



**Aforo y calidad del agua de los
manantiales de Acopilco, Cuajimalpa**

Informe
COMUNEROS DE ACOPIILCO

**Eugenio Gómez Reyes
Oscar Monroy Hermosillo
Carlos Vargas Cabrera**

Coordinadores del Proyecto

Octubre de 2013

COLABORACIONES

INVESTIGADORES:

DR. EUGENIO GÓMEZ REYES, UAM-IZTAPALAPA (Co-Coordinador del proyecto)
DR. OSCAR MONROY HERMOSILLO, UAM-IZTAPALAPA (Co-Coordinador del proyecto)
MTRO. CARLOS VARGAS CABRERA, UAM-IZTAPALAPA (Co-Coordinador del proyecto)
DRA. ELOÍSA DOMÍNGUEZ MARIANI, UAM-AZCAPOTZALCO
MTRA. SAMANTHA CAMACHO GUADARRAMA, UAM-CUAJIMALPA

TÉCNICOS:

ING. LUIS MAURICIO TREJO PUIG, INGENIERÍA HIDROLÓGICA, UAM-IZTAPALAPA
ALUMNO JUAN A. BERNAL VILLA, INGENIERÍA HIDROLÓGICA, UAM-IZTAPALAPA
ALUMNO JOSÉ ROBERTO RAMÍREZ RESÉNDIZ, INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN, UAM-AZCAPOTZALCO
ALUMNA ANA K. PAREDES MERCADO, INGENIERÍA AMBIENTAL, TESOEM-LOS REYES, EDOMEX
ALUMNO JESÚS A. AVILÉS ÁLVAREZ, INGENIERÍA AMBIENTAL, TESOEM-LOS REYES, EDOMEX
ALUMNO HUGO SALGADO VILLALOBOS, INGENIERÍA AMBIENTAL, TESOEM-LOS REYES, EDOMEX

INVITADOS:

LIC. MARÍA DE LOS ÁNGELES CARSOLIO, COMISIÓN DE GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA, ALDF

CONTENIDO

	Páginas
Resumen -----	iv
1. Introducción -----	1
2. Objetivo -----	2
3. Área de Estudio -----	2
4. Líneas de Conducción -----	4
4.1. Agua de Los Leones -----	4
4.2. Agua de Los Pantanos -----	6
4.3. Manantial Agua Bendita -----	7
4.4. Manantial El Tigre -----	7
5. Adquisición de Información -----	7
5.1. Recopilación de datos -----	7
5.2. Campaña de muestreo -----	8
6. Análisis de Datos -----	11
6.1. Sistema de Información Geográfico -----	11
6.2. Volúmenes de manantiales -----	12
6.3. Calidad del agua -----	14
7. Fuente de abastecimiento y demanda de agua -----	20
7.1. Comportamiento hidráulico de los manantiales -----	20
7.2. Demanda de agua potable -----	21
8. Alternativas de sustentabilidad hídrica para satisfacer la demanda -----	22
9. Conclusiones -----	22
10. Bibliografía consultada -----	23

Resumen

El presente estudio se enfoca a determinar los volúmenes y la calidad del agua, durante el estiaje, de los aprovechamientos de arroyos y manantiales de la subcuenca de San Lorenzo Acopilco. Se realizaron campañas de medición para determinar la caudal de aporte de los manantiales y arroyos Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos. Asimismo, se midieron parámetros físico-químicos en los aportes de manantial y en cajas de distribución para conocer las condiciones de calidad del agua de los aprovechamientos. La información recopilada fue analizada y contrastada con la demanda de agua de la población de Acopilco, con el fin de proponer alternativas para la autosustentabilidad hídrica de la comunidad.

Los aforos indicaron que el abastecimiento de Agua de Los Leones a la población de Acopilco, fue de 30.5 l/s. Este flujo se forma con las contribuciones de los aportes de los manantiales y del arroyo de la cuenca alta de Agua de Los Leones (4.9 l/s), así como de los manantiales del Llanito (0.5 l/s). También se tiene la contribución del agua del cauce del Arroyo de Agua de Los Leones que aporta 20.9 l/s. Asimismo, se cuenta con el transvase del agua de los manantiales Agua de Ajolotes y Agua de Gallinas (8.4 l/s), del municipio de Ocoyoacac del Estado de México, que se incorpora a escasos metros arriba de la caja Presa Tres Caminos. Por otro lado, se registró que la contribución de agua, a la población de Acopilco, por parte de los aprovechamientos de los manantiales Agua de Los Pantanos, es de 4 l/s. También se aportan al tanque de San Lorenzo Acopilco un volumen de 1.1 l/s por parte del manantial El Tigre.

Este déficit de abastecimiento, durante el estiaje, para la población de Acopilco puede fácilmente ser compensado si se detectan y reparan las fugas en la red de distribución para alcanzar una eficiencia del 90%. Asimismo, puede balancearse reduciendo el requerimiento de agua de 120 a 80 l/hab/día durante el estiaje. Otras alternativas sustentables consideran la exploración de otros manantiales, el almacenamiento de excedentes pluviales y el incremento en la recarga del acuífero

Cabe mencionar que en todos los casos de muestreo de los parámetros físicoquímicos de los manantiales, se observó que el agua cumple con la norma de calidad potable. Las concentraciones de conductividad son un orden de magnitudes más bajas que las establecidas por la norma, lo que indica la alta calidad del agua de los manantiales de Acopilco por su bajo contenido de sales.

Aforo y calidad del agua de los manantiales de Acopilco, Cuajimalpa

1. Introducción

El abastecimiento de agua es uno de los principales problemas que enfrentan los organismos operadores del agua en la zona metropolitana del Valle de México. Una de las metas en la nueva política hídrica para satisfacer la demanda de agua es lograr la sostenibilidad hídrica de las cuencas; comprendiendo en esto la autosuficiencia del recurso hídrico para la vida de los moradores de la cuenca.

En el caso de la cuenca donde se ubica la población de San Lorenzo Acopilco, Cuajimalpa, es relevante conocer la disponibilidad vs. demanda del recurso hídrico para proponer proyectos que aseguren la sostenibilidad de la cuenca en materia de agua. Toda vez que el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), organismo operador del agua en el Distrito Federal, cuenta con un proyecto para satisfacer la demanda en Acopilco a expensas de sustraer agua que se conduce del sistema Cutzamala hacia la Ciudad de México. Aunque este proyecto verdaderamente satisface la demanda del abastecimiento de los habitantes de Acopilco, es importante presentar otras alternativas de dotación porque la opción del SACMEX agrava el problema para el resto de los habitantes de la Ciudad de México además de no contribuir a la sustentabilidad hídrica de la cuenca.

La población de Acopilco se ha abastecido, de forma tradicional, del agua emanada de los manantiales que se encuentran en la microcuenca que habitan; así, aprovecha los caudales proporcionados por el sistema de manantiales Agua de Los Leones (ahora operado por el SACMEX), del manantial Agua Bendita, así como de los manantiales Agua de Los Pantanos, el manantial El Tigre, y el manantial La Olla, estos últimos operados por los comuneros de Acopilco. La producción de estos manantiales durante el período de lluvias rebaza por mucho la capacidad de la infraestructura hidráulica para su aprovechamiento, tanto para la captación y conducción, como para el almacenamiento; presentándose excedentes que mantienen llenos los cauces de los arroyos en la zona.

Durante el estiaje, la producción de los manantiales merma en cantidades que se determinan en este informe y se compara con los volúmenes de la demanda. El déficit en el abastecimiento durante el estiaje se propone cubrir con volúmenes sustentables de agua para no ejercer más presión hídrica para el resto de los habitantes del Distrito Federal y de otras cuencas. El aforo y la calidad del agua de los manantiales, durante el estiaje, que abastecen la población de Acopilco, constituyen el tema a desarrollar en las siguientes secciones. También se incluye el balance abastecimiento-demanda y las alternativas propuestas para lograr la autosuficiencia de agua en Acopilco.

2. Objetivo

El presente estudio tiene la finalidad por una parte, conocer la disponibilidad vs. demanda del recurso hídrico con que cuenta la población de San Lorenzo Acopilco, Cuajimalpa, y por otra, determinar la calidad del agua del sistema de manantiales que abastecen la población de Acopilco.

Para tal fin se plantean los siguientes cuatro objetivos específicos:

1. Recopilación y análisis de la información existente.
2. Realizar un censo de mediciones de los sistemas de manantiales Agua de Los Leones, Agua de Los Pantanos, El Tigre y Agua Bendita.
3. Analizar las mediciones de los aforos de los manantiales para evaluar los volúmenes de agua que producen durante el estiaje.
4. Analizar las mediciones de los parámetros de calidad del agua de los manantiales para evaluar sus características durante el estiaje.
5. Proponer un plan hídrico para suplir el déficit de abastecimiento durante el estiaje.

El desarrollo de cada una de las actividades listadas se presenta en los capítulos que integran este documento. En los anexos correspondientes se incluye la información que soporta los resultados y conclusiones que se generan de este trabajo.

3. Área de Estudio.

El área de estudio abarca una zona de aproximadamente 10 km de largo de suelo de conservación de la Cuenca del México, ubicado cuenca arriba del poblado San Lorenzo Acopilco, Cuajimalpa, al poniente de la Ciudad de México (Figura 1). La Delegación Cuajimalpa colinda al Norte con la Delegación Miguel Hidalgo y el Municipio de Huxquilucan en el Estado de México; al Oriente con la Delegación Álvaro Obregón; al Poniente con el Municipio de Ocoyoacac del Estado de México.

En el área de estudio se localizan las microcuencas conformadas por las áreas de captación de los arroyos Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos, donde se encuentran los manantiales que abastecen a la población. Esta zona representa un punto importante para la recarga del acuífero del que se abastece la ciudad. La precipitación pluvial promedio anual registrada en la zona, es del orden de 1,145 mm y comparada con la precipitación promedio anual en el Distrito Federal de 780

mm, se observa que la excede casi en un 47%, por lo que resulta importante aprovechar este recurso natural.

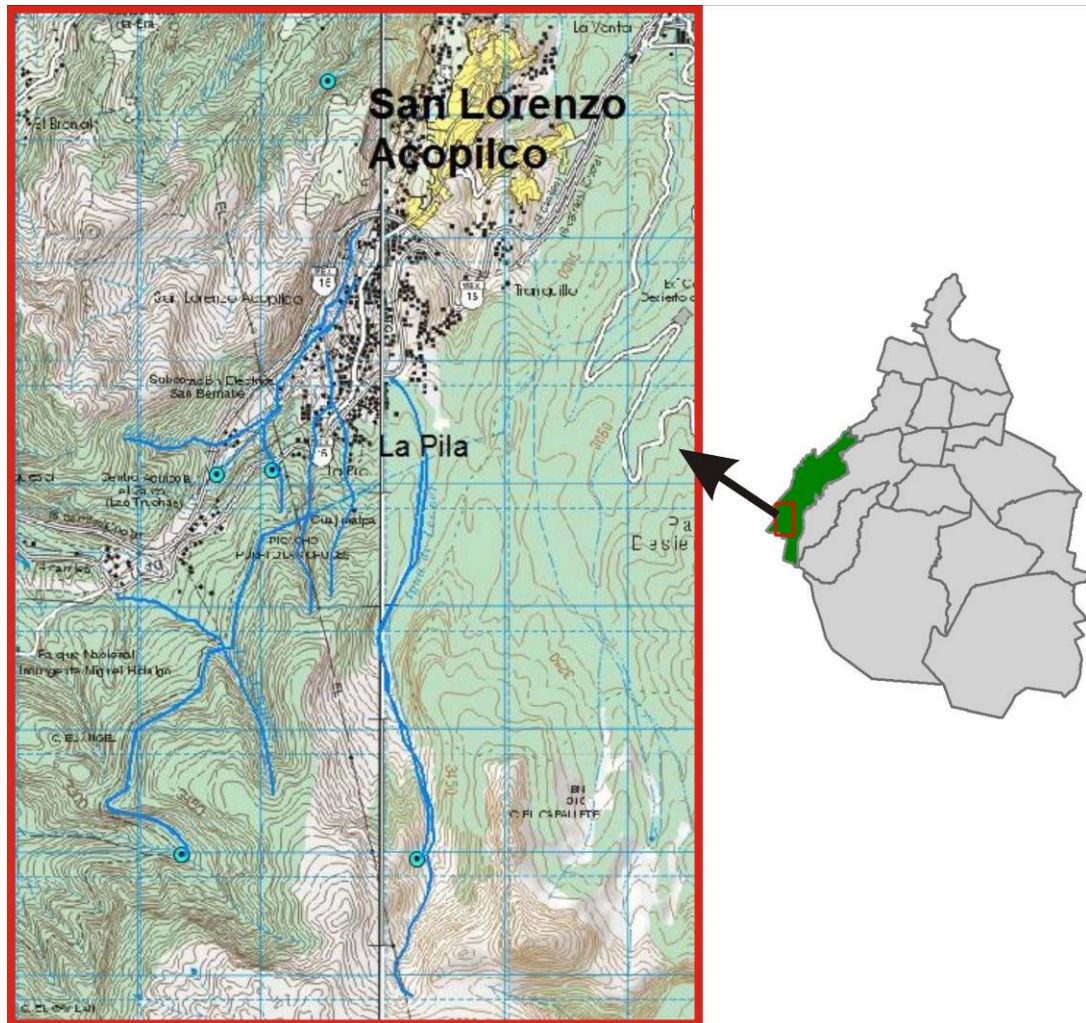


Figura 1.- Área de estudio mostrando las microcuencas de los arroyos Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos.

La microcuenca alta del Arroyo Agua de Los Leones se localiza dentro de la zona de suelo de conservación y cuenta con infraestructura hidráulica para los aprovechamientos del agua. Además, está vigilada por un consejo agrario integrado por pobladores de San Lorenzo Acopilco, lo cual propicia que el agua de los manantiales y del cauce del arroyo mantenga buenas condiciones para el consumo humano. El Arroyo Agua de Los Leones, tiene una longitud aproximada de 7 km, y su cuenca propia cuenta con una superficie aproximada de 6.4 km². Los manantiales se encuentran en la parte alta de la cuenca y sus aprovechamientos son operados por el SACMEX para beneficio de la población de Acopilco. Hacia la parte baja de la cuenca, cerca del área urbana colindante con la

Carretera Federal México – Toluca, se encuentra enclavado en la zona boscosa del suelo de conservación el manantial Agua Bendita. Este manantial, al igual que los referidos anteriormente de la parte alta de la microcuenca, cuenta con una estructura de captación.

En cuanto a la microcuenca del Arroyo Agua de Los Pantanos, sus aprovechamientos son operados por los Comuneros de Acopilco y también cuenta con infraestructura para su aprovechamiento aunque requiere mantenimiento. El Arroyo Agua de Los Pantanos tiene una longitud de aproximadamente 2.5 km y su cuenca de aproximadamente 3 km² está delimitada por la carretera Federal y Autopista México – Toluca. Dentro de esta microcuenca se ubica también el manantial El Tigre.

4. Líneas de Conducción.

El aprovechamiento del agua de las microcuencas Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos, se hace con apoyo de infraestructura hidráulica, *v.gr.*, líneas de conducción, presas de mampostería, presas de gaviones, presas de piedra acomodada, tanque de almacenamiento y estructura de cloración (Figura 2).

4.1 Agua de Los Leones.

Se cuenta con líneas de conducción de distintos diámetros, construidas con tubería de asbesto-cemento, acero y fierro galvanizado. Las más importantes que permiten la conducción del agua de los manantiales y del cauce del arroyo Agua de Los Leones, desde la parte alta de la microcuenca y hasta los tanques de almacenamiento, corresponden a dos, una de 6" y otra de 12" de diámetro. La línea de 6" parte de los manantiales Agua de Los Leones hasta una longitud de 100 m donde se ubica una caja de depósito en la misma cuenca alta. En esta caja también se encuentra otra tubería de 12" de diámetro que aporta el caudal del cauce del arroyo a partir de la Presa Agua de Los Leones ubicada también a 100 m aproximadamente de la caja en cuestión.

De la caja con origen en los manantiales y la presa Agua de Los Leones, en la parte alta de la microcuenca, parte una línea de 12" que entrega el caudal a la caja de depósito ubicada en el paraje El Llano, al margen del cauce del arroyo y a una distancia de 0.7 km. A lo largo del trazo de la esta línea, existen cajas de depósitos que reciben aportes de los manantiales del Llanito, ubicados aproximadamente 500 m a las márgenes del cauce del arroyo Agua de Los Leones, que son conducidos con tuberías de 6".

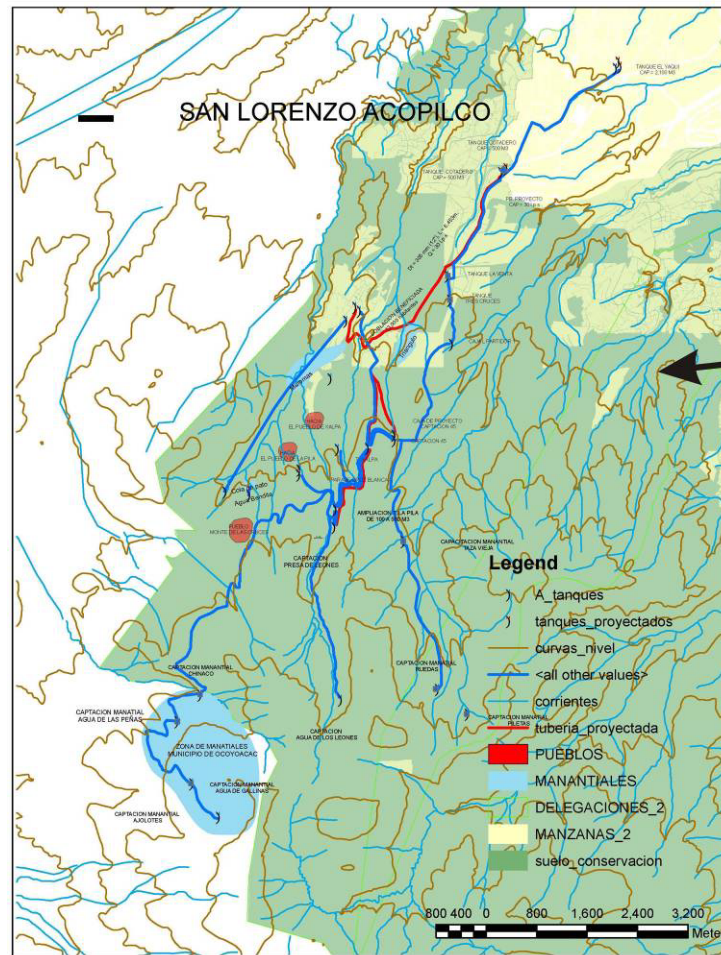


Figura 2.- Infraestructura hidráulica para el aprovechamiento del agua de los manantiales del Agua de Los Leones y del Agua de Los Pantanos, mostrando las estaciones de muestreo.

La línea de 12" que conduce el agua de los manantiales de la parte alta de la microcuenca Agua de Los Leones y de los aportes de los manantiales del Llanito, se extiende paralelo al cauce del arroyo, en una longitud de 1.8 km, hasta la caja de depósito de la Presa Tres Caminos. Esta línea se une, a escasos 100 m antes de la caja de la Presa, con una línea de 20" que transvasa agua de los manantiales de Ajolotes y de Agua de Gallinas de la parte alta de la cuenca del Municipio de Ocoyoacac, en el Estado de México. De la caja de la Presa Tres Caminos parte una tubería de 12" hacia una caja a escasos 200 m de distancia, que hemos denominado caja de entrada Presa Tres Caminos. En esta caja confluyen también los volúmenes del arroyo Agua de Los Leones que son conducidos mediante una tubería de 12" de diámetro que parte del vertedor de la Presa Tres Caminos.

La caja de entrada Presa Tres Caminos se conecta con otra caja de distribución, que hemos llamado caja de salida Presa Tres Caminos, mediante una tubería de 20" y de 100 m de longitud. De esta última caja parte una tubería de 12" que conduce el agua para el abastecimiento de los habitantes de La Pila. También parte otra tubería de 20" que conduce el agua hacia el tanque de almacenamiento de San Lorenzo Acopilco, ubicado en la cabecera de la población. En esta caja se observa también una tercera tubería de 20" que se supone está clausurada más adelante y que conduciría agua hacia Santa Fe.

Finalmente, la tubería de 20" que conduce el agua hacia el tanque de almacenamiento de Acopilco, pasa por la caja de Paraje Cruz Blanca en donde se hace manejo de una válvula. El SACMEX asegura que toda el agua de la caja Paraje Cruz Blanca se destina al tanque de almacenamiento de San Lorenzo Acopilco.

En la cuenca alta de la microcuenca, a lo largo del cauce del arroyo Agua de Los Leones, existen cinco presas de mampostería; ninguna de estas estructuras cuenta con obra de toma funcionando, por lo que el escurrimiento del cauce se da por el vertedor. Tres de estas presas cuentan, escasos metros aguas arriba, con presas de gaviones para el control de azolves. Así mismo, se cuentan con trece presas de piedra acomodada a lo largo de la corriente principal, que también sirven para el control del material arrastrado por la corriente; al ubicarse estas estructuras de manera continua o escalonada, disminuyen la velocidad del agua, con lo que se reduce la erosión del cauce.

4.2 Agua de Los Pantanos.

Se cuenta con líneas de conducción de distintos diámetros, construidas con tubería de asbesto-cemento, acero y fierro galvanizado. Las líneas inician en la parte alta de la microcuenca con tuberías de 6" de diámetro y 100 m de longitud que se concentran en agua de los manantiales en una caja de almacenamiento. De esta caja parte una tubería principal de 4" de diámetro y 4 km de longitud, que se extiende paralelo al cauce del arroyo Agua de Los Pantanos y que cuenca con varias cajas de almacenamiento cuesta abajo en donde se descarga también agua entubada de los manantiales localizados a los costados del cauce del arroyo.

La entrega final de las aportaciones de los manantiales Agua de Los Leones se realiza en la caja de los límites de la zona urbana, a partir de donde se conduce por una tubería de 6" hacia el tanque de almacenamiento de San Lorenzo Acopilco. Esta última tubería, en su paso hacia el tanque de almacenamiento,

abastece de agua de manera local y clandestina a los asentamientos irregulares ubicados en las colonias Las Torres y La Cañada.

4.3 Manantial Agua Bendita.

En el costado izquierdo cuesta abajo del cauce del arroyo Agua de Los Leones, aproximadamente a 1 km de la caja de salida Presa Tres Caminos y pegado a la Carretera Federal México - Toluca, se ubica el manantial Agua Bendita. El aprovechamiento del agua de este manantial abastece los pobladores de la colonia Cola de Patos.

4.4 Manantial El Tigre.

En el costado izquierdo cuesta abajo del cauce del arroyo Agua de Los Pantanos, aproximadamente a 100 m de la caja final de entrega de los manantiales Agua de Los Pantanos, se ubica el manantial El Tigre. El aprovechamiento del agua de este manantial se conduce en tubería separada al tanque de San Lorenzo Acopilco.

5. Adquisición de Información.

Para cumplir con los alcances del presente estudio, se recopiló información morfológica y de algunos parámetros ambientales de las microcuencas, tanto para generar un sistema de información geográfica del área de estudio, como para cuantificar la producción y calidad del agua de los manantiales. En esta sección se detalla el tipo de información existente que se recopiló de diversas fuentes.

5.1 Recopilación de datos.

La información consistió de cartas topográficas y de datos de altitud, de mapas de la traza urbana, de información hidrométrica (caudales de las corrientes), climatológica (precipitación pluvial), de parámetros de calidad del agua de los manantiales y arroyos (temperatura, sólidos totales disueltos, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, alcalinidad) y de las características de la red de conducción del agua de los manantiales para su aprovechamiento, así como del suelo de conservación, áreas de recarga de acuíferos y áreas naturales protegidas. Se consultaron varias fuentes de información diversa asociada a la zona en estudio para recopilar los datos requeridos, entre ellas: estudios, documentos y mapas de la biblioteca y mapoteca del SACMEX, documento "Proyecto para la construcción del colector marginal en la Barranca Agua de Los

Leones, en la Delegación Cuajimalpa” de la empresa INESPROC S.A. DE C.V. Los detalles del tipo de información utilizada se describen a continuación.

◆ Topología

La información básica, como: localización geográfica (latitud y longitud) del área de estudio, curvas de nivel, corrientes superficiales naturales (perennes e intermitentes), manantiales, límites municipales, vías terrestres, poblaciones, etc., se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de las cartas topográficas 1:50000, disponibles en el Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI). Adicionalmente, se consultaron las ubicaciones de los Bancos de Nivel reportados por SACMEX en la Delegación Cuajimalpa y en la Delegación Magdalena Contreras, vecina al área de estudio. Asimismo, se utilizaron capas de datos del sistema de información geográfica de la Comisión de Recursos Naturales (CORENA) del Gobierno del Distrito Federal, correspondientes a curvas de nivel, cauces y/o barrancas, microcuencas, traza urbana, vegetación, erosión de suelos e infiltración.

◆ Climatología

La información de la precipitación pluvial fue consultada de las isoyetas anuales históricas reportadas por el SACMEX. Asimismo, se consultaron las isoyetas según regionalización de tormentas para la cuenca del Valle de México.

◆ Población

Los datos de población utilizados provienen del Censo de Población y Vivienda de 2010, disponibles en el INEGI.

5.2 Campaña de muestreo.

Adicionalmente, y ante la falta de información sobre los aforos y calidad del agua de los manantiales, se realizó una campaña de muestreo para obtener este tipo de datos, tanto en la microcuenca Agua de Los Leones como en la microcuenca Agua de Los Pantanos. Durante la campaña se realizaron mediciones simultáneas *in situ* de aforos y de la medición de parámetros de calidad del agua. Los detalles de la recopilación de los datos y de la campaña efectuada se describen a continuación.

Caudales

Para ingresar a la zona de suelo de conservación, así como para facilitar la realización de los recorridos de campo y ubicar los manantiales, siempre se estuvo acompañado de los Comuneros Agrarios de San Lorenzo de Acopilco.

En los sitios de aforo (Figura 2), se procedió a determinar el caudal que se conduce tanto en las tuberías como en el cauce de los arroyos. Se utilizaron las cajas de almacenamiento para aforar directamente la entrega de agua entubada, *i.e.*, se aplicó el método volumétrico, excepto en el caso de la estación Presa Tres Caminos, en donde la determinación del gasto se realizó mediante el método área-velocidad, en donde se midiendo la velocidad de la corriente de agua y el área de la sección transversal del flujo a lo largo de un canal de aforo. Los datos obtenidos para el aforo en Agua de Los Leones se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Aforos en los manantiales de Agua de Los Leones.

Estación	Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)	Caudal (l/s)
Presa Agua de Los Leones	18/abril/2012	19.27403	-99.32969	3,414	2.60
Caja Presa Agua de Los Leones	18/abril/2012	19.27640	-99.32977	3,411	2.30
Llano Grande	18/abril/2012	19.28254	-99.33161	3,345	5.40
Presa Tres Caminos	18/abril/2012	19.29787	-99.33037	3,222	20.90
Caja Presa Tres Caminos	18/abril/2012	19.29871	-99.33062	3,208	13.80
Caja de entrada Presa Tres Caminos	18/abril/2012	19.29878	-99.33021	3,190	34.70
Caja de salida Presa Tres Caminos	18/abril/2012	19.30009	-99.33018	3,185	4.20

En el caso del aforo en la caja de almacenamiento de la Presa Agua de Los Leones, el gasto medido considera las aportaciones tanto del entubamiento de la Presa como el afloramiento de los manantiales y el escurrimiento de la cañada. Por otra parte, el aforo en la caja de almacenamiento de Llano Grande considera, además del caudal registrado aguas arriba, en la caja de la Presa Agua de Los Leones, las contribuciones de las cañadas del Llanito que se incorporan a lo largo de la tubería que unen estas cajas de aforamiento. Cabe mencionar que el aforo en la caja Presa Tres Caminos, confluyen tanto el flujo de la tubería que viene de Llano Grande y el entubamiento de los manantiales de la zona del Municipio de Ocoyoacac del Estado de México, *v.gr.* manantiales Ajolotes, manantiales Agua de Gallinas. Asimismo, en la caja de entrada Presa Tres Caminos, se tienen las aportaciones de la caja Presa Tres Caminos y del vertedero de la Presa Tres Caminos que es el flujo del Arroyo de Los Leones que escurre desde aguas abajo de la Presa Agua de Los Leones. En el caso de caja de salida Presa Tres Caminos, el gasto aforado corresponde a la línea de salida hacia la Pila; en esta caja existe otra línea de salida activa hacia Acopilco.

En cuanto a los aforos en los manantiales Agua de Los Pantanos y de otros manantiales que aportan abastecimiento al tanque de San Lorenzo Acopilco y a algunas colonias de San Lorenzo Acopilco, se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Aforos en los manantiales de Agua de Los Pantanos y otros manantiales de San Lorenzo Acopilco.

Estación	Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Caudal (l/s)
Caja Agua de Los Pantanos	30/mayo/2012	19.321375	-99.332176	4.00
Manantial El Tigre	13/junio/2012	19.321500	-99.334300	1.10
Manantial Agua Bendita	13/junio/2012	19.300745	-99.340729	2.80

En el caso del aforo en la caja de almacenamiento de Agua de Los Pantanos, el gasto medido considera las aportaciones de ambas cañadas que delimitan la microcuenca (carretera y autopista México-Toluca) y que se incorporan a las cajas a lo largo de la tubería.

Calidad del agua

Se midieron parámetros físico-químicos, en 8 estaciones de muestreo, procedente de los manantiales de Acopilco (Cuadro 3). En el cuadro de registro de las estaciones de monitoreo se incluyen los datos medidos de temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), potencial hidrógeno (pH), oxígeno disuelto (OD), sólidos totales disueltos (STD) y de la alcalinidad.

Cuadro 3.- Registros de monitoreo del agua de manantiales de Acopilco.

Clave	Estación	Toma	Fecha	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m)
Ac1	Manantial Agua de Los Leones	Estanque	18/abril/2012	12:11	19.270872	-99.328343	3,464
Ac2	Manantial en grieta pared brecha	Fuga en tubo	18/abril/2012	13:10	19.274666	-99.329521	3,388
Ac3	Paraje Presa Tres Caminos	Caja	18/abril/2012	15:15	19.298190	-99.329759	3,151
Ac4	Caja de llegada Manantiales Ocoyoacac	Caja	18/abril/2012	16:04	19.297014	-99.329985	3,177
Ac5	Caja de la presa de mampostería	Canal	18/abril/2012	16:40	19.296174	-99.330021	3,196
Ac6	Tubo azul con tapa	Tubo	30/mayo/2012	14:01	19.293125	-99.331947	3,228
Aj1	Caja de visita Manantiales Ocoyoacac	Caja	30/mayo/2012	14:10	19.297014	-99.329985	3,177
P7	Caja inicial Agua de Los Pantanos 7	Caja	30/mayo/2012	14:45	19.292818	-99.331871	3,235

Clave	Estación	T	CE	pH	OD	STD	Alcalinidad
		(°C)	μ ohms/cm		mg/l	mg/l	mg CaCO ₃ /l
Ac1	Manantial Agua de Los Leones	7.8	50		7.53	20	30.00
Ac2	Manantial en grieta pared brecha	9.0	60		7.00	20	
Ac3	Paraje Presa Tres Caminos	9.2	50	4.6	8.57		35.41
Ac4	Caja de llegada Manantiales Ocoyoacac	9.4	50	5.4	6.61	20	
Ac5	Caja de la presa de mampostería	10.1	50	5.1	10.83	20	39.60
Ac6	Tubo azul con tapa	13.4	50	5.5	8.10	20	
Aj1	Caja de visita Manantiales Ocoyoacac	13.1	60	5.5	3.20	30	31.25
P7	Caja inicial Agua de Los Pantanos 7	13.2	100	5.0	2.40	50	50.00

La ubicación de los sitios de medición de parámetros físico-químicos del agua se muestra en la Figura 2. La mayoría de estas mediciones se realizaron en los aportes del Arroyo de Agua de Leones (Ac1, Ac2, Ac3, Ac5 y Ac6), dos (Ac4 y Aj1) en aportes de los manantial de la zona del Municipio de Ocoyoacac del Estado de México, *v.gr.* manantiales Ajolotes, manantiales Agua de Gallinas. Una sola estación de medición correspondió al manantial del Arroyo de Los Pantanos (P7).

Las muestras de agua se colectaron, siguiendo la Norma Oficial Mexicana NMX-AA-003-1980, en botellas de plástico previamente etiquetadas con la ubicación del pozo y fecha. El contenido de una de las botellas se utilizó para determinar su pH, conductividad y temperatura *in situ*. Para ello se empleo un conductivímetro portátil PC16, marca Conductronic, con un electrodo de vidrio de rango de 0 a 14 pH y precisión de ± 0.02 pH; 0 mg/l a 19.99 g/l en rango de conductividad con 0.1 mg/l de precisión; -50° a 150°C de temperatura y precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Las botellas se conservaron refrigeradas con hielo y se transportaron al Laboratorio, para determinar las características fisicoquímicas, de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas (NMX) de análisis.

6. Análisis de Datos.

Toda la información adquirida se verificó por posibles errores de precisión posicional (para las bases digitales no existe dado que no hay distorsión ni disminución), variación de las fuentes (chechado en cada base de datos), numéricos por computadora (corregido y verificado mediante la impresión del mapa). Así mismo los errores de precisión de contenido (atributos adheridos a los puntos, líneas y áreas), defectos del análisis topológico (algoritmos asociados a aplicaciones) y de clasificación y generalización (métodos de clasificación e interpolación desde puntos a áreas), todos ellos se corrigieron para generar una base de datos confiables a partir de la cual se elaboraron los mapas y cálculos de caudales y calidad del agua de los manantiales de Acopilco. Los resultados de este análisis de datos se describen a continuación.

6.1. Sistema de Información Geográfico.

La información tabular recopilada se convirtió a un formato digital que puede ser utilizado en el Sistema de Información Geográfico (SIG). La información cartográfica se procesó digitalmente mediante un software especializado que permite integrar este tipo de información a un formato computarizado llamado PC ARC/INFO ver. 3.4.2b (386) y ARC/INFO 7.0.2 instalados en computadoras Compaq PC (486) y estaciones de trabajo de Silicon Graphics respectivamente, del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota del

Departamento de Geografía, de la UAM-Cuajimalpa. La información tabular fue relacionada a un área cartográfica digital por medio de puntos. La información que representa características por áreas (polígonos) se procesó digitalmente y se relacionó con sus respectivas bases de datos para reconocer los atributos de las distintas zonas. La información digital recopilada fue procesada a archivos exportables para ARC/INFO y en algunos casos tuvo que ser georreferenciada.

Con esta información se realizaron procesos analíticos con la finalidad de estructurar capas de información a partir de datos puntuales de campo, de esta manera se generó un sistema eficiente de información georreferenciada como la plataforma de apoyo a los cálculos de aforos y calidad del agua de los manantiales de Acopilco. En este caso, el SIG actúa como un instrumento de consulta, almacenamiento y disponibilidad de información de la infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los manantiales del Arroyo Agua de Los Leones y del Arroyo Agua de Los Pantanos. Toda esta información es organizada en el SIG como capas de datos, generalmente llamados datos primarios ya que tienen la función de ser la fuente para la generación de nuevas capas de información a partir de procesos analíticos.

6.2. Volúmenes de manantiales.

Partiendo de los aforos realizados en el sistema de aprovechamiento de los manantiales de Acopilco, durante el estiaje del 2012 (Cuadros 1 y 2), se procedió a analizar los volúmenes de agua que se aportan al tanque de almacenamiento de San Lorenzo Acopilco que abastece de agua potable a la población. Los volúmenes calculados para el aprovechamiento de los manantiales del Arroyo Agua de Los Leones se presentan en la Figura 3.

La Figura 3 indica que, en la caja de salida de la Presa Tres Caminos, el volumen de abastecimiento de Agua de Los Leones a la población de Acopilco, durante el estiaje del 2012, fue de 30.5 l/s. Este flujo se forma con las contribuciones de los aportes de los manantiales y del arroyo de la cuenca alta de Agua de Los Leones (4.9 l/s), así como de los manantiales del Llanito (0.5 l/s). También se tiene la contribución del agua del cauce del Arroyo de Agua de Los Leones que aporta 20.9 l/s, a partir de la Presa Agua de Leones hasta la Presa Tres Caminos. Asimismo, se cuenta con el transvase del agua de los manantiales Agua de Ajolotes y Agua de Gallinas (8.4 l/s), del municipio de Ocoyoacac del Estado de México, que se incorpora a escasos metros arriba de la caja Presa Tres Caminos. Parte del volumen de agua colectado en este sistema Agua de Los Leones, es destinado para el abastecimiento de los habitantes de La Pila, en una cantidad de 4.2 l/s.

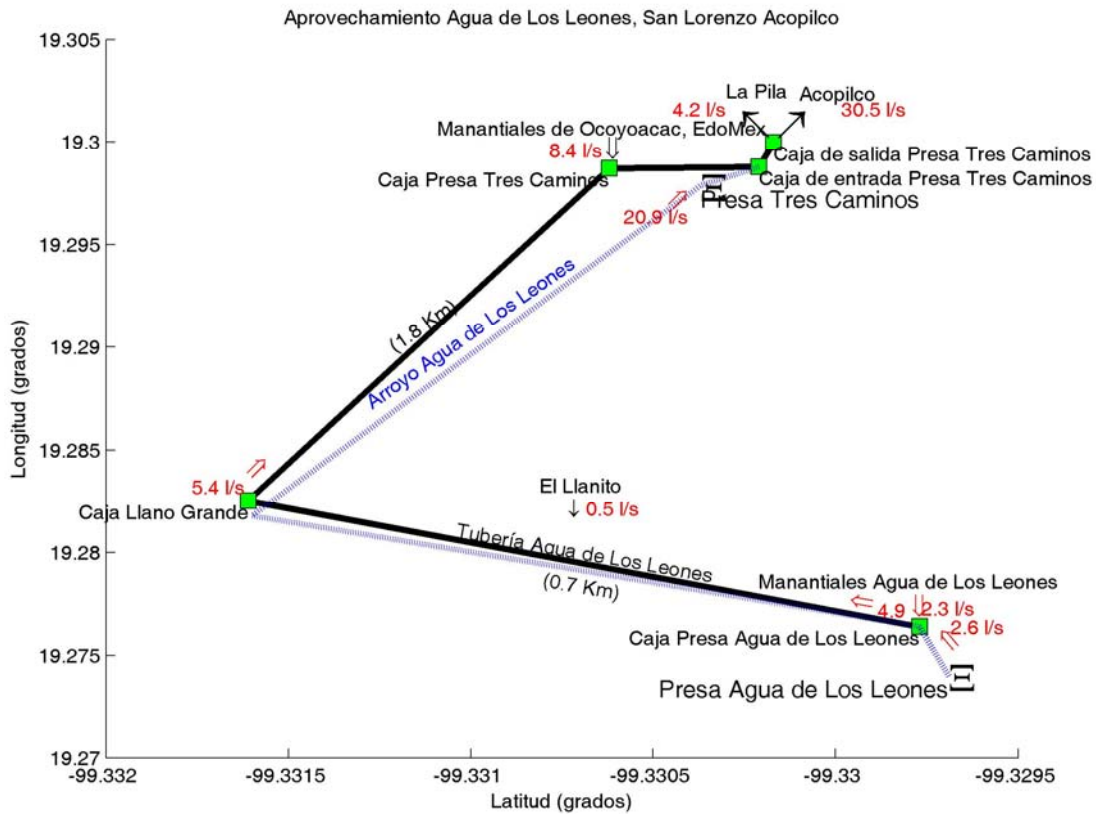


Figura 3.- Caudales durante el estiaje del 2012 en Agua de Los Leones.

Por otro lado, se observa en la Figura 4 que la contribución de agua, a la población de Acopilco, por parte de los aprovechamientos de los manantiales Agua de Los Pantanos, es de 4 l/s. También se aportan al tanque de San Lorenzo Acopilco un volumen de 1.1 l/s por parte del manantial El Tigre. El aporte del manantial Agua Bendita ($2.8 \text{ m}^3/\text{s}$) es para el abastecimiento exclusivo de la colonia Cola de Patos, así como el aporte del manantial La Olla (0.8 l/s) lo es solo para colonias específicas.

En total se tiene que el tanque de almacenamiento de San Lorenzo Acopilco recibe 35.6 l/s para el abastecimiento de los habitantes de Acopilco durante el estiaje. El aprovechamiento de los manantiales Agua de Los Leones aporta el 85.7% y el resto (14.3%) los manantiales Agua de Los Pantanos, incluyendo el manantial El Tigre.

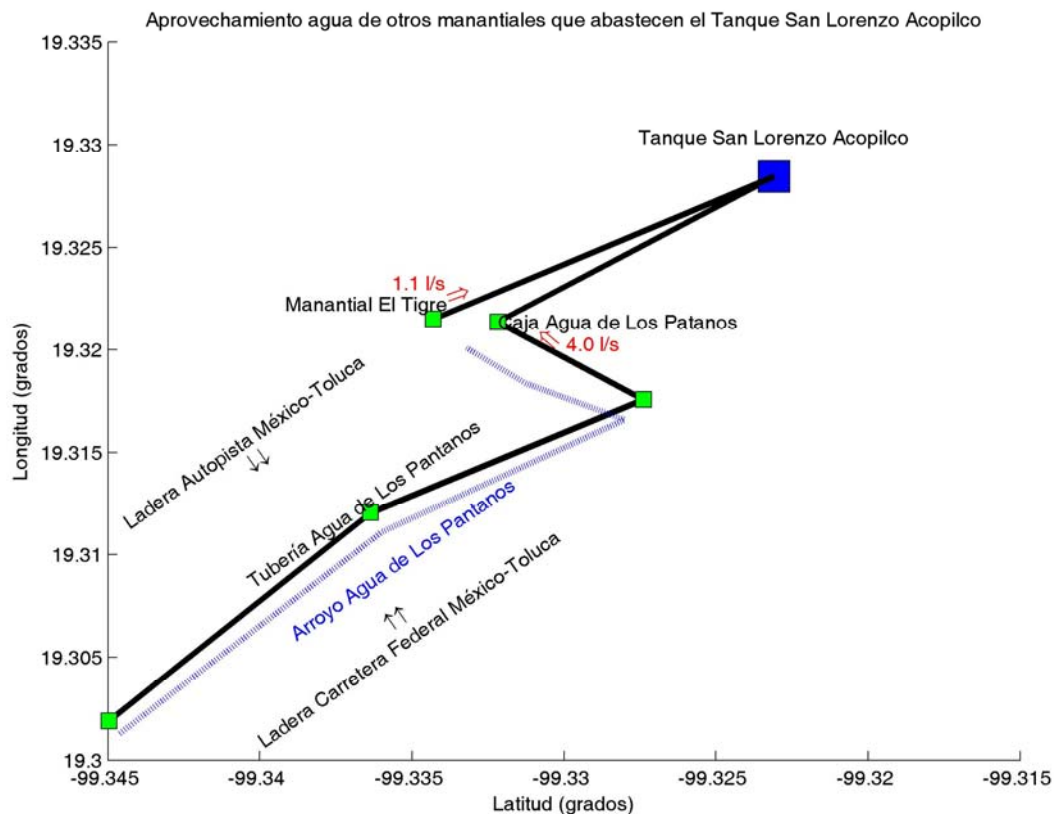


Figura 4.- Caudales durante el estiaje del 2012 en Agua de Los Pantanos.

6.3. Calidad del agua.

Las características fisicoquímicas del agua de los manantiales de Acopilco, están reportadas en las hojas de resultados de los análisis practicados a las muestras de agua colectadas (Cuadro 3). En todos los casos de los parámetros fisicoquímicos y de los manantiales, se observa que el agua cumple con la norma de calidad potable¹. Es importante señalar que las concentraciones de conductividad son un orden de magnitudes más bajas que las establecidas por la norma, lo que indica la alta calidad del agua de los manantiales de Acopilco por su bajo contenido de sales.

Por otra parte se tiene que los resultados de pH, para los manantiales de Acopilco, muestran en todos los casos valores del intervalo de pH ácido (Figura 5); siendo menor valor de pH para la muestra de aguas abajo, lo que indica el intercambio de CO₂ con la exposición a la atmósfera del agua de los manantiales. Los valores de

¹ Límites máximos permitidos para calidad del agua potable, según la Norma Oficial Mexicana NOM127: ph entre 6.5 a 8.5; STD no mayor de 1,000 mg/l; Alcalinidad no mayor de 400 mg CaCO₃/l; conductividad eléctrica no mayor de 500 μ ohms/cm.

pH registrados no mantienen relación directa con los valores de alcalinidad que son muy bajos y se deben únicamente al intercambio de CO₂ (Figura 6).

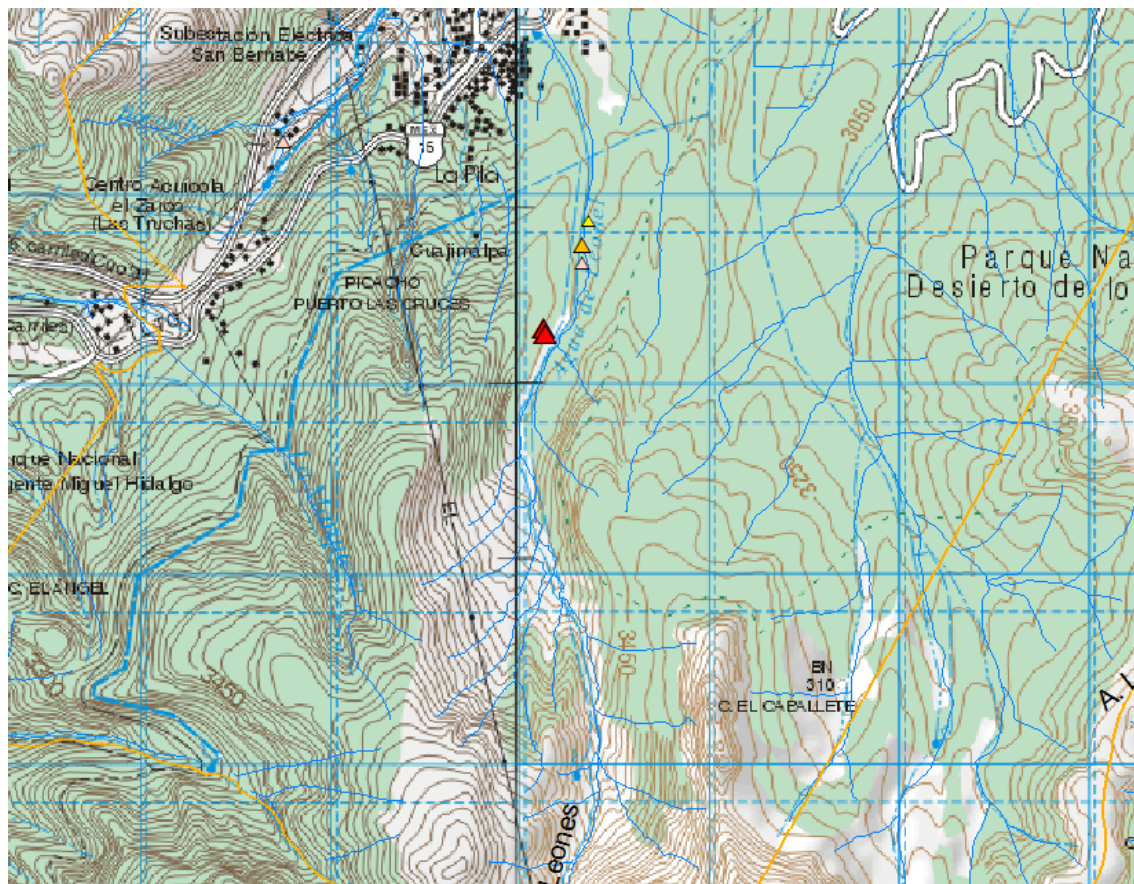


Figura 5. Variación de los valores de pH en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo se presentan valores de 4.5 a 4.8, en rosa valores de 4.8 a 5.1, en naranja valores de 5.1 a 5.4 y en rojo valores de 5.4 a 5.7.

En este intercambio con la atmósfera se tiene que el agua de los manantiales de Agua de Los Leones, gana oxígeno toda vez que sus máximos se presentan en las cajas de almacenamiento, en donde el agua es expuesta al intercambio atmosférico (Figura 7). En el caso del agua del manantial Agua de Los Pantanos, la baja concentración de oxígeno que presenta, indica la acción de un proceso de consumo de oxígeno, como pudiera ser la respiración de fitoplancton presente en el agua.

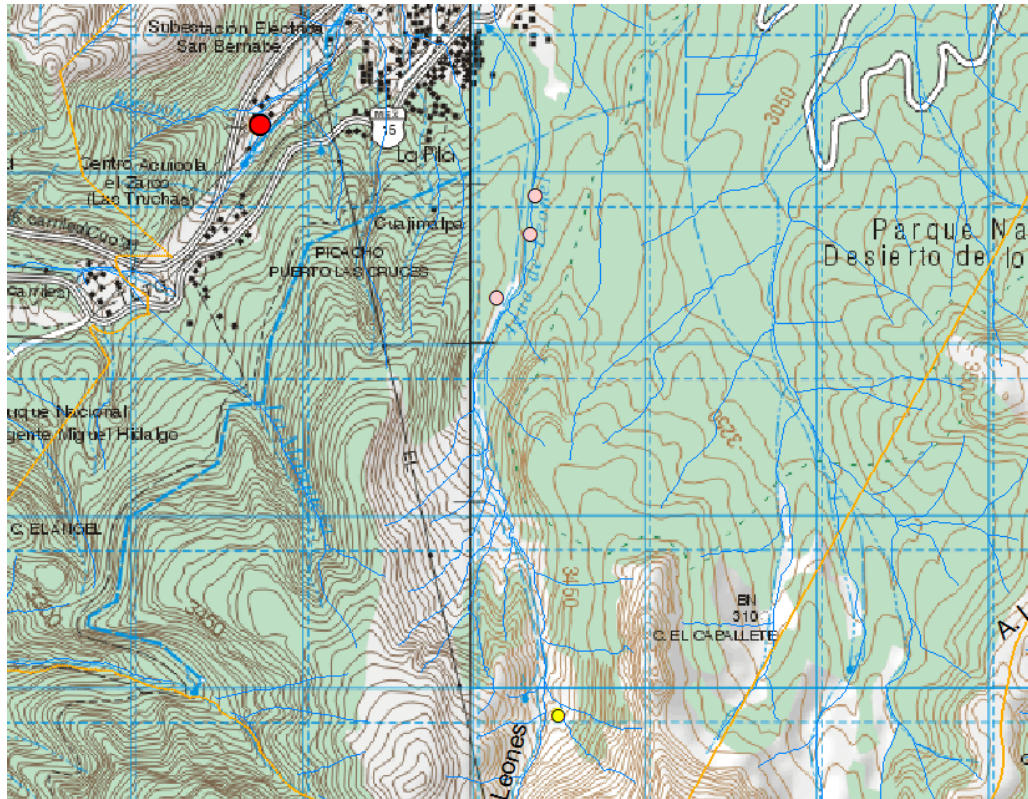


Figura 6. Variación de los valores de la Alcalinidad ($\text{mg CaCO}_3/\text{l}$) medida en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo valores de 20 a 30 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$, en naranja valores de 31 a 40 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$ y en rojo valores de 41 a 50 $\text{mg CaCO}_3/\text{l}$.

En todos los casos el agua proveniente de los manantiales casi no presenta turbiedad, debido a la baja concentración de sales. Un indicador de la turbiedad es la concentración de sólidos totales (Figura 8), la cual muestra que el agua de los manantiales presenta concentraciones por debajo de los 400 mg/l , que aumenta a medida que el agua es transportada por las tuberías cuesta abajo. Esto implica que el agua de los manantiales tiene valores bajos de sales y ésta se incrementa una vez que está en escurrimiento en la tubería, sin rebasar los límites permisibles.

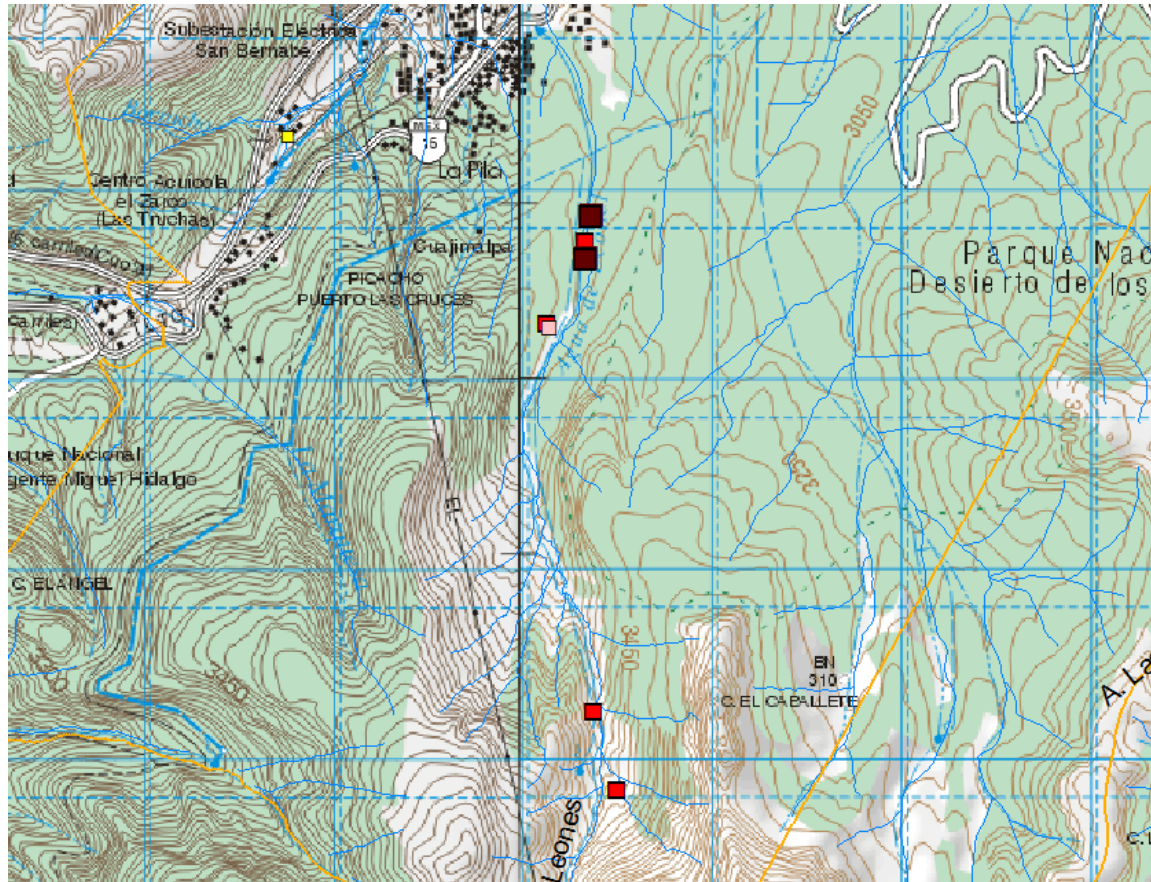


Figura 7. Variación de los valores de Oxígeno Disuelto (mg/l) medida en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo valores de 1 a 2 mg/l, en rosa de 2.1 a 4 mg/l, naranja valores de 4.1 a 6 mg/l, en rojo valores de 6.1 a 8 mg/l, y en marrón de 8.1 a 11 mg/l.

En particular, en todos los manantiales de Acopilco se observa que la conductividad eléctrica es inferior al límite máximo permitido ($500 \mu \text{ ohms/cm}$); de manera que la presencia de sales es mínima (Figura 9). Observándose un ligero ascenso en el valor de la conductividad eléctrica en el manantial Agua de Los Pantanos, debido a que no se tiene 100% de cobertura de tubería en el aprovechamiento del agua de este manantial.

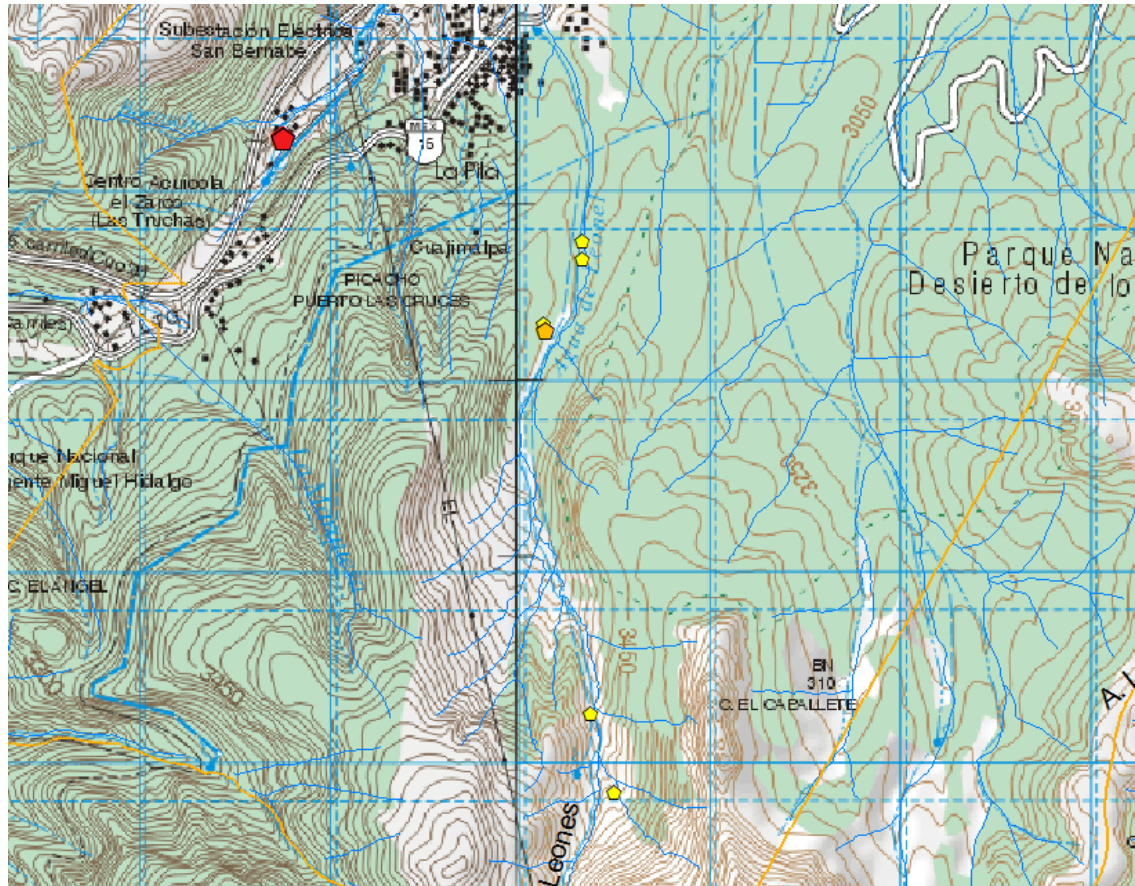


Figura 8. Variación de los valores de Sólidos Totales Disueltos (mg/l) medida en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo valores de 0 a 20 mg /l, en naranja valores de 21 a 40 mg /l y en rojo valores de 41 a 60 mg /l.

Con la finalidad de evaluar los cambios en la cinética de los procesos químicos se analizó la temperatura que presenta el agua de los manantiales de Acopilco (Figura 10). Se encontró que en general la temperatura del agua de los manantiales es templada, variando entre 9 y 13 °C; el agua del manantial Agua de Los Leones prácticamente conserva su temperatura a lo largo de su curso, por otro lado, el agua del manantial Agua de Los Pantanos es un par de grados centígrados de mayor temperatura, tal vez por proceder de sistemas de flujo más superficiales que del Agua de Los Leones.

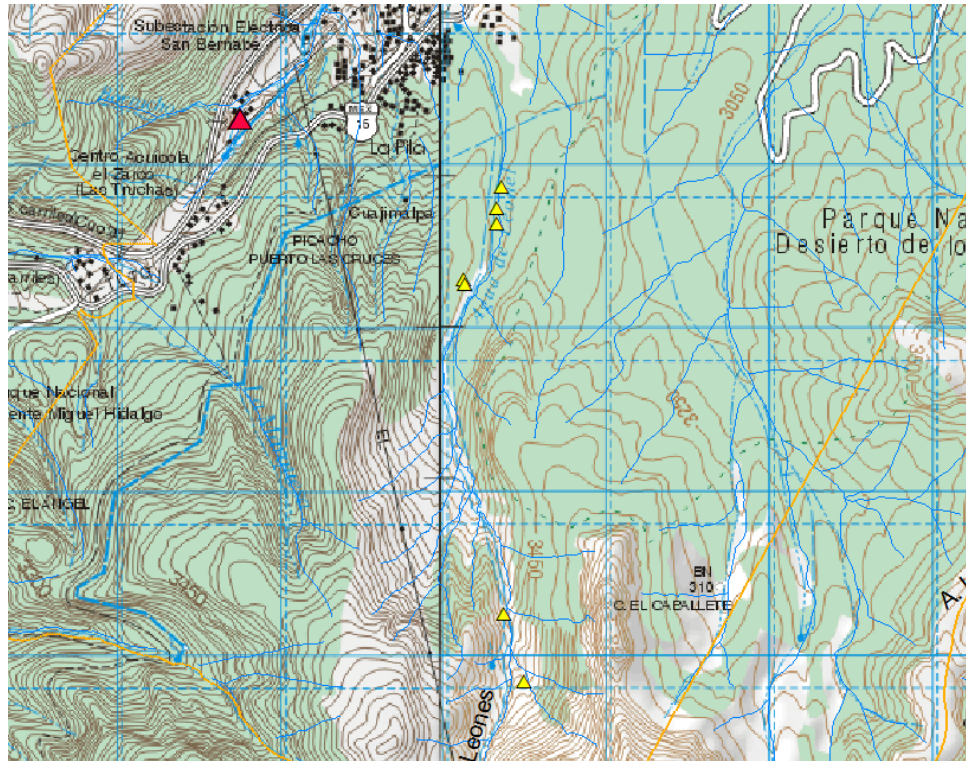


Figura 9. Variación de los valores de Conductividad Eléctrica (μ ohms/cm) medida en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo valores de 40 a 60 μ ohms/cm, en naranja valores de 61 a 80 μ ohms/cm y en rojo valores de 81 a 100 μ ohms/cm.

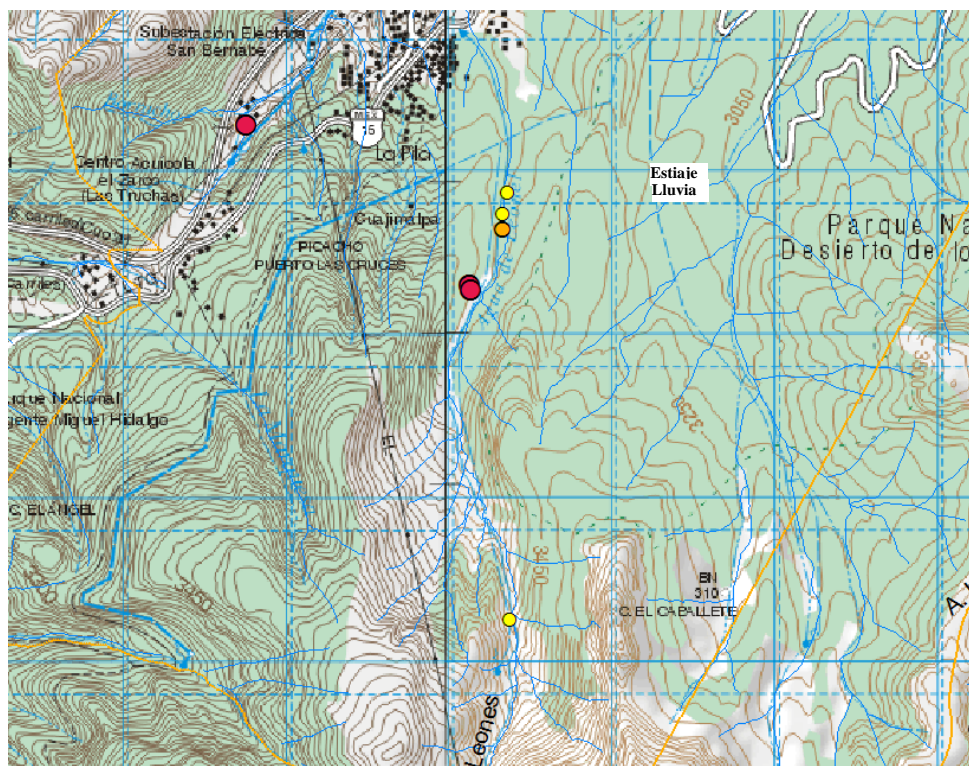


Figura 10. Variación de la Temperatura ($^{\circ}$ C) en el agua de los manantiales de Acopilco. En color amarillo valores de 9 $^{\circ}$ C, naranja de 10 $^{\circ}$ C y en marrón valores de 11 a 13 $^{\circ}$ C.

7. Fuente de abastecimiento y demanda de agua

En esta sección se describen las características del acuífero que contiene los manantiales Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos, con la finalidad de conocer la fuente de abastecimiento de agua a la población de Acopilco. Asimismo, se calcula la demanda de agua potable de la población con el fin de conocer el déficit que se tiene con el abastecimiento de los manantiales.

7.1. Comportamiento hidráulico de los manantiales.

La geología regional de la Sierra de la Cruces, en la que se localizan los manantiales de San Lorenzo Acopilco, indica que los manantiales tienen lugar cuando aflora la losa rocosa sobre la cual fluye el agua subterránea. Esta losa está conformada por basaltos y andesitas basálticas del cuaternario, intercaladas con capas de piroclastos (tobas y lahares), además de suelos orgánicos que constituyen un acuífero superficial de poco espesor.

Los patrones de flujo subterráneo indican que el transporte de las aguas de recarga está caracterizado por trayectorias iniciadas en la parte alta de la Sierra de las Cruces, específicamente en el cerro La Palma, que representa el límite del Distrito Federal con el Estado de México. Con trayectoria de dirección sur - norte, el flujo subterráneo se expresa en la superficie a través de los manantiales Agua de Los Leones ubicado dentro de la microcuenca de San Lorenzo Acopilco, y por los manantiales Agua de Gallinas, Agua de Las Peñas y Ruedas, en la parte externa. En los recorridos realizados sobre el área de afloramiento de los manantiales Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos, se observó que la losa basáltica sobre la que fluye el agua subterránea en el subsuelo, presenta un alto grado de fracturamiento. Sin embargo, las fracturas se encuentran rellenas por arcillas de alteración, lo que le confiere a la losa rocosa una capa inferior de confinamiento del acuífero superficial de baja permeabilidad. Mientras que da lugar al flujo subterráneo la alta permeabilidad de las capas granulares de piroclastos, lahares y suelos orgánicos que sobreyacen la losa rocosa.

La información documentada sobre el subsuelo, mediante sondeos geotécnicos de penetración estándar (SPT) realizados en las cercanías de la población de Acopilco, muestran una capa de por lo menos 7 metros de capas limo-arenosas con intercalación de rocas andesíticas que confirma el modelo estimado de flujo del agua subterránea a través de materiales granulares tobáceos y aluviales.

7.2. Demanda de agua potable.

En el último Censo de Población y Vivienda levantado por el INEGI en el 2010, se registró una población de 23,037 habitantes para la comunicad de San Lorenzo Acopilco. La demanda de agua para esta población (l/día), suponiendo 100% de cobertura en el servicio, es el producto del número de habitantes por la dotación del líquido, *i.e.*,

$$\text{Demanda} = \text{Dotación} * \text{Población}$$

En cuando a la *Dotación* (l/hab/día), ésta considera tanto el requerimiento de agua que por norma necesita la población (*Requerimiento* igual a 120 l/hab/día) como las pérdidas de agua por fugas en la red de distribución, *i.e.*, la eficiencia de la distribución expresada en porcentaje):

$$\text{Dotación} = \text{Requerimiento}/\text{Eficiencia}$$

Ahora bien, si consideramos una eficiencia del 60% (*i.e.*, requerimiento equivalente a 200 l/hab/día), tenemos que la demanda de agua para la población de San Lorenzo Acopilco es de 4,607,400 litros diarios, *i.e.* 53 l/s. Por otro lado, la distribución de agua potable para esta población proviene del Tanque de almacenamiento San Lorenzo Acopilco, el cual recibe un total de 35.6 l/s. Por lo que existe un déficit de abastecimiento de 17.4 l/s durante el estiaje.

Este déficit de abastecimiento, durante el estiaje, para la población de Acopilco puede fácilmente ser compensado si se detectan y reparan las fugas en la red de distribución para alcanzar una eficiencia del 90%.

8. Alternativas de sustentabilidad hídrica para satisfacer la demanda.

El déficit en el abastecimiento de agua durante el estiaje (17.4 l/s) para la población de San Lorenzo Acopilco, puede ser compensado de varias maneras. Aquí se describen algunas alternativas que tienden así la sustentabilidad hídrica en la subcuenca de San Lorenzo Acopilco.

- A. Reparación de fugas.- Se requiere un programa de detección y reparación de fugas, especialmente aquellas fugas no visibles de la red de distribución secundaria. Se estima que actualmente se pierden por fugas casi la mitad (40%) del volumen de agua suministrado. Con una eficiencia del 90% en la distribución de agua, *i.e.*, pérdidas por fugas del 10% de los volúmenes suministrados, se podría balancear el déficit de abastecimiento durante el estiaje.

- B. Dosificación del requerimiento.- Esta alternativa considera que se tenga que reducir el requerimiento de agua de 120 a 80 l/hab/día durante el estiaje, para reducir la demanda a los volúmenes suministrado por los manantiales, considerando que no hay reparación de fugas en la red de distribución. La manera para garantizar este requerimiento de agua es mediante la instalación de válvulas dosificadoras en vez de medidores en las casas, que solo dejen pasar (dosificar) 80 l/hab/día. Esto conlleva a generar una nueva cultura de agua toda vez que se necesitará hacer un uso más eficiente del agua.
- C. Explorar otros manantiales.- Esta alternativa consiste en realizar un estudio de exploración para detectar otros manantiales de la cuenca San Lorenzo Acopilco que no están siendo aprovechados y que pueden aportar el volumen de déficit durante el estiaje.
- D. Almacenamiento de agua.- Aquí se considera la construcción de una presa que almacene los volúmenes excedentes de los aprovechamientos durante las avenidas para ser utilizados durante el estiaje.
- E. Incremento en la recarga del acuífero.- Se requiere la construcción de ollas de aguas y presas de gavión, así como de la reforestación y conservación en la zona de recarga, para que se tenga mayor retención del agua durante los escurrimientos de las avenidas y se aumente la recarga del acuífero. Es necesario realizar mediciones durante el estiaje de la producción de los manantiales considerando la construcción de obras de retención de agua.

9. Conclusiones.

Los resultados obtenidos de las campañas de mediciones de los aforos en los aprovechamientos de los manantiales Agua de Los Leones y Agua de Los Pantanos, indican que los aportes de agua de estos aprovechamientos presentan un déficit de 17.4 l/s durante el estiaje para cubrir la demanda de agua de los habitantes de San Lorenzo Acopilco. Este déficit es generado no por la falta de recurso hídrico, sino por la eficiencia en la distribución del agua potable (60%), toda vez que para una eficiencia del 90% en la distribución no existe tal déficit.

Se sugiere como medida prioritaria para satisfacer la demanda de agua durante el estiaje en Acopilco, implementar un programa de detección y reparación de fugas, sino es que uno de sustitución de tubería, para lograr una eficiencia del 90% en la distribución de agua.

10. Bibliografía consultada.

- Conservación del Arrollo Agua de Leones. Comisión Nacional del Agua. Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Delegación Cuajimalpa. Agosto de 2009.
- Tabulador General de Precios Unitarios 2009. Gobierno del Distrito Federal. Secretaría de Obras y Servicios. Coordinación Técnica. Marzo de 2009.
- Manual del Usuario del Programa MACRA2 2002 GABION WEIRS. MACCAFERRI. 2002.
- Normas de Proyecto para Obras de Alcantarillado Sanitario en Localidades Urbanas de la República Mexicana. UNAM, Facultad de Ingeniería. Noviembre de 2000.
- Normas de Construcción del Gobierno del Distrito Federal. Proyectos Ejecutivos Urbanización. Libro 2, Tomo II, Parte 03. Gobierno del Distrito Federal, Abril de 2000.
- Normas de Construcción del Gobierno del Distrito Federal. Construcción - Urbanización. Libro 3 Tomo I. Gobierno del Distrito Federal, Abril de 2000.
- Hidráulica General, Volumen 1. Gilberto Sotelo Ávila. Ed. Limusa, México, 2000.
- Fundamentos de Hidrología de Superficie. Francisco Javier Aparicio Mijares. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México D.F., 1996.
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y Normas Técnicas Complementarias 1995. Gobierno del Distrito Federal, 1995.
- Túneles Mineros. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España. Madrid, 1991.
- Foundation Analysis and Desing. Joseph E. Bowles. Mc Graw Hill Internacional, 4ª Edición. Singapore, 1988.
- El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana del Valle de México. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. México, D.F., 1978.
- Carta Geológico-Minera Ciuda de México E14-2. 1997. Servicio Geológico Mexicano. 2ª edición. Escala de 1:250.

