul		10.5	6.8	3.7	804.6	808.3
	Ago		2.6	6.7	-4.1	808.3	804.3
	Sep	722.5	5.4	6.6	-1.1	804.3	803.1
	Oct		0.7	6.6	-5.9	803.1	797.2
	Nov		8.1	6.5	1.6	797.2	798.8
	Dic	762.9	0.1	6.1	-6.0	798.8	792.9
1977	Ene	765.7	0.2	7.0	-6.8	792.9	786.1
	Feb	764.6	0.1	7.3	-7.2	786.1	778.9
	Mar	764.9	0.0	7.7	-7.7	778.9	771.2
	Abr	764.6	0.0	7.6	-7.6	771.2	763.6
	May	764.6	0.3	7.3	-7.0	763.6	756.6
	Jun	763.2	0.5	7.8	-7.3	756.6	749.3
	Jul	758.0	1.3	7.7	-6.3	749.3	743.0
	Ago		15.5	7.6	7.9	743.0	750.9
	Sep	767.5	25.2	7.7	17.5	750.9	768.4
	Oct	767.7	1.3	9.4	-8.0	768.4	760.3
	Nov	766.9	0.0	7.4	-7.4	760.3	752.9
	Dic	765.6	0.0	7.1	-7.1	752.9	745.8
1978	Ene	765.1	0.4	7.3	-6.8	745.8	739.0
	Feb	764.6	0.0	8.2	-8.2	739.0	730.8
	Mar	764.2	0.0	8.5	-8.5	730.8	722.4
	Abr	762.8	2.7	8.3	-5.6	722.4	716.8
	May	760.2	1.8	8.0	-6.1	716.8	710.7
	Jun	762.2	8.5	7.8	0.7	710.7	711.4
	Jul		3.0	7.1	-4.1	711.4	707.3
	Ago		2.7	6.7	-3.9	707.3	703.3
	Sep		8.4	6.6	1.9	703.3	705.2
	Oct	772.8	6.2	9.1	-2.9	705.2	702.3
	Nov	768.9	0.4	8.9	-8.5	702.3	693.8
	Dic	767.9	0.1	9.2	-9.1	693.8	684.8
1979	Ene	767.2	0.0	9.4	-9.4	684.8	675.4
	Feb	765.1	0.0	9.3	-9.3	675.4	666.1
	Mar	765.1	0.0	8.7	-8.7	666.1	657.3
	Abr	764.8	6.6	8.5	-1.9	657.3	655.5

año	mes	Nivel (est y din) pozo 5BA /msnm	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
	May	763.9	11.7	7.8	3.9	655.5	659.4
	Jun		2.8	7.5	-4.7	659.4	654.7
	Jul	747.3	0.3	7.1	-6.8	654.7	647.9
	Ago	746.3	0.9	8.0	-7.1	647.9	640.8
	Sep	747.0	8.6	7.3	1.3	640.8	642.2
	Oct		0.0	7.0	-7.0	642.2	635.2
	Nov		0.0	6.3	-6.3	635.2	628.9
	Dic		2.8	6.3	-3.5	628.9	625.3
1980	Ene	720.0	0.0	6.2	-6.2	625.3	619.1
	Feb	701.0	0.4	6.0	-5.6	619.1	613.5
	Mar	698.2	0.0	5.6	-5.6	613.5	607.9
	Abr	683.2	0.0	5.5	-5.5	607.9	602.4
	May	692.2	0.2	5.1	-4.9	602.4	597.6
	Jun	696.5	2.9	4.7	-1.7	597.6	595.8
	Jul	689.8	7.9	4.8	3.1	595.8	598.9
	Ago	695.8	14.9	5.1	9.8	598.9	608.7
	Sep	693.2	16.9	5.1	11.8	608.7	620.6
	Oct	692.2	4.8	4.9	-0.1	620.6	620.5
	Nov	692.0	1.9	4.9	-3.0	620.5	617.5
	Dic	691.6	0.1	5.0	-4.8	617.5	612.6
1981	Ene	691.2	0.6	4.8	-4.2	612.6	608.4
	Feb	690.7	0.1	5.0	-4.9	608.4	603.5
	Mar	688.1	0.0	5.0	-5.0	603.5	598.5
	Abr	684.1	4.9	5.2	-0.4	598.5	598.1
	May	681.4	9.1	5.1	4.1	598.1	602.2
	Jun	689.1	8.7	5.6	3.1	602.2	605.3
	Jul	688.9	5.2	5.9	-0.7	605.3	604.5
	Ago	699.1	3.6	5.7	-2.1	604.5	602.4
	Sep	701.3	13.8	6.2	7.7	602.4	610.1
	Oct	686.3	0.7	5.0	-4.3	610.1	605.8
	Nov	691.9	0.0	5.6	-5.6	605.8	600.3
	Dic	692.8	0.0	5.8	-5.8	600.3	594.5
1982	Ene	692.8	0.0	5.6	-5.6	594.5	589.0
	Feb	697.9	0.3	4.5	-4.2	589.0	584.8
	Mar	703.0	0.0	6.0	-6.0	584.8	578.7
	Abr	694.4	3.3	5.9	-2.6	578.7	576.2
	May	688.7	1.8	5.6	-3.8	576.2	572.4
	Jun	667.5	0.0	5.4	-5.4	572.4	567.0
	Jul	666.3	3.4	6.0	-2.7	567.0	564.3
	Ago	660.2	2.0	5.1	-3.1	564.3	561.3
	Sep	699.0	10.9	5.0	5.9	561.3	567.1
	Oct	688.1	0.8	5.0	-4.2	567.1	563.0
	Nov	691.0	1.3	4.8	-3.5	563.0	559.4
	Dic		0.0	4.7	-4.7	559.4	554.8
1983	Ene	693.8	0.8	4.6	-3.8	554.8	550.9
	Feb	684.6	2.1	4.8	-2.6	550.9	548.3

año	mes	Nivel (est y din) pozo 5BA /msnm	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
	Mar	685.2	0.7	4.8	-4.0	548.3	544.3
	Abr	667.8	0.0	5.1	-5.1	544.3	539.2
	May	663.8	0.0	5.0	-5.0	539.2	534.1
	Jun	664.8	0.0	5.1	-5.1	534.1	529.0
	Jul	662.3	0.0	5.0	-5.0	529.0	524.0
	Ago	664.8	0.1	4.9	-4.9	524.0	519.2
	Sep	666.8	0.3	4.6	-4.3	519.2	514.8
	Oct	657.3	0.0	4.6	-4.6	514.8	510.2
	Nov	659.8	0.0	4.7	-4.7	510.2	505.6
	Dic		0.0	4.7	-4.7	505.6	500.8
1984	Ene		0.0	4.5	-4.5	500.8	496.3
	Feb		0.0	4.3	-4.3	496.3	492.1
	Mar		0.7	4.3	-3.6	492.1	488.5
	Abr		0.0	4.7	-4.7	488.5	483.7
	May		0.0	4.7	-4.7	483.7	479.0
	Jun		0.0	4.9	-4.9	479.0	474.1
	Jul		0.4	4.9	-4.5	474.1	469.7
	Ago		0.1	4.9	-4.8	469.7	464.8
	Sep		0.3	5.0	-4.8	464.8	460.1
	Oct		0.0	5.1	-5.1	460.1	455.0
	Nov		0.0	5.0	-5.0	455.0	450.0
	Dic		0.0	4.7	-4.7	450.0	445.3
1985	Ene		0.7	5.1	-4.4	445.3	440.9
	Feb		0.0	4.8	-4.8	440.9	436.1
	Mar		0.2	4.6	-4.3	436.1	431.8
	Abr		2.1	4.9	-2.8	431.8	429.0
	May	676.8	0.0	4.9	-4.9	429.0	424.1
	Jun	676.8	1.7	5.1	-3.4	424.1	420.7
	Jul	679.8	8.2	4.8	3.4	420.7	424.1
	Ago		3.4	4.8	-1.5	424.1	422.6
	Sep		1.9	4.9	-3.0	422.6	419.7
	Oct		2.3	4.7	-2.4	419.7	417.3
	Nov		0.0	4.7	-4.7	417.3	412.6
	Dic	647.3	0.0	4.6	-4.6	412.6	408.0
1986	Ene	676.8	0.0	4.6	-4.6	408.0	403.4
	Feb		0.3	4.1	-3.8	403.4	399.6
	Mar		0.0	3.9	-3.9	399.6	395.7
	Abr		0.0	3.8	-3.8	395.7	391.9
	May		0.0	3.9	-3.9	391.9	388.0
	Jun	671.8	0.0	3.8	-3.8	388.0	384.2
	Jul		0.0	3.9	-3.9	384.2	380.3
	Ago		0.1	4.0	-3.9	380.3	376.4
	Sep		0.3	3.9	-3.6	376.4	372.8
	Oct	670.8	0.0	3.7	-3.7	372.8	369.1
	Nov	670.8	0.0	3.5	-3.5	369.1	365.6
	Dic	666.8	0.0	3.4	-3.4	365.6	362.2







Sistema Mina

En el sistema Mina no se tuvo completo el conjunto de datos para un período de tiempo común. Se contó con lluvia diaria y extracción para los años 82 a 86 pero los niveles estáticos son del período 96-97.

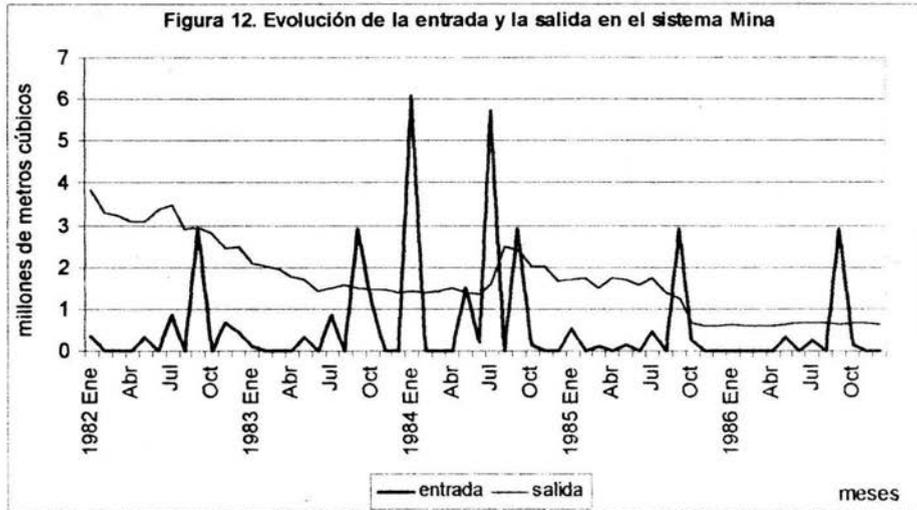
Se propuso obtener el volumen de recarga con los coeficientes de Knisel del sistema Monterrey ya que los niveles estáticos de los pozos eran de un período diferente; esto imposibilitó la obtención de una relación entre la elevación con el almacenamiento, como se hizo con los dos sistemas anteriores.

En seguida se muestran los valores de entrada y volumen estimados y la gráfica sobre la entrada y la salida.

Tabla 30. Recarga y volumen del sistema Mina estimados con valores: área del acuífero=150km²; coeficientes de Knisel a=76.44, b=1.3; y volumen inicial = 900x10⁶m³.

Año	mes	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
1982	Ene	0.4	3.9	-3.5	900.0	896.5
	Feb	0.0	3.3	-3.3	896.5	893.2
	Mar	0.0	3.2	-3.2	893.2	890.0
	Abr	0.0	3.1	-3.1	890.0	886.9
	May	0.3	3.1	-2.8	886.9	884.1
	Jun	0.0	3.4	-3.4	884.1	880.7
	Jul	0.8	3.5	-2.7	880.7	878.1
	Ago	0.0	2.9	-2.9	878.1	875.2
	Sep	2.9	3.0	0.0	875.2	875.1
	Oct	0.0	2.8	-2.8	875.1	872.4
	Nov	0.7	2.5	-1.8	872.4	870.6
	Dic	0.5	2.5	-2.0	870.6	868.6
1983	Ene	0.1	2.1	-2.0	868.6	866.6
	Feb	0.0	2.0	-2.0	866.6	864.6
	Mar	0.0	2.0	-2.0	864.6	862.6
	Abr	0.0	1.8	-1.8	862.6	860.8
	May	0.3	1.7	-1.4	860.8	859.4
	Jun	0.0	1.4	-1.4	859.4	858.0
	Jul	0.8	1.5	-0.7	858.0	857.4
	Ago	0.0	1.6	-1.6	857.4	855.8
	Sep	2.9	1.5	1.4	855.8	857.2
	Oct	1.1	1.5	-0.3	857.2	856.9
	Nov	0.0	1.5	-1.5	856.9	855.4
	Dic	0.0	1.4	-1.4	855.4	854.0
1984	Ene	6.1	1.4	4.7	854.0	858.7
	Feb	0.0	1.4	-1.4	858.7	857.3
	Mar	0.0	1.4	-1.4	857.3	855.9
	Abr	0.0	1.5	-1.5	855.9	854.4
	May	1.5	1.4	0.1	854.4	854.5

Año	mes	Recarga (E) /10 ⁶ m ³	Extracción (S) /10 ⁶ m ³	(E-S) /10 ⁶ m ³	Vi /10 ⁶ m ³	Vf /10 ⁶ m ³
	Jun	0.2	1.4	-1.1	854.5	853.3
	Jul	5.7	1.6	4.1	853.3	857.5
	Ago	0.0	2.5	-2.5	857.5	855.0
	Sep	2.9	2.4	0.5	855.0	855.5
	Oct	0.1	2.0	-1.9	855.5	853.6
	Nov	0.0	2.0	-2.0	853.6	851.6
	Dic	0.0	1.7	-1.7	851.6	849.9
1985	Ene	0.5	1.7	-1.2	849.9	848.8
	Feb	0.0	1.7	-1.7	848.8	847.0
	Mar	0.1	1.5	-1.4	847.0	845.7
	Abr	0.0	1.7	-1.7	845.7	843.9
	May	0.1	1.7	-1.6	843.9	842.4
	Jun	0.0	1.6	-1.6	842.4	840.8
	Jul	0.5	1.7	-1.3	840.8	839.5
	Ago	0.0	1.4	-1.4	839.5	838.1
	Sep	2.9	1.3	1.6	838.1	839.8
	Oct	0.3	0.7	-0.4	839.8	839.4
	Nov	0.0	0.6	-0.6	839.4	838.7
	Dic	0.0	0.6	-0.6	838.7	838.1
1986	Ene	0.0	0.6	-0.6	838.1	837.5
	Feb	0.0	0.6	-0.6	837.5	836.9
	Mar	0.0	0.6	-0.6	836.9	836.3
	Abr	0.0	0.6	-0.6	836.3	835.7
	May	0.3	0.6	-0.3	835.7	835.4
	Jun	0.0	0.7	-0.7	835.4	834.7
	Jul	0.3	0.7	-0.4	834.7	834.3
	Ago	0.0	0.7	-0.7	834.3	833.6
	Sep	2.9	0.6	2.3	833.6	835.9
	Oct	0.1	0.7	-0.5	835.9	835.4
	Nov	0.0	0.7	-0.7	835.4	834.7
	Dic	0.0	0.6	-0.6	834.7	834.1



Sistema Santiago

No fue posible determinar una curva de elevaciones-capacidades porque no se contó con datos de nivel estático. Tampoco se pudo estimar los volúmenes de almacenamiento, ya que para poderlo hacer se requiere realizar ajustes en los coeficientes de Knisel hasta lograr que sean de aspecto similar las gráficas de volumen y de evolución del nivel de agua.

5. Modelo de manejo conjunto de fuentes superficiales y subterráneas y pruebas con diversas políticas de operación

Este capítulo está dividido en tres partes. En la primera se presentan los datos fundamentales de presas y acuíferos, un examen de la capacidad de los sistemas en forma individual y en conjunto a partir de información acerca del ingreso de agua y un análisis de los ingresos y salidas en los sistemas durante el periodo 1982-1986. En la segunda se describe un modelo de combinación de variables, basado en la programación dinámica, que permite estimar mes con mes una alternativa de extracción de agua tanto de las fuentes superficiales como de las subterráneas con cierta flexibilidad para poder adaptarlo de acuerdo con la experiencia de los que pudieran manejar las políticas de extracción y se muestra una panorámica de la situación del manejo actual en la ZMM. Y en la tercera se presentan y examinan corridas con el programa para mostrar su uso en un escenario de nivel de agua inicial en las fuentes.

Datos fundamentales de presas y acuíferos

Con los datos que se presentan en la sección de las fuentes acerca tanto de las capacidades de almacenamiento mínima y máxima de las presas como de volúmenes de extracción de los acuíferos, se puede calcular la capacidad mínima y máxima para dos conjuntos de fuentes, a saber una conformada por presas y otra por acuíferos.

Tabla 31. Capacidades de almacenamiento y conducción en presas y acuíferos (el almacenamiento en acuíferos fue estimado en este trabajo).

	Capacidad Mínima 10^6m^3	Capacidad Máxima 10^6m^3	Capacidad máxima de conducción ^{1,2}	
			m^3/s	$10^6\text{m}^3/\text{mes}$
Presas	126.0	1,465.5	12.8	33.2
Cerro Prieto	25.0	300.0	6.0	15.6
La Boca	1.0	42.5	1.8	4.7
El Cuchillo	100.0	1,123.0	5.0	13.0
Acuíferos	2,094.9	2,713.4	7.6	19.6
Mina	842.4	896.6	1.9	4.9
Santa Catarina	362.2	893.4	3.6	9.3
Monterrey	890.3	923.4	2.1	5.5

¹En los casos en que existen varias fuentes, se tomó la mínima: en la Presa El Cuchillo se tomó la capacidad del acueducto a Monterrey aunque hay también otros dos acueductos: el China-Los Aldamas-Arcabuz ($0.22\text{m}^3/\text{s}$) y otro al distrito de riego 031 ($40\text{m}^3/\text{s}$).

²En el sistema Monterrey la conducción de los manantiales tiene una capacidad de $0.224\text{m}^3/\text{s}$; la de los pozos someros, $0.914\text{m}^3/\text{s}$; y la de los pozos profundos, $0.957\text{m}^3/\text{s}$; lo cual totaliza $2.115\text{m}^3/\text{s}$.

Como una referencia de comparación, se presenta en seguida los valores de conducción y almacenamiento máximos que se calcularon a partir del análisis conjunto de los volúmenes de entrada acumulados.

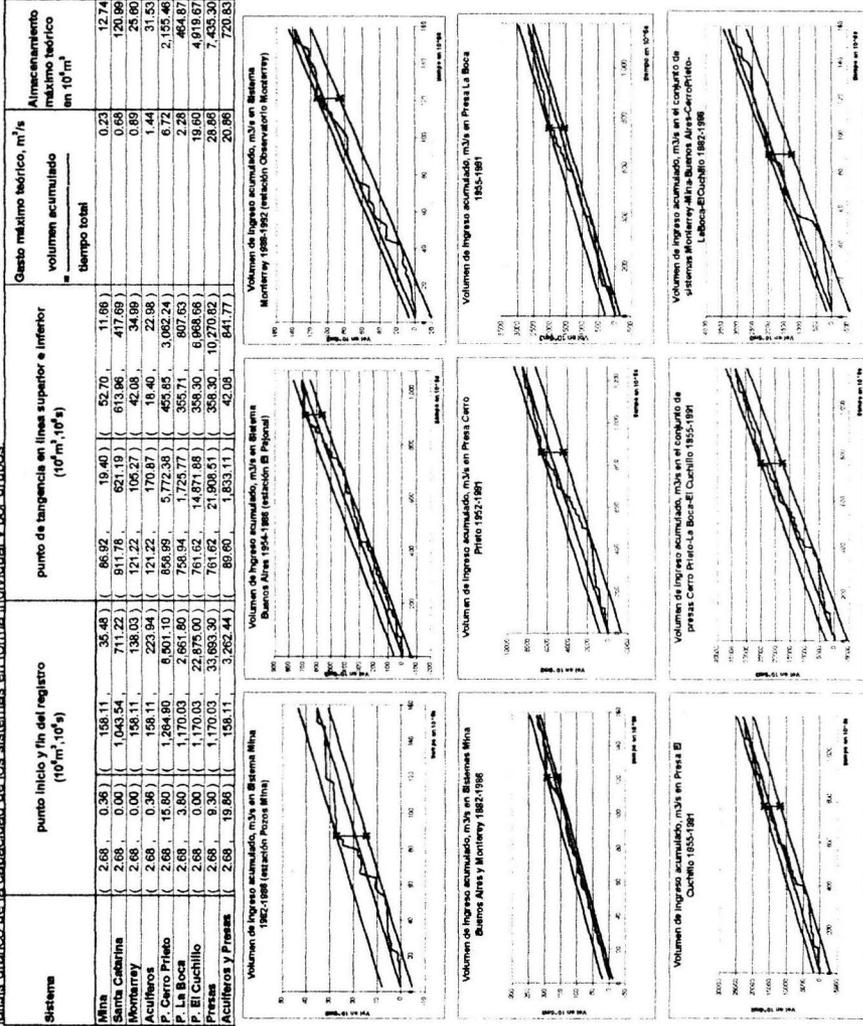
Análisis de la capacidad de los sistemas

Se hizo un análisis gráfico (ver la siguiente figura) de los ingresos a lo largo del tiempo en cada uno de los acuíferos y luego en el conjunto de todos; y asimismo, de las presas en forma individual y agrupadas; y posteriormente, de todas estas fuentes juntas para determinar en forma teórica su capacidad de satisfacer la demanda. En particular, se calcularon dos conceptos: el gasto máximo de ingreso y el almacenamiento teórico que podría ser contenido para su aprovechamiento. Estos dos conceptos se pudieron obtener mediante un análisis de la gráfica del ingreso mensual acumulado a través de los años de registro disponible (ver las siguientes tablas y gráficas). El cociente del volumen acumulado total entre el tiempo es el gasto máximo; mientras que el almacenamiento máximo teórico es el volumen delimitado por las rectas paralelas a la línea del gasto máximo y tangentes a los límites de la curva de ingreso acumulado.

Comparando los valores teóricos del análisis gráfico con el cuadro anterior de valores reales en las presas y calculados para los acuíferos, se observa lo siguiente.

El gasto de ingreso en las presas y acuíferos podría ser conducido durante la extracción de las diferentes fuentes porque, en general es menor que la capacidad de conducción instalada (sólo ligeramente mayor en la presa Cerro Prieto). En cuanto al almacenamiento, al parecer es menor la capacidad de cada presa que el volumen que se podría almacenar; pero en los acuíferos quizás sea al revés, porque según el análisis se puede contener más agua (o se ha extraído más) que la que ingresó.

Figura 13. Análisis gráfico de la capacidad de los sistemas en forma individual y por grupos.



Análisis de ingresos y salidas en los sistemas de abastecimiento durante 1982-1986

Con la intención de mostrar la coherencia de la información que fue utilizada en el ejemplo del programa, se desarrolló el siguiente análisis sobre las entradas y salidas de agua en los sistemas de abastecimiento de agua a la ZMM durante el período 1982-1986. Este lapso de tiempo se eligió por contar con datos suficientes de registros ya sean históricos o calculados. Hubo que tomar en consideración las fechas en que las presas comenzaron a operar; y en efecto, la presa más antigua de la región, La Boca, funciona desde 1957; la presa Cerro Prieto entró en operación en 1984; mientras que la presa El Cuchillo no comenzó a ser utilizada sino a partir de 1993.

Se procuró tener datos mensuales de volúmenes de ingreso (ver tabla 32) desde ríos a las presas y desde lluvia a los acuíferos; de pérdidas (ver tablas 33 y 34) por evaporación o derrame en presas; y de extracción (ver tablas 35 y 36) hacia la ZMM y hacia zonas agrícolas. Con ello se puede calcular el cambio de volumen (ver tablas 37 y 38) por mes y por año mediante la sustracción de las pérdidas y extracciones, a partir de los ingresos; es decir,

$$\Delta V = I - E - D - S_z - S_A$$

donde:

- ΔV Cambio de volumen
- I Ingresos
- E Pérdidas por evaporación
- D Derrames en presas
- S_z Salidas hacia ZMM
- S_A Salidas hacia usuarios agrícolas

Los resultados déficit o superávit (mensuales o anuales) obtenidos, representan volúmenes tomados de, o agregados a los sistemas de abastecimiento y almacenamiento de la ZMM; de tal modo que a nivel mensual o anual esos volúmenes calculados deberían ser de tal magnitud que pudieran ser soportados en los embalses o acuíferos. Es decir que si el resultado anual es un déficit, éste debería poder ser aportado por el almacenamiento del año previo en los sistemas; pero si el resultado es un superávit, esos sistemas deberían tener capacidad de contenerlo para usarlo en un período futuro.

En el caso de ingreso en las presas, se contó con la información de SADM a través del estudio de la empresa COINPRO. Los valores de ingreso en los sistemas de acuíferos fueron obtenidos con el método Knisel en este trabajo con excepción del sistema Santiago y los pozos del sistema Linares-Monterrey. Para estos dos últimos sistemas, por la carencia de información básica necesaria según el método, se decidió considerar como entrada a los valores de salidas. Ambos sistemas son mixtos por estar constituidos de una presa y acuíferos, y las salidas reportadas por la empresa COINPRO (con información de SADM) se refieren a cada sistema completo por lo que fue necesario separar lo referente al agua superficial y a la subterránea. Así, en el sistema Santiago, se consideraron los caudales medios de extracción de sus componentes subterráneos (sin considerar los de la presa La Boca). Por su lado, en el sistema Linares-Monterrey, de acuerdo con COINPRO y SADM, los pozos sólo se utilizaron entre agosto de 1982 y el 18 de julio de 1984, coincidiendo esta última fecha con el comienzo de la operación de la presa Cerro Prieto y los pozos no fueron utilizados más. Para un trabajo posterior, sería necesario contar con los valores necesarios (área de recarga y niveles estáticos) que permitan estimar la entrada específica de cada uno de estos dos sistemas.

En cuanto a las extracciones de agua para abastecer a la ZMM, se tienen datos mensuales por cada sistema también de SADM reportados en el mismo estudio de COINPRO. Acerca de las extracciones destinadas al suministro agrícola, y a falta de datos mensuales o anuales en el período, se contó con el valor registrado en los títulos de usuarios con el máximo volumen que se puede disponer al año para ser distribuido conforme con el número de ciclos de cultivo. En el análisis, a nivel mensual no se consideró la demanda agrícola; sino que se incorporó como un componente a nivel anual.

Para calcular las pérdidas que se tienen por evaporación, se contó con los registros de CNA acerca de volumen almacenado mensual en cada presa, y las láminas de evaporación neta. El área de espejo de agua expuesta a la evaporación se infirió, por interpolación, de las tablas de elevaciones-capacidades-áreas a partir de los registros de volumen mensual. El volumen de evaporación se calculó como el producto de la lámina de evaporación neta por el área expuesta correspondientes a cada embalse. Y, en cuanto a los derrames, se contó con el registro histórico de CNA para la presa La Boca, pero no se pudo disponer del correspondiente a la presa Cerro Prieto.

Tabla 32. Ingresos mensuales en 10⁶ m³/s durante el período 1982 - 1986 de las presas Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo; y los acuíferos de los sistemas Mina, Santa Catarina, Linares-Monterrey, Santiago y Monterrey

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1982 Presa Cerro Prieto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Presa La Boca	1.5	2.8	0.0	1.8	1.8	0.8	3.7	0.7	8.1	4.5	1.8	1.9	29.4	2.5
Presa El Cuchillo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Subtotal Presas	1.5	2.8	0.0	1.8	1.8	0.8	3.7	0.7	8.1	4.5	1.8	1.9	29.4	2.5
Sistema Mina	0.4	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.8	0.0	2.9	0.0	0.7	0.5	5.6	0.5
Sistema Sta. Catarina	0.0	0.3	0.0	3.3	1.8	0.0	3.4	2.0	10.9	0.8	1.3	0.0	23.9	2.0
pozos Sist. Linares-Mty	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.4	0.1	0.0	1.0	0.1
acuíf. Sist. Santiago	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	37.0	3.1
Sistema Monterrey	0.0	0.0	0.7	1.8	1.4	0.1	0.0	1.7	2.1	2.8	0.2	3.5	14.3	1.2
Subtotal Acuíferos	3.4	3.4	3.8	8.2	6.6	3.2	7.3	7.0	19.2	7.0	5.4	7.1	81.7	6.8
Total	4.9	6.2	3.8	10.0	8.4	4.0	11.0	7.7	27.3	11.5	7.2	9.0	111.1	9.3
1983 Presa Cerro Prieto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Presa La Boca	1.7	1.5	0.9	1.3	7.8	2.8	4.2	9.9	31.8	18.6	3.4	2.1	86.0	7.2
Presa El Cuchillo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Subtotal Presas	1.7	1.5	0.9	1.3	7.8	2.8	4.2	9.9	31.8	18.6	3.4	2.1	86.0	7.2
Sistema Mina	0.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.8	0.0	2.9	1.1	0.0	0.0	5.3	0.4
Sistema Sta. Catarina	0.8	2.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	4.0	0.3
pozos Sist. Linares-Mty	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.1
acuíf. Sist. Santiago	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	39.8	3.3
Sistema Monterrey	0.0	0.0	0.7	1.4	16.1	0.0	0.2	1.4	8.0	5.6	0.0	0.0	33.3	2.8
Subtotal Acuíferos	4.2	5.7	4.9	4.7	19.9	3.6	4.6	5.0	14.7	10.1	3.3	3.3	83.9	7.0
Total	5.9	7.2	5.8	6.0	27.7	6.4	8.8	14.9	46.5	28.7	6.7	5.4	169.9	14.2
1984 Presa Cerro Prieto	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.1	4.2	52.9	29.5	12.8	10.3	113.8	19.0
Presa La Boca	4.6	3.5	0.4	3.6	5.8	1.8	3.0	6.4	14.7	7.7	3.5	1.6	56.6	4.7
Presa El Cuchillo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Subtotal Presas	4.6	3.5	0.4	3.6	5.8	1.8	7.1	10.6	67.6	37.2	16.3	11.9	170.4	23.7
Sistema Mina	6.1	0.0	0.0	0.0	1.5	0.2	5.7	0.0	2.9	0.1	0.0	0.0	16.6	1.4
Sistema Sta. Catarina	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	1.5	0.1
pozos Sist. Linares-Mty	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
acuíf. Sist. Santiago	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	41.4	3.4
Sistema Monterrey	4.7	0.0	0.0	1.4	13.2	0.9	3.2	1.4	1.6	2.8	0.1	0.5	29.8	2.5
Subtotal Acuíferos	14.2	3.4	4.2	4.8	18.2	4.6	12.8	4.9	8.3	6.4	3.5	4.0	89.3	7.4
Total	18.8	6.9	4.6	8.4	24.0	6.4	19.9	15.5	75.9	43.6	19.8	15.9	259.7	31.1

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1985 Presa Cerro Prieto	8.3	5.3	2.4	6.3	4.8	7.5	7.4	9.0	24.5	6.1	3.0	3.2	87.8	7.3
Presa La Boca	1.7	1.4	2.2	2.2	2.4	2.6	2.0	2.9	4.2	4.3	2.6	2.2	30.7	2.6
Presa El Cuchillo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Subtotal Presas	10.0	6.7	4.6	8.5	7.2	10.1	9.4	11.9	28.7	10.4	5.6	5.4	118.5	9.9
Sistema Mina	0.5	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.5	0.0	2.9	0.3	0.0	0.0	4.4	0.4
Sistema Sta. Catarina	0.7	0.0	0.2	2.1	0.0	1.7	8.2	3.4	1.9	2.3	0.0	0.0	20.4	1.7
pozos Sist. Linares-Mty	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
acuíf. Sist. Santiago	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	41.4	3.4
Sistema Monterrey	0.3	0.2	4.4	3.6	4.2	5.3	0.4	9.0	0.4	7.0	1.0	0.0	35.9	3.0
Subtotal Acuíferos	4.9	3.7	8.2	9.1	7.8	10.4	12.5	15.8	8.7	13.0	4.5	3.4	102.0	8.5
Total	14.9	10.4	12.8	17.6	15.0	20.5	21.9	27.7	37.4	23.4	10.1	8.8	220.5	18.4
1986 Presa Cerro Prieto	2.5	0.8	0.5	0.8	10.5	51.6	8.8	4.6	48.6	14.4	12.6	12.3	168.0	14.0
Presa La Boca	2.1	1.7	1.7	1.6	6.7	4.2	1.9	16.6	7.5	4.1	6.3	6.8	61.2	5.1
Presa El Cuchillo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Subtotal Presas	4.6	2.5	2.2	2.4	17.2	55.8	10.7	21.2	56.1	18.5	18.9	19.1	229.2	19.1
Sistema Mina	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	2.9	0.1	0.0	0.0	3.6	0.3
Sistema Sta. Catarina	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.7	0.1
pozos Sist. Linares-Mty	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
acuíf. Sist. Santiago	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	41.4	3.4
Sistema Monterrey	0.0	0.0	0.0	1.4	4.0	3.8	0.0	1.1	8.9	4.9	0.1	0.5	24.7	2.1
Subtotal Acuíferos	3.4	3.8	3.4	4.8	7.8	7.3	3.7	4.6	15.6	8.5	3.5	4.0	70.5	5.9
Total	8.0	6.3	5.6	7.2	25.0	63.1	14.4	25.8	71.7	27.0	22.4	23.1	299.7	25.0

Tabla 33. Evaporación en 10^6 m³ durante el período 1982-1986 en las presas de abastecimiento a la ZMM. Estimación con los registros de lámina de evaporación neta sobre las áreas expuestas. Las áreas se obtuvieron de los registros de los registros de volumen almacenado en las presas interpolando en las curvas Elevaciones-capacidades-áreas.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1982 Cerro Prieto														
La Boca	0.36	0.23	0.37	0.01	-0.07	0.56	0.62	0.59	-0.28	-0.58	0.16	0.00	1.98	0.16
El Cuchillo														
Total	0.36	0.23	0.37	0.01	-0.07	0.56	0.62	0.59	-0.28	-0.58	0.16	0.00	1.98	0.16
1983 Cerro Prieto														
La Boca	-0.14	-0.16	-0.12	0.00	-0.65	-0.04	-0.70	-0.61	-2.06	-0.45	-0.01	-0.03	-4.99	-0.42
El Cuchillo														
Total	-0.14	-0.16	-0.12	0.00	-0.65	-0.04	-0.70	-0.61	-2.06	-0.45	-0.01	-0.03	-4.99	-0.42
1984 Cerro Prieto														
La Boca	-0.51	0.29	0.53	0.66	-0.69	0.38	-0.24	0.42	-0.58	0.15	0.08	0.10	0.60	0.05
El Cuchillo														
Total	-0.51	0.29	0.53	0.66	-0.69	0.38	0.83	2.00	-2.73	1.72	1.57	1.29	5.35	0.84
1985 Cerro Prieto														
La Boca	0.26	0.60	2.36	-2.01	0.28	0.30	3.20	2.88	1.52	1.17	1.57	-0.12	12.02	1.00
El Cuchillo	0.01	0.13	0.36	-0.05	0.15	0.29	0.58	0.50	-0.10	-0.18	0.15	0.12	1.97	0.16
Total	0.27	0.74	2.72	-2.06	0.42	0.60	3.78	3.38	1.42	0.98	1.73	0.00	13.99	1.17
1986 Cerro Prieto														
La Boca	1.25	0.74	1.49	0.98	0.35	-0.62	2.57	1.34	1.05	0.15	1.20	0.09	10.59	0.88
El Cuchillo	0.18	0.20	0.29	0.20	0.14	0.06	0.41	0.16	-0.62	-0.21	-0.05	-0.15	0.62	0.05
Total	1.43	0.95	1.78	1.17	0.49	-0.56	2.98	1.50	0.43	-0.06	1.15	-0.06	11.21	0.93

Tabla 34. Derrames* en 10⁶ m³/s durante el período 1982 - 1986 de la presa La Boca

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1982	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
1983	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8	2	3.80	0.32
1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
1985	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
1986	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00

*No se contó con registro de derrames en la presa Cerro Prieto

Tabla 35. Producción en 10⁶ m³/s durante el período 1982 - 1986 de las fuentes de abastecimiento de la ZMM, sin dotación para uso agrícola

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1982 Mina	3.85	3.32	3.22	3.09	3.08	3.38	3.50	2.90	2.95	2.79	2.46	2.47	37.01	3.08
Sta. Catarina	5.55	4.53	6.04	5.90	5.60	5.42	6.04	5.11	5.01	4.96	4.80	4.66	63.62	5.30
Linares-Monterrey	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.26	0.39	0.12	0.00	0.96	0.08
Santiago	6.35	6.09	6.14	6.94	7.06	6.90	6.38	6.46	6.82	6.11	5.25	5.04	75.54	6.30
Monterrey	2.26	2.06	2.36	2.09	2.45	2.16	1.97	2.02	1.95	2.08	2.01	2.08	25.49	2.12
El Cuchillo	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	0.00
Total	18.01	16.00	17.76	18.02	18.19	17.86	17.89	16.68	16.99	16.33	14.64	14.25	202.62	16.89
1983 Mina	2.10	2.01	1.97	1.78	1.71	1.43	1.49	1.56	1.50	1.48	1.47	1.39	19.87	1.66
Sta. Catarina	4.59	4.75	4.76	5.11	5.02	5.11	5.02	4.94	4.62	4.60	4.65	4.73	57.90	4.83
Linares-Monterrey	0.00	0.22	0.10	0.04	0.13	0.24	0.24	0.27	0.25	0.00	0.00	0.00	1.49	0.12
Santiago	4.31	3.97	3.83	3.72	4.04	5.40	6.43	6.61	8.28	8.79	7.79	6.80	69.97	5.83
Monterrey	2.00	1.83	1.78	2.02	1.99	3.33	3.42	3.91	3.08	2.95	3.04	3.23	32.58	2.72
El Cuchillo	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	0.00
Total	13.00	12.78	12.44	12.67	12.89	15.51	16.60	17.29	17.73	17.80	16.95	16.15	181.81	15.15
1984 Mina	1.43	1.39	1.41	1.49	1.40	1.36	1.61	2.47	2.40	2.01	2.01	1.68	20.66	1.72
Sta. Catarina	4.54	4.25	4.32	4.74	4.74	4.88	4.85	4.90	5.04	5.05	5.03	4.72	57.08	4.76
Linares-Monterrey	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	1.02	3.45	2.90	3.10	3.54	3.76	17.86	1.49
Santiago	6.63	6.52	6.32	7.48	7.55	7.74	7.45	7.79	8.06	7.06	6.05	6.54	85.19	7.10
Monterrey	3.45	3.71	3.28	3.49	3.30	3.30	3.16	2.99	3.15	3.11	3.18	3.11	39.23	3.27
El Cuchillo	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	0.00
Total	16.05	15.87	15.33	17.20	17.00	17.36	18.09	21.60	21.55	20.33	19.81	19.81	220.00	18.33
1985 Mina	1.69	1.73	1.49	1.74	1.71	1.55	1.73	1.38	1.26	0.69	0.62	0.61	16.20	1.35
Sta. Catarina	5.05	4.80	4.55	4.87	4.88	5.07	4.75	4.83	4.92	4.69	4.68	4.56	57.65	4.80
Linares-Monterrey	3.46	3.68	3.86	4.28	4.87	5.23	5.32	6.06	6.77	7.65	7.50	7.21	65.89	5.49
Santiago	6.36	6.76	6.31	6.53	6.70	7.13	7.77	7.72	7.47	6.88	6.10	5.11	80.84	6.74
Monterrey	2.87	2.79	3.02	3.06	2.92	2.71	2.70	2.81	2.77	2.80	2.61	2.56	33.62	2.80
El Cuchillo	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	0.00
Total	19.43	19.76	19.23	20.48	21.08	21.69	22.27	22.80	23.19	22.71	21.51	20.05	254.20	21.18
1986 Mina	0.63	0.59	0.61	0.60	0.64	0.66	0.67	0.66	0.63	0.68	0.66	0.64	7.67	0.64
Sta. Catarina	4.58	4.12	3.92	3.81	3.89	3.82	3.88	4.01	3.86	3.68	3.52	3.42	46.51	3.88
Linares-Monterrey	7.27	6.59	6.24	6.18	6.05	5.92	6.34	7.02	5.74	5.34	5.33	5.36	73.38	6.12
Santiago	4.49	4.21	3.90	3.73	3.70	4.51	4.66	5.11	7.46	7.33	7.03	6.90	63.03	5.25
Monterrey	2.32	2.24	2.02	1.81	1.70	1.73	1.75	1.80	1.55	1.39	1.36	1.67	21.34	1.78
El Cuchillo	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	0.00
Total	19.29	17.75	16.69	16.13	15.98	16.64	17.30	18.60	19.24	18.42	17.90	17.99	211.93	17.66

Tabla 36. Estimación de la producción máxima anual en $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el período 1982 – 1986 hacia usuarios agrícolas abastecidos por los sistemas de agua de la ZMM.

1982	9.4
1983	9.4
1984	9.4
1985	9.4
1986	9.4

Tabla 37. Cálculo del cambio de volumen en $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el período 1982 – 1986, sin salida hacia usuarios agrícolas

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL	PROM
1982	-13.43	-10.01	-14.34	-8.04	-9.71	-14.39	-7.51	-9.58	10.61	-4.20	-7.62	-5.29	-93.52	-7.79
1983	-6.97	-5.46	-6.55	-6.66	15.46	-9.11	-7.11	-1.75	30.85	11.30	-12.02	-12.70	-10.72	-0.89
1984	3.30	-9.21	-11.27	-9.45	7.68	-11.30	0.95	-8.10	57.05	21.53	-1.54	-5.22	34.40	2.87
1985	-4.80	-10.10	-9.16	-0.80	-6.54	-1.78	-4.13	1.52	12.81	-0.31	-13.16	-11.20	-47.65	-3.97
1986	-12.67	-12.41	-12.82	-10.10	8.53	47.02	-5.88	5.68	51.99	8.64	3.39	5.14	76.52	6.38

Tabla 38. Cálculo del cambio de volumen en $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el período 1982 – 1986 incluyendo salida hacia usuarios agrícolas

1982	-102.92
1983	-20.12
1984	25.00
1985	-57.05
1986	67.12

La disminución en volumen que debió ocurrir en los sistemas entre 1982 y 1983 según los valores anuales de las dos últimas tablas no alcanza al año siguiente en que comienza la operación del nuevo embalse Cerro Prieto en el que la ZMM deposita la confianza para el alivio de la escasez en el abasto. El área, como se manifiesta en los resultados de ingresos anual y promedio totales (tabla 32) a lo largo del período, tiene entradas variables que la condujeron de nuevo a presentar déficit en 1985 y posteriormente una franca recuperación en el año final del análisis.

Método de distribución de recursos mediante programación dinámica

Se requieren obtener ciertos datos de las fuentes de agua en Monterrey para luego hacer una distribución de los volúmenes que cada una podría suministrar en diversos tiempos. Los datos en los diversos acuíferos y presas se calcularon mediante la aplicación de una ecuación de balance, en la que el componente de recarga a los acuíferos se calculó con el método de Knisel. Y la distribución de volúmenes se procesó mediante un modelo de programación dinámica realizado en el paquete de cómputo Excel. La Programación Dinámica es una herramienta útil para resolver procesos de distribución de recursos.

Dotación de Agua Vista Como un Caso de los Procesos de Distribución

La principal cuestión en los procesos de distribución consiste en usar recursos de varios tipos en maneras eficientes. En lenguaje matemático, consiste en hacer los cálculos para determinar el máximo de la función de N variables

$$R(x_1, x_2, \dots, x_N) = g(x_1) + g(x_2) + \dots + g(x_N) \quad (1)$$

Definida en la región de valores determinada por las siguientes relaciones

$$x_1 + x_2 + \dots + x_N = X, \quad (2)$$

$$x \geq 0. \quad (3)$$

Un proceso de distribución puede describirse como sigue. Una cierta cantidad de un *recurso* (dinero, empleados, combustible, agua para agricultura o para generar energía eléctrica, etc.) puede ser utilizado de varias formas, es decir en varias *actividades*. En cada actividad, el uso de una parte o de todo el recurso produce un *resultado* (ganancias, velocidad de un vehículo, mercancía, ...).

La utilidad total del proceso de distribución se obtiene con sumar los resultados de las actividades individuales. Cabe hacer mención que el resultado en cualquier actividad es independiente de la distribución en las otras actividades.

El problema fundamental consiste en dividir los recursos de manera tal que se maximice el resultado total.

Para el caso del presente trabajo se consideró que la provisión de agua hacia la ciudad de Monterrey a partir de varias fuentes con cantidades de líquido por determinar podría manejarse como un proceso de distribución donde el recurso (agua para la ciudad de Monterrey durante un tiempo determinado) no ha de ser repartido en varias actividades sino que, al revés, las actividades consisten en dotar a la ciudad de cierta cantidad de agua de un acuífero o presa y cuyo resultado será el beneficio buscado por lograr un acopio de agua racional en cada fuente.

Beneficio por alcanzar

El resultado o beneficio que se pretende lograr con la partición racional del agua en las diferentes fuentes para aportar la cantidad requerida en un tiempo determinado y dependiendo de cuál mes del ciclo de lluvia-no lluvia se está trabajando, se calcula teniendo en consideración varios aspectos que se tratarán de explicar en seguida.

En cada fuente se tiene un volumen disponible inicial al que se le restará la cantidad por calcular y que será extraída durante un tiempo en el que también la fuente tendrá aportes de agua por lluvia o por los ríos (por infiltración, si es un acuífero). Sin embargo, el aporte por llover no será conocido como dato histórico sino que tendría que ser estimado mediante predicción.

En adición, para tener un mínimo desperdicio por derrames en las fuentes, la cantidad por calcular deberá estar en función de qué tan próximo está el nivel actual del agua en la fuente del nivel de derrame. Pero quizás no bastaría una simple y mecánica comparación de cercanía o proximidad entre niveles sino que sería esencial permitir que alguien con experiencia u "ojo clínico" en el manejo de almacenamientos pudiera tener cierto control en los cálculos. Específicamente, si se mostraran al calculista con experiencia las gráficas de la evolución de niveles en las fuentes de Monterrey en las que se apreciara la línea de nivel de derrame y dependiendo de cuántos meses lluviosos o no faltan por transcurrir en el futuro próximo, el calculista podría tener acceso a una especie de control que le permitiera variar el peso individual a cada fuente para el cómputo de las dotaciones de agua del siguiente cálculo.

También sería conveniente que se mandara un aviso periódico al calculista de actualizar o verificar los datos de las curvas de elevaciones – almacenamientos de las fuentes utilizadas para conocer el volumen disponible antes de calcular el agua que se extraerá para enviarla rumbo a Monterrey.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se debería construir por cada fuente su función de resultado dependiente de la cantidad de agua a ser extraída.

Derivación matemática

En seguida se transformará la expresión (1) en otra equivalente que resultará más adecuada.

Se establecerá que la distribución del recurso se hará mediante una actividad a la vez lo cual permitirá asignar al proceso una característica dinámica porque habrá cierto orden temporal en la asignación del recurso.

Por simple simbología, y para dejar explícito que la función en (1) depende tanto de N como de x, se define:

$$f_N(x) = \max_{(x_i)} R(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (4)$$

Dos casos particulares:

$$f_N(0) = 0, N = 1, 2, \dots \quad (5)$$

bajo la condición de que $g_i(0) = 0$, y

$$f_1(x) = g_1(x) \quad (6)$$

Si se toma parte x_N del recurso x para la actividad N (en este trabajo significa que ya sea un acuífero o cierta presa a la que se asigne el número N proporciona la primera cantidad x_N para Monterrey), entonces: i) el remanente del recurso $x - x_N$ será empleado para obtener el máximo beneficio a partir de las (N - 1) actividades restantes (que es $f_{N-1}(x - x_N)$, por definición); y ii) el beneficio para esta actividad N es $g_N(x_N)$. Así, la óptima elección de x_N y el máximo de la función en (1) quedan representados ahora por la siguiente expresión que relaciona la porción de

recurso asignado a una actividad con la porción remanente a ser distribuida de la mejor manera en las restantes actividades.

$$f_N(x) = \max_{0 \leq x_N \leq x} [g_N(x_N) + f_{N-1}(x - x_N)] \quad (7)$$

para $N = 2, 3, \dots$; $x \geq 0$; y $f_1(x) = g_1(x)$

Esquema para cómputo

La relación (7) es el método teórico para conocer $f_2(x)$ a partir de $f_1(x)$, y con ello calcular luego $f_3(x)$ y así hasta $f_N(x)$. Sin embargo, para el cómputo, conviene reemplazar el problema con la variable continua x_i (cantidad de recurso correspondiente al acuífero o presa i) por un problema en el que la variable sólo pueda tomar valores discretos:

$$X_i = 0, \Delta, 2\Delta, \dots, R\Delta = x \quad (8)$$

Los valores de $f_1(x)$ pueden almacenarse en la memoria de la computadora, ya que todo valor $g_i(x)$ puede calcularse, y para $i = 1$ se utiliza la relación (6).

Es pertinente resaltar que la cantidad x de agua que requiere la ciudad de Monterrey no es la misma necesariamente mes con mes y con mayor razón, no se requiere el mismo abasto x en la temporada de lluvias que en la temporada en la que la temperatura ambiental es más alta y no cae agua de la atmósfera.

De acuerdo con el método propuesto por Kauffman para distribución de un recurso central (adaptado en el trabajo presente para concentración de recursos), el esquema de cálculo basado en la ecuación (7) se implementa en dos fases. La primera fase es de cálculo comparativo de valores obtenidos con las funciones f_1, f_2, f_3, \dots cuyos valores máximos se conservan en una tabla. En la segunda fase se seleccionan de la tabla los valores que según los datos propios del problema de estudio constituyen el resultado de la distribución de recurso (o de la proporción de recursos a concentrar).

Primera fase. Tanto la variable x_N como x toman valores discretos como en (8) que se eligen con algún incremento Δ conveniente de modo de obtener las sucesiones

$$\text{para } x: 0, \Delta, 2\Delta, \dots, x_{\text{máx}} \quad (9)$$

$$\text{para } x_N: 0, \Delta, 2\Delta, \dots, x \quad (10)$$

Por cada valor de x se evalúa la función f_1 en toda la sucesión de x_N hasta obtener el valor máximo y se almacena en una tabla junto con el valor x_N con el que se logró el máximo. Luego, en forma similar y con la ecuación (7) se procede para f_2 y posteriormente para f_3 , etc. Al final se tiene la tabla siguiente de valores máximos correspondientes a toda la sucesión desde $x = 0$ hasta $x_{\text{máx}}$ ($x_{\text{máx}}$ en un problema de asignación de agua sería la demanda):

Tabla 39. Registro de valores máximos para tres actividades.

x	$f_1(x)$	$x_1(x)$	$f_2(x)$	$x_2(x)$	$f_3(x)$	$x_3(x)$
0	—	—	—	—	—	—
Δ	—	—	—	—	—	—
2Δ	—	—	—	—	—	—
•						
•						
•						
$R \Delta = x_{\max}$	—	—	—	—	—	—

En las columnas $x_i(x)$ se almacena el valor donde se tuvo el máximo de f_i para cada x .

Segunda fase. El aspecto más peculiar de esta fase es que procede en orden inverso al de la fase anterior, comenzando desde la última actividad hasta la primera. De la tabla obtenida se busca para x_{\max} el valor $x_3(x)$ con el que se logró el máximo beneficio $f_3(x)$. En seguida, el recurso restante $x_{\max} - x_3(x)$ se busca en la columna x para leer el valor $x_2(x)$ correspondiente al máximo beneficio $f_2(x)$. Y así hasta la primera actividad. Esto completa el análisis para el problema de un particular valor de recurso x y un cierto número de actividades N .

ESTA TESIS NO SALI
DE LA BIBLIOTECA

Programa de extracciones

Se tiene una tabla que representa un año dividido en meses.

Figura 14. Detalle esquemático de la tabla para el programa de extracciones.

	ene		feb			oct		nov		dic	
Año 1	V_a, V_p	$(e_a, e_p)_1$ $(e_a, e_p)_2$ $(e_a, e_p)_3$ $(e_a, e_p)_n$	V_a, V_p	$(e_a, e_p)_1$ $(e_a, e_p)_2$ $(e_a, e_p)_3$ $(e_a, e_p)_n$...	V_a, V_p	$(e_a, e_p)_1$ $(e_a, e_p)_2$ $(e_a, e_p)_3$ $(e_a, e_p)_n$	V_a, V_p	$(e_a, e_p)_1$ $(e_a, e_p)_2$ $(e_a, e_p)_3$ $(e_a, e_p)_n$	V_a, V_p	$(e_a, e_p)_1$ $(e_a, e_p)_2$ $(e_a, e_p)_3$ $(e_a, e_p)_n$

Que representa lo siguiente:

Volumen acuíferos,	Volumen presas	Extracción acuíferos,	Extracción presas
(N diferentes combinaciones por analizar. En cada combinación, la suma de extracciones iguala la demanda necesaria.)			

En la figura anterior, cada mes tiene dos zonas; en la izquierda se anota el volumen inicial que se tenga en los dos grupos de fuentes (subterráneas y superficiales) y en la derecha se escribirá las combinaciones de extracciones que pueden llevarse a cabo en ambas fuentes y cuya suma iguale a la demanda requerida por la ciudad de Monterrey. De la elección de extracciones en acuíferos y presas que se realice, dependerá en parte el volumen que existirá en las fuentes en el siguiente periodo. Pero, por otra parte, ese volumen también dependerá del ingreso registrado en las fuentes por efecto de lluvia y escurrimiento. El volumen del siguiente mes será, pues, la suma algebraica que resulte de suprimir la extracción elegida y de añadir el ingreso que se haya tenido en el periodo. Es decir que las zonas izquierda y derecha representan el estado de los volúmenes al inicio del mes y la cantidad de agua que puede extraerse de ambas fuentes. Así, si se considera el periodo mayo, por ejemplo, en la tabla se escribirá el volumen existente en los almacenamientos subterráneos y superficiales y luego se elige alguna de las posibles combinaciones de volúmenes por extraer y se resalta en la tabla. Luego, al volumen inicial se resta la extracción y se suma la lluvia o el escurrimiento registrado en el mes para así obtener el volumen del principio de junio.

A lo largo de los meses de la tabla, la extracción se supone constante, pero el ingreso varía con el régimen de lluvias de la región. La demanda se puede suponer constante, a menos que se quiera definir una demanda para cada mes, lo cual es factible porque se cuenta con esa información (ver la sección donde se describe la demanda, en el capítulo sobre Fuentes). Se puede elegir una extracción en acuíferos de cero o cualquiera otra hasta el máximo volumen que puede mensualmente ser conducido por su sistema de tubería. Recíprocamente, el volumen a extraer de las presas correspondiente a la selección en los acuíferos iría desde un valor que complete la demanda hasta cero. Es decir que si la extracción en los acuíferos es cero, en las presas sería el volumen de demanda, pero si de los acuíferos se toma el volumen

máximo de conducción, de las presas se extraería el complemento para satisfacer la demanda. También se habrá de tomar en cuenta la máxima capacidad de conducción en las presas para no incluir como opción un volumen mayor que esa capacidad.

Elección de las extracciones (definición de la función beneficio)

De entre la lista de combinaciones posibles de volúmenes de agua a ser extraídos de los acuíferos y de las presas para cubrir la demanda mensual de la ZMM, la selección que se haga dependerá, principalmente de cinco aspectos. El primero es que debe procurarse evitar dejar un nivel demasiado alto en los almacenamientos (acuíferos y presas) para evitar el derrame de agua que así se desperdiciaría porque no llegaría a la obra de toma¹. Esto es particularmente importante en los meses previos a la temporada de lluvias o durante ella y más aún sabiendo que la zona es propensa a presenciar la llegada de algún huracán con sus lluvias extraordinarias. El segundo aspecto a considerar es no hacer extracciones fuertes de las presas si sus niveles están bajos; y si en los acuíferos hay volúmenes suficientes que permitan la recuperación de mejores niveles en los embalses. De manera similar, se preferirá extraer más agua de las presas cuando haya niveles adecuados allí y mientras que en los acuíferos los volúmenes disponibles sean bajos.

El tercer aspecto que se tomará en cuenta se refiere a considerar el ingreso mensual a las presas y acuíferos. Si bien se dijo anteriormente que el dato de recarga mensual a los acuíferos o de volumen mensual de ingreso a presas se añade al final del mes; es decir, hasta que se tenga la información registrada en pluviógrafos y en estaciones hidrométricas, es importante contar con un estimado del ingreso cuya importancia es patente por dos hechos, a saber: i) el régimen de lluvia desigual en el año, que determina meses de lluvias fuertes y otros de muy baja precipitación pluvial; y ii) aunque la lluvia fuera igual en toda la región, los tamaños diferentes que tienen las áreas de captación de los distintos embalses y acuíferos dan por resultado volúmenes de captación también diferentes y proporcionales a las áreas. Con los registros históricos se puede contar con un volumen promedio, un volumen máximo y otro mínimo de ingreso mensual en presas y acuíferos. Esto permite contar con un rango de ingresos que sumado al agua almacenada constituirán la base a partir de la cual se proceda a elegir la extracción. De esta manera, si se tuvieran por ejemplo almacenamientos muy similares en dos meses con regímenes de lluvia muy distintos, julio y enero, la selección de extracciones sería muy distinta en ambos meses porque al añadir el estimado de ingreso se marcaría notoriamente la diferencia de volúmenes disponibles en presas y acuíferos en ambos meses ya que aumentaría mucho el nivel disponible en julio pero poco el nivel en enero.

Existe un cuarto aspecto que se debería tomar en cuenta para elegir las extracciones. Se refiere a que existen criterios diferentes acerca de cuál es el volumen que se debería procurar tener en los acuíferos y presas según el mes del año. En general, poco antes de la época de lluvias no sería conveniente tener niveles muy altos de agua embalsada; pero a partir de finales de esa época y durante el resto del año se procuraría tener niveles de almacenamiento elevados. Una manera de aplicar este aspecto en la programación de extracciones sería establecer en cada período de estudio, es decir en cada mes, el volumen máximo de almacenamiento permitido. Al menos, establecer que en la última parte de la época de lluvias se permita almacenar el mayor volumen posible, apenas suficientemente próximo al nivel de derrame, pero manteniendo cierta seguridad. Este criterio podría continuar durante la temporada seca; pero hacia finales de ésta, cambiaría por el de procurar dejar libre de agua un volumen de embalse abajo del nivel de derrame capaz de contener quizás un volumen similar al

¹ Los volúmenes de derrame no llegan a la obra de toma sino que se desvían por otro conducto ante un riesgo de exceso de volumen en un embalse y cuando la obra de toma no puede desalojar agua a un ritmo suficientemente rápido. Los acuíferos de la región, como consecuencia de lluvias extraordinarias, han presentado "derrames"; es decir pérdida de agua en túneles y galerías o manantiales porque la recarga llega a superar a la capacidad de conducción hacia la ZMM. Eventualmente esa agua llegará por escurrimiento a las presas La Boca o El Cuchillo.

que en un mes pudiera ingresar si ocurriera un huracán con lluvias semejantes a las del máximo histórico.

Finalmente, el quinto aspecto se refiere al distinto costo de extracción entre acuíferos y presas. En efecto, por un lado resulta costoso el pago de energía para bombeo de agua subterránea; y por otro lado, el agua no simplemente fluye por gravedad desde las presas por diferencia de niveles ya que también se cuenta con estaciones de bombeo a lo largo del sistema de tuberías de conducción; lo cual también implica un costo por consumo eléctrico. Sin embargo, entre más profunda esté el agua en un acuífero, mayor será el costo del bombeo, lo cual no tiene un paralelismo en el caso de presas.

La función beneficio, deberá tomar en cuenta todo lo anterior para evaluar la mejor alternativa de extracciones.

Una reflexión adicional acerca de esta función. El beneficio que se obtiene de sacar agua de una presa o acuífero es que se satisface la demanda. Supóngase que no estén disponibles los acuíferos; es decir que se aíslan las presas. Si en un mes cualquiera y sin distinción del nivel que existiera en ese momento en una de las presas, entre más agua se extraiga para satisfacer la demanda, mayor es el beneficio. Así también los acuíferos considerados independientemente de las presas proporcionarán más beneficio en la misma medida que suplan la demanda. Ahora bien, en principio esto es válido para cualquier nivel como lo es en presas; sin embargo, el costo por bombeo aumenta con la profundidad cuando hay que bombear agua más abajo en un acuífero al haberse agotado la que había a niveles más superficiales. Pero también es cierto que en un pozo con la bomba situada a cierto nivel, el costo por extraer agua no se va incrementando conforme se va extrayendo más agua sino que es igual el gasto de energía durante toda la operación de bombeo. El costo se incrementaría si hubiera que situar la bomba a mayor profundidad mediante maniobras técnicas y en su nueva posición el costo de bombeo es el mismo durante toda la extracción de agua independientemente de que el nivel vaya disminuyendo.

Se propuso una función similar para acuíferos y presas sobre tres intervalos de volumen. Uno de ellos define la existencia de un volumen de reserva equivalente a la demanda anual que estaría repartido por mitad entre los acuíferos y las presas; otro asegura un cierto volumen de seguridad para poder contener un gran ingreso en el mes; y, entre el intervalo de reserva y el de seguridad queda el intervalo mayor. Por sencillez del tratamiento matemático, se eligió la relación lineal de la función sobre los intervalos. La función es creciente en el intervalo de reserva para que tanto en acuíferos como en presas se favorezca el tener completo su volumen de resguardo; es decir que se asigna mayor puntaje conforme quede almacenado más volumen. En el otro extremo, sobre el intervalo de seguridad, la función es decreciente para asignar un menor beneficio a medida que el almacenamiento esté más próximo al riesgo de derrame. Y en el intervalo de enmedio, la función es creciente con el fin de alentar el que se tengan niveles mayores de agua embalsada.

Podría haberse hecho notar un beneficio mucho menor en la zona de seguridad por medio de un cambio de pendiente en la recta de tal modo que fuera más pronunciada y quizás se podría haber generado una función para cada mes en las que la distinción entre ellas sería el ancho de esa zona de volumen de seguridad ya que el ingreso histórico máximo varía en el mes, pero ya no se implementó en este trabajo.

Implementación

En una hoja de cálculo se puede implementar un programa mensual en el que se pueda casi automáticamente planear las extracciones considerando los aspectos que se mencionaron arriba. Y se pueden probar distintos volúmenes iniciales de almacenamiento.

El esquema de cómputo basado en la ecuación (7), presentado previamente en este capítulo y aplicado al caso de $N=2$ actividades y X_{\max} = demanda, se lleva a cabo en cada mes del programa de extracciones mediante una tabla con valores discretos de x_N . De esos valores se elige el óptimo x_1 en la actividad $N=1$. No resulta necesario hallar el óptimo en $N=2$ porque no hay una tercera actividad y directamente el recurso x_2 es "demanda - x_1 ". Como se explicó en el esquema para cómputo, la presentación de resultados es en el orden inverso desde la última actividad hasta la primera; pero en el caso de este trabajo, que consiste de dos actividades, parecería que se obtuvo en el orden directo porque los valores de $N=2$ no requieren ya ser optimizados para una tercera actividad; es decir que no se requiere de la segunda fase del esquema de cómputo. Tampoco resulta necesario calcular los máximos en toda la sucesión de valores x inferiores a la demanda. Esto último implica que la tabla de dos actividades implementada en cada mes del programa en realidad corresponde al último de los renglones de la tabla 32, sólo que en el programa se muestran todos los valores y no sólo el de mayor beneficio.

Para un caso con más de dos actividades sería necesario calcular la tabla completa de valores máximos f_1, f_2, f_3, \dots correspondientes a cada x desde 0 hasta x_{\max} ; y ya no sólo a x = demanda. Y después se tendría que continuar con la segunda etapa del esquema de cómputo.

Al final de este capítulo se presenta un extracto del programa que se generó en este trabajo. Allí se tiene al principio los volúmenes mínimo, medio y máximo por mes que se calcularon con los datos básicos para acuíferos y presas. Luego se tienen los ingresos y las salidas mensuales que se registraron en un período común de cinco años tanto para el conjunto de acuíferos como para el conjunto de presas. Posteriormente, se muestran para ambos conjuntos el volumen mínimo posible de agua que tienen y el máximo que pueden contener antes del derrame. Debe comentarse aquí que en el caso de los acuíferos no se pudo conocer el nivel al cual ocurre el derrame, pero se utilizó en su lugar, el máximo histórico. También se consideró y anotó un volumen de seguridad, que representa el volumen que se debería dejar libre de agua en los almacenamientos al comienzo de un mes de modo que si ocurriera un ingreso igual al máximo histórico, pudiera ser contenido todavía y sin riesgo de llegar a la capacidad máxima. Al final se puede observar los cálculos para los meses de enero en los cinco años, a partir de volúmenes iniciales elegidos al azar tanto para el conjunto de presas como para el de acuíferos. El programa completo en todo el período se muestra, con letra más pequeña, en las páginas posteriores al extracto.

Cómo utilizar el método

El método incluye que se recolecten los registros históricos que permitan tener el ingreso en cada presa y acuífero, y sean sumados para generar el registro único de las presas y el del conjunto de acuíferos. A partir de estos dos registros hay que obtener por mes el valor máximo histórico así como el medio y el mínimo, tanto para el conjunto de presas como para el de acuíferos, que constituirán valores de pronóstico mensual. Cabe mencionar que en el caso de los acuíferos, el ingreso se obtiene a partir del cálculo del registro histórico de lluvia diaria mediante los coeficientes de Knisel (ajustados por comparación gráfica del nivel estático y el volumen almacenado; en el entendido de que este último se estima mediante el balance del ingreso y la extracción mensual).

Los ingresos y salidas mensuales en acuíferos y presas deberán ser anotados en las tablas correspondientes conforme se vaya conociendo los valores. Es decir que inicialmente las tablas estarán vacías por desconocimiento de los datos; pero mes a mes se irán llenando. En el ejemplo, como se representó el período 1982-1986, anterior a la fecha actual, se tenía la posibilidad de tener todos los datos; pero para el estudio de un escenario futuro, quizás el de los años 2004-2008 se comenzaría sin ingresos ni salidas.

Las funciones beneficio propuestas asignan unidades de beneficio (del 1 al 10) al volumen almacenado. Sólo se asignan valores positivos a los volúmenes que representan el almacenamiento útil, entre el volumen mínimo y el máximo; y estos últimos tienen beneficio cero. La porción ascendente de las funciones culmina en el volumen de seguridad y a partir de allí empieza la porción descendente. En el programa, las funciones evalúan el volumen almacenado que resultaría luego de sumarle el ingreso estimado y de analizar las quince posibles extracciones. Así, si el volumen almacenado (incluido el ingreso estimado) queda en la porción descendente se considera que tienen menor beneficio las extracciones pequeñas y se califica más alto a las extracciones cuantiosas. Y por otro lado, si el volumen queda en la porción ascendente, allí las extracciones pequeñas se califican con más beneficio que a las extracciones cuantiosas.

En el planteamiento del escenario a cinco años se comienza con escribir el dato de volumen total existente en el conjunto de presas y en los acuíferos al inicio y el programa suma el valor de pronóstico, el usuario elige ya sea en algunos meses el máximo, y el medio o el mínimo en otros (la elección dependerá de la experiencia). En el ejemplo se usó el medio para todos los meses.

El programa presenta las extracciones posibles de acuerdo con el intervalo de incremento (Δ) y con la demanda a satisfacer que se escriben en la esquina superior izquierda del cuadro de cálculos. Entonces el programa con las funciones evalúa la pareja de extracción individual y conjunta en acuíferos y presas y calcula las extracciones mensuales que correspondan al máximo beneficio en todo el escenario de pronóstico (cinco años). El inicio de un mes presenta el volumen almacenado luego de la extracción mejor evaluada y de cambiar el ingreso estimado para el mes anterior por el ingreso real que al comienzo del mes ya se habrá de conocer como dato. Cada mes que transcurra, conforme se vaya teniendo el dato de ingreso en las presas y en los acuíferos, el programa lo leerá de la tabla de ingresos e irá sustituyendo éste en lugar del medio, máximo o mínimo histórico. En el ejemplo se hizo la sustitución en todos los meses porque se contó con la información de los cinco años. Sería interesante lograr que el volumen existente (el cual es dato inicial) se pudiera estimar a partir de las curvas elevación – capacidad no sólo de presas, sino también de los acuíferos.

Se dejó para el final el último elemento del programa referente a las extracciones reales históricas que se llevan a cabo en presas y acuíferos y que resultan de decisiones tomadas con base en consideraciones técnicas, en la experiencia y en las necesidades sociales, económicas y agrícolas. Las extracción real que ocurra en acuíferos y presas en un mes se escribirá en el cuadro de salidas; y entonces, el programa la tomará en sustitución del valor obtenido a través del cálculo del máximo beneficio conjunto. De este modo, en el siguiente periodo mensual se considerará ya no sólo el verdadero ingreso del mes anterior sino también la extracción real. Ahora bien, como los valores ocurridos de ingreso y extracción muy probablemente diferirán de los estimados, el programa calcula los nuevos beneficios conjuntos y extracciones en los meses restantes.

Es importante advertir al lector que en el ejemplo no se incluyeron los valores de extracción (a pesar de que aparecen en el cuadro de salidas) con la finalidad de poder apreciar los valores obtenidos como máximo beneficio. Con la sustitución mes a mes, al cabo de cinco años cuando se conocen las extracciones reales, éstas sustituyen paulativamente y por completo a todos los valores calculados.

Dos puntos a resaltar son: i) entre las parejas de extracciones calculadas con el incremento, la última (21.0, 0.0) no aparece en los cálculos porque rebasa la capacidad de conducción en acuíferos; y ii) se destacan en sombreado las extracciones resultantes del mayor beneficio en cada mes.

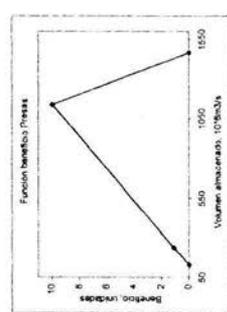
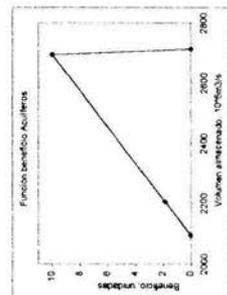
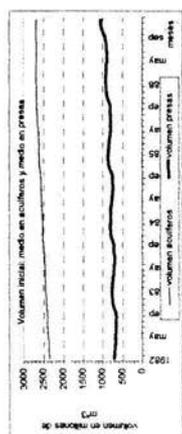
El resultado del método es: (a) que se tiene una estimación anticipada (en el ejemplo es a cinco años) de las extracciones mensuales en los conjuntos de presas y acuíferos; y (b) que la estimación se recalcula mes a mes conforme se conozcan el ingreso y la extracción mensual ocurridas en la región y se escriban en los cuadros respectivos, inicialmente vacíos. Restaría luego, pero fuera ya del alcance del trabajo actual, obtener por cada fuente individual su volumen de contribución para lograr la extracción.

Programación mensual de extracciones en 1982-1988 para condición inicial de volumen medio en acuíferos y medio en presas. Volumen en 10⁶m³. Basada en ingreso histórico mensual (promedio)

Ingreso estimado (obtenido del registro histórico)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Acuíferos												
prom.	5.04	4.50	3.86	6.33	10.95	8.33	8.17	7.48	13.30	8.08	4.95	4.23
max.	11.24	5.85	8.19	9.12	19.95	10.40	12.76	13.85	19.22	17.98	5.36	7.35
Presas												
prom.	2.40	1.90	0.45	1.00	1.20	0.90	0.96	1.00	4.00	3.30	3.80	3.25
max.	11.07	6.21	4.77	4.30	7.39	22.24	22.61	24.15	71.20	66.34	24.43	15.49
min.	40.10	19.70	14.85	15.00	20.50	274.40	209.80	143.40	324.80	268.50	89.40	48.20

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Acuíferos												
1982												
1983												
1984												
1985												
1986												
1987												
1988												
Presas												
1982												
1983												
1984												
1985												
1986												
1987												
1988												



	Acuíferos	Presas
Volumen mínimo	2084.6	0
Volumen de reserva	2200.7	1.8674
Volumen de seguridad	2693.6	10
Volumen máximo	2713.4	0
Porción almacenada	0.02	0.01
Porción disponible	-35.00	-1.24
Porción de reserva	32.50	-0.03
Porción de seguridad	1389.02	45.11

Análisis de ejemplos

Las ideas formales de matemáticas y de programación de Bellman (en su método para distribución eficiente de recursos) se trataron de conjuntar con la visión práctica de Kauffman (en su presentación de la programación dinámica para optimizar inversiones múltiples) y ambos conceptos se procuraron utilizar en la generación de un esquema útil para el manejo de las fuentes de agua. El resultado que se obtendría con el método de Bellman es la colocación de una cierto recurso total en cantidades adecuadas en los diversos destinos; análogamente, el diseño del trabajo presente busca cubrir la demanda con las dotaciones óptimas de las diferentes fuentes en un mes y repetir la misma operación durante los subsiguientes meses en el período de proyecto.

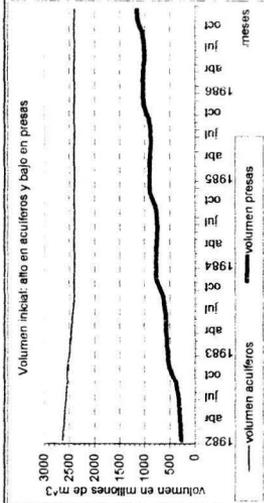
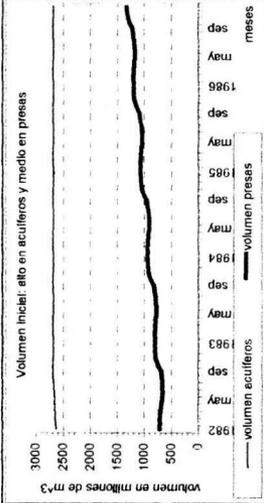
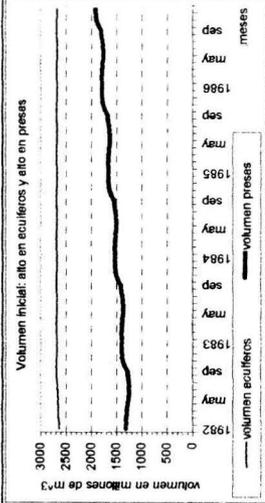
Una vez que se cuenta con las dotaciones calculadas es posible estudiar la resultante variación mensual de volúmenes en una gráfica para corroborar que no se hayan rebasado los límites máximo y mínimo de los almacenamientos y que la condición inicial de volúmenes no haya decaído. Estas observaciones a veces conducen a tener que modificar la función beneficio definida.

Se realizaron nueve corridas con diferente volumen inicial de acuíferos y presas. Se decidió analizar casos que comenzaran con: volúmenes bajos en acuíferos y presas, volúmenes medios en ambas fuentes; volúmenes altos en ambas; y combinaciones de volúmenes bajos en un tipo de fuente con medios en el otro, medios con altos, y bajos con altos. En todos los casos se utilizó el ingreso histórico promedio para pronostico.

La corrida que se presentó completa en la sección anterior corresponde al caso en el que se parte de volúmenes a la capacidad media tanto de acuíferos como de presas. Los resultados gráficos de las nueve corridas que muestran la evolución de niveles en presas y acuíferos durante el período analizado se muestran en la tabla siguiente junto con un resumen de las características que hacen diferente cada caso. En dos casos con la condición de volumen inicial alto en presas y medio o alto en acuíferos hay derrame en presas a pesar de que las extracciones anteriores al derrame son únicamente de embalses. Otra función no podría incrementar aún más las extracciones en presas. Es notorio el caso en que los acuíferos comienzan en un volumen alto; y las presas, en bajo, porque la función beneficio original no aprovecha extraer agua de acuíferos. Esto es debido a que el punto de inflexión en la gráfica se encuentra muy próximo al volumen máximo. Un cambio en la función beneficio, basado en desplazar ese punto de inflexión hacia volúmenes menores, permite definir extracciones convenientes en ambos conjuntos de almacenamiento.

Tabla 40. Características de las extracciones en nueve casos de condiciones iniciales y proyección de volumen en periodo 1982-1986

Proyección de volumen almacenado con programa de extracciones		Características de las extracciones
Condición inicial de volumen	Presas	
Alto Acuíferos	Alto	<p>Combinación de extracciones en ambos conjuntos de fuentes. Extracción nortoria en presas pero éstas derraman.</p> <p>La condición de volumen al final es alto-alto</p>
Alto	Medio	<p>Durante medio año sólo hay extracción de presas, posteriormente es combinada. Es adecuado el incremento de nivel en presas y sube moderadamente el de acuíferos.</p> <p>La condición de volumen al final es alto-alto</p>
Alto	Bajo	<p>Se decide modificar la función. Beneficio porque la existente produce extracción inicial sólo en presas que si bien incrementa el nivel hasta medio, no busca aprovechar más la extracción de acuíferos.</p> <p>La modificación (desplazar a niveles mucho más bajos el punto de inflexión en la función de acuíferos) permite extracciones sólo de acuíferos durante uno y medio años; y posteriormente combina con extracción en presas.</p> <p>La condición de volumen al final es medio-medio.</p>



Condición inicial de volumen		Proyección de volumen almacenado con programa de extracciones	Características de las extracciones
Acuíferos	Presas		
Medio	Alto	<p>Volumen inicial, medio en acuíferos y alto en presas</p>	<p>Durante tres y medio años sólo hay extracción en presas, lo cual pretende disminuir el nivel en ellas y favorecer la recuperación en acuíferos. Pero al final de ese tiempo las presas derraman a pesar de su aprovechamiento completo.</p> <p>La condición de volumen al final es: alto-alto</p>
Medio	Medio	<p>Volumen inicial, medio en acuíferos y medio en presas</p>	<p>Durante tres y medio años sólo hay extracción en presas. El volumen en acuíferos sube y en acuíferos también. Después de este tiempo, el volumen en acuíferos tiende al punto de inflexión de la función beneficio.</p> <p>La condición de volumen al final es alto-medio.</p>
Medio	Bajo	<p>Volumen inicial, medio en acuíferos y bajo en presas</p>	<p>Las extracciones durante cuatro y medio años sólo provienen de acuíferos; posteriormente combina con extracción en presas. Suben los volúmenes tanto en acuíferos como en presas.</p> <p>La condición de volumen al final es alto-medio.</p>

Condición inicial de volumen		Proyección de volumen almacenado con programa de extracciones	Características de las extracciones
Acuíferos	Presas		
Bajo	Alto	<p>Volumen inicial: bajo en acuíferos y alto en presas</p>	<p>Las extracciones corresponden sólo a los acuíferos durante todo el período. Suben los volúmenes tanto en acuíferos como en presas. La condición de volumen al final es medio-alto.</p>
Bajo	Medio	<p>Volumen inicial: bajo en acuíferos y medio en presas</p>	<p>Solo hay extracción de presas. Sube notoriamente el volumen en acuíferos, en tanto que el de presas se incrementa moderadamente. La condición de volumen al final es, alto-medio.</p>
Bajo	Bajo	<p>Volumen inicial: bajo en acuíferos y bajo en presas</p>	<p>Solo hay extracción de presas y se recupera el nivel de acuíferos. La condición de volumen al final es, alto-medio.</p>

Propuesta de Met. para tratar de Mantener el Equilibrio del Abastecimiento de Agua Potable Ejemplificando en la ZAM

6. Situación actual del manejo conjunto de agua en la ZMM y posible aplicación del método

En este capítulo se presentan las posibilidades de aplicación del método propuesto considerando el manejo actual que se lleva a cabo en el país para dotar de agua a los usuarios público-urbanos y agrícolas de los sistemas superficiales y subterráneos en la ZMM.

Situación actual del manejo conjunto de agua en la ZMM y posible aplicación del método (fuente: comentarios del Gerente de Infraestructura del SADM y de personal de mandos medios de la CNA en sus oficinas centrales y en Monterrey; y el estudio "Análisis hidrológico para definir los criterios de operación de las presas Cerro Prieto –José López Portillo-, La Boca –Rodrigo Gómez-, NL, y Marte R Gómez –El Azúcar-, Tamps, como base para fundamentar el reglamento de operación del sistema", CNA, 1996)

La CNA realizó en 1996 un estudio hidrológico para definir la programación de las extracciones anuales en las presas Cerro Prieto, La Boca, El Cuchillo y Marte R. Gómez, teniendo en cuenta las necesidades actuales y futuras de abastecimiento de agua para usos público-urbanos de la ZMM y otras comunidades dependientes de las presas, así como para usos agrícolas de los Distritos de Riego 026 y 031, y también de Unidades de Riego en la región. El estudio constituyó el fundamento de un Convenio Federal el cual reglamenta los criterios para el cálculo de la extracción total anual de cada presa a partir del almacenamiento que tenga al 1º de octubre.

Se presenta a continuación una síntesis de las consideraciones que tomó en cuenta el estudio.

1. Las presas destinadas a uso público-urbano o mixto (de riego y público-urbano) son:
 - p. La Boca (para uso urbano de la ZMM);
 - p. Cerro Prieto (para uso urbano de la ZMM, y de riego en unidades de riego menores);
 - p. El Cuchillo (para uso urbano de la ZMM y de comunidades de los estados Nuevo León y Tamaulipas, abastecidas por el acueducto China-Los Aldamas-Arcabuz; y de riego en el DR 031 y otras unidades de riego); y
 - p. Marte R. Gómez (para uso de riego en el DR 026).
2. El agua efluente de la ZMM (equivalente a un 60% del abastecimiento), después de ser tratada, se ha de conducir hacia la presa Marte R. Gómez a través del río Pesquería. Parte del agua de este río corresponde a comunidades con derechos de uso.
3. El abastecimiento de agua potable a la ZMM y a las comunidades que aprovechan el acueducto China-Los Aldamas-Arcabuz se garantizará mediante:
 - usar primero el agua subterránea (la CNA determinó en el estudio que constituye una aportación de $4\text{m}^3/\text{s}$; es decir de 126.1 millones de $\text{m}^3/\text{año}$);
 - usar luego el agua de las presas La Boca y Cerro Prieto; y finalmente,
 - completar el abastecimiento con agua de la presa El Cuchillo, sin pasar el límite acordado para la primera etapa de esta presa (157.7 millones de m^3 anuales).
4. Con el análisis del funcionamiento de vaso anual en la p. Marte R. Gómez, sin restricciones al riego, se calculó el volumen requerido de la p. El Cuchillo para el DR 026.
5. El funcionamiento de vaso anual en la p. El Cuchillo permitió estudiar en todo el sistema la factibilidad de garantizar el abasto público urbano y al riego con las consideraciones anteriores; de los resultados emanarían, en su caso, las restricciones necesarias al riego.

De acuerdo con los niveles que se tengan en los embalses al 1º de octubre de cada año se aplican las ecuaciones definidas en los criterios de operación del Convenio Federal que dan como resultado el volumen de extracción anual de las presas. Ahora bien, para calcular las

7. Conclusiones

Se elaboró un método para tratar de mantener el equilibrio del abastecimiento de agua potable y se obtuvo la información básica, real o estimada, de las fuentes de abastecimiento en la Zona Metropolitana de la ciudad de Monterrey (ZMM) para ejemplificar su uso. El fundamento consiste en combinar las extracciones de las fuentes superficiales y subterráneas con un método de programación dinámica originalmente concebido para distribución de recursos, pero adaptado aquí para concentrar los recursos provenientes de varias fuentes.

El método primero requiere: i) integrar a las diversas fuentes existentes en dos grupos, el de las superficiales y el de las subterráneas; ii) generar el valor máximo, el medio y el mínimo mensual de los volúmenes históricos de ingreso en las fuentes; y iii) elaborar una función beneficio mensual para el grupo subterráneo y otra para el superficial, con las que se califica mediante unidades de beneficio al volumen que quedaría en cada grupo después de extraer alguna fracción de la demanda de agua. Posteriormente, a partir del volumen almacenado inicial en los grupos superficial y subterráneo, se genera un escenario con varios años de pronóstico de extracciones de agua mensuales para los dos grupos.

Dentro de los aciertos del trabajo destacan que permite el manejo conjunto de las fuentes superficiales o subterráneas en un solo método; su fácil uso y flexibilidad por haber sido realizado en el paquete de cálculo Excel; y que no se necesita el conocimiento de algún lenguaje de programación especial. Tiene un potencial grande de adaptabilidad para la ZMM o para ser aplicado en otras poblaciones por medio de ajustes en las funciones beneficio, en el detalle de la partición de las posibles extracciones o en la longitud de años de pronóstico. Fue posible probarlo con diversos casos de grado de almacenamiento en acuíferos y presas de la ZMM durante 1982-1986. En la situación presente del manejo de agua en la ZMM los resultados mensuales que se pudieran obtener durante un amplio período apoyarían la planeación.

Por otro lado, como limitantes se encuentran que fue necesario emplear información estimada para los acuíferos de la ZMM y que sus curvas de elevación - capacidad podrían haber sido mejores en caso de haber contado con una mayor amplitud en años de datos; por lo que queda pendiente completar el conocimiento de la información básica que permita obtener resultados reales. Las funciones beneficio definidas se podrían considerar carentes de la experiencia en el campo operativo real y no se les incorporó de una manera explícita el carácter económico del manejo de las fuentes.

En cuanto a los habitantes de la ZMM, y para otras poblaciones, el método podría ser una sencilla herramienta adicional de las oficinas técnicas o de los grupos de usuarios para planeación de un horizonte de varios años en particiones mensuales en la búsqueda de políticas de operación conjunta que minimicen los derrames y los riesgos de bajos niveles de agua porque permite el apoyo de acuíferos y fuentes superficiales entre sí para poder mantener el equilibrio del abastecimiento. Queda la propuesta de un futuro trabajo que permita el manejo con cada fuente individual.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Bellman Richard E., Dreyfus Stuart E. Applied Dynamic Programming. 1962.
2. Colección Proyectos IMTA. Serie Programas. ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica). Disco compacto. 1996.
3. Comisión Nacional del Agua. Análisis hidrológico para definir los criterios de operación de las presas Cerro Prieto (José López Portillo), La Boca (Rodrigo Gómez), NL y Marte R. Gómez (El Azúcar), Tamps., como base para fundamentar el reglamento de operación del sistema. 1996.
4. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. Registros del sistema de cómputo para captura de datos de lluvia diaria.
5. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. Registro en papel de datos de lluvia diaria.
6. Consultores en Ingeniería y Proyectos, S. A. (COINPRO). Balance hidráulico y estudio de políticas de operación del sistema regional de los ríos Bravo y San Juan. 1993.
7. del Conde Guadalajara Juan Carlos. Propuesta de Aprovechamientos Hidráulicos en la Cuenca del Río San Juan (Región Hidrológica del Río Bravo). Borrador de Tesis para Maestría en Hidráulica de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, UNAM. 1998.
8. de Victorica J. A., Olvera J.C.S., San Román O.G., Romero F.L., Martínez, J.L.P. Estudio para Determinar la Operación de las Presas La Boca y Cerro Prieto. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1986.
9. Domínguez R. M. Probabilidades de Abastecimiento a 1, 2, 3 y 4 Años al Acueducto Linares – Monterrey. Instituto de Ingeniería, UNAM. 1987.
10. INEGI. Síntesis Geográfica del Estado de Nuevo León y la Carta hidrológica subterránea 1:1 000 000 contenida en el anexo cartográfico. 1986.
11. Kauffman, A y Faure, R. Invitación a la Investigación de operaciones. 1967.
12. Knisel Walter G. Response of karst aquifers to recharge. Hydrology papers, Colorado State University, number 60. 1972.
13. Loaiza, Jiménez. Aplicación del Modelo de Asignación de Agua a Monterrey, N.L. Ingeniería Hidráulica de México. Vol. 2. Núm. 3. Sept.-dic. 1987.
14. Planeación, Sistemas y Control, SA de CV. Apuntes del Taller sobre Modelos de Asignación de Agua. 1987.
15. Schick William, Silverman Gordon. Fortran 90 and Engineering Computation. 1994.
16. Sistema de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), Organismo Operador de Agua. Información de niveles estáticos en los pozos de los sistemas Mina, Monterrey y Santa Catarina; datos de lluvia mensual en una estación pluviométrica cercana a cada uno de los tres sistemas proporcionadas por el ingeniero Federico Villareal González, director general del 1997.
17. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Hidrología de la Cuenca del Valle de México. Tomo IV, Capítulos VI y VII. 1964.
18. Velázquez Aguirre Luis. Definición del funcionamiento hidrogeológico de los sistemas cársticos del área de Monterrey, N. L. Tesis para terminar la licenciatura de ingeniero geólogo. 1985.

9. Nomenclatura

CNA	Comisión Nacional del Agua
COINPRO	Consultores en Ingeniería y Proyectos, SA (empresa de consultoría)
ha	Hectáreas
Inap	Medición inapreciable de lluvia en algún registro de precipitación diaria. El dato no se puede cuantificar con exactitud porque es menor que la mínima graduación (0.1 mm) en la escala del pluviómetro; sin ser cero.
Knisel (método)	Método para estimar la recarga en acuíferos kársticos mediante una ecuación que requiere el dato de lluvia diaria y dos coeficientes con valores a determinar en cada acuífero
ND	Nivel dinámico en un pozo
NE	Nivel estático en un pozo
NOD	No se tiene un dato en algún registro histórico de mediciones hidrométricas o meteorológicas
PSC	Planeación, Sistemas y Control, SA de CV (empresa de consultoría)
SADM	Servicios de Agua y Drenaje en Monterrey (Organismo operador del agua)
ZMM	Zona Metropolitana de la Ciudad de Monterrey

Anexo. Método de Knisel en acuíferos cársticos

Un método para estimar la recarga en terrenos cársticos fue desarrollado por Walter Knisel con base en los resultados de estudios hidrológicos que el Servicio de Investigación en Agricultura de los Estados Unidos (ARS, por sus siglas en inglés) llevó a cabo en la zona conocida como Plataforma Eduards, en Texas.

Si bien los resultados del ARS no eran tan completos como para poder confirmar en detalle sus estimaciones de recarga obtenidas con datos de lluvia, sí permitían comprobar que estas estimaciones eran razonablemente buenas.

El autor escribió que existen zonas cársticas en las que no ocurre escurrimiento superficial, y otras en las que sí es posible. Una representación ideal de la relación entre la altura de lámina de lluvia y la recarga producida cuando no hay escurrimiento, sería una relación exponencial como la de la figura siguiente.

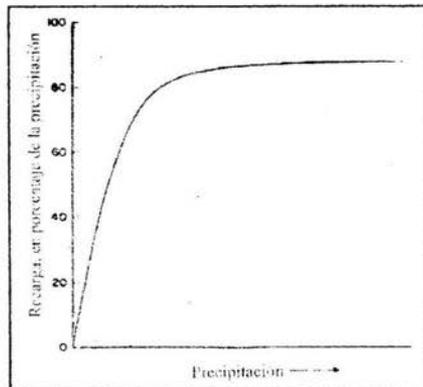


Figura 16. Representación ideal del porcentaje de precipitación que proporciona recarga efectiva en zonas cársticas sin condiciones de escurrimiento.

Factores como la retención de agua por la vegetación (para después ser utilizada en el metabolismo de las plantas o bien ser transpirada) y el grado en que el agua ocupa volumen en el espesor del suelo (para quizás más tarde evaporarse) son responsables del área situada arriba de la curva. Si el terreno tuviera condiciones para presentar escurrimiento, entonces a partir de cierto valor de precipitación, la curva reflejaría una progresiva disminución de la recarga a favor del escurrimiento. La cantidad de lluvia necesaria para producir escurrimiento no es constante para todas las tormentas; pues depende de la intensidad de lluvia, de la estación del año o del grado de saturación del suelo por tormentas previas. Sin embargo, con los datos disponibles, Knisel propuso un esquema para representar la relación lluvia - recarga en términos de lámina llovida en pulgadas y porcentaje de recarga (ver la figura siguiente con línea punteada). Se sabía que el escurrimiento iniciaba con aproximadamente 3 pulgadas (76.2 mm) de precipitación; que por la alta evaporación en la Plataforma Eduards, la máxima recarga que podría ocurrir antes del inicio del escurrimiento sería del orden del 80% de la lluvia; en adición, aproximadamente unas 6 pulgadas (152.4 mm) de lluvia producían 1 pulgada (25.4 mm) de escurrimiento (i.e. cerca del 17% de la lluvia); y, finalmente, aunque no se conoció el límite inferior de lluvia efectiva para iniciar la recarga, se proponía que podría ser de 0.25 pulgadas (6.35 mm). Con esta información, Knisel propuso la curva hipotética mostrada enseguida con trazo discontinuo.

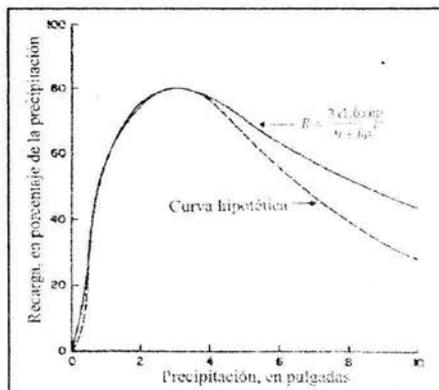


Figura 17. Esquema hipotético (línea discontinua) de la relación entre lámina de lluvia y su porcentaje que se convierte en recarga efectiva en la zona cárstica de Texas conocida por Plataforma Edwards, y representación gráfica de la curva serpentina ajustada con datos hidroclógicos del lugar.

La línea hipotética podría ser representada muy cercanamente por la porción positiva de una curva matemática conocida como serpentina, cuya ecuación general es la siguiente

$$y = \frac{abx}{a^2 + x^2}$$

donde a es el parámetro de forma; y b , el de escala. La ecuación aplicada a la recarga, R (como porcentaje de la lluvia), en función de la precipitación, hp , se muestra a continuación.

$$R = \frac{abhp}{a^2 + hp^2}, \quad \text{para } hp \geq 0$$

Knisel utilizó algunos puntos selectos de la curva hipotética para determinar los valores de a y b , que resultaron ser, respectivamente, 3.0 y 1.6. Con estos valores se obtuvo en forma gráfica la línea continua sobrepuesta a la curva hipotética que representa en forma muy aceptable el segmento ascendente y el pico de la curva hipotética; pero diverge en el segmento descendente en tal magnitud que en 10 pulgadas (254 mm) de lluvia se tiene una diferencia en la recarga de aproximadamente 16% de lluvia. Sin embargo, los registros históricos muestran que tan solo un evento de 8 pulgadas (203.2 mm) en esa región sería bastante poco frecuente pues tiene un período de retomo de 100 años; por lo que el error se puede considerar como pequeño; sin embargo, Knisel propone que la ecuación no se utilice con valores superiores a las 6 pulgadas (152.4 mm).

Al multiplicar los dos lados de la ecuación por hp para poder representar la recarga como lámina en pulgadas y ya no como porcentaje de lluvia, queda como sigue:

$$R = \frac{abhp^2}{a^2 + hp^2}$$