



U. N. A. M.
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA
PORCIÓN SURESTE DE LA PLANICIE DE TEXCOCO,
MÉXICO, PARA ESTABLECER SITOS DE RECARGA
ARTIFICIAL AL ACUÍFERO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
INGENIERO GEÓLOGO

P R E S E N T A

EFRAÍN MENDOZA ARCHUNDIA

MÉXICO, D.F.

OCTUBRE, 2012



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.

Agradezco incondicionalmente a mis padres que gracias a ellos soy lo que he podido alcanzar, gracias a ellos logré un sueño que pocos cumplimos y ahora es momento de mostrarles el fruto de lo que sembraron.

A mis hermanas por esperarme con un abrazo cuando regresaba de mis prácticas.

A Carolina por estar conmigo en el momento más anhelado que un estudiante quiere alcanzar y por darme el fruto más apreciado que cualquier ser humano desea en esta vida.

Al Dr. Rafael Huízar por ser un maestro de vida y de carrera, por haber aceptado ser mi director de tesis y que gracias a él he podido dar un gran salto en la vida al presentar este trabajo.

A mis amigos de la carrera Nancy, Alonso y Oswaldo gracias por brindarme su apoyo.

Le agradezco a la vida por este maravilloso momento.

ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMEN	vii
OBJETIVOS Y ALCANCES	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
2.1. Demanda de los Recursos Hídricos	3
2.2. Agua Residual	4
2.3. Extracción Excesiva de Agua de los acuíferos	6
2.4. Recarga Artificial	7
3. MARCO TEÓRICO	16
3.1. Acuífero	16
3.2. Infiltración y recarga	17
3.3. Recarga Natural (RN)	19
3.4. Recarga Artificial (AR)	20
3.5. Metodología	48
4. MEDIO FÍSICO	57
4.1. Localización	57
4.2. Clima	58
4.3. Geomorfología	64
4.4. Hidrología	66
4.5. Geología	67
4.6. Estratigrafía	70
4.7. Geología Estructural	77
4.8. Geología Local	78
5. HIDROGEOLOGÍA	91
5.1. Unidades Hidrogeológicas	91
5.2. Potenciometría	99
6. HIDROGEOQUÍMICA	110
6.1. Características del Agua Subterránea	110
6.2. Principales Constituyentes Químicos del Agua Subterránea	113
6.3. Análisis de la Información Hidrogeoquímica	117

7. UBICACIÓN DEL SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL	138
7.1. Condicionantes	138
7.2. Ubicación Regional para Realizar Proyectos de Recarga	138
7.3. Localización de sitios para Recarga (Propuesta)	141
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
9. TABLA RESUMEN	154
10. BIBLIOGRAFÍA	156

ÍNDICE DE FIGURAS

	PAGINA
Figura 1. Consumo hídrico de cada país	3
Figura 2. Mapa que muestra los 101 acuíferos sobreexplotados	7
Figura 3. Balsa de infiltración, en Sud África	10
Figura 4. Esquema simplificado de un acuífero libre y confinado	17
Figura 5. Esquema simplificado de un proyecto de recarga artificial de superficie	24
Figura 6. Esquema simplificado de un proyecto de recarga artificial a profundidad	25
Figura 7. Muros en forma de “L” para recarga	29
Figura 8. Diagrama que representa una instalación y funcionamiento del sistema ASR	33
Figura 9. Aplicación de un TEM en el área de estudio	51
Figura 10. Celda de Aislamiento y dispositivos para la medición de diversos parámetros físicos del agua	54
Figura 11. Análisis de la alcalinidad del agua	55
Figura 12. Localización del área de estudio dentro del acuífero de Texcoco y este dentro de la región hidrológica – administrativa XIII	57
Figura 13. Formación de tolvánicas en la planicie de Texcoco	60
Figura 14. Unidades del tipo de relieve exógeno en la Planicie de Texcoco	65
Figura 15. Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana	68
Figura 16. Distribución de los centros monogenéticos y estratovolcanes al centro de la FVTM	68
Figura 17. Esfuerzos horizontales de la FVTM	69
Figura 18. Calentamiento de una zona volcánica	70
Figura 19. Localización de las secciones geoeléctricas	79
Figura 20. Arreglo de la bobina coincidente	80
Figura 21. Ubicación del perfil de resistividad 1 (TEM'S 8-7-5-6-4)	81
Figura 22. Perfil de resistividad 1	82
Figura 23. Ubicación del perfil de resistividad 2 (TEM'S 4-6-9-10)	82
Figura 24. Perfil de resistividad 2	83
Figura 25. Ubicación del perfil de resistividad 3 (TEM'S 8-7-9)	83
Figura 26. Perfil de resistividad 3	84

Figura 27. Sección hidrogeológica 1	94
Figura 28. Sección hidrogeológica 2	95
Figura 29. Sección hidrogeológica 3	96
Figura 30. Sección hidrogeológica 4	97
Figura 31. Configuración del nivel estatico para el año 1990	101
Figura 32. Configuración del nivel estatico para el año 1993	102
Figura 33. Configuración del nivel estatico para el año 1995	103
Figura 34. Configuración del nivel estatico para el año 2000	104
Figura 35. Configuración del nivel estatico para el año 2002	105
Figura 36. Configuración del nivel estatico para el año 2004	106
Figura 37. Configuración del nivel estatico para el año 2006	107
Figura 38. Configuración del nivel estatico para el año 2008	108
Figura 39. Configuración del nivel estatico para el año 2010	109
Figura 40. Esquemas comunes de los diagramas o poligonos de Stiff	117
Figura 41. Mineralización del agua para el año 1990 en temporada húmeda	122
Figura 42. Mineralización del agua para el año 1990 en temporada de estiaje	123
Figura 43. Mineralización del agua para el año 1996 en temporada húmeda	123
Figura 44. Mineralización del agua para el año 1996 en temporada de estiaje	124
Figura 45. Mineralización del agua para el año 2000 en temporada húmeda	124
Figura 46. Mineralización del agua para el año 2000 en temporada de estiaje	125
Figura 47. Mineralización del agua para el año 2003 en temporada húmeda	125
Figura 48. Mineralización del agua para el año 2003 en temporada de estiaje	126
Figura 49. Mineralización del agua para el año 2010 en temporada húmeda	126
Figura 50. Mineralización del agua para el año 2010 en temporada de estiaje	127
Figura 51. Área destinada al análisis para la ubicación de sitios de recarga artificial	139
Figura 52. Porción E y W separados a la cota 2,243 m.s.n.m.	140
Figura 53. Primer sitio propuesto de recarga artificial	143
Figura 54. Ubicación del sitio de recarga a profundidad 1	144
Figura 55. Segundo sitio propuesto de recarga artificial	146
Figura 56. Tercer sitio propuesto de recarga artificial	147
Figura 57. Ubicación del sitio de recarga a profundidad 3	148
Figura 58. Cuarto sitio propuesto de recarga artificial	149
Figura 59. Ubicación espacial de los sitios de recarga propuestos	150

ÍNDICE DE TABLAS

	PAGINA
Tabla 1. Métodos de recarga artificial	28
Tabla 2. Métodos de prueba y muestreo para agua residual	40
Tabla 3. Calidad del agua residual tratada para la recarga artificial	41
Tabla 4 (a). Límites máximos permisibles de la NOM-014-CONAGUA	42
Tabla 4 (b). Límites máximos permisibles de la NOM-014-CONAGUA	43
Tabla 5. Límites máximos permisibles de contaminantes	44
Tabla 6. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros de NOM-001-ECOL-1996	45
Tabla 7-a. Límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1	46
Tabla 7-b. Límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1	47
Tabla 8. Coordenadas de las estaciones meteorológicas utilizadas	59
Tabla 9. Datos de precipitación (1999-2009) por estaciones en mm	63
Tabla 10. Datos de temperatura Media Mensual (1999-2009) por estaciones en °C	63
Tabla 11. Unidades estratigráficas en la cuenca de México, en rojo se muestran aquellas que pertenecen a la zona de estudio	73
Tabla 12. Coordenadas de los TEM'S seleccionados.	78
Tabla 13. Descripción de las unidades litológicas en sus perfiles asociados	86
Tabla 14. Composición mineral de los sedimentos que constituyen los depósitos lacustres	89
Tabla 15. Posible comportamiento de las unidades litológicas	98

ÍNDICE DE GRAFICAS

	PAGINA
Grafica 1. Medias mensuales de precipitacion y temperatura	61
Grafica 2. Medias mensuales de precipitación-temperatura	62
Grafica 3. Información química del pozo L.N.C. 1	128
Grafica 4. Información química del pozo L.N.C. 7	129
Grafica 5. Información química del pozo PEÑÓN 3	130
Grafica 6. Información química del pozo PEÑÓN 4	131
Grafica 7. Información química del pozo PEÑÓN-TEXCOCO 19	132
Grafica 8. Información química del pozo PEÑÓN-TEXCOCO 20	133
Grafica 9. Información química del pozo PURÍSIMA IZTAPALAPA 7	134
Grafica 10. Información química del pozo IZTAPALAPA11	135
Grafica 11. Información química del pozo A. ORIENTAL 4.	136
Grafica 12. Información química del pozo IZTAPALAPA 1.	137

RESUMEN

El Valle de México, gracias a su ubicación espacial, a través de su historia ha sufrido diversos problemas referentes al agua. Hoy en día, el problema de abastecimiento de agua en el Valle cada vez se agrava de manera incontrolada, provocando hundimiento en su suelo arcilloso y por ello causa diversos problemas económicos que directamente afectan a su población.

El sistema acuífero de la Cuenca de México, presenta un comportamiento hidrodinámico definido gracias a las características geomorfológicas, tectónicas, estructurales, estratigráficas y litológicas incluidas en su marco geológico.

En la porción oriental del valle de México, éste problema se agrava cada vez más, por lo que es necesario el implemento de nuevas tecnologías para poder enfrentar éste problema. El apoyo de sistemas ingenieriles como la Recarga artificial al Acuífero, ayudará en gran manera a detener el hundimiento del terreno, apoyara al aumento del volumen del agua subterránea existente, reducirá el contenido salino del agua mejorando la calidad de la misma y apoyará en la temporada de estiaje al abastecimiento de agua en éste sector.

Para ello el análisis climatológico, geológico/estratigráfico, piezométrico y químico en conjunto ayuda a identificar los sitios probables para implementar un proyecto de Recarga artificial. De esta forma se logran definir cuatro sitios posibles de recarga, las cuales pueden ayudar a atenuar estos problemas.

ABSTRACT

The Valley of Mexico, due to its spatial location, through its history has suffered various problems relating to water. Today, the problem of water supply in the Valley increasingly aggravated in an uncontrolled manner, causing subsidence in clay soil and thus causes various economic issues that directly affect their population.

The aquifer system in the Basin of Mexico, has a hydrodynamic behavior defined by the geomorphology, tectonics, structural, stratigraphic and lithologic included in their geological setting.

In the eastern portion of the valley of Mexico, this problem is getting worse, so it is necessary to implement new technologies in order to address this problem. The support of engineering systems such as artificial recharge to the aquifer, greatly help stop land subsidence, support the increased volume of existing groundwater, reduce the salt content of the water quality improvement and support in the same season dry season water supply in this sector.

This analysis climatological, geological / stratigraphic, chemical and piezometric together helps identify likely sites to implement an artificial recharge project. This will manage to define four possible recharge sites, which can help mitigate these problems.

OBJETIVOS Y ALCANCES

La recarga artificial es un método ingenieril cuyo objetivo principal es la conservación de los mantos acuíferos desde varios puntos de vista, sin embargo es un técnica muy poco conocida en varios países del mundo, por ello es importante tener los principios básicos para implementar un proyecto de tal envergadura.

Es importante conocer cuales son las características físicas de la Cuenca de México, lo cual implica una documentación exhaustiva sobre la geología, geomorfología, propiedades físicas de los estratos, calidad del agua y registros piezométricos del sistema acuífero y gracias a esta información poder realizar una caracterización geohidrológica de la zona.

Identificar una región en la cual el abasto de agua potable es insuficiente para satisfacer sus necesidades primarias, en donde las zonas de recarga han desaparecido casi en su totalidad debido al crecimiento de la mancha urbana por lo que la extracción del agua del subsuelo ha sido tal que ha provocado la contaminación del acuífero, hundimientos en el terreno, problemas en construcciones, etc; por todo lo anterior, la necesidad de emplear técnicas ingenieriles para tratar de solucionar o disminuir tales problemas es de vital importancia.

Es importante saber que el implementar la Recarga artificial (RA) como un método que puede combatir a largo plazo los problemas mencionados considerando que el volumen a recargar es igual o mayor que el agua extraída al acuífero.

Es necesario identificar y clasificar las familias de agua existentes en la región a considerar ya que es de vital importancia no empeorar al acuífero, para que en un momento esta pueda ser aprovechada de la mejor manera.

Proponer sitios de recarga artificial en una zona identificada donde esta cumpla con las características hidrogeológicas, geológicas y sociales.

Se espera que este trabajo sea una base para darle continuidad a un proyecto en la región sobre recarga artificial, siendo así que posteriormente se realicen estudios más a detalle sobre la estratigrafía, sus propiedades físicas y calidad del agua.

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años el tema del abasto del agua es un problema que se ha venido agravando en tiempo y espacio, éste no solo es un problema local si no mundial, por ello el tema de agua ha sido fundamental en toda conversación ambientalista.

La Ciudad de México y su área conurbana enfrentan dos diferentes retos para el abasto de agua potable:

El primero es el constante crecimiento de la población, que para sus necesidades requieren cada vez un mayor volumen de agua.

El segundo, es garantizar el abasto del agua potable a la población para satisfacer parcialmente sus necesidades utilizando fuentes externas que son insuficientes y no obstante, se debe continuar con la extracción del acuífero local, lo que provoca que el suelo arcilloso se compacte cada vez más, causando el hundimiento ya conocido, ya que el abatimiento excesivo del nivel estático varía entre 1.4 y 1.6 m/año; generando daños en las estructuras urbanas, casas, edificios e infraestructura hidráulica, resultando que estas últimas se dañen y provoquen pérdidas del agua por fugas; y obliga a erogar grandes inversiones económicas sin aún satisfacer la demanda de agua a la población.

En algunas zonas e industrias, el consumo llega a ser excesivo sin llegar a hacer conciencia a las dificultades técnicas y económicas para obtener el agua, la sociedad no es capaz de valorar éste recurso por esta razón en el Programa del Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México se han desarrollado varias reglas y estrategias para que la gente concientice el uso del agua, sin embargo los programas no han tenido el éxito esperado y actualmente el acuífero tiende a ser menos potencial.

Asimismo, para proteger éste vital recurso es necesario proteger y restaurar toda Zona de Conservación Ecológica, pues sus lugares son de vital importancia para la recarga natural del acuífero y como fuente de oxigenación local, pues su degradación provoca la erosión del suelo, destruyendo el equilibrio del ecosistema en la cuenca.

En la cuenca, existe infraestructura limitada para el tratamiento de agua residual. De la misma manera no se cuenta con la infraestructura para la captación de agua pluvial provocando que esta se dirija directamente al drenaje y a su vez se mezcla con agua negra, disminuyendo su calidad y provocando así el riesgo de padecer inundaciones, aun sabiendo que éste gran volumen de agua puede ser utilizado para diversos fines.

Haciendo un análisis de esta problemática, la implementación de técnicas de recarga artificial son ejemplos posibles de soluciones a largo plazo ante tales situaciones. Considerando además que la recarga artificial de los acuíferos no es la solución absoluta al problema causado por la sobrexplotación del mismo por esto es necesario, cambiar la cultura de una sociedad que ha venido a lo largo de los años haciendo un mal uso del agua.

La porción nor - oriental de la Ciudad de México, es un área donde podría implementarse un proyecto de recarga artificial en la Zona Ecológica Federal del Ex Lago de Texcoco, ya que ahí se extrae una gran cantidad de agua subterránea, además de contar con una gran área para poder realizar cualquier tipo de recarga, es decir, la implementación de métodos tanto superficiales como profundos.

En esta zona y debido a la extracción de agua el nivel piezométrico ha disminuido de manera considerable a través de los años, provocando inestabilidad en el terreno causando problemas por el asentamiento diferencial en las calles y las viviendas; por esto, este trabajo se da a la tarea de aportar las ideas necesarias para la propuesta de sitios de recarga artificial, misma que ayudara a que el nivel piezométrico se estabilice, sin embargo el diseño de las obras serán efecto de un análisis mas a detalle el sitio en el cual se pretende realizar la recarga, dicho diseño será efecto de otro estudio.

La elección de la zona en la cual se pretende realizar la recarga se encuentra en la porción sureste de la planicie de Texcoco, ya que la cercanía de la fuente primaria a inyectar es un factor importante dado que los costos de transporte serán bajos; el agua que se pretende utilizar es aquella proveniente de la Ciudad de México y su área conurbana que será tratada en la planta del Modulo Experimental de Tratamiento gestionadas por el OCAVM, que aportará el agua tratada a nivel terciario. Por tanto tendrá la calidad química idónea para poder realizar un proyecto de recarga artificial sobre todo a profundidad y si no fuera así, el agua proveniente de las escorrentías y de los pequeños arroyos puede ser otra fuente importante para este proyecto.

Se propondrán sitios en donde se pueda realizar la recarga artificial, los cuales deberán ser sujetos a un estudio hidrogeológico detallado, que determine con rigurosidad la calidad química del agua subterránea y discernir si el agua a inyectar cumple con los parámetros para el método de recarga y no cause efectos negativos al acuífero, pues no hay que olvidar el uso que esta tendrá, ya que será nuevamente extraída.

Dentro de los parámetros necesarios de conocer para realizar recarga artificial al acuífero, hay que destacar el aspecto geológico del lugar pues la parte más somera está constituida de arcillas y areniscas, materiales que pueden ocasionar problemas debido a la variabilidad de su permeabilidad y conductividad, por lo que los pozos o las pequeñas represas a construir pueden sufrir daños por colmatación.

Finalmente, para poder realizar un proyecto de recarga es necesario sujetarse a la normatividad existente en México tales como la NOM-014-CONAGUA-2003, NOM-015-CONAGUA, NOM-003-SEMARNAT y NOM-127-SSA1. Ya que en ellas se establecen las características y especificaciones del agua y de las obras para que se realice de manera optima un proyecto de recarga artificial. También es muy importante la participación del gobierno para que estos grandes proyectos se pongan en marcha ya que este tipo de acciones en beneficio del acuífero debe estar supervisado por el ente gubernamental correspondiente.

2.1 DEMANDA DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

El agua es el elemento esencial para el desarrollo industrial de cada país, sin embargo se agota cada día así. En el siguiente mapa (Figura. 1) se observa el consumo de agua anualmente por persona durante el periodo 1997-2001.

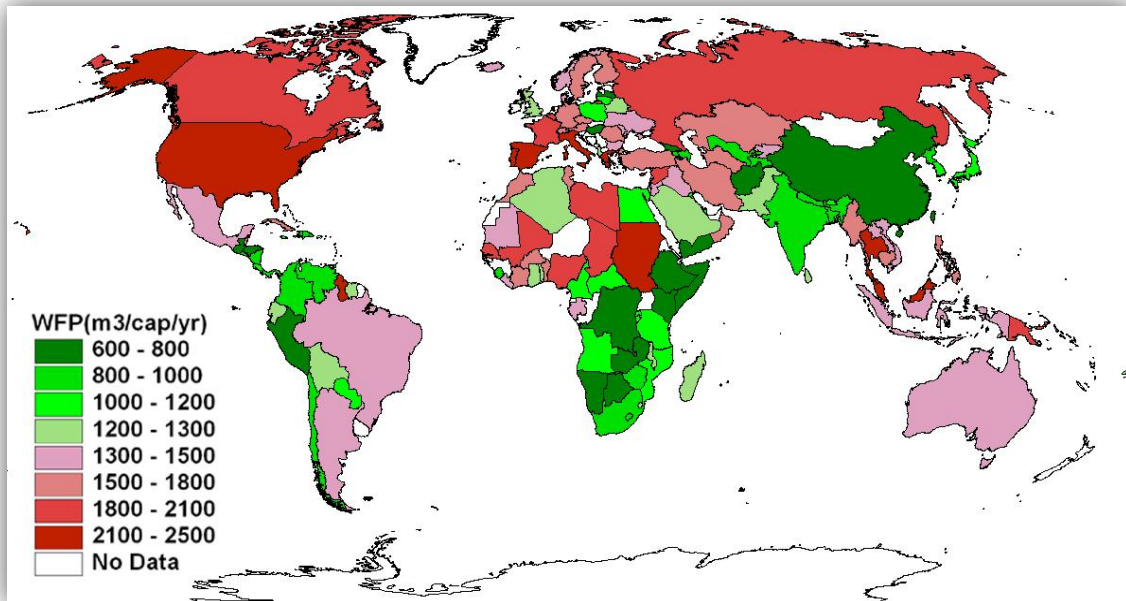


Figura 1. El consumo hídrico de cada país se calcula con datos de consumo como la suma de agua en el país más las importaciones brutas del recurso menos las exportaciones de las mismas (www.waterfootprint.org).

Se observa que países como Estados Unidos o España son grandes consumidores de agua con un promedio de 2,500 m³/año por persona. China mantiene un consumo por debajo de la media 700 m³/año por persona. México es considerado como un país de un consumo medio, y que actualmente al igual que otros países se encuentra en grandes problemas para la obtención de éste recurso.

No solo el problema de abastecimiento del agua corresponde a aquellos países que consumen grandes cantidades, sino también a aquellos que enfrentan dificultades de tipo económico, político y social como es el caso de algunos países africanos, asiáticos y del centro-sur de América que, aunque tengan grandes reservas de agua subterránea, no tienen la industria necesaria para aprovecharla.

Todos los países del mundo enfrentan en diferente proporción grandes problemas sobre el abastecimiento y reutilización del agua; problemas que inciden en las actividades industriales, de agrícolas, ganaderas y de uso humano, esto sucede porque la principal y casi única fuente de agua que la sociedad tiene es el agua subterránea y en muy pequeña proporción la superficial, extrayéndose sin importar los daños que se pueden ocasionar al ecosistema, ya que al realizar esta acción rompe con el equilibrio en la zona de extracción.

Problemas comunes al sobre extraer agua subterránea es el hundimiento diferencial en el suelo; provocando daños a carreteras, puentes, hogares, edificios, monumentos históricos, así como rupturas de infraestructura hidráulica urbana formándose grandes fugas de agua. La desecación de manantiales, suelos, ríos, lagos, lagunas entre otros cuerpos de almacenamiento de agua en superficie provocando un cambio más visible, alterando o extinguiendo la biodiversidad del lugar causando la formación de una zona árida, por lo cual, el suelo se vuelve infértil constituyendo a la detonación de conflictos económicos, políticos y sociales que comúnmente no son solucionados con tanta claridad, y todo esto es debido a la ausencia o escasez del agua.

2.2 AGUA RESIDUAL

La gran cantidad de agua que es destinada al consumo humano es mal utilizada, constituyendo una enorme pérdida de agua y por tanto económica pues éste recurso termina en el alcantarillado causando la inminente contaminación de la misma.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, se considera como agua residual al líquido que ha sido utilizado en actividades domésticas, industriales, comerciales, de servicios, etc. clasificándose en agua residual, municipal e industrial. La primera es aquella que es transportada por la red de alcantarillado hacia una planta de tratamiento. El agua residual industrial es la que proviene de las descargas industriales y de igual manera va dirigida a una planta de tratamiento, como lo es México. (CONAGUA, 2010).

De acuerdo al contenido de contaminantes, el agua residual se clasifica de la siguiente forma: (CONAGUA. 2010):

- Agua negra: Es aquellas que es rica en sólidos suspendidos, coliformes fecales y nitrógeno.
- Agua gris: Es aquella que aporta menor cantidad de sólidos suspendidos, pero mayor cantidad de fosfatos, grasas y coliformes fecales.
- Agua industrial: Se refiere a la mezcla del agua negra de una industria en combinación con el agua residual de su manufactura. Los contaminantes provenientes de manufactura están en función del proceso industrial, y tienen la mayoría de ellos, efectos que perjudican a la salud si no existe un control de la descarga.

Cuando no se da un tratamiento especial al agua para su posterior uso, esta suele perjudicar notablemente a la salud de las personas. El Cadmio (*Cd*) es un elemento presente en los fertilizantes y que puede ser absorbido en las cosechas, produciendo en su consumo daños en el hígado y riñones (www.lenntech.es). Actualmente se sabe de la

presencia de Plomo (*Pb*), Mercurio (*Hg*) y Arsénico (*As*) en el agua y que estos elementos son mortales cuando se ingieren causando muertes o grandes lesiones en diversos órganos y tejidos del cuerpo. Los nitratos suspendidos en el agua suelen provocar grandes lesiones e incluso mortales en la comunidad infantil (www.lenntech.es). La eutrofización, que es un método de enriquecimiento artificial de nutrientes, se da comúnmente en zonas cerradas como lo es un lago donde el tránsito del agua es casi nulo, tendiendo a la producción de plantas de manera anormal produciendo un olor y color poco agradable generando zonas de pantano en donde la precipitación de carbonatos es amplia.

¿Que acciones se realizan para darle un uso apropiado a éste gran recurso?

Actualmente no se han tomado grandes medidas para el uso apropiado del agua, sin embargo hay países como Alemania y Holanda que se han puesto a la tarea de formar una cultura propia para su uso, además de la construcción de plantas de tratamiento. En países americanos tales como México, Colombia, Perú y Brasil, tienden a reutilizar el agua residual, sin embargo en muchas ocasiones no les dan el tratamiento especial para su nuevo uso, como lo es cuando su aprovechamiento se pretende en la agricultura donde generalmente no le dan un tratamiento especial o simplemente no se trata.

Aunque en la mayoría de los países en el mundo se tiene como prioridad la potabilización del agua residual para su reúso, comúnmente no tienen la infraestructura suficiente para su tratamiento, provocando que la gran mayoría del agua residual vaya a los ríos causando su contaminación, creando grandes focos de infección, además de alterar notablemente al ecosistema, llegando a matar a una gran número de especies que dependen de éste vital recurso.

En México en 2008 se generaron 235.8 m³/s de agua residual municipal y 190.4 m³/s de agua residual industrial. En el 2008 de las 1,833 plantas en operación en el país se trataron el 40% del agua residual de los 208 m³/s recolectados por alcantarillado (CONAGUA. 2010).

Actualmente se encuentra en construcción la Planta de Tratamiento de Agua Residual en Atotonilco de Tula, Hidalgo; esta planta es la más grande en todo el país y de América Latina, tendrá la capacidad de tratar 23 m³/s durante el estiaje (mediante un método convencional) y un modulo adicional (por el método físico – químico) para tratar 12 m³/s en época de lluvias. Esta obra será de gran beneficio para los hidalguenses, ya que mejorará las condiciones sanitarias de la población y permitirá utilizar agua tratada en la agricultura (conservando los nutrientes de las aguas residuales pero eliminando los contaminantes), además de facilitar la tecnificación de los sistemas de riego y la producción de cultivos de mayor valor agregado. La localización de esta planta obedece a que las aguas negras del Valle de México descargan en el municipio de Atotonilco de Tula, donde también comienzan los distritos de riego de la región, por lo que será posible el aprovechamiento de las aguas tratadas que actualmente son utilizadas en la agricultura sin ningún proceso de limpieza; esta planta pretende ser inaugurada a mediados del año 2013.

Las 5 regiones que tratan el mayor caudal de agua residual son la regiones VIII (*Lerma – Santiago - Pacífico*), VI (*Río Bravo*), I (*Península de Baja California*), III (*Pacífico Norte*) y XIII (*Aguas del Valle de México*), (CONAGUA. 2011), siendo el último el más destacable por ser la región más pequeña, sin embargo la necesidad de uso del agua en la región responde a la obligación de tratarla dado que es una zona en la cual el número de industrias y densidad de población es enorme.

Los procesos principales con los cuales la CONAGUA realizó el tratamiento de éste tipo de agua son los siguientes:

- Lodos activados.
- Lagunas de estabilización.
- Primario avanzado.
- Lagunas aireadas.

Las plantas de tratamiento de agua industriales se dieron a la tarea en el 2008 en cambiar la calidad del agua un 33.8% del agua residual. Actualmente y de acuerdo al informe presidencial por el C. Presidente de la Republica, el Lic. Felipe Calderón, actualmente se tratan el 75% de las aguas residuales en el país.

Las técnicas de tratamiento de agua residual son de tres tipos principalmente: los de nivel primario, secundario y terciario. El tratamiento tipo primario tiene como propósito ajustar el pH y remover materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión con un tamaño mayor a 0.1 mm; el tipo secundario remueve materiales orgánicos coloidales y disueltos; por último el tratamiento terciario tendrá como objetivo remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus (CONAGUA. 2010).

Para el año 2010 se contaron con 1,899 plantas de las cuales 648 son de tratamiento primario, 1,185 del secundario y 66 de tratamiento terciario (CONAGUA. 2010).

2.3 EXTRACCIÓN EXCESIVA DE AGUA DE LOS ACUÍFEROS

Las técnicas de recarga de agua hacia un acuífero no son suficientes para poder satisfacer los volúmenes requeridos y evitar su deterioro, además, la demanda cada día es mayor ya que la sociedad, industrias y desde luego el gran volumen de líquido que se necesita para la agricultura; por lo que la extracción continua y excesiva de un acuífero determinado será causa de un desabastecimiento del mismo provocando que a futuro ya no se pueda extraer la suficiente agua.

Con el fin de tratar de solucionar los problemas de sobre extracción, se han diseñado dos estrategias; la primera será aumentar los volúmenes de recarga natural recuperando la capacidad de infiltración del agua de lluvia y la segunda es recargar artificialmente los acuíferos mediante el tratamiento del agua residual (Korenfeld Federman et al. 2011).

Como se observa en la Figura 2, la sobre extracción en los acuíferos representa un 15.46% del total de los acuíferos en México, en 1975 eran solo 32 acuíferos sobrexplotados, 80 en 1985 por lo que definitivamente podemos decir que cada vez se agravan más. De los acuíferos que se dicen muy explotados se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos, pues en un tiempo determinado, estos no podrán abastecer las demandas y se tendrá que hacer uso de otros más cercanos.

Para el Estado de México, incluyendo la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, se tienen identificados nueve acuíferos, de los cuales seis se encuentran sobre explotados de acuerdo con informes de la CONAGUA. El acuífero cuyo nivel estático es más negativo

es el de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 347.5 %; le sigue el acuífero de Texcoco, 90.32; Cuautitlán-Pachuca, 47.5 %; Ixtlahuaca-Atlatomulco, 75 %; Chalco-Amecameca, 22.1 % y Valle de Toluca con 25 % (Korenfeld Federman et al. 2011).



Figura 2. Mapa que muestra los 101 acuíferos sobrexplotados. (CONAGUA, 2010).

2.4 RECARGA ARTIFICIAL

La recarga artificial responde a un conjunto de técnicas, las cuales tienen como fin de detener la sobre explotación de un acuífero, gracias al mantenimiento de sus reservas de manera no natural, también tiene como objetivo la mejora de la calidad del agua, así como de su almacenamiento para su uso posterior.

Hasta la fecha la recarga artificial es una técnica especial y desconocida por gran parte de la población en el país y en el mundo, además de justificarla como la gran solución para la restauración de los acuíferos, lo cual, no lo es, ya que solo ayuda gradualmente a disminuir tales impactos antrópicos sobre el acuífero.

Actualmente una de las acciones para el uso eficiente del agua así como la restauración de los acuíferos en México y resto del mundo es la implementación de proyectos enfocados a la recarga artificial. La recarga superficial se ha venido usando a lo largo del tiempo, además de ser un método relativamente económico es eficiente, sin embargo, la recarga a profundidad es un método caro, aunque el espacio a utilizar en el proyecto es menor, la calidad del agua deberá ser muy buena para evitar futuros problemas de taponamiento o colmatación del pozo.

Alrededor del mundo se han efectuado grandes proyectos de recarga artificial, tanto someras como profundas; sin embargo cada proyecto es diferente y ha tenido dificultades diferentes en su operación, por lo que se le considera único. A continuación se muestran algunos proyectos realizados en diferentes partes del mundo haciendo una mención especial en el continente americano en particular México.

ESPAÑA

España es uno de los países que hasta nuestros días ha implementado un sinnúmero de proyectos para la recarga de sus acuíferos, sin embargo hay países como Hungría, Alemania y Holanda que también lo han hecho de manera exitosa (Iturbide. 1986).

En España los primeros proyectos de recarga se remontan cuando éste país estaba sujeto a los árabes, operando así *careos alpujarreños* y que aún siguen en funcionamiento (Fernández Escalante et al. 2006). Estas construcciones en la Sierra Nevada están levantadas sobretodo en rocas metamórficas como meta-esquistos, mármol y gneis; tipos de rocas con muy baja capacidad de filtración pero que sin embargo han sido capaces de realizar su labor de manera optima.

En Mallorca se puso en operación un sistema mixto fundamentado en el riego directo con agua residual domestica e inyección de sobrantes, cuando existen en depósitos de calcarenitas muy permeables (Fernández Escalante. 2004).

Además se tienen varios proyectos de recarga por medio de zanjas de infiltración en el aluvial del bajo Guadalquivir en Sevilla, Un sondeo profundo en Jijona, otro en Mancha real en Jaén y en el valle de Esgueva en la región de Valladolid. Otro proyecto, es la construcción de dieciséis balsas de infiltración (Fernández Escalante. 2004). Además España ha incursionado del empleo de agua residual tratada para proyectos de recarga.

HUNGRÍA

En Hungría el agua filtrada en los márgenes de los ríos cubre un tercio de la demanda de agua potable en el país. El abastecimiento de agua potable en Budapest depende del agua filtrada en las márgenes del Danubio, siendo así que la limitante para la extracción del agua del acuífero depende claramente de la recarga suministrada al mismo. La ventaja es la alta tasa de purificación que ofrece el suelo (Iturbide. 1986).

ISRAEL

En Israel existen proyectos que aprovechan agua de inundaciones para hacer la recarga en los acuíferos de Schiquma, al norte de Gaza cerca de Cesarea (Fernández Escalante. 2004).

Un primer proyecto consta de una presa que retiene el agua de la inundación, para ser distribuidas en estanques de infiltración intercalados sobre las dunas arenosas en la costa produciendo una colmatación en la base de los estanques. Un segundo proyecto consta de un embalse de almacenamiento, uno de decantación y una serie de estanques de infiltración, produciéndose la conducción del agua por gravedad.

En la región El Dan, se implementó un proyecto para el rehúso indirecto de agua tratada para realizar la recarga del acuífero, con el objeto de extraerlo en un futuro con un fin

agrícola. El tratamiento previo a la infiltración tanto del agua como del suelo, son factores importantes para que la calidad del agua sea de mejor calidad. Cabe destacar que se implementó una recarga de manera intermitente mediante lagunas de infiltración.

PAKISTÁN

En Pakistán, la elaboración de represas perforadas para hacer la recarga en acuíferos desabastecidos en Balochistán, considerando que la única fuente de agua dulce para esta región solo es subterránea, la extracción del acuífero ha venido aumentando debido a la expansión de la agricultura, crecimiento de la población e industria en un periodo de cuatro años que va desde 1998 hasta el 2002. Por todo lo anterior, El Consejo de Investigación en Recursos Hídricos de Pakistán implementó la construcción y operación de represas perforadas en la zona (Ian Gale. 2005)

La primera represa perforada quedó construida durante el 2002 en Margat; la represa actúa como barrera reduciendo la velocidad de la escorrentía, pero a su vez tiene la capacidad de retener durante un tiempo suficiente el agua, permitiendo que el material suspendido sedimente y reduzca las pérdidas por evaporación, además de permitir la infiltración de manera óptima. Las represas fueron construidas con un bajo costo ya que los materiales fueron cantos rodados, adoquín, piedras de gran tamaño y gravas de los arroyos y ríos. Además de ser contenidas con una tela metálica; la construcción de la represa consta en su mayoría de 5 escalones llegando a una altura poco menor a los cinco metros. Actualmente la represa tienen un área de captación de 1.79 Km² y una capacidad de almacenamiento de 11,000 m³ (Ian Gale. 2005).

INDIA

En la India los problemas de escasez de agua son muy grandes, además de las sequías que agravan aun más el problema; en Nallan Pillai Patral, Gingee Blook, Gingee Taluk, Vallupuram, Tamil Nadu son ejemplos donde la agricultura es factor importante para el sostén económico de estos lugares. En Vaallupuranm la sequía anual y la calidad del terreno, hacen que el agotamiento de éste recurso se agrave sobre todo en verano, implementándose un sistema de recarga con base a la construcción de un dique de 100 m de longitud y 3.5 m - 7.0 m de profundidad (www.cgwb.gov.in).

Pero no sólo se agrava el problema por las zonas áridas sino también por el exceso de lluvia en la mayoría del país.

En Purulia la intensidad del cultivo es tan alta que la necesidad del agua es inminente, por lo que la construcción de diques, excavación para la elaboración de un tanque de almacenamiento, etc. se construyen para almacenar el exceso de escorrentía y utilizarlo para riego aunado a la recarga de la zona no saturada para un uso posterior (www.cgwb.gov.in).

En Nueva Delhi la construcción de pozos de inyección y de zanjas de recarga son métodos para el almacenamiento de agua por escorrentía además de poder gestionar un control para el futuro.

Se preparó una gestión de cuenca en Rajasthan, India. En 1985, la cuenca del río Arvari (Al igual que otras cuencas del área) se encontraban en una degradación debido al exceso de bombeo del agua subterránea, la remoción de plantas y sequía han provocado que la erosión sea inminente, provocando al poco tiempo que la población busque otros

lugares más propicios para su supervivencia. La ONG en Tarun Bharat Sang (TBS) afronto el compromiso de elaborar represas de tierra en forma de media luna para recolectar la escorrentía de lluvia en la zona. Lo más sobresaliente es que éste tipo de proyecto lo tomaron 70 aldeas sabiendo que el suelo en el que se pretende realizar la recarga no tiene gran permeabilidad, ya que son rocas volcánicas, ígneas e incluso metamórficas muy fracturadas, lo cual ayuda a la implementación de esta técnica (Ian Gale. 2005).

ÁFRICA

Estudios llevados por “Water Affairs and Forestry” y por ayuntamientos de diversos países como Namibia, Cabo del Norte y Sud África (Figura 3), concluyen que la recarga artificial puede representar una solución efectiva para los países propensos a sequías a bajo costo (www.csir.co.za 2002).



Figura 3 Balsa de infiltración, en Sud África (www.igrac.net).

AUSTRALIA

Según (Fernández Escalante. 2004), es en éste país en donde han desarrollado de manera muy efectiva éste tipo de técnicas. En la actualidad existen por lo menos cinco programas en desarrollo comandados por CSIRO y CGS (modificado de Pavelic, 2003, en www.iah.org/recharge).

El desarrollo de reservas de agua mediante técnicas de inyección en acuíferos salobres ha sido implementado en pocos países del mundo; sin embargo en Australia del Sur demuestran la viabilidad técnica y económica para tales casos.

En áreas urbanas con suelos arcillosos, la escorrentía de lluvia no era retenida, por lo que la descarga en las redes de drenaje se dirigía al mar. Los acuíferos de roca caliza, que están debajo de la ciudad de Adelaida no podían ser conectados con el agua almacenada

en estanques de infiltración debido a la baja capacidad de infiltración que muestran las arcillas. Sin embargo la elaboración de pozos mayores a 100 m de profundidad pudieron penetrar la roca caliza e interconectarla con la superficie, pudiendo almacenar el agua (Ian Gale. 2005).

En otro proyecto se intento realizar la misma técnica pero en una zona calcárea cementada. Pero la calidad del agua no fue lo suficientemente aceptable para tal objetivo, generando colmatación de los pozos por el crecimiento del zooplancton y algunos sólidos en suspensión (Ian Gale. 2005).

ESTADOS UNIDOS

En Palo Alto, California en Estados Unidos en una zona aluvial, se inicio un proyecto de recarga en 1976, con el fin de obtener datos que permitan conocer cuál es el cambio de la calidad del agua, a través del acuífero. El agua a infiltrar provenía de una planta de tratamiento avanzado de 90 L/s. el proyecto consto de nueve sistemas dobles de pozos de inyección-extracción. Los pozos de extracción se localizaron a 300 m de los pozos de inyección (Iturbide. 1986).

La conductividad en éste proyecto disminuyó del rango 35-55 micro - siemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$) acercándose asintóticamente a $1.6 \pm 3 \mu\text{S}/\text{cm}$, valor que representa al agua de inyección. El nitrógeno amoniacal se mantuvo por debajo de 1 mg/L para las primeras 100 hrs de inyección, posteriormente aumento a $28 \pm 3.8 \text{ mg/L}$ que corresponde al valor del agua inyectada. El Fe disminuyó de 2.6 a 0.2 mg/L. El oxígeno disuelto de concentración $8 \pm 0.8 \text{ mg/L}$, llego a pozo de observación con una valor menor a 1 mg/L después de 500 hrs de operación, debido a degradación aeróbica de sustrato orgánico, nitrificación y oxidación de minerales. El DQO disminuyó de 10.3 a 3 mg/L, misma causa debida a la desaparición de la demanda de oxígeno. Los nitritos y nitratos no se encontraron en concentraciones mayores a 0.5 mg/L., también el calcio y magnesio disminuyeron sus concentraciones después de realizada la recarga. Sin embargo el sodio fue de 12 meq/L. mayor que la inyectada lo que se explica por el intercambio iónico, cuantificándose 2, 4 y 1.5 mg/L. para los iones amonio, calcio y magnesio; el resto del sodio en exceso se equilibra con un exceso de 5 meq de ion cloruro. Los metales traza tales como el cobre, cadmio y plata se mantuvieron después de 500 horas de operación en niveles inferiores a los del agua de recarga original (Iturbide. 1986).

MÉXICO

Debido a que en más de la mitad del territorio mexicano predominan las condiciones climáticas áridas y semiáridas, el agua subterránea es un factor importante para el crecimiento socio - económico de diversos estados y en general del país. Éste recurso se utiliza en más de un 70% en la agricultura y solo un 26% las áreas industriales y urbanas.

Un proyecto en la Comarca Lagunera de México Norte se ha puesto en operación, por ser una zona agrícola importante para el país. El sistema se basa en las descargas de los ríos que van a la región, el río Nazas y el río Aguanaval y unas 3,500 perforaciones que extraen el agua subterránea del acuífero de la Comarca Lagunera, con fines agrícolas, domésticos e industriales. Actualmente se estima que la extracción es tres veces mayor que la recarga en el acuífero disminuyendo de manera significativa el nivel piezométrico y deteriorando la calidad del agua encontrándose niveles muy altos de arsénico. Para todo

esto se utilizó una cuenca de recarga arenosa en las proximidades del Río Nazas, en Torreón con una capacidad de 197,000 m³. Se implementaron sistemas de abastecimiento para transportar el agua de la represa Zarco, por medio del canal de riego Sacramento, a la cuenca de recarga. De esta manera y con el monitoreo constante se observó que en las pruebas realizadas entre mayo y agosto del año 2000 un volumen de 5,200 m³ fue transportado e inyectado de los cuales 200 m³ de agua se evaporó y 5,000 m³ fueron infiltrados a la sub-superficie. La capacidad de infiltración disminuyó de 2.4 m/d a 0.116 m/d debido a la colmatación producida (Ian Gale. 2005).

El gobierno del Estado de México, preocupado por mejorar el medio ambiente y detener el abatimiento de los acuíferos, se construyó una planta piloto que recargue veinte litros por segundo de manera directa al acuífero subyacente (Korenfeld Federman. et al. 2011).

En octubre de 1981 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, conjunto a la Comisión del Lago de Texcoco, hicieron un estudio preliminar sobre el Tratamiento y Rehuso de Agua Residual en el Área del Ex Lago de Texcoco; en el cual con base al programa "Proyecto Texcoco" elaborado por el Dr. Nabor carrillo, con el objeto de reabastecer al acuífero por medio de un método de recarga a profundidad, lo cual implica, tener agua de una calidad aceptable para no contaminar al acuífero y que pueda permitir su posterior uso como suministro de agua potable, además que la recarga permita el tratamiento y almacenamiento en la zona no saturada del suelo condicionando a agua de mala calidad para poder ser usada en un futuro a usos limitados excluyendo el suministro de agua potable (Nabor Carrillo, 1981).

Se elaboró un cuadro, el cual muestra las posibilidades de recarga en el sistema acuífero localizado en la zona del Ex Lago de Texcoco, del cual se acepta la recarga con pozos de inyección en las formaciones volcánicas y aluviales; además de la realización de campos de recarga exclusivamente en la formación volcánica (Nabor Carrillo. 1981).

En el mes de febrero de 1987 el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un proyecto por título: "Asesoramiento general en un modulo experimental de recarga de acuíferos por medio de pozos" en la zona federal del Lago de Texcoco (Iturbe A. Rosario, et al. 1987).

El modulo experimental de recarga consta de tres pozos, uno de recarga y dos de observación, de 14 pulgadas de diámetro a una profundidad de 200 m. Los tubos son de acero, los cuales a partir de los setenta metros de profundidad se encuentran ranurados, con el objeto de que el agua fluya en todas las direcciones siempre y cuando estas, no sufran colmatación.

La metodología que pondera la calidad mediante la ecuación y peso correspondiente a cada parámetro, es la que se define como Índice de Calidad del Agua (ICA) (Iturbe A. Rosario, et al. 1987). Éste índice indica una clasificación superficial y subterránea del agua, requiriendo datos de campo por las estaciones de monitoreo en determinado tiempo. Tomando en cuenta éste procedimiento los parámetros que se midieron con mayor importancia fueron el oxígeno disuelto, DBO, DQB, coliformes totales y fecales respectivamente.

Con los datos obtenidos se elaboró un modelo de simulación, con el objeto de poder predecir el comportamiento de diversos compuestos dentro del acuífero. La simulación realizada fue bidimensional para predecir el avance de un contaminante descargado dentro del acuífero mediante un pozo de inyección de agua residual (Iturbe A. Rosario, et al. 1987).

Por último el experimento de recarga mediante inyección fracasó por la baja permeabilidad del suelo, se mencionó que uno de los principales problemas de la recarga mediante inyección es el taponamiento de los pozos debido a la formación de colonias de bacterias y a la presencia de sólidos en el agua, por lo que también recomiendan hacer un monitoreo periódico del agua de los distintos efluentes. Se recomendó que el diseño de tratamiento avanzado se efectuó siempre y cuando ya se haya realizado un análisis sobre las características del agua proveniente de las otras plantas de tratamiento, además explican que el mencionar a la planta de tratamiento avanzado como fuente de agua para la recarga del acuífero es inoportuno al no poder saber cuáles son las características físicas, químicas y biológicas que esta planta mandara ya que la planta de tratamiento avanzado en su momento (1987) aun estaba en construcción.

Un año después, en febrero de 1988 el Instituto de ingeniería retomo el caso; llamando al proyecto "Modulo experimental de recarga de acuíferos, en la zona del ex lago de Texcoco, con agua tratada (2ª. Etapa)" (Iturbe A. Rosario, et al. 1988).

En éste proyecto se llevó a cabo una prueba de alimentación de agua potable al pozo de recarga, denominado RA3, sin presión. Esta prueba tuvo como objeto poder obtener datos sobre la capacidad de infiltración de los pozos, en donde se utilizaron tres pipas de 10,000.00 L de capacidad cada una.

La primera prueba se inicio a las con un nivel estático de 23.3 m, se utilizó una sola pipa con una descarga de 4 in de diámetro; el agua se desalojo en un tiempo de 10 min

Posteriormente se analizo el comportamiento del agua en el acuífero mostrándose que en los 30 min de mediciones el nivel decreció lentamente por lo que se esperará que para un gasto continuo a la velocidad de descarga dada el pozo no tendrá la capacidad para admitir dichas condiciones.

El gasto de la prueba fue de 16.7 L/s.

La segunda prueba se inicio con un nivel estático de 23 m, aquí se utilizaron simultáneamente tres pipas, con un diámetro de descarga de 10 in, provocando que el pozo se llenara a los 7 min por lo que se redujo el diámetro a 6 in, de esta manera se mantuvo el nivel del agua a los 15 m aproximadamente.

El último camión se termino por vaciar a los 28 min.

El gasto de esta prueba fue de 17.86 L/s.

De acuerdo con lo observado en la prueba, se deduce que 6 in es el diámetro adecuado en la descarga que admite el pozo, sin en cambio en la primera prueba el gasto era menor y no lo admitió. Pero es posible que en la segunda prueba el gasto fuera menor, debido a que no se midió el volumen descargado durante los primeros 7 min usando las tres pipas, siendo así que si el volumen descargado haya sido de 10 m³, el gasto para la segunda etapa fuera de 15.8 L/s.

Se concluyó en éste proyecto que el posible gasto que acepta el pozo es menor a 17 L/s de acuerdo a los resultados obtenidos por la primera prueba, y que de acuerdo a la segunda el gasto fluctúa entre los 15 y los 18 L/s. y que para determinar de manera optima y con menor rango de error la capacidad de infiltración de los estratos permeables es recomendable trazar una red de flujo así como calcular la red de influencia; conociendo el gasto de descarga y esta área se podrá determinar la capacidad de infiltración de una manera aproximada.

En el 2011 el Instituto de Geología de la UNAM realizó una caracterización hidrogeológica para seleccionar sitios ideales para realizar recarga mediante inyección directa, dicho estudio recomienda dos lugares para llevar a cabo un experimento piloto de recarga en la zona poniente cercana al Lago Nabor Carrillo, dicho estudio también estima tiempos de avance inyectada al acuífero (Huízar Alvarez et al. 2011).

En éste proyecto se obtuvo la estratigrafía y las propiedades petrofísicas, de los sedimentos que constituyen el acuitardo y el acuífero en las inmediaciones de la planta de tratamiento; la obtención de las características químicas del agua subterránea que son extraídas del Lago de Texcoco y su evolución en tiempo y espacio; la elaboración de un modelo de la evolución piezométrica, así como cuantificar la velocidad de desplazamiento del agua inyectada y sobre todo establecer la ubicación del sitio de inyección, manejando sus efectos positivos y negativos al utilizar agua tratada.

Se concluyó gracias a las secciones lito - estratigráficas elaboradas, que en el centro de la planicie, que es donde se pretende realizar la recarga artificial, mantiene una estratificación arcillosa con horizontes de limo, arena fina y toba arcillosa lo cual es poco favorable. Además la zona no saturada es de un espesor delgado y arcilloso con un alto contenido en sales, causando una recarga casi nula por ser de alta impermeabilidad. Además de tratar de inyectar agua a zonas saturadas del liquido en los horizontes de limos y arcillas es prácticamente imposible a una carga hidráulica normal, solo se podría efectuar aumentando tal carga; además menciona sobre la alta calidad que debe de tener el agua para que el acuífero no se contamine ya que el agua en la zona es de buena calidad en general.

Se tiene conocimiento de la existencia de una serie de pozos de infiltración en el campus de Ciudad Universitaria de la U.N.A.M., esta es una serie de pozos que absorben por gravedad un gran volumen de agua de origen pluvial que escurren sobre canales diseñados para tal acción. Estas acciones están bajo la dirección y supervisión de PUMAGUA.

La recarga artificial del agua residual tratada al acuífero del valle de México fue realizado por la Dirección de Construcción y Operación Hidráulica–Secretaría General de Obras–DDF (actualmente llamada Sistema de Aguas de la Ciudad de México), Lesser y Asociados (1991), realizaron estudios geológicos y geohidrológicos del acuífero de la Ciudad en los cuales las características de dichos estudios permitieron la recarga utilizando las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento. Para el programa de recarga, encontraron 82 pozos como sitios posibles, donde el pozo San Luis 15 junto con otros tres pozos de monitoreo (cerca de éste) periódicamente fueron analizados y sacaron muestras. Realizaron experimentaciones a escalas para definir el grado de colmatación o taponamiento de los pozos durante la recarga, bajo diferentes gastos de inyección y en diferentes litologías (Leyva – Suárez. 2010).

Actualmente como alternativa de recuperación del acuífero de San Luis Potosí, se plantea un proyecto de recarga artificial con el agua de lluvia dentro de la Cuenca del Valle de san Luis Potosí; a estas fechas (2012) se tiene un avance del 10% y se planea para el 2015 un avance del 50%.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México ha realizado diferentes estudios para determinar sitios adecuados para la infiltración de agua a través de pozos de absorción: Con los análisis geológicos permiten establecer zonas para la recarga de los mantos acuíferos en la zona sur del Distrito Federal, en zonas que se encuentran urbanizadas y sin servicios de drenaje, en donde es viable realizar obras de captación, canalización y de pre-tratamiento para encausar el agua de lluvia hacia los pozos, existen 600 sitios propicios, de los cuales se cuentan con 135 estudiados (SACM. 2011).

En el predio que por gran tiempo fue ocupado y utilizado por la empresa Sosa Texcoco S.A. de C.V. llamado El Caracol, se está realizando un proyecto ambicioso de recarga artificial a profundidad. Este proyecto consta de una planta de tratamiento con una capacidad de descarga de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ con una calidad similar al agua encontrada en el acuífero. Para lo anterior y de acuerdo a un estudio geohidrológico a detalle del sitio y comprendiendo los valores de conductividad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento reales gracias a pruebas de bombeo realizadas en los pozos cercanos al lugar se está realizando una batería de pozos que cubra la capacidad de la planta de tratamiento y esta agua sea dirigida a los mantos permeables del acuífero. Se planea una serie de mas de 20 pozos de recarga que acepten un caudal variable a una presión constante provenientes de la planta de tratamiento. Actualmente se cuenta con un proyecto piloto en el cual únicamente se tiene como objetivo verificar si se puede realizar la recarga artificial en el estrato permeable de tobas. Para ello se realizó un pozo de 250 m de profundidad el cual extraerá agua del acuífero y esta será dirigida al pozo de recarga; este pozo tiene una profundidad de 300 m. con un diámetro de 8 in. de ademe y in de diámetro en la entrada; además se cuenta con tres pozos de monitoreo de 2 in. de diámetro. De acuerdo a la explicación de la empresa encargada del proyecto, la capa permeable de tobas acepta un caudal entre 11 y 18 L/s.

3. MARCO TEÓRICO

Todo estudio hidrogeológico requiere el entendimiento de una serie de conceptos que permitan explicar de manera concisa el funcionamiento hidrogeológico del medio y con ello poder establecer los proyectos y acciones que, respecto del agua subterránea se pretendan realizar. Para el caso que ocupa al presente estudio, es necesario destacar algunos conceptos fundamentales.

3.1 ACUÍFERO

Todo aquel paquete de rocas, que por sus características petrofísicas puede almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades importantes para los diferentes usos.

A partir de las características petrofísicas de las rocas, también se pueden considerar los siguientes conceptos:

- Acuífugo: es aquel que no posee capacidad de retención ni circulación de agua.
- Acuífardo: Contiene agua y la transmite muy lentamente.
- Acuícludo: Es una zona en la cual contiene agua en su interior, incluso suele estar saturado, sin embargo la capacidad de circulación es nula.

EN FUNCIÓN DEL NIVEL ENERGÉTICO

Si se califica al acuífero de acuerdo a la presión hidrostática se clasifica de la siguiente manera:

Cabe destacar que, aunque las imágenes mencionan e indica capas impermeables, es de hacerse destacar que no existe capa impermeable ideal por lo que poseen una permeabilidad mínima y por ello puede considerarse semipermeable.

Acuífero libre: También llamado freático. Es aquel en donde la superficie del agua dentro de la zona está en contacto a la presión atmosférica. Se considera a la zona no saturada como aquella porción que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel freático (Figura 4).

Aquifers and wells

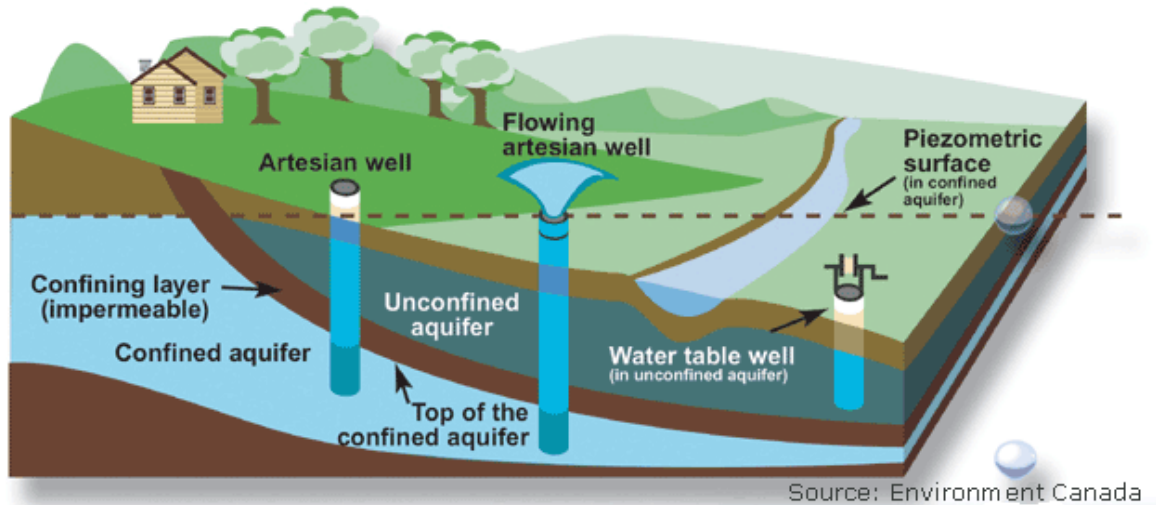


Figura 4. Esquema simplificado de un acuífero libre y confinado (<http://water.usgs.gov/gotita/earthgwaquifer.html>)

Acuífero confinado: Aquí el agua está sometida a una presión mayor a la atmosférica, además rellena de manera total a todos los espacios porosos de la formación geológica, quedando así saturada de agua. El agua se sitúa en medio de dos capas casi impermeables los cuales provocan que esta se encuentre parcialmente atrapada (Figura 5).

Acuífero colgado: Acuífero a manera de lente y delgado dentro de la zona no saturada, suspendido muy por arriba del nivel freático.

3.2 INFILTRACIÓN Y RECARGA

El término infiltración hace referencia al agua que atraviesa la superficie del suelo, mientras que el término recarga alude al agua que alcanza el nivel freático de un acuífero, en donde ambos conceptos muestran magnitudes diferentes a medir, por lo cual es inaceptable confundir estos términos (Custodio y Llamas. 1976).

CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN

Se le conoce como capacidad de infiltración a la velocidad de máxima penetración del agua sobre la superficie del suelo. Esta agua puede ser proveniente de la lluvia o de la irrigación. La capacidad de infiltración dependerá de las condiciones físicas del suelo, es decir, un suelo impermeable como lo puede ser un suelo arcilloso y/o compacto mantendrá una tasa de infiltración baja. Sin embargo una tasa de infiltración alta está dada por un suelo no consolidado con textura arenosa de grano grueso.

La cantidad de agua por precipitación es un valor importante. Si esta excede la capacidad de infiltración, la porosidad del suelo tiende a colmatarse, provocando un aislamiento del agua formando encharcamientos en el terreno y la formación de una escorrentía superficial. La infiltración será menor si la precipitación es violenta o rápida en un corto período de tiempo. Mientras que si llueve de forma lenta y por un tiempo prolongado habrá una mayor infiltración.

El valor de la infiltración está en función de la permeabilidad en el sentido del flujo y gradiente hidráulico, los cuales suelen modificarse en el proceso de infiltración (Custodio y Llamas. 1976). El volumen infiltrado se calcula para periodos de larga duración como un mes o un año.

El valor de esta variable esta dada por la siguiente ecuación, en donde es aplicable con existo en zonas semiáridas (Custodio y Llamas. 1976).

$$IF = \alpha(P - P_0)$$

Donde:

IF = Infiltración en (mm/a)

P = Precipitación sobre la cuenca (mm/a)

P_0 = Valor en mm/año característico de la cuenca (mm/a)

α = Coeficiente adimensional característico de la cuenca

En los sistemas de recarga superficial los datos de la capacidad de infiltración varían, ya que si la columna de agua aumenta, la capacidad e infiltración aumenta, pero hasta un límite el cual lo decide el suelo, ya que la presión del agua que ejerce sobre el suelo suele ser tal que puede compactarlo y disminuir significativamente su permeabilidad.

Cuando se realiza un proyecto de recarga, el material expuesto al contacto con el agua suele colmatarse, provocando costos para su recuperación, por lo que es indispensable conocer cual es la calidad química del agua para determinar los periodos de limpieza del suelo.

Cuando se realiza la recarga a profundidad, la superficie filtrante es del orden de pocos metros cuadrados a algunas decenas de metros cuadrados. En principio los caudales de inyección por pozo son similares a los de bombeo (Custodio y Llamas. 1976), sin embargo para reducir los problemas de colmatación se recomienda disminuir éste valor.

De acuerdo con Fernández Escalante. 2004, dos maneras de poder cuantificar la infiltración de manera directa es mediante el uso de infiltrómetros y lisímetros:

Los *infiltrómetros* son dispositivos los cuales nos darán la oportunidad de conocer cuál es la tasa de infiltración en el lugar ya que el valor que se obtiene es muy puntual.

Existen diferentes tipos de infiltrómetros, pero el que comúnmente se utiliza es el de cilindros concéntricos y de estos el más sencillos a utilizar es el de cilindros excavados en el suelo. Con éste instrumento se puede obtener el valor de la infiltración mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1) \ln \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R}}$$

Donde:

f = Es la capacidad de infiltración (m/s)

R = Es el radio del cilindro excavado en el suelo en (m)

h_1 = La altura cuando se llena el cilindro en el tiempo 1 (t_1) en (m)

h_2 = Corresponde a la altura cuando se llena el cilindro en el instante t_2 en (m)

El *lisímetro* es un bloque de suelo aislado en un cilindro que permite medir la transmisibilidad del agua por el mismo.

Lo que permite medir es el valor de la evapotranspiración por medio de la siguiente ecuación:

$$EVT = P + Rr \pm Es \pm \Delta\theta$$

Donde:

EVT = Evapotranspiración (mm/a)

P = Precipitación (mm/a)

Rr = Es el aporte debido al riego (mm/a)

Rt = Es la recarga en tránsito o el drenaje en profundidad (mm/a)

Es = Es la escorrentía superficial (mm/a)

$\Delta\theta$ = Es la variación del contenido de humedad en el tiempo (mm/a)

El lisímetro es un sistema que aísla porciones de suelo y permiten medir las entradas y salidas de agua y el intercambio de humedad, sirviendo para estimar, por diferencia ambas, la evapotranspiración de una determinada cubierta vegetal (Fuente: www.ocw.upm.es).

La medida de la evapotranspiración es determinada por el balance hídrico de los dispositivos. Comúnmente hay una balanza en el fondo del lisímetro donde se calcula la cantidad de agua evaporada. Otro tipo de lisímetro utiliza en lugar de una balanza un sistema de drene, en donde la cantidad drenada equivale a la cantidad evapotranspirada.

Para el primer dispositivo (Lisímetro de pesada) el valor de evapotranspiración (EVT) se calcula de la siguiente manera:

$$EVP = P + I - D \pm \Delta\theta$$

Donde:

I = Riego

D =Drenaje

Para el segundo dispositivo (Lisímetro de drenaje) se calcula con la siguiente fórmula:

$$ETR = P + I - D$$

3.3 RECARGA NATURAL (NR o RN)

La recarga natural es una forma de llamarle a la infiltración de agua que llega al nivel freático causando el aumento de su elevación, al llegar el agua al acuífero proveniente de la superficie del terreno que esta aunado al flujo descendente del liquido hacia la zona saturada del acuífero.

Las maneras de recargar de forma natural un acuífero son por agua de lluvia, escurrimientos superficiales y por transferencia entre acuíferos.

TIPOS DE RECARGA NATURAL

Se distinguen dos tipos de recarga natural: la directa (local o difusa) y la indirecta (localizada o preferencial). La recarga directa se define como la percolación vertical directa de la precipitación o través de la zona no saturada, que se une al agua subterránea. La recarga indirecta es la percolación de la escorrentía superficial localizada en depresiones topográficas (J. M. Ruiz. 2003), tales como zonas estancadas, lagunas, agua ligada a labores y acciones antrópicas, que dan lugar a fenómenos tales como excedentes, retornos de riego, fugas de redes de abastecimiento, saneamiento, regadío e infiltración en embalses, depósitos y balsas.

MÉTODOS PARA CALCULAR LA RECARGA NATURAL

El cálculo de la recarga hacia el acuífero se puede hacer mediante métodos directos e indirectos. Sin embargo, su determinación es comúnmente muy complicada, por lo que la incertidumbre y el error deberán estar contemplados para la decisión de cada proyecto.

De acuerdo con Fernández Escalante. 2004, los métodos que comúnmente se aplican son de manera directa e indirecta como se muestra a continuación:

i. MÉTODOS DIRECTOS

De acuerdo con Fernández Escalante (2004) y Murillo Díaz (2004) los métodos indirectos son los siguientes:

- Método de balance de masas, ya sean determinados in situ (técnica directa), o bien simulados en gabinetes con modelos estocásticos de la precipitación (técnica indirecta).

Se aplica el principio de conservación de masas durante un período de tiempo determinado a una cierta región del espacio en volumen definido y delimitado por fronteras ya caracterizadas. Aunque no es necesario hacerle éste estudio a toda la cuenca, el método se puede adaptar y aplicarse solo en algunas porciones de la misma.

- Cálculos hidrodinámicos (con cierta incertidumbre en la zona no saturada).

Se basa a la utilización de modelos matemáticos, con ecuaciones de flujo bajo condiciones de saturación del agua de manera parcial o total. Existen dos métodos básicamente, una es mediante el empleo de métodos numéricos los cuales ayudarán analizar profundamente las situaciones de flujo complejas bajo una ambiente heterogéneo o transitorio y la segunda es mediante la toma de datos en campo en un régimen estacionario, es decir en donde la conductividad hidráulica no saturada no pueda ser calculada.

Los dos principios mencionados para la obtención del valor de recarga natural es mediante un uso de las matemáticas aplicadas a través de los modelos numéricos de flujo y la ecuación para determinar la aproximación al flujo de Darcy.

- Modelos numéricos de flujo.

Éste modelo se basa en la construcción de un modelo de flujo en el que se considera a la recarga como un parámetro de calibración. La gran ventaja de éste método es la flexibilidad de cuantificar la recarga media anual de un área relativamente extensa, sin embargo resulta un poco difícil por no poder precisar la evolución en espacio-tiempo la recarga de los acuíferos por lo que se necesitan valores previamente calculados para la implementación del método y poder determinar dichos parámetros.

- Técnicas de trazadores químicos e isotópicos naturales.

Los métodos basados con respecto al transporte de masas son aquellos que contemplan su aporte por medio de la filtración de los mismos a través de la precipitación, tomando en cuenta que dichos elementos pueden venir de la misma agua o del polvo que contienen sustancias, mismas que al disolverse con el agua caen al suelo y se depositan.

El método que comúnmente se utiliza es el del ion cloruro, ya que muestran un carácter conservativo y su determinación es fácil de obtener. El cálculo de la recarga de un acuífero se considera menor cuando ya se ha caracterizado la salinidad del mismo y al monitoreo de la zona cercana al nivel freático, además de la zona no saturada. La caracterización del cloruro atmosférico requiere de un prolongado tiempo de monitoreo ya que el valor obtenido es diferente en cada zona.

Los mayores problemas que presenta éste método es su aplicación, ya que éste no se puede emplear en zonas donde la actividad antrópica es importante, tal y como lo es en una zona de riego, aguas residuales o en lugares donde la salinidad es muy alta.

Estos métodos que requieren del monitoreo de los cloruros e incluso de los isótopos en la zona no saturada, implica su amplia observación en un pequeño perfil vertical, lo cual indicara un cambio ocurrido en la detección de los componentes, teniendo lugar a una recarga en el medio no saturado durante un tiempo determinado a cierta profundidad, siempre y cuando la humedad haya sido considerada estable en un largo período de tiempo.

El método de los trazadores por balance implica conocer las concentraciones del tritio ^3H aportado por la lluvia y por el radiocarbono ^{14}C , elementos que contiene el agua subterránea y nos indicara el tiempo de residencia del agua en el acuífero. Existe otro método de trazadores llamado de marcado, éste método consta de medir el flujo vertical del agua en el medio no saturado.

Aunque los métodos por trazadores son muy precisos, no son adecuados para su determinación cuando existen líneas de flujo preferencial o si hay otras fuentes de trazador.

- Balance del ión cloruro entre la concentración en el agua de lluvia y en la capa freática.

Diversos autores, (Schoeller. 1962; Custodio y Llamas. 1976) han aplicado el método químico para estimar la recarga de agua a la capa freática a partir de la concentración que sufre el ión cloruro como resultado de la EVT y que expresa la relación entre la precipitación y la recarga. El cloruro, dada su elevada solubilidad, es considerado un ión conservativo y un trazador natural del movimiento del agua ya que el terreno lo aporta en ínfima proporción. Este método basado en el transporte de masa, es alternativo a los hidrodinámicos y en buena medida independiente de ellos, por lo que resulta de interés para contrastar resultados.

La aplicación del método es de carácter regional y las estimaciones resultan un promedio de la recarga ocurrida en un periodo de tiempo más o menos prolongado, dependiendo de cada región, por lo anterior, la recarga se calcula de la siguiente forma:

$$R = C_P / C_R (P - E_d)$$

Donde:

R= Es la recarga

Ed= Es el escurrimiento superficial directo cuya concentración de cloruros se asume igual a la del agua de lluvia

C_P y C_R= son las concentraciones de cloruros en el agua de lluvia y en la freática respectivamente.

- Curvas de sucesión en un hidrograma.

El hidrograma es un gráfico que muestra la variación en el tiempo de alguna información hidrológica tal como: nivel de agua, caudal, carga de sedimentos, etc. para un río, arroyo o un canal, si bien típicamente representa el caudal frente al tiempo; esto es equivalente a decir que es el gráfico de la descarga (L³/T) de un flujo en función del tiempo. Éstos pueden ser hidrogramas de tormenta e hidrogramas anuales, los que a su vez se dividen en perennes y en intermitentes.

Permite observar:

- las variaciones en la descarga a través de una tormenta, o a través del año hidrológico;
- el pico de escorrentía (caudal máximo de la avenida);
- el flujo de base o aporte de las aguas subterráneas al flujo; o,
- las variaciones estacionales de los caudales si se grafica un período de uno o varios años.

Un mm de precipitaciones significa que en una superficie de un m² a caído un litro de agua de lluvia (1L/m²). El área bajo el hidrograma, es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma. Es muy raro que un hidrograma presente un caudal sostenido y muy marcado, en la práctica la forma irregular de la cuenca, la heterogeneidad espacial y temporal de la lluvia, la influencia de las infiltraciones, etc. conducen a hidrogramas de uno o muchos picos (caudal máximo).

Los hidrogramas son útiles, entre otras cosas, para comparar los tiempos de descarga y caudales pico de varias corrientes o cuencas hidrográficas, para así conocer las diferencias entre sus capacidades de respuesta ante avenidas.

ii. MÉTODOS INDIRECTOS

Según Fernández Escalante (2004), menciona las formas de poder medir indirectamente el valor de la recarga natural mediante los siguientes métodos:

- Estimación de la recarga a partir de las líneas de flujo a distintas escalas.
- Técnicas de modelación y simulaciones inversas de estimación de la recarga.

- Métodos empíricos basados en investigaciones previas de la precipitación suficientemente distribuidas en el espacio, apoyados por un GIS.
- Modelación inversa de perfiles de sondeo a lo largo de una zona no saturada gruesa.

3.4 RECARGA ARTIFICIAL (RA)

La recarga artificial es el conjunto de técnicas que de manera directa o indirecta y programada permite introducir agua al acuífero, intentando incrementar o mantener la disponibilidad y actuar sobre la calidad del agua.

El principal deseo de la recarga artificial es aumentar o mantener el volumen de agua subterránea disponible, reducir la intrusión salina, atenuar el abatimiento del nivel estático del agua, mejorar la calidad del agua de recarga mediante la purificación por medio del suelo, reducción del costo de bombeo, dilución del excesivo contenido de nitratos, cloruros u otros constituyentes químicos de las aguas de determinados acuíferos.

En las siguientes imágenes (Figuras 5 y 6) se muestran de manera general el concepto general del diseño de un sistema de recarga artificial de superficie y a profundidad, teniendo en consideración que debe existir una fuente de agua, misma que se pretende introducir por un método superficial o a profundidad. Cabe destacar como se atenderá más adelante, es conveniente realizar un proceso de tratamiento de agua para evitar problemas de colmatación y posteriormente realizar la recarga, para que en un determinado momento se extraiga para darle un tratamiento fina y poder ser utilizada para cualquier fin.

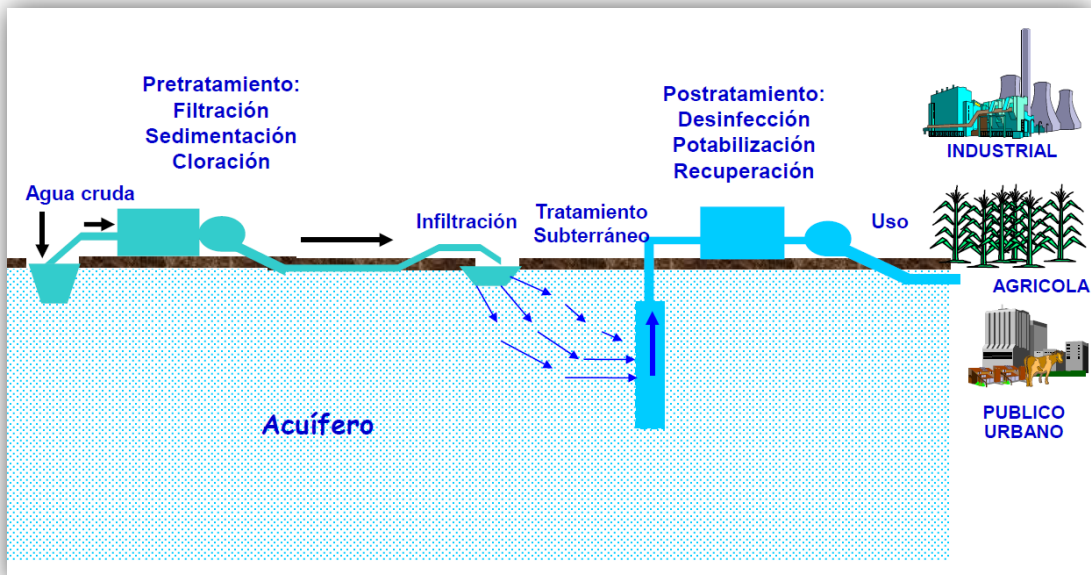


Figura5. Esquema simplificado de un proyecto de recarga artificial de superficie (www.agua.unam.mx).

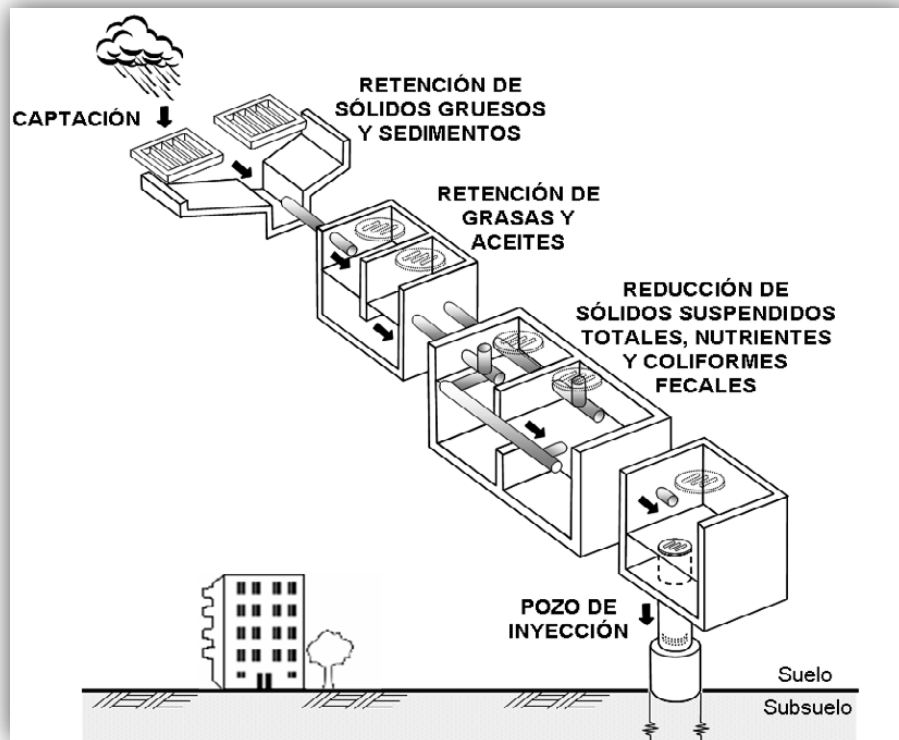


Figura 6. Esquema simplificado de un proyecto de recarga artificial a profundidad (www.agua.unam.mx).

La realización de la recarga artificial precisa de ciertos requisitos:

- Que haya agua en abundancia para recargar.
- Suelo permeable. Las características del suelo condicionaran al método de recarga.
- El acuífero ser libre y con un valor de conductividad y transmisibilidad alta para no generar domos en la superficie piezométrica, ya que si estos domos permanecen durante largos períodos de tiempo, la capacidad de infiltración disminuye, además de producir pequeñas inundaciones. Si el acuífero en los estudios previos muestra que tiene una alta transmisibilidad el impacto por el ascenso del nivel piezométrico será minimizado.
- La calidad del agua a utilizar es un factor importante ya que puede ser un importante foco de contaminación al acuífero receptor, además de poder provocar la formación de capas colmatantes en la superficie de infiltración, causando el deterioro de las estructuras, elementos de obra generando un proyecto de recarga poco factible.

CONDICIONES AMBIENTALES

La recarga artificial se propondrá en zonas en donde la demanda de agua subterránea supera a la cantidad de agua extraída es decir, cuando disminuyen las reservas totales del agua.

Los procesos de recarga dependen totalmente de la geología, morfología, clima, tipo de suelo, vegetación, etc. Para todo esto, lo más recomendable es que la vegetación sea casi nula y el suelo deberá tener al permeabilidad adecuada para la fácil filtración.

La infiltración del agua de recarga tiene un control estacional. Según estudios realizados con infiltómetros, la conductividad hidráulica disminuye en invierno y aumenta en verano, dado que el agua al ser expuesta a mayor temperatura tiende a disminuir su densidad y viscosidad, por lo que tiene una capacidad de infiltración mayor (Fernández Escalante. 2004).

FUENTES DE AGUA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL Y MATERIALES GEOLÓGICOS DONDE REALIZARLA

Un factor importante, para poder determinar la zona de recarga es la fuente de agua con la que se pretende realizar el proyecto; el agua puede provenir de diversas fuentes (www.igme.es):

- Agua pluvial.
- Agua procedente de cursos fluviales permanentes.
- Aguas superficiales discontinuas cuyo origen puede ser la escorrentía de tormentas.
- Agua residual doméstica e industrial, normalmente con un tratamiento de depuración secundario o terciario.

En principio la recarga artificial se puede efectuar en formaciones geológicas preferentemente granulares como depósitos aluviales o areniscas, y bajo ciertas precauciones y condiciones en materiales consolidados (roca dura) como en calizas y dolomías fracturadas o con karstificación. Asimismo, se puede realizar en materiales relativamente cementados o consolidados poco fracturadas, tales como rocas volcánicas. Entendiendo, que el caudal de admisión será menor, generando posibles problemas de colmatación.

Es posible efectuarla en cualquier tipo de acuífero, principalmente en acuíferos libres debido a las grandes facilidades que éste tipo de acuífero tiene como su permeabilidad y transmisibilidad adecuada para su optimización.

Se puede realizar con el nivel freático a profundidades variables, desde muy próximas a la superficie, hasta más de 100 m de profundidad. O simplemente en la zona no saturada.

Entendiendo todos estos aspectos, la efectividad del acuífero receptor dependerá de sus características hidrogeológicas, así como al régimen de extracción de agua subterránea al

que esté sujeto, no olvidando que el agua recargada debe permanecer al menos un año al interior del acuífero antes de ser captada para su uso posterior, esto con el fin de que la calidad del agua sea la ideal para su aprovechamiento.

MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

En países como Israel, EE.UU. e India entre otros, la recarga artificial de acuíferos se realiza desde hace varias décadas, variando en la forma de su ejecución de acuerdo a las características geológicas, hidrogeológicas, topográficas y climáticas que encada país se presentan.

La recarga consiste desde la captación de agua de lluvia, hasta la inyección de agua residual, mediante pozos a diferente profundidad (Gutiérrez. 2010). En la Tabla 1 se muestran los diferentes métodos principales para realizar la recarga artificial, recordando que todo proyecto de esta índole dependerá a las condiciones físicas de la región y de la zona a implantar la recarga.

a) Recarga Inducida.

Consiste en perforar pozos para extraer agua en zonas muy cercanas a drenes naturales (ríos o arroyos); el bombeo inducirá a que el agua del dren se infiltre hacia el subsuelo. Además está comúnmente gestionada por Organismos operadores que llevan a cabo un control exhaustivo de la calidad del agua a infiltrar, del monitoreo piezómetro, del mantenimiento de la obra civil mecánica y de su operación.

b) Recarga Incidental

Es aquella en donde no se tenía planeado como tal hacer la recarga, es decir, se forma a partir de fugas de tuberías, regadíos, conductos de fosas sépticas, etc. Aquí éste tipo de recarga comúnmente es un foco de contaminación para el acuífero ya que no se realiza un monitoreo sistemático sobre la calidad del agua.

Tabla 1. Métodos de recarga artificial.

Directo	<i>Inyección</i>	Por pozo Sumideros Dolinas	
		Incidental	Riego
			Inundación
Indirectos	<i>Superficial</i>	En cauces	Fugas Fosa Séptica
		Fuera de cauces	
	<i>Sub-superficial</i>	Pozos someros Drenes – Galerías	
Mixtos			

• **MÉTODOS DE RECARGA EN SUPERFICIE**

Los sistemas de recarga superficial, requieren, de una gran superficie de suelos permeables, y zonas vadosas que permitan la filtración de agua hacia el acuífero y además que tenga una alta conductividad hidráulica para impedir la formación de domos, gracias a que permitiría un flujo lateral adecuado.

Los principales métodos a utilizar se dividirán en dos partes:

1. En Cauces

- Serpenteos y represas.
- Escarificación.

Los dos métodos tratan de disminuir la velocidad de flujo para que aumente la velocidad y la tasa de infiltración.

Los **SERPENTEOS** y las **REPRESAS** consisten en aumentar el tiempo de contacto y la superficie entre el agua y el terreno, mediante la construcción de muros, generalmente de tierra y en forma de “L”, de manera alternada generando la figura de una serpiente, sobre el mismo cauce del río. (Figura 7).

La **ESCARIFICACIÓN** consta de limpiar el lecho del río, eliminando los sedimentos finos para mejorar la infiltración.



Figura 7. Imagen aérea que muestra la construcción de muros en forma de “L” para la recarga, aumentando el tiempo de contacto entre la superficie del terreno y el agua Foto: (Fuente: Fernández Rubio. 2011).

2. Fuera de Cauces

Lo que se pretende en éste método es expandir una capa amplia de agua sobre el terreno, incrementando la superficie de infiltración.

- Balsas
- Fosas
- Canales
- Campos de extensión

Las **BALSAS** son dispositivos de grandes áreas, alargadas y de baja profundidad, donde la infiltración se produce por el fondo.

Éste tipo de dispositivo es fácil de construir y de mantener y pueden disponerse comunicadas entre sí mediante compuertas. Las paredes suelen tener una inclinación entre 0.5 y 1 (vertical) a 1 (horizontal), con un ancho mínimo en la parte alta de 0.3 a 1 m (Custodio y Llamas. 1976).

Las **FOSAS** se asemejan a las balsas, en cambio, aquí las paredes, hacen que la filtración no solo se haga en el fondo si no también en los flancos (Fernández Escalante. 2004).

Los **CANALES** son mecanismos de poca profundidad que siguen la topografía del terreno, siendo comúnmente más largos y anchos que las balsas o las fosas (Fernández Escalante. 2004); al igual que las fosas, los canales también produce infiltración del agua por sus flancos y por el fondo.

Los criterios para poder determinar la construcción de canales dependen de la profundidad del nivel del agua debajo del canal, ya que esta deberá ser por mínimo el doble de la anchura del canal, para que el agua pueda infiltrarse. El fondo del canal deberá ser escarificado o simplemente que no posea grandes cantidades de finos en el lecho del canal ya que puede producirse una desconexión entre el acuífero y la superficie de recarga.

La pendiente de terreno deberá ser lo suficientemente aceptable para que no haya sobrecarga de arenas en los bordes de las estructuras; se recomienda una pendiente máxima de 3:1.

Los **CAMPOS DE INUNDACIÓN** son áreas de terreno relativamente amplias en donde se colocan grandes volúmenes de agua, provocándose su expansión sobre la superficie generando una lámina de agua sobre la misma.

Esto es comúnmente aplicado en la agricultura, aunque de manera no intencional se recarga al acuífero ya que el objetivo solo es el regadío de las plantas. Además se puede considerar que esta técnica solo sería aplicable cuando las excedencias de agua son altas, siendo así que la recarga ya se podría considerar de manera intencional.

• **MÉTODOS DIRECTOS (A PROFUNDIDAD)**

Se emplean métodos de perforación y sondeos para la introducción de agua en las capas permeables del acuífero. Como sabemos esta técnica comparada con los métodos indirectos se acopla a lugares reducidos sin complicación alguna.

Los principales métodos son:

- Sondeos de inyección.
- Simas y dolinas.
- Drenes y galerías.
- Pozos Secos (Dry Wells).
- SAT (Sal – Acuífero Tratado).

Los **SONDEOS DE INYECCIÓN** se fundamentan en la elaboración de pozos profundos, para poder inyectar agua al acuífero. Éste es un gran método por que la disponibilidad de espacio que se requiere es muy escasa.

Para que sea posible determinar la elaboración de éste tipo de estructuras se deben tomar en cuenta diversos aspectos; es necesario que se cumplan cuatro condiciones que son necesarias y suficientes (www.igme.es):

- Que exista una formación permeable capaz de poder aceptar el agua.
- Exista una formación impermeable que cubra a la formación de inyección, y que mantenga separado del medio ambiente el tiempo que se considere necesario.
- Las características de ambas formaciones no cambien con la inyección.
- Con la inyección no se hipotecan recursos más importantes.

La colmatación en los pozos suelen ocurrir de manera muy rápida, por lo que se tienen que llevar operaciones de limpieza por bombeo inverso, éste es un factor económico que se debe de tomar en cuenta en un proyecto de tal envergadura; además de tener en cuenta que la calidad del agua debe ser lo suficientemente limpia para que la colmatación se retarde en su formación.

La inyección deberá efectuarse debajo del nivel piezométrico y con un caudal a inyectar adecuado, para evitar turbulencias y el desprendimiento de gases como CO₂ y la por consecuencia la precipitación de carbonatos.

La recarga en **SIMAS Y DOLINAS** consisten en utilizar los terrenos kársticos, en los que existen cavidades verticales que alcanzan la superficie. Aquí el agua suele ser de origen fluvial.

En estos casos la disolución se compensa con la disolución de la calcita, con lo que se inhibe la colmatación (Sukia Irastortza. 2009).

Los **DRENES Y GALERÍAS** son construcciones que se realizan a través de la elaboración de un pozo previamente y de ahí hacer líneas de perforaciones horizontales o sub-horizontales, de tal manera que haya un espacio extra de almacenamiento de agua. Es un método parecido a la formación de canales, solo que aquí es subterráneo, gracias a que no hay la disponibilidad de terreno suficiente en superficie.

El almacenamiento de agua dulce en un acuífero que tenga agua con niveles de salinización altos, permite su recuperación dependiendo de la estructura, flujo natural y efectos de flotación del agua dulce sobre la salada por diferencia de densidad, además considerando que la recuperación será mayor siempre y cuando el almacenamiento dure poco tiempo, siendo así que el acuífero mejorara aun más si los ciclos de recarga-explotación aumentan de manera progresiva (Custodio y Llamas. 1976).

Los **POZOS SECOS** son sistemas de recarga que función principal es la transferencia de agua de una zona a otra que es más capaz de absorberla. Estos pozos, a veces llamados desagües franceses (o “sumideros” y pozos de infiltración” en algunos lugares del mundo, están diseñados para el desplazamiento temporal de agua como la que se produce en temporada de lluvias.

Estos pozos no son captadores de grandes volúmenes de agua, debido a que suelen colmatarse. Son cavados generalmente a una baja profundidad y son de un gran diámetro.

- **MÉTODOS DE RECARGA MIXTOS**

El empleo de los métodos superficiales y profundos en uno solo, se forma por las necesidades y problemas técnicos en cuestión. Aquí se mostraran algunas metodologías a emplear:

- Zanjas y sondeos.
- Pozos colgados o que intercomunican uno colgado con otro infrayacente.
- Filtración en el lecho de los ríos.
- Pozos ASR (Aquifer Storage and Recovery).

La elaboración de **ZANJAS Y SONDEOS** consisten en una gran zanja de infiltración, de escasa profundidad, rellena de grava calibrada, dentro de la cual se ubican sondeos de recarga tal y como se muestra en la figura 12 (ITGE. 2000).

El empleo de estos métodos impide la creación de grandes obras superficiales para el almacenamiento de agua. Se trata de un método iniciado a finales de la década de 1940 por el USGS, sin que los ensayos fueran culminados. La primera estructura operativa empezó a funcionar en New Jersey en 1960 (www.asrforum.com/frames/wherefr.html).

Un tipo de proyecto que se pone en marcha, son el método de **Almacenamiento y recuperación de agua en acuíferos mediante pozos (ASR por sus siglas en ingles Aquifer Storage & Recovery)**, ya que esta es una tecnología para poder capturar grandes volúmenes de agua en temporadas de grandes precipitaciones y de alta calidad a través de los sondeos, para que en un futuro su recuperación sea pronta y poco costosa en los períodos secos y donde la calidad del agua tiende a empeorar (Figura 8). El empleo de estos métodos impide la creación de grandes obras superficiales para el almacenamiento de agua. Se trata de un método iniciado a finales de la década de 1940 por el USGS, sin que los ensayos fueran culminados. La primera estructura operativa empezó a funcionar en New Jersey en 1960 ([/www.asrforum.com/frames/wherefr.html](http://www.asrforum.com/frames/wherefr.html)).

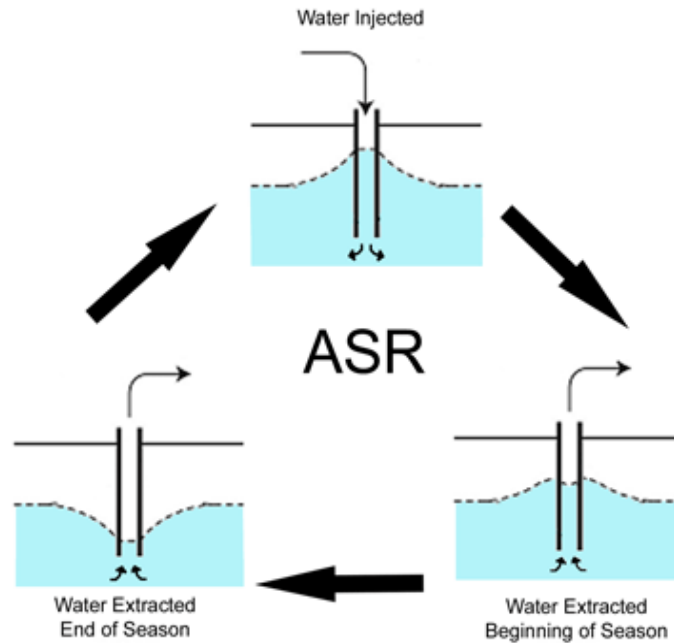


Figura 8 Diagrama que representa una instalación y funcionamiento del sistema ASR.

Los **POZOS COLGADOS**, son aquellos que por medio de la perforación de un pozo sobre un acuífero colgado, lo interconecta con otro más profundo, de tal manera que el agua irá en dirección vertical descendente. Éste método propiamente dicho será de recarga artificial profunda.

La **FILTRACIÓN EN EL LECHO DE LOS RÍOS o RBF** (River Bank Filtration), se remonta en Europa en la década de 1890 para evitar epidemias como el cólera.

Éste método consiste en inducir la infiltración en el lecho del río induciendo un gradiente por bombeo desde un pozo cercano (Fernández Escalante. 2004). El problema será la colmatación del pozo por agentes biológicos, además de los metales disueltos.

Los procesos colmatantes reducen la capacidad de infiltración, pero ayudan a la biodegradación de contaminantes (Fernández Escalante. 2004), por lo que la extracción de los compuestos químicos orgánicos, inorgánicos y patógenos será de beneficio a la calidad del agua a infiltrar, por lo que se recomienda hacer una limpieza periódica de las instalaciones.

En formaciones geológicas preferentemente granulares como depósitos aluviales o areniscas, y bajo ciertas precauciones y condiciones en materiales consolidados (roca dura) como en calizas y dolomías fracturadas o con Karstificación. También, se puede realizar en materiales relativamente cementados o consolidados poco fracturados, tales

como rocas volcánicas. Entendiendo, que el caudal de admisión será menor, generando de esta manera posibles problemas de colmatación.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DIVERSOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

Las obras superficiales tienen características totalmente distintas a las de profundidad, lo que las hace aptas para unos fines y no aptas para otros; situación similar pasa con las de profundidad, sin embargo aunque se elija una en especial, siempre estará sujeta a una desventaja.

Se sugiere que los métodos de recarga superficial, no se pueden realizar en terrenos donde la permeabilidad sea muy baja, de lo contrario se requieren grandes extensiones de terreno para poder hacer una recarga apreciable de agua, además de hacer casi siempre una nivelación del terreno, retirar zonas poco permeables o arcillosas, retirar vegetación, etc.

Es difícil establecer un proyecto de recarga superficial en una zona poblada o muy cultivada, además se adaptan mal a terrenos muy accidentados, por lo que la recarga no se efectúa de manera óptima. Sin embargo en los métodos a profundidad solo necesitan de poco espacio.

La construcción de instalaciones para un proyecto superficial tardan mucho tiempo pues son obras relativamente grandes, en cambio las de profundidad son pequeñas y más rápidas de construir, no obstante son de mayor costo en su mantenimiento.

Los caudales recargables varían de un método a otro, pero de manera general la cantidad de agua a recargar es mayor en un sistema superficial que uno a profundidad.

La calidad del agua a emplear en un sistema de recarga superficial no es tan importante ya que suele aprovecharse la capacidad de purificación de la zona no saturada para eliminar una buena cantidad de contaminantes, sin embargo la colmatación suele ser alta en estos casos. En un sistema de recarga a profundidad el problema de colmatación es un gran factor para que se interrumpa la recarga, por lo que la calidad del agua deberá ser muy buena, además de no ayudar a la depuración del agua en terreno por las mismas causas.

SOIL – AQUIFER TREATMENT (SAT)

Cuando las condiciones del suelo y el agua subterránea son favorables para la recarga artificial a través de los métodos de recarga a superficie, un alto grado de mejora se puede lograr al permitir que las aguas residuales parcialmente tratadas logren infiltrarse en el suelo, pase por los estratos y logren bajar hasta el agua subterránea.

La zona no saturada o "vadosa" actúa como un filtro natural y puede eliminar esencialmente todos los sólidos suspendidos, materiales biodegradables, bacterias, virus, y otros microorganismos. Las reducciones significativas en nitrógeno, fósforo, y las concentraciones de metales pesados también se pueden lograr (www.fao.org).

Después de las aguas residuales, tratadas en el paso a través de la zona vadosa y que han alcanzado el agua subterránea por lo general deja fluir una cierta distancia a través del acuífero antes de su extracción. Este movimiento adicional a través del acuífero puede producir más purificación (eliminación de los microorganismos, la precipitación de los fosfatos, la adsorción de compuestos orgánicos sintéticos, etc.) de las aguas residuales. Puesto que el suelo y el acuífero se utilizan como tratamiento natural, se denominan sistemas acuíferos de tratamiento de suelo o SAT. El SAT es, esencialmente, una baja tecnología y avanzado sistema de tratamiento de aguas residuales. También tiene una ventaja estética ya que el agua recuperada de un sistema de SAT es no sólo clara y sin olor (www.fao.org) y es aprovechable para diversos usos posteriormente a su extracción; este ejemplo se observa en el Acuífero del Valle del Mezquital, en donde el agua residual generada en el Valle de México se utiliza para el riego en la zona y que a su vez esta agua se infiltra se purifica naturalmente y recupera y aumenta los niveles del acuífero, a tal magnitud que existe un proyecto en el cual se pretende bombear esta agua y enviarla al Valle de México.

COLMATACIÓN

La colmatación puede deberse a efectos mecánicos, actividad biológica y a procesos químicos.

La recarga artificial, en lo referente a los fenómenos de colmatación, exige condicionantes rigurosas en lo que respecta al agua de recarga. La afección sobre la tasa de infiltración es tan importante que incluso en los casos de donde se opera con una concentración muy baja de sólidos totales en suspensión es necesario programar sistemas de limpieza y descolmatación de las instalaciones. Al cabo de un período de tiempo es necesario dejar el dispositivo de recarga ya que su capacidad de infiltración disminuye con un caudal de operación ya definido. Para ello es necesario estimar la vida útil de las instalaciones y realizar un estudio económico de la misma para verificar su rentabilidad (ITGE. 2000).

El mantenimiento de las instalaciones que realizarán la recarga artificial deberá ser mediante tratamientos preventivos tales como el filtrado y/o penetración de agua, así como curativos, mediante la restauración de la capacidad de infiltración del sistema por medio de técnicas de secado, secado-re humedecimiento, retirada de la capa colmatada, filtrado, lijado, escarificación, técnicas de roturación, etc.

a) COLMATACIÓN MECÁNICA

Partiendo de un principio mecánico, se sabe que para una partícula sea cual sea su naturaleza pueda ser transportada por una corriente de agua, se necesita cierta velocidad, además el tamaño de esta deberá ser el adecuado para que esto suceda; ahora si la velocidad disminuye, la partícula suspendida puede asentarse. Éste fenómeno es un factor constante en los problemas de las instalaciones que realizan la recarga artificial, ya que el agua después de estar en constante movimiento, suele estar en reposo durante un tiempo prolongado, depositándose sobre el suelo, en los poros o en las fisuras del mismo,

provocando la formación de una pequeña capa o costra superficial, misma que impide el flujo del agua de manera optima (ITGE. 2000).

En los sistemas de recarga por pozos de inyección, aparte de la colmatación provocada por la sedimentación de las partículas, también es producida por la gran cantidad de gases que se producen por la entrada de aire, generando burbujas que se comportan como una barrera semisólida impidiendo el flujo del agua.

b) COLMATACIÓN BIOLÓGICA

Esta se genera por la aparición de algas y plantas en el agua, además por la utilización de agua con un cierto contenido de materia orgánica; esto generalmente sucede en épocas de alta luminosidad y temperatura, tal y como es el verano (ITGE. 2000).

El problema en realidad no es la cantidad o el número de organismos que vienen en el agua para utilizarse en la recarga, si no en realidad el problema es el número de organismos que se proliferaran, provocando que estos lleguen a ocupar los espacios porosos del suelo, o que se concentren en los filtros purificadores, obstruyendo así la efectividad del proceso, causando pérdidas económicas significativas, así como de tiempo por la restauración de los equipos y del suelo.

c) COLMATACIÓN POR PROCESOS QUÍMICOS

El agua a recargar en el acuífero es de una naturaleza extraña a la que originalmente se encuentra en el mismo, por lo que las reacciones químicas no pueden pasar desapercibidas ya que se producen intercambios iónicos, precipitación, absorción, adsorción, oxidación-reducción, etc. (ITGE. 2000).

RECARGA CON AGUA RECLAMADA

Día a día los proyectos de recarga que utilizan agua residual han sido mayores, después de un tratamiento secundario o terciario en algunas ocasiones. Los casos como ya se vio en el capítulo 2 son diversos pero en especial son los que se han hecho en Los Ángeles (Whittier Narrows); en Phoenix; Arizona; Tel Aviv en Israel, etc. en los cuales el volumen de agua tratada es pequeña o simplemente de carácter experimental (Custodio y Llamas. 1976).

Los sistemas más utilizados para la recarga con aguas residuales son los de superficie tal como la inundación del terreno, el riego por aspersión y/o por surcos, siendo éste el que suele tener mayor rentabilidad, además de que estos métodos al infiltrar el agua por el suelo, éste tiende a realizar un proceso de purificación natural, depurando el agua residual de algunos compuestos como los nitratos, fosfatos, DQO, DBO, etc.

Se sabe que el acuífero del Valle del Mezquital, es único en su tipo debido a que la agricultura generada por la población es mantenida mediante el uso de agua residual proveniente de la Ciudad de México y área conurbana, provocando que se utilicen grandes volúmenes de agua y estos se infiltran de manera natural causando un efecto de recuperación del acuífero.

CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA OPTIMA PARA UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL

La calidad del agua natural subterránea depende de la roca almacén que la contiene y de la interconexión que hay entre acuíferos, siendo así que su calidad varía de acuerdo al recorrido subterráneo.

Cuando el agua no es afectada por impactos antrópicos, se puede decir que es de excelente calidad de acuerdo a un enfoque físico, químico y biológico. Sin embargo, el agua puede tener concentraciones naturales de Fe, Mn, As, F, sales, etc. lo cual la hace inaceptable para consumo humano (Ian Gale. 2005).

La calidad del agua resulta del proceso de purificación natural que efectúa el suelo al retener algunos sólidos disueltos, o hacer un filtrado microbacteriológico.

Pero la calidad natural del agua puede ser alterado mediante actividades mismas que el ser humano hace sobre el acuífero, tal y como lo es la extracción de agua subterránea, el riego, cambios de uso de la tierra, la minería, la agricultura, la creación de ciudades, etc.

En general, en acuíferos libres y confinados donde se ha extraído agua en exceso, la disminución piezométrica, es acompañada eventualmente por el deterioro de la calidad misma (Ian Gale. 2005). El agua por escorrentía y por lluvia, son un factor favorable para la recarga natural o artificial del acuífero y proveerán agua de una calidad aceptable. Esto ayudara por medio de disolución a mejorar la calidad del agua ya alterada por la extracción intensiva, además de disminuir la intrusión salina lateral en zonas costeras principalmente.

Cuando se planea para un proyecto de recarga utilizar agua potable, de lluvia o con agua con un tratamiento de purificación ya sea a nivel secundario o terciario dentro de acuíferos confinados y salobres, la calidad del agua inyectada seguramente en su calidad química puede deteriorarse.

Para evaluar la eficacia de la gestión de la recarga de acuíferos, es importante conocer la calidad natural del agua subterránea, los impactos humanos que han ocasionado en la zona, además de los procesos geoquímicos involucrados en el lugar de estudio. Posteriormente realizar un análisis del agua que se utilizara para la recarga y verificar cuáles son sus características físicas, químicas y biológicas para no efectuar una recarga que perjudique en un futuro próximo al acuífero y agravar el problema por la disposición del liquido.

a) TIPO DE AGUA A RECARGAR

El volumen de agua a utilizar deberá ser el suficiente para poderse ocupar en un proyecto de recarga. Los tipos de agua pueden ser de dos tipos principalmente:

i. Agua de Escorrentía de tormenta y de cursos fluviales permanentes.

Sobre todo las áreas urbanas son aquellos sitios en los cuales se generan cantidades significativas de agua por las intensas lluvias, por lo que la construcción de estanques o balsas de infiltración son la solución para poder almacenar estos volúmenes significativos. En áreas rurales las escorrentías superficiales son generadas desde los campos agrícolas

o tierras no cultivadas. En estas áreas (p. ej. En Saurashtra, India) esta escorrentía es canalizada hacia pozos de gran diámetro cavados a mano para recargar el acuífero (Ian Gale. 2005). En ocasiones se construyen diques para disminuir la carga de sedimentos y hacen que aumente el tiempo de retención del agua provocando la infiltración por gravedad.

La calidad química del agua urbana por escorrentías varía en su calidad dado que los contaminantes pueden provenir de diversas fuentes como de industrias, de hogares, de los productos químicos aplicados en parques, de zonas de construcción, etc. lo cual ayuda a decidir que la primera descarga es aquella que contiene el mayor número de contaminantes la cual deberá ser catalogada como desecho, siendo el agua descargada posteriormente de mejor calidad para poder ser tratada a un bajo costo y posteriormente utilizada en la recarga.

En las zonas agrícolas los plaguicidas, fertilizantes y demás compuestos químicos que se utilizan en este tipo de lugares, así como en la ganadería, la escorrentía utilizada de estas fuentes para la recarga tiende a empeorar la calidad química del acuífero, perdiendo la capacidad de purificación que tiene el suelo sobre el agua, por lo que obligando a la incorporación de otras técnicas de tratamiento del agua.

ii. Agua reciclada o residual.

El utilizar agua reciclada implica tener una fuente de abastecimiento con un volumen basto, tasa uniforme y calidad constante e inferior comúnmente; esta agua tuvo que ser tratada previamente para considerarse aceptable, con el objeto de no permitir que la calidad química del agua en el acuífero varíe de manera significativa.

El agua puede provenir de dos fuentes principales, es decir, de las descargas de uso doméstico o industrial; siendo así que el agua residual podrá tener como objetivo un uso posterior a los usos no potables del mismo como lo es el riego de parques, jardines, campos de golf, alimentación de calderas, riego de calles, lavado de automóviles, etc.

Las limitaciones para el uso de esta agua en un proyecto de recarga es la sociedad y los costos de bombeo y transporte del agua desde la planta de tratamiento hasta donde se vaya a realizar el proyecto (Ian Gale. 2005). La reutilización de las aguas residuales en las zonas urbanas ha sido una práctica muy utilizada en muchos países áridos o semiáridos como en México y países del Medio Oriente así como africanos. Por otra parte la reutilización de este recurso residual impide de manera considerable que éste vaya a parar al mar contaminando el ecosistema del lugar, impidiendo algunos efectos no deseables como son los malos olores, el efecto visible, eutrofización e incluso la contaminación de ríos y acuíferos subterráneos.

El mayor inconveniente para el uso de agua residual para un uso público-urbano es la concientización ideológica para que la población adquiera y utilice este tipo de agua en su vida diaria, debido a que es difícil pensar que esa agua provino de aguas residuales.

b) ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA RECARGA ARTIFICIAL.

En México y en el mundo existen estándares de calidad y Normas que regulan las condiciones físicas, químicas y biológicas que debe tener el agua para un fin determinado. Las Normas especifican los pasos a seguir para llevar a cabo un cierto proyecto, en

nuestro caso, es la recarga artificial. Las Normas que se deben cumplir de acuerdo a éste trabajo bajo la normatividad mexicana son:

- NOM-015-CONAGUA “Infiltración artificial de agua a los acuíferos” nos señala las características y especificaciones de las obras y del agua.
- NOM-014-CONAGUA “Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada”.
- NOM-003-ECOL-1997 o llamada también NOM-003-SEMARNAT “Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público”.
- NOM-127-SSA1 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe sostenerse el agua para su potabilización”.

Las Normas aplican una serie de referencias, las cuales obligan a la persona a realizar ciertos procedimientos para el muestreo y análisis de muestras.

La norma NOM-015-CONAGUA tiene por objetivos:

- Proteger la calidad del agua en los acuíferos
- Aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.

Esta norma se aplica en todo el territorio nacional, para las personas que planean la realización de obras de infiltración mediante la disposición de agua pluvial y escurrimiento superficial al suelo y subsuelo con una capacidad mayor a los sesenta litros por segundo.

Las especificaciones principales que muestra la norma son:

5.1.2 El suelo deberá ser caracterizado conforme a lo dispuesto por la norma ISO 15175:2004, Calidad del suelo.- Caracterización del suelo en relación con la protección del agua subterránea; la que la sustituya, o la NMX correspondiente.

5.2.1 Se deberán observar las especificaciones establecidas en el numeral 6.2 de la NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.

5.2.2 La infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa. Para el muestreo del agua nativa se utilizara la Norma ISO/CD 5667-11-2006 Calidad del Agua. Parte 11.- Guía para el muestreo de aguas subterráneas, la que sustituya o la NMX correspondiente.

5.2.3 Las obras de disposición de agua al subsuelo mediante pozos de infiltración, deben contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración tendrá los límites establecidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Métodos de prueba y muestreo para agua residual.

Contaminante	Unidad de medida	Límite	Método de prueba	Método de muestreo
Grasas y aceites	mg/L	15	NMX-AA-005-SCFI-2000	NMX-AA-003-1980
Materia flotante	mg/L	0	NMX-AA-006-SCFI-2000	
Sólidos sedimentables	mg/L	2	NMX-AA-004-SCFI-2000	
Sólidos suspendidos totales	mg/L	150	NMX-AA-034-SCFI-2001	
Nitrógeno total	mg/L	40	NMX-AA-026-SCFI-2001	
Fósforo total	mg/L	20	NMX-AA-029-SCFI-2001	
Coliformes fecales	NMP/100 ml	No detectable	NMX-AA-042-1987	

6.1.1 Se debe mantener una bitácora de resultados del muestreo y las pruebas aplicadas en la que se consignaran los datos de los informes emitidos por los laboratorios acreditados y aprobados, antes y después de cada temporada de lluvias.

7.1 Los pozos de infiltración deberán contar con un dispositivo de cierre manual o automático.

La NOM-014-CONAGUA nos muestra los siguientes parámetros obligatorios a realizar para poder implementar la recarga artificial con agua residual tratada.

6.1.2 Fuente del agua de recarga. Ubicación y sus características de la fuente residual que se pretende utilizar para el Sistema de Recarga Artificial en términos de su: origen, régimen de descarga, tipo y nivel de tratamiento, volumen de agua disponible, uso o destino actual, características físico-químicas y microbiológicas del agua de recarga en términos del requisito 6.4.6 de esta NOM.

6.1.3 Hidrogeología de la zona del proyecto de recarga artificial.

Se refiere éste apartado sobre todo a la caracterización geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de la zona donde se pretende realizar el proyecto.

6.3.1 el agua residual tratada utilizada en la recarga debe cumplir los requisitos indicados en la Tabla 3.

Tabla 3. Calidad del agua residual tratada para la recarga artificial.

Tipo de contaminante	Sistemas de recarga	
	Superficial/subsuperficial	Directo
Microorganismos patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos
Contaminantes regulados por la Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994
Contaminantes no regulados por la Norma	DBOS \leq 30 mg/L, COT= 16 mg/L	COT .1 mg/L

6.3.2 Cuando a distancias menores a un kilómetro del límite exterior del sistema de recarga artificial existan captaciones que suministran agua para usos público - urbano o domestico, se deben cumplir además de cumplir de los requisitos anteriormente lo siguiente:

- Realizar un proyecto piloto.
- Efectuar un análisis hidrogeoquímico.
- Aplicar un modelo numérico de flujo y transporte de solutos.
- Respetar distancias mínimas horizontales entre el límite exterior del sistema de recarga y las captaciones para uso público-urbano o doméstico, que van desde los 150 m para una recarga superficial y 600 m para una profunda.
- Hacer valer el tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción; el agua deberá estar almacenada por 6 meses cuando la recarga fue superficial y el doble de tiempo cuando fue a profundidad.

Cabe resaltar que esta Norma no es equivalente con ninguna Norma internacional, por no existir norma internacional sobre el tema.

Los niveles máximos permisibles de contaminantes no regulados por norma, en aguas residuales destinadas para la recarga son mostradas en las Tablas 4 (a y b):

Tabla 4 (a). Límites máximos permisibles de la NOM-014-CONAGUA-2007.

Contaminante	Máximo nivel (mg/L)
Químicos inorgánicos	
Antimonio	0.006
Asbesto (fibra > 10 µm)	7 millones de fibras por litro
Berilio	0.004
Boro	0.3
Hierro	0.3
Plata	0.1
Selenio	0.05
Microbiológicos	
Cryptosporidium	Ausencia no detectable
Vibrio cholerae	Ausencia no detectable
Giardia Lamblia	Ausencia no detectable
Conteo de bacterias heterotróficas	Ausencia no detectable
Legionella	Ausencia no detectable
Enterovirus	Ausencia no detectable
Productos de desinfección	
Bromatos	0.01
Cloritos	1
Ácidos Haloacéticos	0.06
Desinfectantes	
Cloraminas (Cl ₂)	Ausencia no detectable
Bióxido de cloro (ClO ₂)	Ausencia no detectable
Radiactivos	
Radio 226 y Radio 228 (Combinados)	5 pCi/L
Uranio	30 µg/L

Tabla 4 (b). Límites máximos permisibles de la NOM-014-CONAGUA en sus componentes orgánicos.

Contaminante	Máximo nivel (mg/L)
Químicos orgánicos	
Acilamida	0.0005
Alaclaro	0.02
Aldicarb	0.01
Atrazina	0.002
Benzo (a) pireno (PAHs)	0.0002
Bifenilos Policlorados (PCBs)	0.0005
Carbofurano	0.005
Clorobenceno	0.1
Cloruro de vinil	0.002
Dalapón	0.2
Dibromoetileno	0.00005
1,2-Dibromo-3cloropropano (DBCP)	0.001
o_Diclorobenceno	0.6
p_Diclorobenceno	0.075
1,2-Dicloroetano	0.005
1,1-Dicloroetileno	0.007
cis-1,2-Dicloroetileno	0.07
Trans_1,2-Dicloroetileno	0.1
Diclorometano	0.005
1,2-Dicloropropano	0.005
Di (2-ethylhexhyl) adipato	0.4
Di (2-ethylhexhyl) ftalato	0.006
Dinoseb	0.007
Dioxina (2,3,7,8-TCDD)	0.00000003
Diquat	0.02
Endothall	0.1
Endrin	0.002
Epiclorohidrina	0.002
Epóxido de heptacloro	0.0002
Estireno	0.02
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Glofosato	0.7
Heptacloro y epoxido de heptacloro	0.001
Hexaclorobenceno	0.001
Hexaclorociclopentadieno	0.05
Metil-Terbutil-Éter	0.03
Metoxicloro	0.02
Oxamil (Vidato)	0.2
Pentaclorofenol	0.001
Picloram	0.5
Simazina	0.004
Tetracloroetileno	0.005
Tetracloruro de carbono	0.005
Toxafeno	0.003
2,4,5_TP (Silvex)	0.05
2,4,5-Triclorobenceno	0.07
1,1,1-Tricloroetano	0.2
1,1,2-Tricloroetano	0.005
Tricloroetileno	0.005

La NOM-003-SEMARNAT indica los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehusen en servicios al público.

4.1 Los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los siguientes (Tabla 5):

Tabla 5. Límites máximos permisibles de contaminantes.

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de Helmito (h/L)	Grasas y aceites	DBO mg/L	SST mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≤1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto ocasional	1000	≤5	15	30	30

4.2 La materia flotante debe estar ausente en el agua residual tratada, de acuerdo al método de prueba de la NMX-AA-006.

4.3 el agua residual tratada rehusada en servicios al público no deberá contener concentraciones de metales pesados y cianuros mayores a los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-ECOL-1996, tal y como lo muestra la Tabla 6.

Tabla 6. Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros de NOM-001-ECOL-1996.

Parámetros (mg/L)	Embalses naturales y artificiales			
	Uso agrícola		Uso Público Urbano	
	Prom. Mensual	Prom. Diario	Prom. Mensual	Prom. Diario
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2
cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2
Cianuros	2	3	1	2
Cobre	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02
Níquel	2	4	2	4
Plomo	0.5	0.1	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20

La NOM-127-SSA1 marcará los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Tablas 7 a y b).

4.2 los límites permisibles de características físicas y organolépticas.

Estas características deberán ajustarse a lo establecido de la siguiente manera:

- El color deberá ser 20 unidades de color verdadero en la escala platino-cobalto.
- El olor y sabor deberá ser agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
- Deberá ser 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 7 (a-b) en donde los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

La radiactividad alfa global tendrá un máximo de 0.56 Bq/L (Becquerel por litro), mientras que la radiactividad beta global será de 1.85 Bq/L.

Tabla 7 (a). Límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1

Característica	Límite permisible
Aluminio	0,2
Arsénico (Nota 2)	0,05
Bario	0,7
Cadmio	0,005
Cianuros (como Cn-)	0,07
Cloro residual libre	0,2-1,50
Cloruros (como Cl-)	250
Cobre	2
Cromo total	0,05
Dureza total (como CaCO ₃)	500
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fierro	0,3
Fluoruros (como F-)	1,5
Hidrocarburos aromáticos en µg/L:	
Benceno	10
Etilbenceno	300
Tolueno	700
Xileno (tres isómeros)	500
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	1
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,5
pH (potencial de Hidrogeno en unidades de pH)	6,5-8,5

Tabla 7-b. Límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1

Característica	Límite permisible
<i>Plaguicidas en µg/L:</i>	
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0,03
Clordano (total de isómeros)	0,2
DDt (total de Isómeros)	1
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	1
Heptacloro y epóxido	0,03
Metoxicloro	20
2,4 - D	30
Plomo	0,01
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sulfatos (como SO4=)	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0,5
Trihalometanos totales	0,2
Yodo residual libre	0,2-0,5
Zinc	5

PROCESOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS QUE SUCEDEN DESPUÉS DE LA RECARGA.

Los fenómenos físicos, químicos y biológicos que suceden durante el paso del agua por un medio poroso en acción del agua infiltrada son: las degradación biológica, filtración, adsorción, absorción, intercambio iónico, precipitación, coprecipitación de metales pesados en carbonatos, sulfuros, etc.

En un proyecto superficial los sólidos en suspensión y disueltos tienden a estar en una concentración mayor que la original debido a la evaporación. Los sólidos en suspensión

son en su mayoría eliminados gracias a su precipitación ya que son retenidos en el suelo antes de la infiltración y en el transcurso de la misma.

El nitrógeno puede ser detectado como nitrito, nitrato, amonio y como nitrógeno orgánico. Éste elemento puede ser eliminado mediante procesos de desnitrificación tipo biológica de manera anaerobia produciendo una gran cantidad de gases y óxidos. Para todo éste proceso la acción de las bacterias provoca tales reacciones y más aun cuando se aportan pequeñas cantidades de aguas residuales que añaden una cantidad necesaria de carbono orgánico el cual ayuda a la acción de las bacterias. La velocidad de estos procesos biológicos aumenta cuando la temperatura es mayor a los 15°C.

El fósforo es eliminado por precipitación como fosfato de aluminio y fierro en suelos ácidos y como fosfato de calcio en suelos alcalinos.

Los factores importantes que afectan a la materia orgánica en el agua para sobrevivir son:

- La humedad del suelo ya que si esta disminuye hay menor supervivencia.
- Los nutrientes orgánicos son para las bacterias heterótrofas la mayor fuente de carbono.
- La luz solar es factor para la supervivencia de las bacterias ya que si esta es menor hay mayor facilidad que estas se reproduzcan de manera simple.

Existen factores que provocan la eliminación de ciertos tipos de virus en el suelo, tales factores son:

- El pH alto provoca la inactivación de virus.
- Las arcillas incrementan la adsorción de los virus, así como el contenido de materia orgánica.
- El agua de lluvia ayuda a la liberación de virus adsorbidos previamente en el suelo.

En el suelo, los metales pesados mantienen cierta relación con las arcillas, provocando un intercambio iónico entre ellas y la materia orgánica. Los metales pesados son eliminados por filtración mecánica del suelo. El boro es adsorbido por hidróxidos de Fe, Al y Mg, óxidos de Fe y Al, además de algunos minerales micáceos.

El Fe y Mn aparecen como óxidos y son insolubles, pero si se encuentran en un ambiente reductor, estos tienden a precipitar causando colmatación en la balsa de infiltración. El cobre, zinc, litio, níquel y cromo son usualmente adsorbidos por el suelo.

3.5 METODOLOGÍA

Como se ha explicado la recarga artificial tiene varios objetivos, pero el principal propósito es mantener el nivel del agua subterránea, utilizando la ingeniería civil adecuada para su construcción. Las técnicas empleadas para la recarga artificial suelen ir encaminadas a los siguientes temas:

- I. Mejorar el rendimiento sostenible de algunas zonas donde la extracción excesiva va en incremento.
- II. La mejora de la calidad del agua por medio de la disolución, sobretodo de los nitratos y cloruros así como de los carbonatos.
- III. El almacenamiento y la conservación de importantes cantidades del volumen del agua para necesidades futuras.
- IV. Para eliminar impurezas bacteriológicas del agua residual para que esta sea apta para su futura reutilización, gracias a las propiedades del suelo y de la zona no saturada para dicha depuración.
- V. Mantenimiento hídrico de zonas ecológicas.
- VI. Regulación de los excedentes almacenados en otras obras civiles.

En términos generales es muy difícil establecer un orden de prioridad para cada punto, dado que comúnmente aparecen juntos por lo que es necesario considerarlo de manera integral.

a. Delimitación del área

Todo proyecto de recarga artificial es específico e incluso la reproducción de las técnicas empleadas en áreas similares se basan a los aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, uso de suelo, etc. Para ello se realiza un análisis de todos estos campos, el cual tiene como objetivo observar aquella zona en la cual se tienen los problemas anteriormente mencionados y poder realizar un proyecto de esta índole.

Estas situaciones adversas se pueden localizar en conjunto al oriente de la Ciudad de México, en la Planicie de Texcoco.

El estudio a detalle de la porción sureste de la planicie de Texcoco dependerá de diversos factores a estudiar para poder determinar de manera precisa y determinativa distintos sitios de recarga.

Una vez delimitada el área es necesario investigar todos los aspectos físicos de la zona. Para ello la búsqueda bibliográfica vía electrónica en las páginas científicas nacionales como la del Instituto de Geología, Instituto de Geofísica, Instituto de Ingeniería, IMTA, INEGI, CONAGUA, Tesis profesionales y de posgrado, etc., que pudieran contener información específica de la Planicie, tal y como lo son los rasgos geológicos, estratigráficos, geomorfológicos, piezométricos, etc.

Por otro lado la búsqueda bibliográfica en el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua y en los organismos Operadores de los diversos Municipios y Delegaciones existentes alrededor de la planicie, son la fuente principal de información para realizar el análisis a detalle de la zona.

b. Estudios hidrometeorológicos

Éste estudio se lleva a cabo para determinar el patrón de las precipitaciones, las pérdidas por evaporación, el escurrimiento superficial y las características climatológicas, que son de gran utilidad para el diseño del equipo de recarga, cuando la opción se sustente en utilizar la recarga, agua superficial y también gestionar los tiempos de recarga para evitar

grandes pérdidas por evaporación. Esta información es proporcionada por el OCAVM en sus boletines anuales. Para la mejor interpretación de los análisis meteorológicos es necesario realizar graficas de precipitación/temperatura en espacio y tiempo.

c. Estudios hidrológicos

Para poder determinar cuales son las fuentes superficiales de agua, se toman en consideración los diferentes cuerpos de agua existentes en el área de estudio, esta información es posible obtenerla en la página electrónica de la Comisión nacional del Agua; existe una liga (SIATL) dentro de la misma página de la Comisión en la cual se observan los diversos arroyos que aportan agua a la superficie de la planicie de Texcoco, que son canalizados y posteriormente descargan en el Lago Nabor Carrillo.

d. Estudios hidrogeológicos

La comprensión clara de la hidrogeología de la zona es un factor a destacar dado que de ella depende el éxito de cualquier sistema de recarga artificial.

El realizar una síntesis sobre todos los datos geológicos regionales, y elaborando un mapa geológico regional a detalle, ayudan a Indicar la ubicación de los diversos estratos, edad, estructuras, datos tectónicos, etc. estos mapas deberán llevar cierta correlación con la topografía y el drenaje de los cuerpos geológicos; esta información es posible encontrarla en el mapa geológico de el Servicio Geológico Mexicano, así como en su página electrónica, en la cual indican claramente cuales son las formaciones existentes en la planicie, para que posteriormente, de acuerdo a los boletines geológicos se realice un análisis a detalle de estos aspectos.

Un mapa que muestre la información sobre las unidades geomorfológicas y lineamientos que rigen la presencia y el movimiento de los cuerpos de agua. Esta cartografía hidrogeológica a detalle mostrara lo siguiente:

- Las unidades hidrogeológicas delimitadas sobre la base de los acuíferos.
- La profundidad del nivel piezométrico en temporadas húmedas y secas a través del tiempo.
- Los distintos cuerpos de agua, con respecto a su calidad química.

El análisis del gradiente hidráulico y la configuración de las isopiezas en el espacio y tiempo, así como la relevancia que estos pueden tener en el alcance de la recarga artificial. Esto se obtiene con información piezométrica registrada en los pozos de observación y estaciones piezométricas del OCAVM en un periodo de 20 años (1990-2010), lo cual permite definir la variación espacio temporal del nivel del agua subterránea en la zona de estudio, esto con la implementación del programa Surfer.

e. Estudios del subsuelo

Para poder conocer al detalle la litoestratigrafía hasta una profundidad máxima de 300 m en la porción sureste de la Planicie de Texcoco, debido a la escasez de información sobre la litología en forma directa, la aplicación de métodos geofísicos para la selección del sitio

idóneo de la recarga artificial servirá para evaluar lo que no conocemos debajo de la superficie, sobre todo las condiciones hidrogeológicas que prevalecen.

Las técnicas indirectas a utilizar será el sondeo electromagnético (TEM) y sondeos eléctricos verticales, para ello se tomo la decisión de utilizar la información de 7 tendidos electromagnéticos; estos registros son obtenidos del realizado en el 2011 por el Instituto de Geología de la UNAM al OCAVM (Figura 9); gracias a los datos obtenidos se elaboraran una serie de secciones geológicas con la información de la litología de manera directa, es decir de los datos extraídos mediante las perforaciones que se realizaron en la elaboración de pozos con el objeto de extraer agua, información que el OCAVM proporcione de sus pozos inscritos en el REPDA.

La aplicación de los estudios indirectos como ya se menciona ayuda a hacer un estudio comparativo de imagen en torno a lo ya conocido tanto en superficie como en el subsuelo.

Otro objeto que tiene la implementación de estas técnicas es definir las estructuras en el subsuelo, además de su litología, y así determinar la presencia de agua. Como se sabe en esta porción de la planicie es considerada como lacustre por lo que el agua mantiene altos valores de conductividad, lo cual provoca una serie de dificultades al realizar las interpretaciones eléctricas.

Esto entre muchas otras cosas ayuda a identificar los flujos del agua subterránea en los procesos de recarga natural y por tanto en un futuro la artificial, así como la estratificación que comprende al acuífero con la variabilidad espacial de la conductividad hidráulica para la determinación de una zona de recarga.



Figura 9. Aplicación de un tendido electromagnético TEM en el área de estudio.

f. Calidad del agua subterránea

La toma de muestras se obtendrá de pozos cuya agua tiene como destino principal el uso doméstico, tomando la consideración de que las muestras colectadas y las pruebas realizadas no tengan la influencia de cloro u otro agente químico que provoque la desinfección de agua, para ello, es primordial realizar un muestreo en campo y recopilar información histórica, misma que es proporcionada por el OCAVM.

De la información proporcionada por el OCAVM sobre la calidad química del agua subterránea, es conveniente verificar si los resultados de los análisis químicos tienen la calidad analítica requerida para la interpretación hidrogeoquímica. Esto permitirá que las conclusiones e interpretación realizada presenten congruencia con las condiciones naturales. De esta manera la interpretación consiste en reconocer aquellos análisis que presenten información completa de aniones y cationes e identificar de estos cual es la congruencia entre las determinaciones de elementos traza.

Por lo anterior, para comprobar la relativa exactitud de los resultados de los análisis químicos se empleará la técnica del balance iónico o condición de electroneutralidad, fundamentada en la neutralidad eléctrica de las cargas de los iones mayores. La técnica para realizar en calcular el total de cargas de aniones y cationes es la siguiente:

El total de cargas positivas (cationes) y negativas (aniones) reportados por el laboratorio se obtiene sumando los equivalentes correspondientes. El error de balance se obtiene con la siguiente fórmula (Huizar Álvarez; et al. 2011):

$$\%Error = \left[\frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} \right] * 100$$

Al aplicar esta fórmula a todos los análisis proporcionados por el OCAVM, se determinaron los porcentajes de error para cada uno de ellos. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979), los análisis que se consideran aceptables son aquellos que presentan un error menor al 10% y por tanto indicará un análisis químico aceptable.

Por otro lado, con respecto a la relación de los elementos traza, es difícil determinar la calidad de su análisis si no se tiene la información sobre la técnica utilizada, las características del equipo de medición empleado para su análisis, el protocolo de muestreo y principalmente la preparación del personal que realiza las determinaciones.

Los parámetros en campo a medir serán mediante el empleo de una celda de aislamiento (Figura 10), en donde se llevaran a cabo las mediciones de:

- Temperatura.
- pH.
- Eh como potencial de oxido-reducción.
- Conductividad eléctrica.
- Oxígeno disuelto.

La celda de aislamiento funciona mediante el empleo de pequeñas mangueras, las cuales estarán conectadas a una válvula de descarga del pozo y dejarán fluir de manera continua

el agua y que, gracias a los electrodos colocados en la celda podrán determinar la evolución de los parámetros de campo a determinar con respecto al tiempo de descarga en el pozo. Esta a su vez tiene como fin evitar la contaminación del agua por la el aire, partículas y/u organismos que pudieran afectar la determinación de la calidad del agua tratando de medir con mayor precisión los parámetros químicos del agua.

El agua subterránea mantiene ciertas propiedades físicas y químicas muy particulares, sin embargo, cuando esta es bombeada y entra en contacto con la atmosfera, tiende a tener cambios mínimos pero significativos en su alcalinidad y pH.

Considerando estas situaciones, el empleo de una celda de aislamiento limitará en lo mayor posible tales cambios producidos por la interacción agua/atmosfera tratando que el agua nos de los valores más próximos posibles a la realidad, es decir a sus condiciones dentro del acuífero.

- Medición de pH.

La medición de la concentración de iones de hidrogeno en el agua subterránea se realizará con un potenciómetro previamente calibrado, el cual se colocara en la celda de aislamientos, de esta manera se registraran las lecturas del pH desde el principio del muestreo hasta el final.

Considerando que en agua pura a 22°C de temperatura, existen cantidades iguales de H₃O⁺ y de OH⁻, la concentración de cada uno es de 10⁻⁷ mol/L, es decir el pH es igual a 7. Sin embargo, en el subsuelo existen varios tipos de ácidos, los cuales hacen que varíe su pH, de esta manera el agua ácida fuerte tendrá un valor de pH=1 y un ácido débil una valor de pH=6. En cambio el agua químicamente básico o alcalino tendrá una concentración baja en iones H₃O⁺ y un exceso de OH⁻, considerando esta situación el pH varía a partir de pH=8 (débil) hasta pH=14 (fuerte). Considerando estas dos situaciones podremos considerar que el agua alcalina es básicamente por la presencia de carbonatos y bicarbonatos, en cambio un pH ácido nos puede indicar una alta contaminación sobretodo del tipo industrial.

- Medición del potencial oxido-reducción

El potencial redox es una manera de medir la actividad de los electrones. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de los protones.

En el agua si éste se encuentra en equilibrio y tiene un pH de 7, el valor es de +0.86 mV a 0°C y varía a +0.8 mV a 25°C. En los potenciales oxidantes la materia tiende a oxidarse y por tanto también a descomponerse. Esto se debe a que en el sistema suelen existir más de un estado de oxidación, como el H, O, C, S, N, Fe, Cr, Mo, Cu, Se, etc.

El agua con un potencial de reducción más negativo es la que se oxida. El oxígeno se difunde o disuelve de manera muy mala en un sistema quieto ya sea externo o interno, es decir, en un lago no existe un movimiento muy periódico del agua lo cual tiende a ser en un futuro condicionante para la vida acuática, movilidad geoquímica y su toxicidad.

- Registro de la conductividad eléctrica

Esta se medirá utilizando un conductivímetro portable. El dato obtenido nos dirá la capacidad que tendrá el agua para conducir la corriente eléctrica, es decir nos indicará la presencia de sales en solución. Éste es un parámetro que nos permitirá observar la evolución de la calidad del agua.



Figura 10. Celda de Aislamiento y dispositivos eléctricos para la medición de diversos parámetros físicos del agua.

- Medición de la alcalinidad

Previamente se mencionó que la alcalinidad del agua tiende a cambiar en espacio y tiempo, por tal motivo se toma la decisión de medir directamente éste parámetro en el campo. La técnica a emplear es el método estándar de titulación con el ácido clorhídrico 0.02N, con alícuotas de 20 empleando fenolftaleína y verde de bromocresol.

Cuando al agua se le agrega el indicador de fenolftaleína y aparece un color rosa, indica que la muestra tienen un pH mayor a 8.3 indicando la presencia de carbonatos, se procede a titular con HCl, hasta que el color rosa varía a incoloro, con esto se titula la mitad del CO_3 .

Una vez realizada esta técnica, se agregan unas gotas de verde de bromocresol, en el cual el agua se tiñe de azul, se continúa titulado con HCl hasta que el agua cambie a color verde, titulado de esta manera a los bicarbonatos (HCO_3) y la mitad restante de los carbonatos (CO_3).

Si las muestras de agua tienen un valor de pH menos a 8.3 la titulación se llevara a cabo en una sola fase, es decir, se agregan unas gotas de indicador verde de bromocresol, con el fin de que el agua tome un color azul y se procede a titular con HCl hasta la aparición de un color verde en el agua, titulándose el HCO_3 (Figura 11).

- Muestreo de agua.

Se colectaran varias muestras de agua para los siguientes objetivos:

- a) Análisis físico-químico.
- b) Determinar contenido de tritio e isótopos estables.
- c) Contenido de materia orgánica.

La toma de muestras, tienen como objetivo enviarlas a un laboratorio el cual de la información necesaria, para poder correlacionar los valores de campo y laboratorio, de esta manera, los datos se podrán procesar estadísticamente para poder aclarar las variaciones en espacio y tiempo mediante la elaboración de diagramas de Stiff.



Figura 11. Análisis de la alcalinidad del agua.

g. Procesamiento e interpretación de la información

El procesamiento de la información y análisis de los mismos para realizar los diversos mapas piezométricos e hidroquímicos; así como las secciones geoelectricas, será gracias a toda la información obtenida. Las secciones geoelectricas se realizarán en el software Auto-Cad 2010, utilizando la simbología para la litología correspondiente. Para los mapas piezométricos el software Surfer 2008 servirá para la configuración piezométrica en la región, sin embargo esta será procesada y se vera modificada para darle un sentido geológico al mapa en el programa Auto-Cad 2010.

Para la caracterización química del agua, se utilizara el programa Aqua-Chem, el cual genera los diagramas de Stiff, esta información generada por el software, será utilizada para que sea colocada en una serie de plantillas elaboradas en Google Earth Pro, en el

cual previamente se ubicaron todos los aprovechamientos encontrados en la zona de estudio, por lo que se facilita la referencia de los pozos con los diagramas de Stiff, ubicados en mapa topográfico ayudando al análisis espacio-temporal de las facies hídricas existentes en la zona de estudio.

Finalmente esta información será de vital importancia para saber cómo, cuándo y en qué momento realizar la recarga artificial, sin embargo el factor económico pudiera ser clave para que no se realice un proyecto de esta índole.

4. MEDIO FÍSICO

4.1 LOCALIZACIÓN

La planicie de Texcoco, México se ubica en el acuífero de Texcoco dentro de la región hidrológica - administrativa XIII "Aguas del Valle de México (Figura 12)

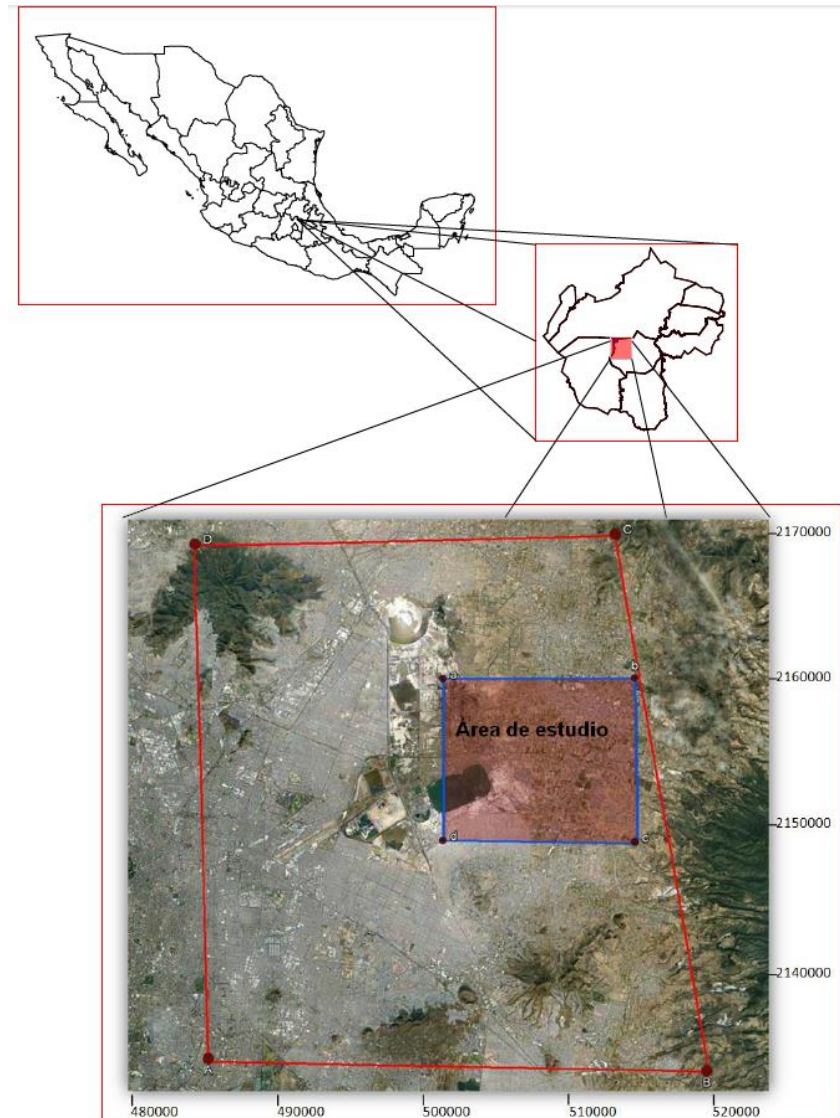


Figura 12. Localización del area de estudio dentro acuífero de Texcoco y éste dentro de la región hidrológica-administrativa XIII.

La región cuenta con un área territorial de 160,426 Km², abarcando un total de 166 municipios del Estado de México, Distrito Federal, Hidalgo y Tlaxcala; es la región más poblada de las trece regiones hidrológicas en el país y por ser la de menor extensión territorial, es de esperar que el consumo hídrico per cápita sea muy alto.

Esta zona, se dividió en dos subregiones o subcuencas, es decir en la subcuenca del río Tula y la subcuenca del Valle de México. La subregión del valle de México consta de 85 municipios 50 del Estado de México, 15 de Hidalgo, 4 de Tlaxcala y las 16 Delegaciones del Distrito Federal; por otro lado la subcuenca del río Tula consta de 31 municipios tanto del Estado de México como de Hidalgo.

En esta región la parte más destacable es la cuenca del Valle de México, y en ella se encuentra el municipio de Texcoco, éste se localiza en la región oriente del Estado de México. Colinda al norte con los municipios de Tepetlaoxtoc, Papalotla, San Andrés Chiautla y Chiconcuac; al sur con los municipios de Chimalhuacán, Chicoloapan e Ixtapaluca; al oeste con el municipio de Atenco y Nezahualcóyotl, y al éste con los estados de Tlaxcala y Puebla.

La extensión territorial del municipio es de 418.69 Km², en el viven 235,151 habitantes de acuerdo con el censo realizado por la INEGI en el 2010, de esta cifra 115,648 son hombres y 119,503 son mujeres.

Debido a su localización, Texcoco comparte la demanda de agua del acuífero con los municipios de Nezahualcóyotl y Chimalhuacán, además de las delegaciones Iztapalapa, Iztacalco y Gustavo A. Madero.

Finalmente, el área objeto de éste estudio para proponer sitios para un proyecto de recarga artificial, (Figura 12):

4.2 CLIMA

Por su ubicación geográfica, de acuerdo con la información del INEGI, la cuenca de México es un área en donde existen diversos tipos de climas que van desde el seco y semiseco subhúmedo en los sectores noreste, noroeste y centro, hasta el clima frío húmedo y tundra alpina en los relieves altos que se localizan al sur de la Ciudad de México.

La caracterización a detalle de la temperatura y la precipitación en espacio y tiempo es ideal para poder determinar los sitios de recarga, así como su operación; por ello se analizará a detalle con base a los datos incluidos en los boletines hidrológicos, los valores de temperatura y precipitación en la porción central del área de estudio, es decir a los alrededores del lago Nabor Carrillo en un periodo de tiempo de diez años (1999-2009).

De acuerdo con la información publicada en el portal del INEGI, el clima que predomina en el Distrito Federal de sur a norte de la Ciudad es semifrío húmedo con lluvias en verano, posteriormente el clima semifrío sub húmedo con lluvias en verano, le sigue templado subhúmedo.

Según la clasificación de Köppen la porción oriental de la Ciudad de México responde una zona semiárida (BS) templada con verano caluroso, con lluvias en verano y finalmente

semiseco localizado en la porción noreste del Distrito Federal que también cubre los municipios de Texcoco, Cd. Nezahualcóyotl, Chimalhuacán, Los Reyes, entre otros. Éste tipo de clima se obtiene al procesar los datos meteorológicos de las estaciones climatológicas existentes dentro y fuera de la planicie de Texcoco tales y como se muestran en la Tabla 8. Los datos de precipitación y temperatura considerados corresponden al periodo 1999-2009 (Gráficas 1 y 2).

En la planicie de Texcoco, la temperatura mantiene variaciones que van desde los -2 °C como temperatura mínima hasta los 35 °C de temperatura máxima anual, manteniendo una media anual de 16 °C, esto ocasiona una evaporación potencial alta sobre la planicie de Texcoco tal (Gráficas 1 y 2 y Tablas 9 y 10).

En la Tabla 9 se observa que en el periodo de mayo - septiembre se presenta la mayor temperatura, la cual oscila entre 16 °C y 20 °C como temperatura media mensual para éste periodo.

La precipitación media anual varía de los 377 mm a los 712 mm de acuerdo a los datos de precipitación para cada estación mostrados en la Tabla 8. La temporada de lluvias comprende de mayo a septiembre teniendo los máximos valores de precipitación en julio y agosto, reportando valores de hasta 157 mm (*Est. Col. Educación*). La temporada seca corresponde a los meses de noviembre a abril en ocasiones sin reportarse precipitación alguna. Las precipitaciones se presentan en forma de chubascos, en cambio cuando se presentan frentes cálidos o fríos las lluvias son del tipo estacionario.

Tabla 8. Coordenadas de las estaciones meteorológicas utilizadas.

ESTACIÓN	X	Y
LAGO NABOR CARRILLO	2152464.4	500000
CHAPINGO	2154589.32	512097.33
ATENCO	2161011.7	509208.17
CHICONAUTLA	2171306.43	498922.45
ACOLMAN	2171185.78	509144.7
TANQUES CHALMITA	2161691.47	485430.65
KM 6250	2153573.48	490409.05
P. B. NUEVA STA. MARIA	2150628.93	482214.46
TANQUE EL PEÑON	2149546.5	491252.5
P. B. U. E. DE ORIENTE	2142175.82	496483.73
COL. EDUCACION	2137777.5	486111.61
COATEPEC DE LOS OLIVOS	2143404.23	516188.39
P. B. LOPEZ MATEOS	2145088.57	493875.24
Sn. JUAN DE ARAGON	2152312.63	491691.15
Sn. JUAN TOTOLAPAN	2159863.77	528413.22
COL. V. GUERRERO	2167249.08	466792.01
LOS REYES	2142076.65	506942.55

La corriente de aire en la zona de estudio tiene dos procedencias una de NW - SE y otra NE - SW, ambas presentan diferentes intensidades mismas que, debido a lo desprotegido de los suelos provoca fuertes problemas de erosión eólica. El viento presenta su mayor intensidad de las 12 a las 16hrs, el resto del día mantiene una ligera calma. La erosión del suelo provoca el movimiento de las partículas más pesadas por rodamiento y las ligeras por saltación, elevándolas hacia arriba hasta alturas de 60 cm o más como se muestra en la Figura 13 (Nabor Carrillo, 1969).

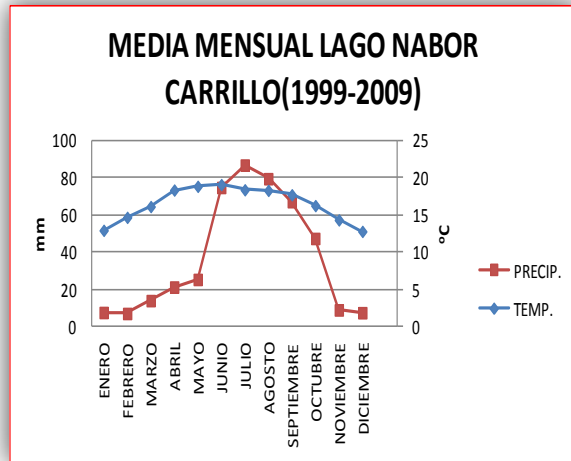


Figura 13. Formación de tolvaneras en la planicie de Texcoco.

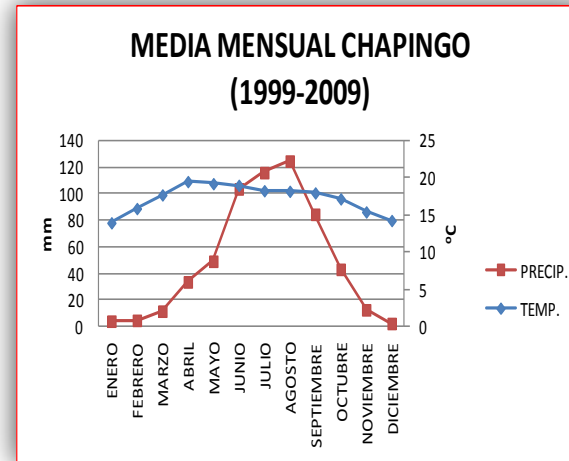
El tipo de clima y la litología que encontramos en esta porción del Ex Lago, permite la formación de cubiertas vegetales típicas de una región semiárida tales como pastos, pirul, fresno y algunos matorrales espinosos que pueden soportar la alta salinidad de los suelos que aquí prevalecen (Huizar Alvarez et al. 2011), también mediante el cultivo de pasto, se ha logrado formar una carpeta vegetal de praderas, logrando con esta acción disminuir en poca proporción la erosión del suelo.

En la zona de estudio existen algunos cuerpos de agua artificial como lo es el Lago Nabor Carrillo, la laguna recreativa, Lagunas facultativas, Lago Churubusco, y El Caracol, donde existe vegetación acuática y subacuática está constituida por gramíneas halófitas; en estos cuerpos de agua viven permanentemente aves, de diferentes especies y aves migratorias que llegan cada año, provenientes en su mayoría de Estados Unidos y Canadá.

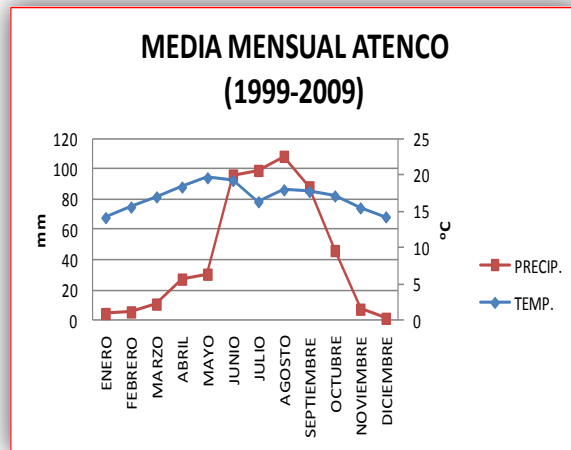
Grafica 1 (a, b, c, d). Medias mensuales de precipitación y temperatura para las estaciones LNC, Chapingo, Atenco y Chiconautla.2



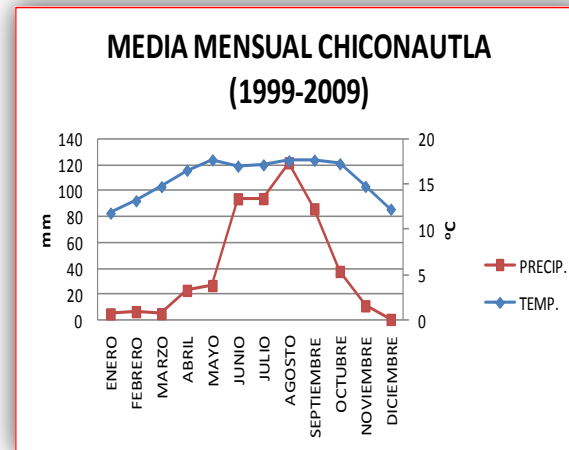
a



b

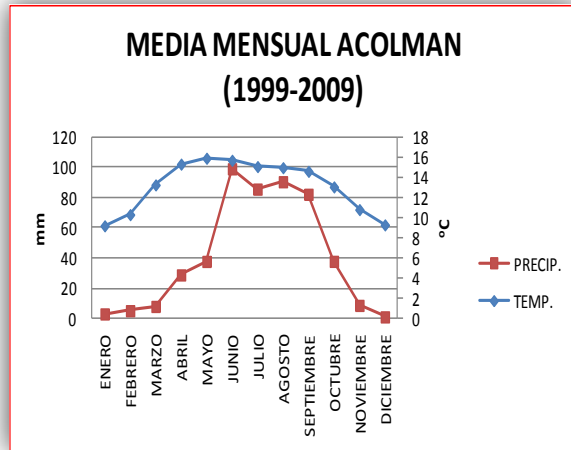


c

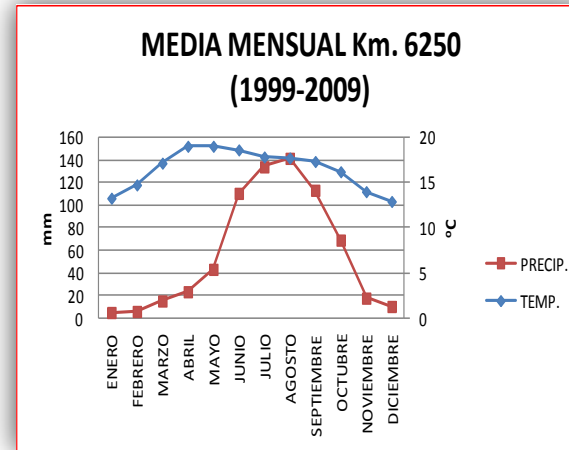


d

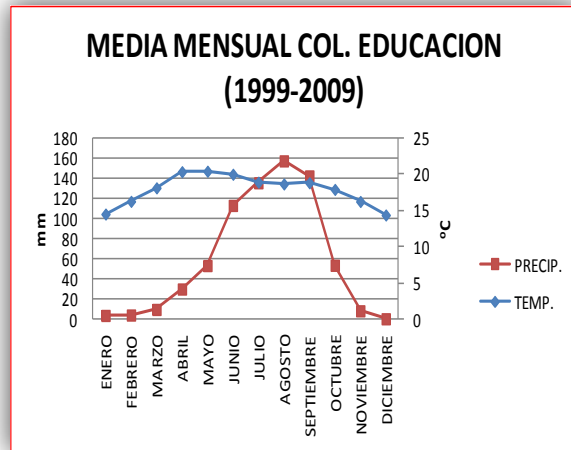
Grafica 2 (a, b, c, d). Medias mensuales de precipitación-temperatura para las estaciones Acolman, Km.6250, Col. Educación y Coatepec de los Olivos.



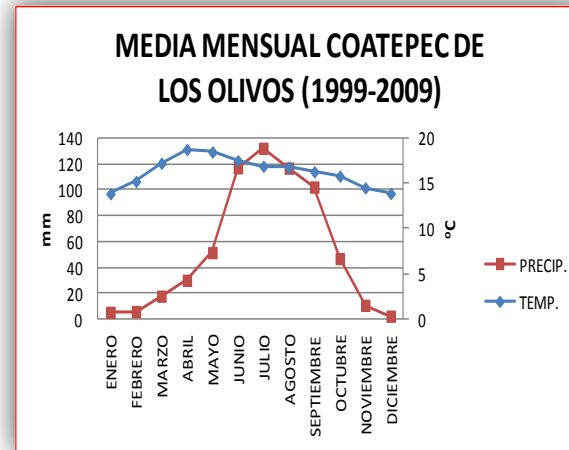
a



b



c



d

Tabla 9. Datos de precipitación (1999-2009) por estaciones en mm.

PRECIPITACIÓN	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
L. NABOR C.	7.57272727	7.04545455	13.9727273	21.2727273	25.3545455	74.8545455	86.9	79.5636364	67.2	47.4090909	8.94545455	7.45454545	377.127273
CHAPINGO	4.05454545	4.67272727	11.6	33.6181818	49.2	103.672727	116	124.663636	84.5818182	43.1	12.6181818	2.31818182	590.1
ATENCO	4.5	5.56363636	10.7363636	27.2545455	30.5363636	96.1909091	99.2636364	108.618182	88.3909091	46.2090909	7.35454545	1.32727273	525.854545
CHICONAUTLA	4.95454545	6.71818182	5.12727273	23.1454545	26.8636364	93.9272727	94.0363636	121.690909	86.1272727	37.75	11.2	0.70454545	508.986364
ACOLMAN	3.04545455	5.19090909	8.00909091	28.8818182	37.8181818	99.1363636	85.7	90.5909091	82.2727273	37.8636364	8.7	1.1	462.68
T. CHALMITA	1.64545455	2.34545455	8.71272727	21.9754545	38.3018182	112.969091	114.813636	139.114545	118.53	75.8690909	11.0954545	1.17909091	646.524545
Km. 6250	5.30909091	6.23636364	15.5090909	23.6636364	43.4272727	110.518182	133.936364	141.436364	113.236364	69.2363636	18.0090909	10.6363636	691.154545
Pta. Nva. Sta. Ma.	4.66	5.35363636	12.9945455	20.5345455	41.2836364	104.017273	120.201818	119.840909	107.535455	62.0718182	11.8681818	0.87454545	611.209091
T. PEÑON	4.02090909	3.18181818	10.4790909	19.8181818	28.6190909	85.62	112.365455	117.105455	92.1781818	44.5172727	11.9981818	0.57909091	530.413636
U.A.E. DE OTE.	5.24	4.2	7.29272727	23.59	29.7336364	81.4472727	99.7263636	85.9490909	87.2936364	40.1927273	11.2063636	0.49181818	476.298182
COL. EDUCACION	3.82727273	4.24545455	9.8	30.0818182	53.3909091	113.118182	135.627273	157.363636	142.4	53.6636364	8.43636364	0.52727273	712.481818
COAT. D LOS OLIVOS	5.36363636	5.98181818	17.8636364	30.1454545	51.5181818	117.109091	132.081818	116.809091	102.172727	46.9	10.8	2.40909091	639.154545
P. B. L.MATEOS	3.31454545	2.97909091	6.93727273	14.2827273	21.4654545	72.2481818	103.206364	104.564545	82.4936364	36.9827273	9.67181818	0.62	458.720909

Tabla 10. Datos temperatura Media Mensual (1999-2009) por estaciones en °C.

TEMPERATURA	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ANUAL
L. NABOR C.	12.9454545	14.6909091	16.1454545	18.3636364	18.8636364	19.1	18.4	18.3181818	17.7272727	16.2727273	14.3454545	12.8	16.5310606
ATENCO	14.1636364	15.6181818	17.0272727	18.3818182	19.6636364	19.2909091	16.3545455	18	17.7545455	17.1545455	15.5	14.2636364	16.9242424
SN. JUAN TOTOLAPAN	12.0363636	13.2818182	14.4818182	16.0454545	15.8	14.9	14.0545455	14.3545455	13.7545455	13.5	12.6636364	12.0909091	13.9424242
CHAPINGO	13.9545455	15.8727273	17.7090909	19.5	19.2181818	19	18.2727273	18.1909091	17.9727273	17.1727273	15.4181818	14.2636364	17.2295455
CHICONAUTLA	11.8272727	13.1909091	14.7545455	16.5545455	17.7090909	17.0090909	17.1545455	17.6	17.6727273	17.2727273	14.78	12.2636364	15.6454545
Km. 6250	13.28	14.7454545	17.1454545	19.0090909	19.0090909	18.6090909	17.8272727	17.7181818	17.3272727	16.2	14	12.92	16.4907576
COL. EDUCACION	14.52	16.2727273	18.1363636	20.3618182	20.4272727	20.0090909	18.9181818	18.6727273	18.8363636	17.9181818	16.2545455	14.3909091	17.8871212
COL. V. GUERRERO	12.7090909	13.7090909	15.9363636	17.0727273	17.5818182	17.4545455	16.3454545	16.7272727	16.4	15.3818182	13.5545455	13.3727273	15.515
LOS REYES	12.7454545	14.2090909	16.6454545	17.9818182	18.4727273	19.4181818	18.5272727	17.8	17.5727273	17.2545455	15.6727273	14.4545455	16.7356061
ACOLMAN	9.20909091	10.3181818	13.2727273	15.3363636	15.9181818	15.7181818	15.0909091	14.9818182	14.6181818	13.0727273	10.8181818	9.3	13.1083333
COAT. DE LOS OLIVOS	13.8545455	15.2181818	17.2181818	18.7454545	18.4636364	17.5	16.8818182	16.7909091	16.2818182	15.8	14.5	13.8818182	16.2924242
Sn. JUAN DE ARAGON	13.8272727	15.6454545	17.9090909	19.9454545	20.0181818	20.1181818	18.8545455	18.9636364	18.5090909	17.2727273	15.0545455	13.9636364	17.505303

4.3 GEOMORFOLOGÍA

Desde un punto de vista morfológico, la Zona federal del Ex lago de Texcoco es una extensa planicie que tiene una elevación promedio de 2234 m.s.n.m., mientras que la zona a estudiar tiene 2235 m.s.n.m.

Las elevaciones cercanas a la zona de estudio y que influyeron en su evolución geomorfológica son: La Sierra del Rio Frio al éste, La Sierra de Guadalupe al oeste, los cerros El Pino, Chimalhuacán, Peñón del Márquez al sur y el cerro Peñón de los baños al suroeste (Figura 14).

Destacan sus laderas de montaña, que alcanzan una altura de 1,780 m sobre el nivel de la planicie, su elevación promedio es de 3,395 m.s.n.m.; compuestas por flujos de rocas volcánicas intercaladas o cubiertas por material piroclástico de caída libre de espesores variables. En algunos sectores las laderas muestran pendientes suaves pero en su mayoría son más inclinadas inclusive abruptas presentando escarpes, crestas agudas y/o redondeadas (Huizar Álvarez *et al.* 2011).

La Sierra de Guadalupe tiene un relieve de forma circular con una altura máxima de 3,000 m.s.n.m. Sus laderas son cortas y muy inclinadas presentan un modelado fluvial intenso, en algunas partes se presentan escarpes resultantes de erosión gravitacional ocasionado el desprendimiento del grandes bloques (Lugo Hubp *et al.* 1996).

El Cerro de Chimalhuacán o Chimalhuachi, situado al sureste del Lago Nabor Carrillo, tiene una elevación de 2550 m.s.n.m., 300m sobre la planicie. Es una estructura cónica; con laderas cortas de pendiente suave, y debido a que es un relieve joven y constituido por materiales bastante permeables, no muestra un patrón de drenaje fluvial predominante ni rasgos de erosión.

El cerro Peñón de los Baños se localiza a un costado del Aeropuerto Internacional, es una estructura volcánica, formada por una sucesión de flujos piroclásticos y derrames de lava del Mioceno tardío. Es una elevación de apenas unos 50 m sobre el nivel de la planicie; está afectado por numerosas fallas debido que es una estructura activa.

El cerro Peñón del Márquez es un volcán cinerítico, tiene una elevación máxima de 2,370 m.s.n.m., su cima tiene 132 m sobre el nivel de la planicie, las laderas de éste volcán presentan gran cantidad fracturas, originadas por la combinación de movimientos tectónicos y extracción de agua subterránea. Su topografía es de laderas cortas, muy inclinadas, y no presenta modelado fluvial. Los materiales de éste volcán han sido aprovechados como banco de material para construcción.

El relieve en la zona es del tipo exógeno acumulativo y acumulativo fluvial. Las geoformas consideradas en esta clasificación son: Laderas montañosas, piedemonte, lomerío y la planicie.

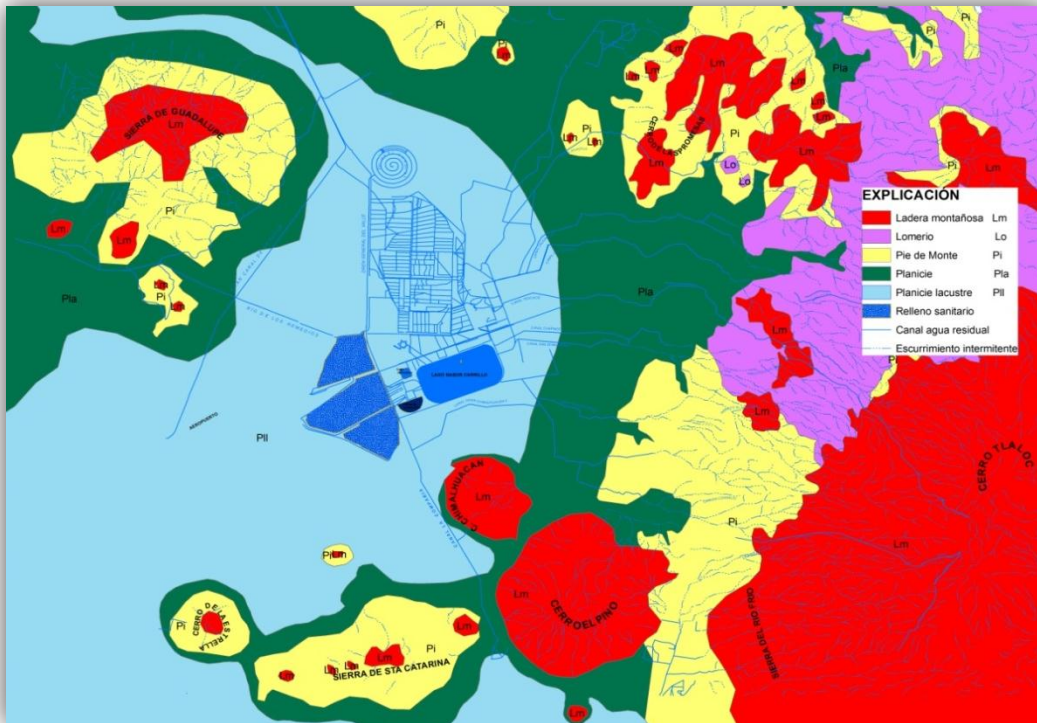


Figura 14. Unidades del tipo de relieve exógeno en la Planicie de Texcoco(Huízar Álvarez *et al.* 2011).

- Ladera Montañosa (Lm):

Alcanzan una altura de 1780 m sobre el nivel de la planicie, y su elevación promedio es 3395 m.s.n.m., están compuestas por flujos de rocas volcánicas, en ocasiones intercalados o bien cubiertos por material piroclástico de caída libre. En algunos sectores las laderas tienen pendiente suaves, pero predominan la pendiente rectas muy inclinadas, abruptas, a menudo presentan escarpes, crestas agudas y/o redondeadas.

La ladera de Río Frío es más larga y más abrupta respecto de aquella de la sierra Guadalupe, donde es una ladera con pendiente recta poco abrupta pero muy inclinada.

Las laderas son drenadas por barrancos cuya profundidad puede alcanzar los 100 m, y están dispuestos en forma paralela en la sierra de Río Frío, y radiales en la de Guadalupe.

- Piedemonte (Pi):

Está formado por el depósito sedimentario originado de la erosión de las rocas depositadas al pie de las laderas y que después es erosionado; son del tipo exógeno acumulativo compuesto por lavas tobas y cenizas además de flujos piroclásticos (Tapia Varela *et al.* 2002). La zona que presenta una mayor extensión de éste tipo de relieve se localiza al sureste en la sierra del Río Frío, además de localizarse al noroeste en la sierra de Guadalupe y al sur en la sierra de Santa Catarina, todos muestran un patrón de

drenaje de forma dendrítica, gracias a los depósitos sedimentarios que se mencionaron previamente.

- Lomerío (Lo):

Son cuerpos de pequeña altura, los cuales se localizan en la parte final del piedemonte y en ocasiones en la base de las laderas, están constituidos por tobas, depósitos piroclásticos de flujo y de caída además de ceniza, producidos por actividades sobretodo del tipo endógeno volcánico del Cuaternario principalmente (Tapia Varela *et al.* 2002); esta zona se extiende desde el municipio de San Vicente Chicoloapan hasta Texcoco.

- Planicie aluvial (Pla):

Se extiende de Chalco hasta Zumpango, está limitada por las diferentes sierras que forman la subcuenca. Tiene muy poca inclinación, y es el resultado del constante depósito de materiales de corrientes fluviales provenientes del piedemonte.

- Planicie lacustre (PlI):

Tienen un origen exógeno acumulativo en el Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno). Se compone de depósitos lacustres que proviene de los depósitos piroclásticos de las explosiones recientes (Tapia Varela *et al.* 2002). Presentan una ligera inclinación hasta dos grados por lo que se le puede considerar como la región más plana de la zona; además de ser la más extensa y el intemperismo que es muy fuerte, esta se caracteriza de tener una capa arcillosa donde la acumulación de agua en los tiempos de máxima precipitación permite la formación de pequeños o grandes lagos; por éste motivo el gobierno con el fin de proteger a la población que se localiza en las inmediaciones de estas zonas, se vio a la necesidad de construir bordos de contención tal y como es el caso del Bordo de Xochiaca en Cd. Nezahualcóyotl, Edo. México.

4.4 HIDROLOGÍA

El sistema hidrológico en la cuenca del Valle de México consiste en su gran mayoría en escurrimientos intermitentes y de bajo caudal de carácter torrencial, con avenidas de corta a mediana duración y arroyos secos durante el estiaje.

De acuerdo a la geomorfología de la región, el drenaje es del tipo radial centrífugo, dendrítico y dendrítico paralelo. La red de drenaje no se encuentra interconectada debido a los aspectos geológicos de la zona.

En la zona oriente del valle, no se ha desarrollado un drenaje relativamente extenso debido a la cercanía con el Lago de Texcoco, dado que éste fenómeno es una manera de representar al nivel base de intemperismo de la cuenca. En esta porción se identifican una serie de arroyos, cuyo origen son de la Sierra Nevada y que desaparecen en las faldas de la misma debido a la buena permeabilidad del suelo. Los arroyos principales son el arroyo Barranca Seca, Coxacoac, Texcoco, Chapingo, Sn Bernardino, Coantlinchan y Manzano - Coatepec, localizados al éste del Lago Nabor Carrillo, todos ellos convergen a

diversos canales, los cuales se localizan en los alrededores del Lago y que algunos son arroyos canalizados para diversos usos.

El arroyo Coaxcacoalco llega a convertirse en las cercanías del municipio de Chiconcuac en el canal Jalapango, el arroyo Barranca Seca en el canal Coxcacoac; el arroyo Chapingo y Sn Bernardino son canalizados al poniente de los mismos en cercanías del Lago Nabor Carrillo, sin embargo convergen en un solo canal en las periferia oriente del lago junto con el canal Santa Mónica proveniente del arroyo Coatlinchán. Por otro lado el arroyo el Manzano junto con algunas cañadas convergen al Canal dren Chimalhuacán II que forma parte del canal La Compañía localizado al SE del Lago Nabor C.

La intervención del hombre en la tala de árboles, incendios, las técnicas de roza, quema y tumba para el cultivo, los cambios del uso del suelo, las prácticas agrícolas mal empleadas a lo largo del tiempo estos y otros factores han ido afectado en equilibrio hidrológico en las subcuencas correspondientes a cada arroyo, haciéndolas cada vez más torrenciales y erosivas, generando una mayor erosión al suelo provocando la formación de cárcavas y barrancas más profundas.

Es necesario destacar que todo el escurrimiento superficial que confluye en la planicie de Texcoco es conducido a través de canales hacia el exterior de la cuenca de México. Hecho que se realiza desde el siglo XIX, con el fin de atenuar las inundaciones que antaño afectaba a toda esta región.

4.5 GEOLOGÍA

GEOLOGÍA REGIONAL

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco volcánico sobre la margen meridional de la Placa Norteamericana, presentando variaciones en su estilo volcánico y en la composición química de sus productos (Demant. 1982).

La faja se divide en tres sectores: la oriental, la central y la occidental (Figura 15). En el sector oriental, la mayor parte del vulcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesita a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales, mientras que los volcanes monogenéticos de composición basáltica solo representan una pequeña porción de los productos emplazados (Figura 16); en éste sector el arco se emplaza sobre una corteza de edad precámbrica probablemente de origen cratónico (Demant. 1982; Ferrari. 2000).

El oriente de la FVTM presenta los mayores valores de espesor cortical, mismos que pueden ser apreciados al poseer las elevaciones más altas en éste arco magmático, destacando la presencia de grandes estratovolcanes con una alineación de 19° N (Gómez Tuena *et al.* 2005).

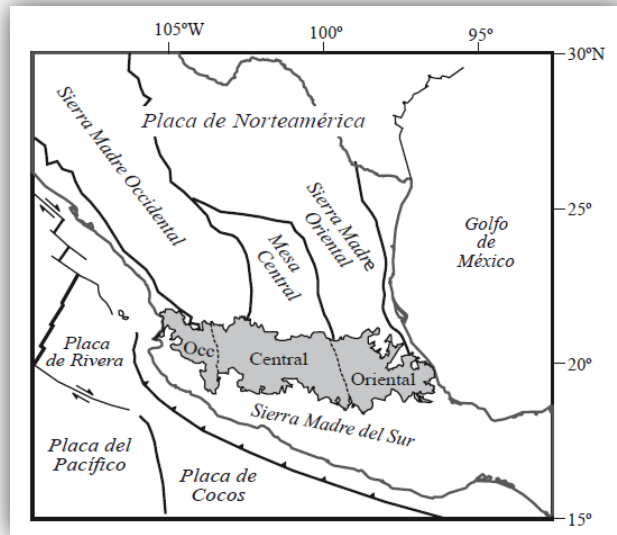


Figura 15. Ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (Mooser F. y Ramírez M. T. 1987).

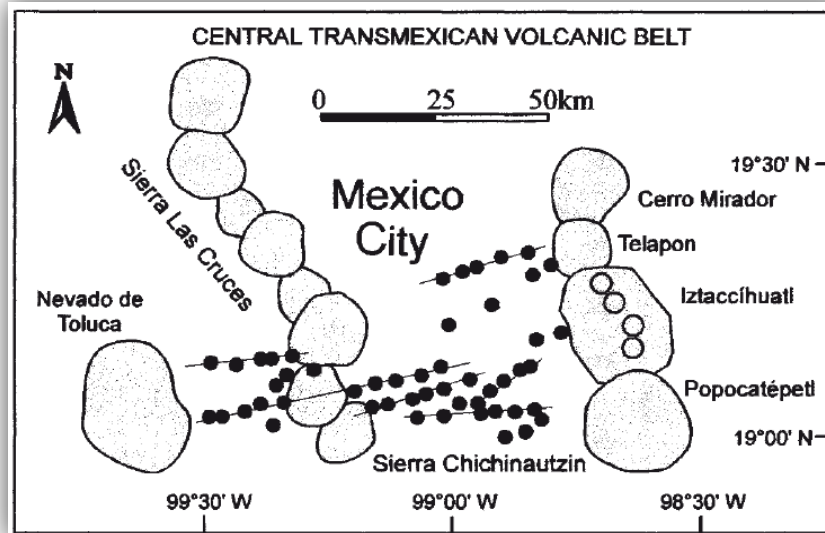


Figura 16. Distribución espacial de los centros monogenéticos y estratovolcanes al centro de la FVTM (Alanís Álvarez et al. 1998).

Los principales elementos morfo-estructurales de la FVTM son las zonas de fracturas, grabens en echelón y elementos circulares son considerados como productos de esfuerzos horizontales y verticales; los esfuerzos horizontales son productos de la fuerza

de compresión y cizalleo ejercidos desde la trinchera de Acapulco, donde esta subduciendo la Placa de Cocos en dirección NE (Figura 17) (Mooser F. y Ramírez M. T. 1987).

Por otro lado los esfuerzos verticales son originados por la tectónica ascendente y de tensión a la vez, definiendo esta última como vulcanotectónica dividiéndose en dos fuerzas básicamente: a) expansión térmica de la corteza calentada por los magmas ascendentes, aquí solamente los esfuerzos se liberan hacia la superficie; b) empuje de las cámaras magmáticas hacia arriba, (Figura 18), (Mooser F. y Ramírez M. T. 1987).

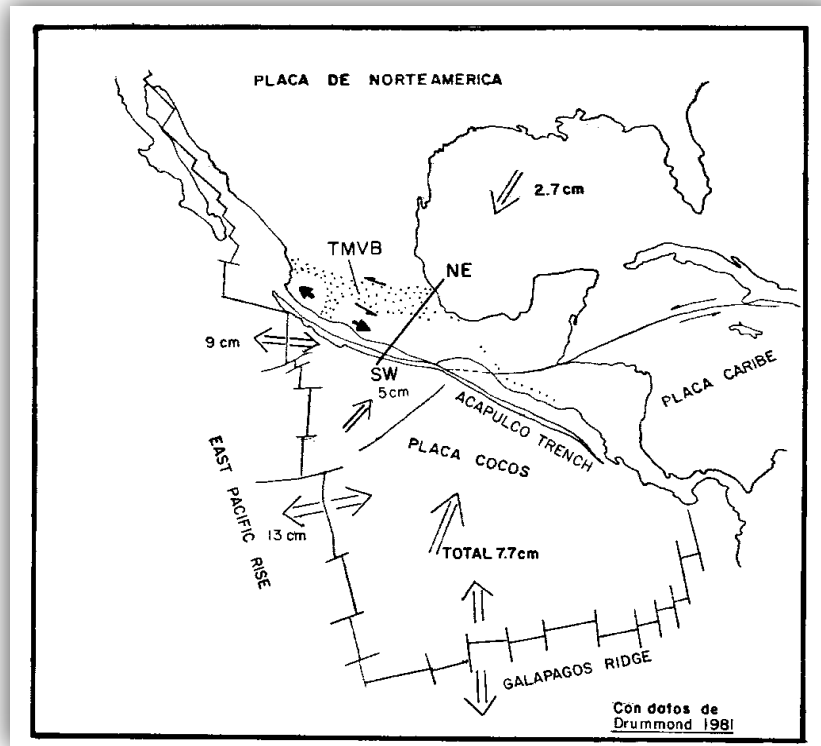


Figura 17. Esfuerzos horizontales de la FVTM (Mooser F. y Ramírez M. T., 1987).

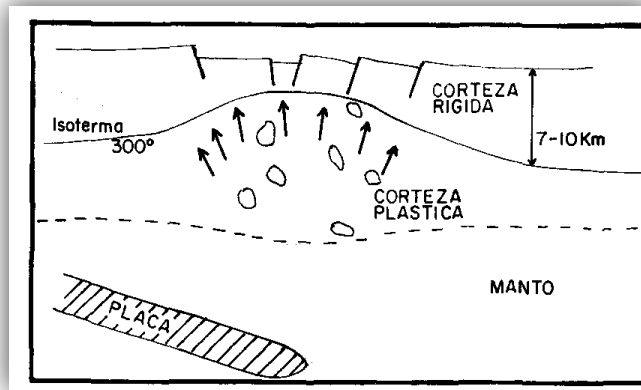


Figura 18. Calentamiento de una zona volcánica (Mooser F. y Ramírez M. T., 1987).

CUENCA DE MÉXICO

La cuenca de México forma parte del sector oriente de la FVTM, expuesta a varios eventos tectónicos y volcánicos ocurridos principalmente a principios del terciario hasta nuestros días.

La cuenca está definida por un paquete sedimentario (depósitos lacustres, aluviones, cenizas, arenas, gravas) en un contenedor de material ígneo (basaltos, riolitas, dacitas), (Rodríguez, R – Ochoa, C. 1989).

Es una cuenca endorreica, del tipo tectónico – volcánico que albergó un sistema lacustre en el centro y sur. Está limitada al sur por la Sierra de Chichinautzin, al norte por la Sierra de Pachuca que la separa de la cuenca de Tula, al éste por la Sierra Nevada y al Oeste por la Sierra de las Cruces que también define a la cuenca de Toluca (Rodríguez, R – Ochoa, C. 1989).

A partir de las perforaciones profundas realizadas por PEMEX y en estudios gravímetros y sísmicos realizados por el Instituto Geofísico (1953) y PEMEX (1985), se reconoció en la cuenca de México la existencia de un graben originado por el tectonismo explicado anteriormente,

El vulcanismo de la Cuenca de México comprende desde el Plioceno al Cuaternario; los eventos volcánicos del tipo calco-alcálico, donde predominan las lavas andesíticas y basálticas, son características de las Sierra las Cruces, Nevada y Chichinautzin.

4.6 ESTRATIGRAFÍA

A continuación se describe la litoestratigrafía de la Cuenca de México desde la unidad más antigua a la más reciente. La Tabla 11, muestra las distintas unidades estratigráficas

documentadas por diferentes autores en la Cuenca de México, sin embargo, en esta tesis se mencionan sólo aquellas que se localizan dentro del área de estudio.

De acuerdo con las perforaciones profundas realizadas por PEMEX; Pozo Profundo Texcoco-1 (2,065 m), el Pozo Roma-1 en el centro de la Ciudad de México (3,200 m), Pozo Copilco-1 que se localiza al sur de la Ciudad muy cerca de la UNAM (2,258 m), el Pozo Tulyehualco-1 (3,000 m) y el Pozo Mixhuca-1 ubicado al oriente de la Ciudad cerca del aeropuerto internacional Benito Juárez. Las unidades más antiguas y expuestas son aquellas que pertenecen a las Formaciones Morelos, Cuautla y Mexcala, y corresponden a depósitos marinos y epicontinentales respectivamente de edad Cretácica (Fries. 1960).

Actualmente se tiene conocimiento de la perforación de un pozo profundo ubicado en la Delegación Iztapalapa en cercanía de la Central de Abasto, entre los ejes 5 y 6 sur con el objeto principal de extraer agua a una profundidad mayor a 1,000.00 m y a su vez ayudará a determinar la estratigrafía del lugar.

Al norte de la Ciudad de México se muestran elementos aislados del volcanismo de la Sierra de Guadalupe. Al poniente se muestran las secuencias andesíticas de la Sierra de las Cruces. Al centro de la Ciudad el Pozo Roma-1 se caracteriza por tener intercalaciones de brechas y tobas, mientras que el Pozo Mixhuca-1 que se localiza al oriente se diferencia por tener más influencia de las lavas.

Al sur el Pozo Copilco-1 mantiene cierta relación con el pozo 7 del GDF, en donde en la secuencia inferior está marcada por tobas andesíticas, mientras que en la parte superior dominan sobretodo los basaltos y al suroeste depósitos de aluvión y gravas, que corresponden a los pozos 7 y 8.

De todo esto se deduce que la correlación estratigráfica en el Valle es difícil, debido a las diferentes fuentes del volcanismo que son generadoras de la estratigrafía de la Cuenca, con excepción de los piroclásticos que vienen siendo un material sedimentario que fue recubriendo al material ígneo previamente depositado.

CRETÁCICO

- **FORMACIÓN MORELOS (Km)**

La formación Morelos aflora al sur de la Sierra Chichinautzin. Se ha identificado en los pozos exploratorios Mixuca-1 y Tulyehualco-1 realizados por PEMEX a profundidades de 2,060 y 2,160 m, con espesores de 410 y 650 m respectivamente; se reconoció a esta Formación por la presencia de caliza con microfósiles "*Nummoloculina heimi*" y "*Dyclina schulbergeri*"; con base a estas apariciones, PEMEX considera a esta como la unidad más antigua (Albiano Medio- Cenomaniano Temprano), sin embargo aun no se sabe cuál es el basamento en el que descansa el subsuelo de la Cuenca de México. Se sabe de la existencia de un depósito evaporítico gracias a la geología histórica que acompaña a la cuenca por ser esta zona una extensa plataforma marina, el cual a la fecha no se ha estudiado de manera amplia el tema (Fries, 1960).

- **FORMACIÓN CUAUTLA (Kc)**

Esta descrita por (Fries, 1960) fechándola en un periodo Cenomaniano Tardío al Turoniano Tardío. Las facies de han sido reconocidas al sur de la Sierra Tepoztlán a una

altitud de 1,500 m.s.n.m y al norte de Zumpango e una elevación de 2,400 m.s.n.m., reconociendo a esta encima de la Formación Morelos y completamente distribuida sobre la Cuenca de México (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989). En sondeos de PEMEX esta Formación fue reconocida en los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 a profundidades de 1,575 y 2,100 m respectivamente, esta formación se reconoció debido a la presencia de microfósiles someros tales como "*Dicyclina sp.*" y "*Valvulomina sp.*".

Las diferencias de altitud pueden ser atribuidas al desplazamiento de fallas producidas durante el Terciario y Cuaternario, además puede deberse a la carga litostática de las rocas del Cenozoico (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989). Litológicamente esta Formación consta de caliza gris con espesores variables y con presencia de rudistas y caliza arrecifal (Enciso de la Vega. 1992).

- **FORMACIÓN MEXCALA (Kmx)**

Descrita a detalle al igual que las anteriores Formaciones por (Fries, 1960). Mantiene un carácter rítmico tipo flysch (De Cserna., et al 1988) de grauvacas (turbiditas), limolitas y lutitas, distribuyéndose sobre todo en zonas de sinclinales. Aflora en la Sierra Chichinautzin y en el cerro La Palma. Se reconoció en el Pozo Mixhuca-1 entre los 1,720 y 1,850 m de profundidad, reconociéndose esta unidad por la presencia de microfósiles tales como *Margino-truncana sp* y *Archeoglobigerina sp.*, estos fósiles son típicos del Turoniano - Maestrichtiano; la Formación Mexcala se formo durante el Conaciano - Campaniano (Cretácico Tardío), que se origino por un levantamiento del arco magmático tipo Andino y su futura erosión de las rocas laramídicas ya que el arco venia emigrando de occidente a oriente (Damon et al. 1981).

TERCIARIO

En diversos trabajos el desarrollo de su columna estratigráfica marcan al Granito Colotepec (Tgc) como una unidad intermedia entre la Formación Mexcala y el Grupo Balsas (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989), sin embargo en otros no se menciona al no encontrarse datos sobre alguna perforación dentro de esta Cuenca, por lo que se prefiere omitir éste dato (Enciso de la Vega. 1992).

- **GRUPO BALSAS (Teob).**

Depósitos continentales de edad terciaria, para ser precisos del Eoceno Tardío al Oligoceno Temprano, reconocido por contener una gran variedad litológica. Éste Grupo puede ser dividido en varias decenas de Formaciones, sin embargo, a la fecha sigue sin ser cartografiado de manera detallada (Fries. 1960). En la descripción realizada en el Pozo Texcoco-1 se reconoció el conglomerado calizo cubierto por limolita calcárea que contiene interstratificación por tobas y aglomerados con una antigüedad anterior a los 31 Ma ya que los basaltos reconocidos en la parte superior datan con estudios radiométricos tal edad. En general es difícil establecer su posición estratigráfica y estructural, además cabe afirmar que la ausencia de fósiles impide su mejor descripción (Enciso de la Vega, 1992).

Tabla 11. Unidades estratigráficas en la cuenca de México, en rojo se muestran aquellas que pertenecen a la zona de estudio (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989; Nabor Carrillo. 1981).

ERA	PERIODO	EPOCA	EDAD				
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		LACUSTRE	DEPOSITOS DE ALUVION	GRUPO ANAHUAC	
				Fm. CHICHINAUTZIN			
				Fm. POPOCATEPETL			
		PLEISTOCENO	CALABRIANO				Fm. IZTACCIHUATL
							Fm. TLALOC
							Fm. EL PINO
	NEOGENO	PLIOCENO	PIACENZIANO		Fm. LLANO GRANDE		DEPOSITOS PIROCLASTICOS Y CLASTICOS ALUVIALES
					RIOLITA NAVAJAS		
					Fm. ZEMPOALA		
					Fm. LAS CRUCES		
					R. VOLC. MAFICAS		
					Fm. OTOMI		
			ZANCLEANANO	DEP. VOLCANICOS			
		MIOCENO		MESSINIANO			
				TORTONIANO	ROCAS EXTRUSIVAS		
				SERRAVALLIANO			
				LANGHIANO			
				BURDIGALIANO			
			AQUITANIANO	ROCAS VOLCANICAS			
	PALEOGENO	OLIGOCENO	CHATTIANO				
			RUPELIANO				
		EOCENO	PRIABONIANO	GRUPO BALSAS			
			BARTONIANO				
			LUTENIANO				
			YPRESIANO				
		PALEOCENO	THANETINIANO	GRANITO COLOTEPEC			
			SELANDIANO				
DANIANO							
CRETACICO	TARDIO	MAASTRICHTIANO	Fm. MEXCALA				
		CAMPANIANO					
		SANTONIANO					
		CONACIANO					
		TURONIANO					
		CENOMANIANO					
		Fm. CUAUTLA					
TEMPRANO	ALBIANO	Fm. MORELOS					

• **ROCAS VOLCÁNICAS DEL OLIGOCENO – MIOCENO TEMPRANO (Tomv)**

Estas rocas afloran profundamente erosionadas y fracturadas en la Sierra de Xochitepec, en los cerros Picacho y Pulpito del Diablo, además de otras pequeñas localidades (Fries. 1960). Las perforaciones realizadas por PEMEX atravesaron a estas rocas entre los 390 y 1,750 m con espesores variables. Su composición es variable que va desde andesítica a riodacítica, aunque en pozos como Copilco-1, Mixhuca-1 y Roma-1 se describen derrames lávicos de basalto.

Constituyen una secuencia de tobas líticas, vítreas y cristalinas, brechas tobáceas y aglomerados, estos depósitos se encuentran interestratificados y/o cubiertos por derrames de lava. Estas secuencias volcánicas contienen capas clásticas aluviales con un espesor máximo de 6 m, expresando un tiempo de reposo en la actividad volcánica (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

En el subsuelo de la Cuenca, estas rocas cubren discordantemente a las unidades cretácicas y al Grupo Balsas subyacente, además de encontrarse cubiertas de manera discordante por rocas volcánicas del Mioceno Temprano (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

- **ROCAS EXTRUSIVAS DEL MIOCENO MEDIO Y TARDÍO (Tmv)**

Esta serie de rocas difieren de la composición litológica y estratigráfica de las anteriores. Sus afloramientos se distribuyen por toda la cuenca pero en porciones pequeñas, comúnmente cubiertas por material volcánico más reciente. Las porciones se pueden identificar en cerros como El Elefante, El Judío, Los Remedios, El Peñón de los Baños, la base de la Sierra de Guadalupe y de Las Cruces y algunos otros en el norte del municipio de Texcoco (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

Se correlacionan con la Formación Tepoztlán por su posición estratigráfica y edad (Fries. 1960), cuyas rocas están constituidas por tobas, brechas volcánicas y lavas de composición andesítica y dacítica.

En el Pozo Texcoco-1 se le encontró a profundidades entre los 814 y 920 m, en el Pozo Roma-1 a profundidades entre 633 y 60 m, en el Pozo Mixhiuca-1 entre los 880 y 1,190 m, en el Pozo Copilco-1 a profundidades entre 1 180 y 1 580 m y por último en el Pozo Tulyehualco a profundidades entre 930 y 1,740 m de acuerdo con los fechamientos realizados a esta unidad se le data con una edad que va del Mioceno Medio al Mioceno Tardío. Cubriendo discordantemente a las rocas volcánicas del Oligoceno Tardío al Mioceno Temprano, además del Grupo Balsas en algunas zonas como a las rocas cretácicas. Además se encuentra cubierta por rocas del Plioceno de manera discordante y en algunas zonas por rocas del Cuaternario (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989).

CUATERNARIO

- **FORMACIÓN EL PINO (Qpp)**

Son aquellas rocas volcánicas máficas que forman cerros como La Estrella, El Pino, Chimalhuacán y otros aislados, así como a los campos volcánicos Tezontepec-Otumba. Su expresión geomorfológica responde a conos cineríticos, volcanes escudo y de amplias coladas de lava; sus espesores son del orden de los 750 m en los centros eruptivos acuñándose a la periferia, además de tener secuencias piroclásticas típicas de un vulcanismo estromboliano, mientras que los derrames de lava son de andesita-basáltica de olivino (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989). Esta Formación cubre discordantemente a las unidades volcánicas del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y a la Formación Llano Grande y cubierta sobre todo por las formaciones Chichinautzin y Telapón. Por último se data a esta Formación con una edad entre 0.9 y 0.7 Ma (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989).

- **FORMACIÓN TLALOC (Qt)**

Se describe a esta unidad solamente para caracterizar a aquellas coladas lávicas que forman parte de la Sierra del Río Frío y a aquellas que están relacionadas magmáticamente con tefra caracterizada de flujos lobulados en forma de mesetas inclinadas. Su composición es andesítica, latítica y dacítica además en su base consta de grandes sucesiones de pómez y líticos accidentales angulosos tamaño lapilli de 1m de espesor aproximadamente y gradación inversa que indica una secuencia eruptiva tipo pliniana (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989).

- **FORMACIÓN IZTACCÍHUALT (Qi)**

El espesor de esta unidad no se conoce en su totalidad, pero se han reconocido en el volcán Iztaccíhuatl un espesor de 2,500 m compuesto de secuencias efusivas, cuya composición varía de andesita basáltica dacítica; estas secuencias inician con derrames lávicos y finalizan con extrusiones dómicas ambos de composición andesítica de olivino y/o anfíbol (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989). Esta formación descansa discordantemente sobre las formaciones Llano Grande y Tlaloc, mientras es cubierta por las formaciones Chichinautzin y Popocatepetl. Su edad isotópica sugiere que esta formación surgió dentro de un intervalo eruptivo entre los 0.6 y 0.08 Ma.

- **FORMACIÓN POPOCATÉPETL (Qp).**

Esta formación edifica al estratovolcán Popocatepetl en el extremo oriental de la zona de estudio al igual que las dos formaciones anteriores. Se reconoce a éste volcán compuesto por una alternancia de depósitos piroclásticos y lavas de composición andesítica de hiperstena y hornblenda (Macías. 2005).

Se reconoce la evolución de éste volcán en diversas etapas: la formación del volcán primitivo o volcán Nexpayantla mediante la emisión de derrames andesíticos, posteriormente una erupción ocurrida hace 200,000 años, produjo la formación de una caldera creando así una nueva fuente eruptiva, hasta que se formó el volcán El Fraile, destruyéndose éste último provocando una avalancha de escombros durante sus erupciones, seguida de una erupción pliniana dejando depósitos piroclásticos y pómez, por último después de éste evento comenzó la formación del nuevo cono llamado Popocatepetl (Macías. 2005).

La Formación cubre discordantemente a la Formación Iztaccíhuatl y probablemente se interdigita hacia el poniente con la Formación Chichinautzin ya que son contemporáneos. De acuerdo con las relaciones estratigráficas y fechamientos isotópicos le suponen una edad del Pleistoceno Tardío-Holoceno (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

- **FORMACIÓN CHICHINAUTZIN (QC)**

Se pretende aplicarle a éste nombre a aquellas unidades precursoras de un vulcanismo monogénico del tipo estromboliano con edades y características similares a las de la Cuenca de México. Esta formación se ha encontrado en varios pozos exploratorios como pozos para sondeos y sondeos geofísicos en la porción meridional de la Cuenca. Las lavas de esta unidad son extensas, masivas o lajadas y vesiculares (Velázquez Sánchez

y R. Jaimes Palomera, 1989). La composición de las lavas es andesítico-basáltica y andesita. Su espesor varía de un sitio a otro, mientras que el espesor máximo es de 1,800 m (Fries, 1960), el cual no es muy diferente a la geología del subsuelo.

La edad comprendida para esta unidad y de acuerdo con los diversos fechamientos realizados por diversos autores, queda comprendida entre los en la parte más tardía del Pleistoceno y Holoceno. Quedando esta unidad discordante con casi todas las unidades cretácicas y del Terciario (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

- **DEPÓSITOS ALUVIALES (Qal)**

Estos depósitos afloran formando llanuras aluviales al norte y al sur de la Cuenca, en la posición sur se encuentran extensamente distribuidos, rellenando amplios valles socavados de depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno (Tppc), así como depresiones tectónicas como el graben de Chalco (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989).

Los espesores máximos en las depresiones ya descritas y que se adelgazan en las márgenes de las mismas. En las zonas norte y sur incluyen materiales no consolidados como grava, arena, limo y arcilla (Fries. 1960). En los pozos Roma-1 (74 a 330 m), Mixhiuca-1 (167 a 520 m) y Tulyehualco-1 (300 a 550 m), se perforo sobre conglomerados y brechas con intercalaciones de arcillas, tobas e incluso derrames de lava basálticos y andesíticos en el Pozo Mixhiuca-1 (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, 1989).

Entre los 80 y 480 m en el pozo Texcoco-1 se perforaron arenas, limos y arcillas con interestratificación de tobas de grano fino y lapílicas, y hacia la base de éste intervalo, se encontró marga y caliza lacustre con espesores de 40 a 60 m, lo cual indica el tiempo de los depósitos aluviales entre el Plioceno y el Pleistoceno (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

Probablemente debido a su edad cuaternaria estos depósitos se interdigitan con las formaciones volcánicas de la misma edad, además de poder ser concordantes e interdigitados con depósitos lacustres (Qla). Con base a la relación estratigráfica se propone una edad del Pleistoceno al Holoceno, lo cual puede coincidir con una serie de invertebrados encontrados en la zona norte de la zona.

- **DEPÓSITOS LACUSTRES (Qla)**

En esta unidad se agrupan los sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre, formando una gran planicie, sus espesores varían entre los 30 y los 300 m las mayores profundidades se localizan al centro de la Ciudad de México, en Texcoco y Chalco.

(Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989), menciona que con base a estudios realizados por diversos autores, estos describen arcillas bentoníticas y montmorilloníticas con carbonato de calcio, diatomeas y otros fósiles, además de ceniza y pómez, secuencias piroclásticas basálticas y andesitas de caída, etc.

4.7 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

PLEGAMIENTOS DEL MAESTRICHTIANO-EOCENO TEMPRANO

Estos se muestran sobretodo en las rocas cretácicas, siendo pliegues simétricos y recostados de oriente a poniente (Fries. 1960). En el pozo Mixhuca-1, la repetición de la Formación Cuautla, debido a las evidencias líticas y paleontológicas, separado por la Formación Mexcala y junto al buzamiento de las capas al poniente, implica todo esto la presencia de un sinclinal recostado al occidente, siendo así que los pliegues de esta zona pertenecen a rocas de edad Jurásica y Cretácica (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

FALLAS DEL EOCENO-OLIGOCENO TEMPRANO

La falla normal que se puede observar de acuerdo a los cortes litológicos de los pozos Mixhuca-1 y Roma-1, con respecto a la diferencia de alturas de rocas cretácicas, responden a que esta falla tiene un rumbo de N15W de 15 Km de longitud.

FALLAS DEL PLIO-CUATERNARIO

En la porción central de la Cuenca de México, las sierras que se localizan al éste y oeste de la misma, así como en la sierra de Guadalupe y el cerro de Chuimalhuichi, existe una serie de fallas de tipo normal que cortan a rocas del Mioceno, Plioceno y Cuaternario. Dichas fallas son de escasos milímetros a cientos de metros, con dirección indefinida y echados que van desde los 60° a los 80°, una característica de éste sistema de fallas en la generación de pequeños graben con dirección preferencial E-W (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

Se han inferidos una serie de fallas normales sepultadas, con base a los alineamientos de los conos cineríticos monogenéticos de las formaciones cuaternarias Chichinautzin y El Pino, además de claros relieves alineados como los conos de los cerros La Estrella, Peñón del Marqués y Chimalhuachi, los cuales se alinean en superficie con la falla inferida ya mencionada indicando que estas formaciones son típicas de zonas tensionales, y asociadas de igual manera a eventos sísmicos, los cuales se dan dentro de esta línea (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

En estudios descritos la realización de un diagrama de rosetas que implica la información estructural de fallas normales tanto superficiales como sepultadas, indican un rumbo preferencial N65E. Además se hace la correlación de una serie de esfuerzos probablemente producidos por la convergencia entre la placa oceánica de Cocos y la placa continental Norteamericana (Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera. 1989).

4.8 GEOLOGÍA LOCAL

Para cubrir éste aspecto, se ha apoyado en la información obtenida por las perforaciones profundas y en estudios de exploración indirecta TEM's.

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA LOCAL

Para conocer el comportamiento del subsuelo en la zona de estudio, se seleccionaron y ubicaron los sitios más propicios (sureste de la planicie de Texcoco), para determinar la estratigrafía a una profundidad máxima de 300 m lo más detallada posible, debido a la insuficiencia de datos litoestratigráficos de forma directa en la región; por tal motivo se tomó la decisión de realizar estudios indirectos como son los sondeos geofísicos del tipo transitorios electromagnéticos (TEM); la información de estos tendidos son gracias al informe realizado por CIGSA, S.A. de C.V., 2011 lo cual se utilizara su nomenclatura y secuencia en los tendidos, usando únicamente aquellos que se localizan en el área de estudio.

Los TEM'S que se proponen fueron tomados en cuenta debido a su localización (Tabla 12 localizados en la Figura 19) ya que en el área de estudio se posee una fuente importante de agua tanto fluvial como residual que puede ser reutilizable para un proyecto de recarga artificial. Como se observa el agua del Lago Nabor Carrillo junto a los sistemas de drenaje y demás canales localizados son un gran foco de importancia para nuestro proyecto, debido a que los costos de almacenamiento, bombeo y por tanto de transporte del líquido se pueden reducir, si la geología del área lo permite.

Tabla 12. Coordenadas de los TEM'S seleccionados (Modificado de CIGSA, 2011).

Sondeo	Longitud	Latitud	Elevación (msnm)
T-4	506419.648	2150658.85	2236
T-5	503676.345	2150654.67	2238
T-6	506333.336	2150648.81	2235
T-7	502391.191	2150206.15	2234
T-8	500355.101	2147889.15	2233
T-9	505667.604	2154815.5	2233
T-10	506162.445	2153038.46	2237



Figura 19. Localización de las secciones geoelectricas.

Una vez seleccionados los puntos para realizar los sondeos y con base a la información estratigráfica de los pozos en la región, se ha tomado la decisión de realizar secciones geológicas, las cuales nos ayudara a interpretar de mejor manera el subsuelo y poder identificar las zonas más viables para un proyecto de recarga.

El tipo de arreglo de bobina empleado para el proyecto es el denominado “bobina coincidente”, el cual se caracteriza porque la bobina para transmitir (Tx) y recibir (Rx) en donde la señal es la misma. El tamaño de la bobina empleada fue de 150x150 m y de 300x300 m. La profundidad de penetración de investigación de la señal se incrementa con el tamaño de la bobina y es del orden de dos veces la distancia del lado, dependiendo de las características del subsuelo y de que la primera capa sea resistiva (Figura 20).

Una vez colocada la bobina, se hicieron mediciones para calibrar la resistencia la cual debe estar entre 3 y 5 Ohm, para poder realizar la medición.

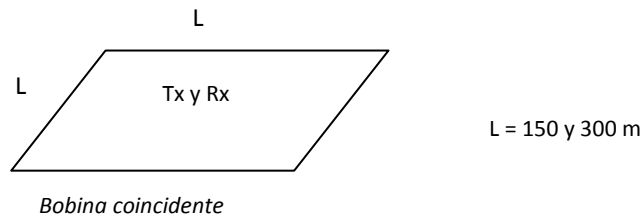


Figura 20. Arreglo de la bobina coincidente.

En el período de pruebas de campo se cumplió con:

- *Pruebas del funcionamiento del equipo.*
- *Pruebas de la resistividad del circuito de transmisión y recepción.*
- *Análisis de la intensidad de corriente circulante de emisión.*
- *Análisis del ruido y respuesta del equipo con diferentes ganancias.*
- *Análisis de la penetración de la señal en el subsuelo (profundidad de investigación).*
- *Análisis de la repetitividad de la respuesta medida por el equipo.*
- *Determinación de los parámetros de registro a utilizar.*

Las pruebas y análisis anteriores se hicieron en sitios diferentes repartidas en el área de estudio, de tal manera que fueran representativas de las condiciones generales esperadas.

Estas pruebas dieron como resultado que el arreglo cumpliera con las especificaciones establecidas: garantizar una resistencia del orden de los 4.2 Ohm en todo el tendido y una intensidad de corriente entre 4 y 6 amperes.

El tipo de serie de tiempo que se seleccionó para éste trabajo fue *High Resolution* y *Early Time*, las cuales fueron aplicadas en todos los sondeos realizados. El propósito, definir las condiciones cercanas a la superficie y a mayor profundidad respectivamente.

El tiempo de medición se fijó entre 40 y 46 ventanas, con la serie de tiempo denominada *High Resolution* o *Early Time* del equipo *Sirotem MK3*; Las mediciones se realizaron con ganancias de 0.1, 1, 10 y 100; se efectuaron por lo menos dos lecturas para cada ganancia, si las condiciones del sitio lo permitían para incrementar la calidad de la estadística.

Con los TEM'S se lograron definir 3 unidades geoelectricas, con las cuales se penetró hasta una profundidad entre los 300 y 350 m. Esas unidades identificadas presentan una distribución vertical relativamente constante, mientras que horizontalmente varían en extensión y espesor ya que son dependientes de la topografía preexistente.

- **PERFIL DE RESISTIVIDAD 1:**



Figura 21. Ubicación del perfil de resistividad 1 (TEM'S 8-7-5-6-4).

Integrado por cinco TEM'S con una longitud de 7.1 km, y dirección preferencial NE – E tal y como se muestra en la Figuras 21 y 22.

En el perfil se aprecian valores de resistividad que van de 1 a 64 Ohm-m.

Los valores menores de 5 Ohm-m se localizan entre los sondeos T-8, T-7 y T-5. En el T-8 todo el sondeo presenta valores en éste rango, entre los sondeos T-7 y T-5 los valores se encuentran entre las elevaciones 2,200 y 2,000 m.s.n.m. respectivamente. Debajo de éste valor se observa un cuerpo con resistividad entre los 10 y 16 Oh-m.

En la parte derecha del perfil en los sondeos T-4 y T-6 se aprecia un cuerpo de alta resistividad, mayor a los 60 ohm-m entre las elevaciones 1,950 y 2,180 m.s.n.m.

Sobre la interpretación de éste perfil se menciona que la distancia entre los sondeo T-5 y T-4, así como del sondeo T-8 a T-7 son muy grandes, aunque se observa la interpolación de puntos, es necesario tomar el resultado con cautela, ya que puede mal interpretarse el resultado.

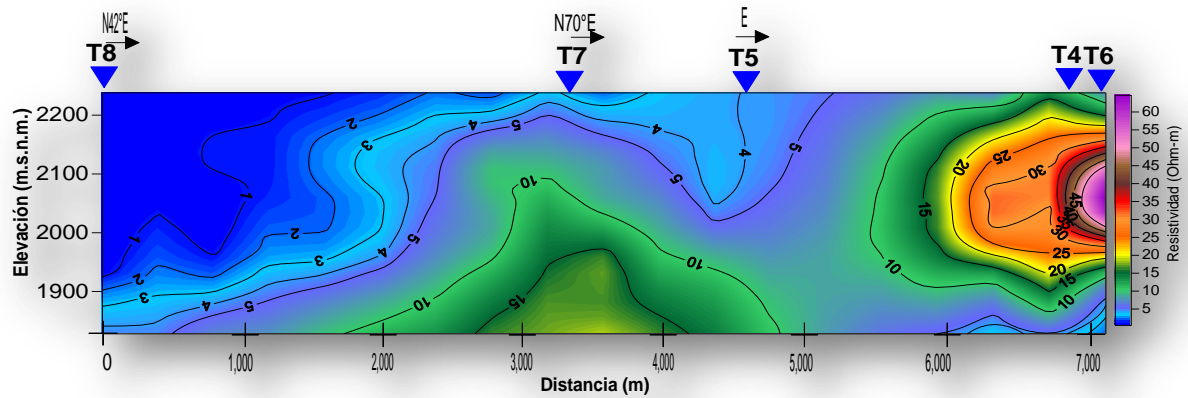


Figura 22. Perfil de resistividad 1.

- **PERFIL DE RESISTIVIDAD 2:**

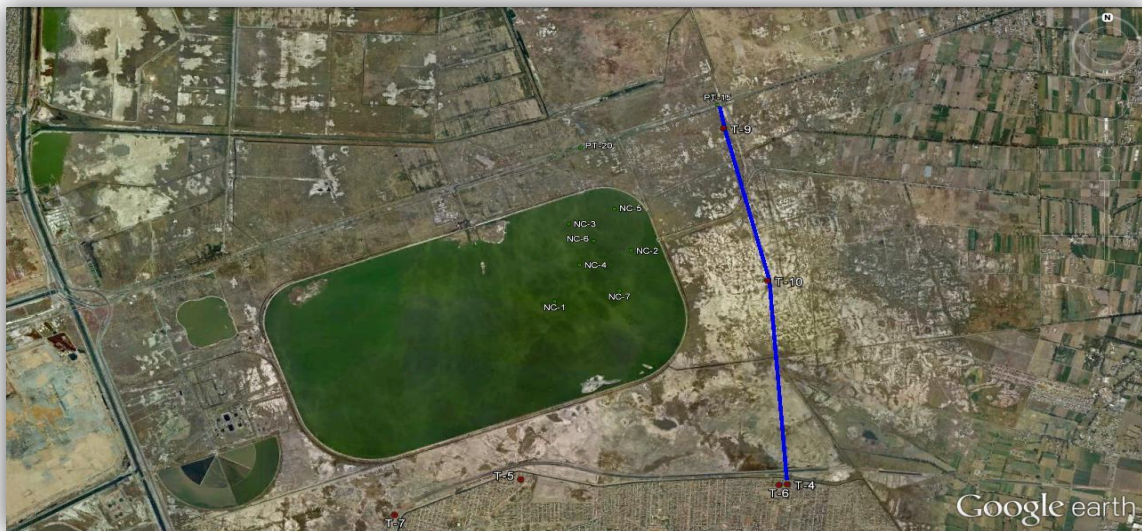


Figura 23. Ubicación del perfil de resistividad 2 (TEM'S 4-6-9-10).

Integrado por cuatro TEM'S con una longitud de 4.45 km, con una dirección preferencial SE13°. (Figuras 23 y 24).

En el perfil se aprecian valores de resistividad que van de 1 a 47 Ohm-m.

Los valores menores de 5 Ohm-m se localizan sólo en los sondeos T-9, T-4 y T-6, muy cercanos a la superficie y dan un horizonte muy delgado. Debajo se identifican valores de resistividad que oscilan entre los 20 y 35 Ohm-m formando una banda con un espesor del orden de los 200 m y una pequeña capa de unos 100 m con una resistividad mayor a los 35 Ohm-m. Debajo de esta banda los valores disminuyen.

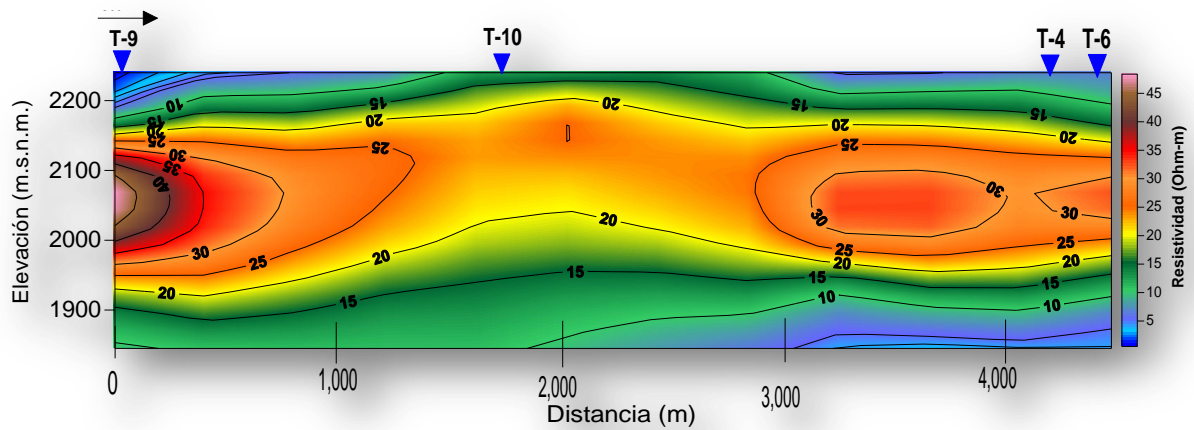


Figura 24. Perfil de resistividad 2.

- **PERFIL DE RESISTIVIDAD 3:**

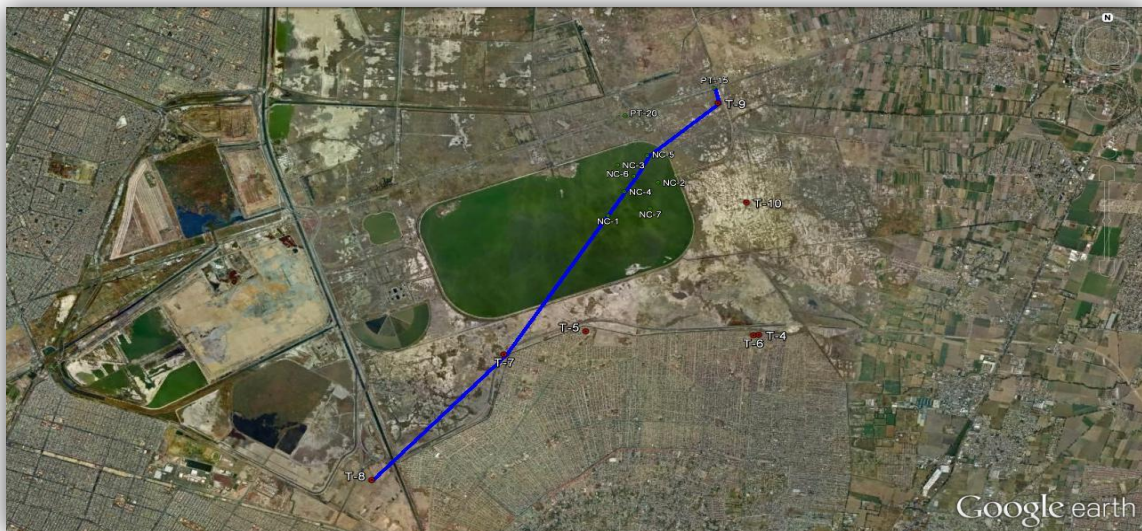


Figura 25. Ubicación del perfil de resistividad 3 (TEM'S 8-7-9).

Integrado por tres TEM'S con una longitud de 8.9 Km y una dirección preferencial N70°E. (Figuras 25 y 26).

En el perfil se aprecian valores de resistividad que van de 1 a 47 Ohm-m.

Los valores menores de 5 Ohm-m se localizan entre los sondeos T-8 a T-7. En el T-8 todo el sondeo presenta valores en éste rango. En el sondeo T-7 los valores se encuentran en la elevación 2,200 m.s.n.m. Debajo de éste valor se observa un cuerpo con resistividad entre los 10 y 16 Oh-m.

En la parte derecha del perfil en el sondeo T-9 se aprecia un una banda de alta resistividad, mayor a los 45 Ohm-m entre las elevaciones 1,950 y 2,150 m.s.n.m.

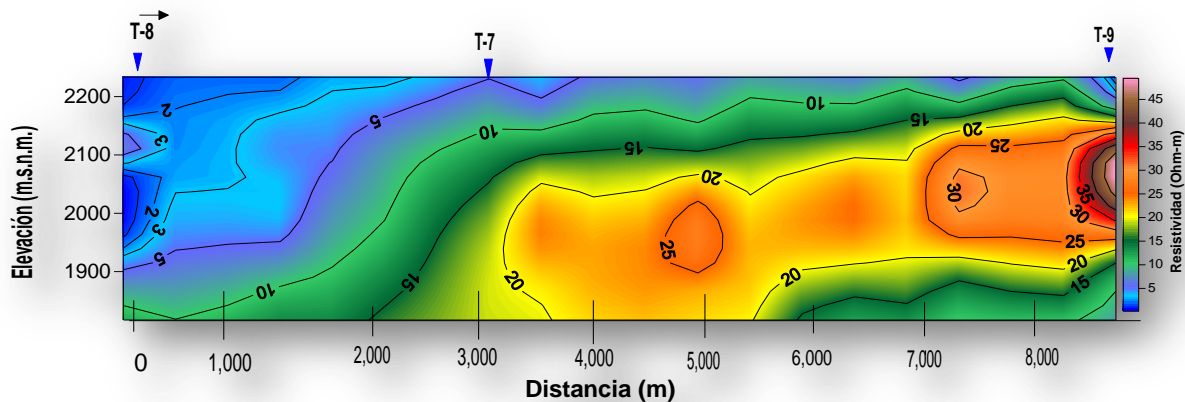


Figura 26. Perfil de resistividad 3.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

A partir de la información de algunos cortes litológicos de pozos localizados en la zona, registros eléctricos de algunos pozos Peñón-Texcoco y Nabor Carrillo, y con base a los perfiles eléctricos ya presentados anteriormente, es posible poder crear secciones geoelectricas en la zona.

Los pozos que cuentan con información litológica son los siguientes:

Pozo L.C, Km 27, Agrícola Oriental 7, Pozo Guadalupe, los pozos del Ramal Peñón – Texcoco (PT 8, PT 9, PT 10, PT 12, PT 13, PT 14, PT 15, PT 17, PT 18, PT 19, PT 20 y PT 21); pozos Nezahualcóyotl (NZ 4, NZ 7 y NZ 303) ; pozos Texcoco (Tx 304, Tx 310 y Tx 316); además de los pozos Nabor Carrillo (NC 1, NC 2, NC 3, NC 6 y NC 7).

En la Tabla 13 se muestra una descripción del comportamiento resistivo con base en los contrastes de resistividad que presentan las unidades geoeléctricas, de tal forma que estas se pueden asociar a una litología en particular lo cual ayudara a poder correlacionar los datos de exploración directa con esta información.

Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Perfil	Descripción	Asociación litológica
5 - 80	0.2 - 0.5	1, 2, 3	Unidad de muy baja resistividad se localiza como capa superficial, se presenta en todos los perfiles de manera continua, con espesor variable	Arcilla con alta concentración de sal
1 - 80	0.6 - 0.8	1, 3	Unidad de muy baja resistividad, se presenta en forma discontinua y con espesor variable	Limos
5 - 190	0.5 - 1	1, 2, 3	Unidad de resistividad muy baja, se presenta en todos los perfiles, en algunos en forma discontinua y a diferente profundidad y con espesor variable	Arena arcillosa
2 - 140	0.8 - 2	1, 2, 3	Unidad de muy baja resistividad se observa en todos los perfiles con espesor variable	Arena fina
5 - 90	2 - 10	1, 2, 3	Unidad de resistividad baja, se presenta en forma continua o como lentes de espesor variable	Toba
5 - 150	4 - 12	1, 2, 3	Unidad de resistividad media, se presenta con espesor variable, en algunos perfiles se presenta en forma continua	Arena media
1 - 150	5 - 20	1, 2, 3	Unidad de resistividad media, se presenta en todos los perfiles con espesor variable y en forma de lentes	Arena gruesa
5 - 50	10 - 15	1, 3	Unidad de resistividad media se presenta en forma de lentes con espesores y extensión variable	Arena -Grava
5 - 80	12 - 20	1, 2, 3	Unidad con resistividad media alta, se presenta en forma continua y en lentes, con espesor variable	Grava
3 - 100	1 - 10	1, 2, 3	Unidad de resistividad baja, media se presenta en todos los perfiles de manera discontinua. con diferente espesor.	Toba arcillosa
50 -150	15 - 40	1, 2, 3	Unidad de resistividad media a alta, se presenta a profundidad y espesor variable. En ocasiones como lentes	Conglomerado
5 - 250	> 60	1, 2, 3	Unidad de alta resistividad la más profunda detectados en las perforaciones y en los sondeos, con extensión y espesor variables	Basaltos

Tabla 13. Descripción de las unidades litológicas en sus perfiles asociados.

EXPLORACIÓN DIRECTA

De acuerdo con trabajos anteriores con el fin de conocer la estratigrafía de Ex Lago de Texcoco, se realizaron tres perforaciones localizados en el centro del Lago. El primero (PP-1) de 1,500 m de profundidad, con el objeto de llegar al fondo basal del Valle pues se pensaba que estaba entre los 1,000 y 1,200 m de profundidad; el PP-2 a 2,500 m de dirección NW del anterior y el PP-3 a un costado de la carretera Peñón-Texcoco y a 2,500 m al NE del PP-1 estos dos últimos a una profundidad de 750 m (Nabor Carrillo.1969).

El pozo profundo 1, con base al programa de perforación se tomaron muestras continuas de núcleo de 8.9 cm de diámetro desde los 180 a 800 m de esa profundidad en adelante sólo fueron muestras de canal, a partir de los 1,380 hasta los 1,550 m se extrajeron núcleos para poder determinar el basamento, sin embargo se encontró roca ígnea a 1,436 m con intercalaciones de brecha y toba arcillosa, llegando a los 1,500 m con tales depósitos, por lo que la perforación PP-2 fue suprimida con el objeto de seguir la perforación hasta los 2,065 m, no pudiéndose llegar a la roca objetivo (Nabor Carrillo.1969).

Limos y arenas de los 0 a los 180 m; de los 180 a los 505 m son arcillas, lutitas, arcillas arenosas, arenas, areniscas y calizas lacustres; de 505 a 1,437 m tobas y rocas ígneas, brechas y conglomerados; de 1,437 a 1,980 m tobas líticas, arcillas, margas y conglomerados calcáreos (Nabor Carrillo.1969).

El último registro de núcleo a 2,065 m en el PP-2 corresponde a un conglomerado calcáreo con algunos líticos basálticos o andesíticos, indicando que la mayor parte de la cuenca cuenta con calizas cretácicas con un vulcanismo inicial. Lo que hace suponer que la secuencia volcánica tiene 200 m de espesor y descansa sobre calizas cretácicas.

El pozo profundo 3, solo se obtuvo muestra de canal a partir de los 177 m y una muestra de núcleo de los 580 a 589 m, que corresponde a la profundidad total. Éste pozo en términos generales muestra una estratigrafía formada en la parte superior por arcillas, arenas, tobas, margas y calizas lacustres hasta los 517 m ya que atravesó un depósito de roca ígnea de 26.5 m que probablemente corresponde a los depósitos que se sitúan entre los 616 m y 621 m en el PP-1. Entre éste derrame y la profundidad de 589 m se presentan tobas, brechas y aglomerados similares a los del PP-1.

De acuerdo con Nabor Carrillo (1969), Velázquez Sánchez y R. Jaimes Palomera, (1989) y la columna estratifica del pozo PP-1 mantiene un rango de edad que vas desde el Terciario al Cuaternario y haciendo una correlación con la tabla 12 que representa la columna estratigráfica regional quedaría de la siguiente manera:

El Grupo Balsas (Teob) se encuentra en la última sección del pozo es decir a profundidades entre 1,437 y 2,065 m debido a los grandes depósitos de yeso, arenisca y arcillas con interestratificaciones de tobas, aglomerados, tobas arenosas y cuerpos de roca ígnea.

De los 1,125 m a los 1,437 m de profundidad se logro localizar una masa muy homogénea de depósitos aglomeráticos, pudiendo ser éste parte de los depósitos de las Rocas volcánicas del Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano (Tomv).

Las tobas y depósitos de roca volcánica incluyendo a las pequeñas interestratificaciones de depósitos aglomeráticos, arenas y toba arcillosa pudieran responder a los depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv), que se encuentran a una profundidad entre los

804 y 1,125 m los cuales están representando un segundo periodo de magmatismo intenso del arco volcánico y sin embargo hubieron dos periodos muy cortos, en los cuales éste magmatismo pudo haber disminuido e incluso haber terminado gracias a la presencia de depósitos sedimentarios y vulcano-sedimentarios.

De los 505 m a los 804 m de profundidad la estratigrafía es diferenciada por los depósitos de diversos espesores de tobas, rocas ígneas, tobas arenosa, conglomerados arenosos, arcillas y brechas, pueden indicar los últimos momentos de el segundo periodo de vulcanismo previamente comentado, dado que los espesores en los estratos sobre todo de las tobas y arenas son relativamente amplios por lo que se considera puede pertenecer al mismo deposito volcánico (Tpv).

Los depósitos de caliza lacustre, marga, arcilla arenosa, toba arcillosa, arenas y caliza lacustre arcillosa se localizan entre los 180 a los 505 m de profundidad. Tienen un espesor variable y relativamente pequeño y posee material clástico fluvial en la parte superior, penecontemporáneo a los depósitos lacustres los cuales estos últimos se localizan en la sección inferior de esta zona pudiendo hacer una descripción sobre la zona de transición entre los depósitos aluviales (Qal) sobre los depósitos lacustres (Qla).

LITOESTRATIGRAFÍA LOCAL

Como se menciona previamente, la existencia de doce secuencias litoestratigráficas, que varían desde derrames volcánicos hasta sedimentos arcillosos. Cada estrato es mantiene una extensión espacial y espesor diferente, pero con una cierta disposición vertical, evidenciando los agentes de depósito así como los cambios de energía que estos sufrieron a través del tiempo, resultado provocado por los diferentes eventos geológicos y a las variaciones climáticas en la región; de esta forma, la depresión geomorfológica que constituye a la Planicie de Texcoco, ha sido rellenada por sedimentos finos del tamaño de las arcillas hasta sedimentos gruesos del tamaño de los conglomerados.

De acuerdo con el trabajo realizado por (Huizar Álvarez *et al.* 2011) desde un punto de vista sedimentológico, la mayor homogeneidad se presenta en las porciones W, SE y NE del Lago Nabor Carrillo en donde la secuencia es de sedimentos finos alternados de arcilla, limo-arena fina y caliza lacustre, mismos que corresponden a una depresión estructural. En la sección 1 se observa que a partir del pozo Peñón Texcoco 20 al 14 a partir de aproximadamente de los 80 m se presenta un cambio brusco en las condiciones de depósito, mostrando una posible depresión tectónica en la zona con la acumulación de sedimentos finos. Mientras hacia los extremos de la planicie, la granulometría de los diferentes estratos es muy variada, determinado además por los sinnúmeros de interdigitaciones entre los distintos materiales. Los materiales volcánicos localizados en las orillas de la Planicie, son producto de la erosión de las lavas andesíticas, riódacíticas y basaltos que constituyen a las sierras que conforman a la Cuenca, por lo que los sedimentos mantienen la misma composición que esas lavas sin hacer a un lado a los depósitos de caída tales como las producidas por la emisiones de tefra y pómez.

Se piensa que el relleno aluvial (sedimentos gruesos del tamaño de las gravas hasta las arcillas) que constituye a la Planicie cubre a la Formación Tarango por estar sobre una serie de materiales similares a los de esta formación (materiales volcánicos tales como tobas, brechas y lavas) y que de manera lateral cambian a conglomerados tal como se muestra en la sección 2 y 3. En la sección 3 se observan dos eventos de depósito, el

último a los 237 m aproximadamente de profundidad donde existen materiales arcillosos, el segundo un periodo de vulcanismo provoca que los espesores de los materiales se depositen de manera que cortan a los depósitos precedentes a éste y el primer depósito constituido por algunos sedimentos arcillosos, y seguramente por margas y calizas lacustres cuyos espesores se acuñan hacia la periferia del lago de Texcoco.

De acuerdo con (Mesri *et al.* 1975) se determina que el porcentaje de las partículas mayores a dos micrómetros es el 63%, de los cuales 21% en carbonato de calcio, el 7% es materia orgánica y el resto son accesorios como plagioclasa, epidota, hornablenda, ópalo, cuarzo, toba, pómez y ceniza (Tabla 14).

Tabla 14. Composición mineral de los sedimentos que constituyen los depósitos lacustres (Mesri et al., 1975).

		Partículas < 2µm	Partículas > 2µm
Componentes en %	SiO ₂	60.8	45.7
	TiO ₂	0.45	0.31
	Al ₂ O ₃	15.3	9.11
	Fe ₂ O ₃	3.35	2.46
	MgO	7.89	2
	CaO	2.12	17.9
	K ₂ O	1.11	1.21
	P ₂ O ₃	0.02	0.1
	CO ₂	0.27	16.8
	Sulfuro Total	0.17	0.15
	Carbón Total	4.34	6.32
	Carbón Organico	0.07	4.59
	Carbón Inorganico	4.27	1.73
	Elementos en ppm	Cu	80
Zn		167	38
Ba		167	478
Na		2942	9214
Mn		1056	1917
Ba		138	100
Ga		232	202
Li		150	110

Entre los 35 m y 50 m de profundidad, se reconocen dos horizontes de tobas híbridas areno-arcillosas con plagioclasas que varían de andesina a labradorita, ambos horizontes contienen carbonatos de calcio y se encuentran confinados por arcillas que poseen un contenido de agua mayor al 200%.

Los materiales superficiales del Lago de Texcoco, a través del tiempo han perdido su alto contenido de humedad, debido a la extracción del agua subterránea y evaporación así como de la escasa recarga que éste recibe; aunado a éste problema, las construcciones civiles en las cercanías del mismo han provocado que su peso actúe sobre las arcillas, generando grietas en los suelos, produciendo en diversas ocasiones deslizamientos verticales y laterales en los terrenos, creando conductos perfectos en los cuales, si suceden en zonas en las que si las fuentes contaminantes se encuentran próximas, estos podrán llegar de manera rápida y sin obstáculos al acuífero.

Un ejemplo de éste tipo se encuentra en Cd. Nezahualcóyotl, en el cual, de acuerdo a la litología del relleno lacustre y por su baja conductividad hidráulica se construyó el relleno sanitario Bordo, en sus diferentes etapas y que actualmente se desconoce la garantía que éste sitio no afecta la calidad del agua subterránea, aun sabiendo que esta agua es de vital importancia para el consumo del municipio.

5.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La principal recarga al acuífero es la infiltración por lluvia, la cual se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, en especial en la porción sur, debido a la alta permeabilidad de las rocas que existen en esa zona (Figura 1).

Sin embargo de acuerdo a las propiedades físicas y el comportamiento hidráulico de los materiales no consolidados y rocas del acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México Ortega G y Farvolden. (1988) formaron cinco unidades hidrogeológicas:

- Acuitardo en materiales lacustres cuaternarios.
- Acuífero en rocas volcánicas y materiales cuaternarios.
- Acuífero en materiales piroclásticos y aluviales terciarios (Acuífero principal en explotación).
- Acuitardo en rocas volcánicas terciarias.
- Acuífero en rocas carbonatadas cretácicas.

Con base a la información estratigráfica recopilada y a las secciones geológicas propuesta, además de diversos estudios como el de Leiva Suárez, (2010), y siguiendo como guía el modelo de Mooser y Molina, (1992), se realizó el desarrollo de cada uno de los sistemas acuíferos en el Valle de México de la siguiente manera:

- ***Acuitardo superior***

Con un espesor promedio a nivel regional sobre toda la planicie que van desde los 20 m hasta los 150 m reportados en el pozo Texcoco-1, constituido por sedimentos fluviales, lacustres con buena porosidad pero de baja permeabilidad a lo largo de toda la planicie, depósitos arcillosos además de algunos lentes de material grueso como arenas-gravas y conglomerados; se forma además de una capa delgada de material arcilloso o limo-arenoso compacta y rígida llamada “capa dura” con un espesor de 3 m a una profundidad de 33 m que ocurrieron dentro de la subcuenca correspondientes al periodo Cuaternario.

Por efecto del alto caudal extraído del acuífero, esta unidad transmite agua al acuífero. Hidráulicamente esta unidad actúa como confinante del acuífero superior y por la pérdida de presión de poro que ha sufrido éste, y debido a la alta compresibilidad, el terreno a lo largo del tiempo ha sufrido un hundimiento diferencial en toda la cuenca y en especial sobre la planicie, debido al gran número de pozos encontrados en esta zona.

La conductividad hidráulica horizontal (K_h) varía de 10^{-6} a 10^{-10} en el material fino y 10^{-5} en los horizontes limo-arenosos (Marsal y Masari, 1959; Rudolph, 1989; Vargas – Cabrera, 1995; Murillo y Huizar Álvarez, 1993 en Huizar Álvarez et al., 2002), ya que estos son

parte de algunos pequeños acuíferos confinados, que en el pasado fueron una fuente principal de aporte de agua.

De acuerdo con Vargas – Cabrera C. y Ortega – Guerrero M.A (2002) se realizaron cerca de 300 pruebas hidráulicas a profundidades de 3 a 85 m, considerando así la formación de tres acuitardos con espesores medios entre 20 y 30 m, siendo que la conductividad hidráulica según el método Hvorslev dentro del acuífero somero oscila entre 4×10^{-11} y 5×10^{-9} , mientras que el segundo acuitardo es de 4×10^{-11} a 5×10^{-9} y el último con un valor de 2.2×10^{-11} .

Hacia las orillas del acuitardo, es decir en los bordes de la planicie, en la parte más superficial (< 10 m), la conductividad hidráulica aumenta debido a los diversos agentes erosivos que provoca que los suelos de la región reciban grandes cambios en su textura sufriendo agrietamientos y por consiguiente presentan un cambio sobretodo en su porosidad, incrementando así su conductividad hidráulica.

Esto sugiere que dentro del sistema acuífero, el agua como tal mantiene un movimiento horizontal sobre los estratos limo-arenosos ya que el valor de la conductividad hidráulica es menor, además de considerar que los valores estáticos en el nivel del agua son menores, estos factores son clave para que el acuífero sufra de contaminación.

- **Acuífero superior**

Con un espesor promedio de 600 m, constituido por aluvión, toba, roca basáltica, arcillas volcánicas intercaladas con pequeñas capas o lentes de arena, depósitos aluviales, piroclastos, conglomerado del Cuaternario; así como roca andesita basáltica, la Formación Tarango del Plio–Cuaternario; roca basáltica y andesítica del Plioceno Superior; depósitos de la Formación Tarango y basaltos del Terciario Superior. Es un acuífero libre en las regiones montañosas, en los abanicos piroclásticos, en las llanuras y aluviales; por otra parte es confinado en las planicies por depósitos lacustres del Cuaternario, los cuales se extienden desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el cerro de Chapultepec. Éste acuífero granular es semiconfinado en la parte central de la Cuenca, ya que por encima se encuentra el paquete de arcillas lacustres.

El valor de K_h referente a esta unidad, de acuerdo con diversas pruebas de bombeo oscila entre 1.5×10^{-4} y 3×10^{-4} m/s y una conductividad hidráulica vertical (K_v) de 1.1×10^{-6} m/s y un coeficiente de almacenamiento (S) de 10^{-3} en las rocas sanas y en las fisuradas $K_h = 1.1 \times 10^{-3}$ y $S = 4 \times 10^{-4}$ (Vásquez Sánchez, 1995; SMA, 1999; Huizar Álvarez et al., 2001 en Fajardo Rivera – Martínez Galicia, 2004).

El mayor volumen de agua que es utilizada para abastecer al Distrito Federal y área conurbada, proviene de esta zona, esto se puede observar claramente por la gran densidad de pozos que se localizan atravesando esta unidad; esto se puede observar en el oriente, norte y sur de la cuenca.

El alto volumen de extracción de agua supone a que éste factor es la causa principal del abatimiento de su nivel y por tanto el del suelo, por lo que, induce a una recarga lateral de peor calidad.

- ***Acuitardo inferior***

Con un espesor promedio de 1,500 m, constituido por clastos sedimentarios, depósitos de pie de monte, piroclastos, conglomerado fluvial, horizontes de pómez, arcillas volcánicas muy comprimidas y resistentes, roca volcánica fracturada a una profundidad de 3,000 m del Plioceno; Formación Tarango, roca volcánica andesítica del Plio-Cuaternario; roca basáltica y andesítica del Plioceno Superior, roca volcánica, depósitos lacustres del Plioceno Inferior; roca volcánica del Terciario; deposito lacustre del Terciario Superior; roca ígnea ácida del Mioceno; roca ígnea intermedia del Oligoceno; conglomerado del Eoceno; marga, arenisca, lutita, carbonatos compactos del Cretácico Superior; la Formación Balsas, Formación Tepozteco y Formación Mezcala.

- ***Acuífero inferior***

Constituido por roca volcánica de tipo andesítico y dacítico del Terciario Medio y Superior; roca carbonatada de origen sedimentario del Cretácico; carbonatos de la Formación Morelos (espesor promedio 500 m).

UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS LOCALES

De acuerdo a la información de las secciones realizadas, los pozos perforados en la región de estudio, se pueden considerar tres tipos de unidades granulares: la primera constituida por los sedimentos lacustres que poseen una baja conductividad hidráulica y una calidad del agua con alto contenido en sales, mismas que la empresa ya desaparecida Sosa Texcoco utilizo por muchos años.

Debajo de la unidad ya mencionada, la unidad hidrogeológica intergranular, indica la presencia de agua lacustre en estratos de espesores y litologías variables constituidas por arcillas, limos, arena fina, tobas y arenas; estos sedimentos se interdigitan con otros sedimentos de textura más gruesa como arenas, gravas, lavas y conglomerados; por su productividad se le puede considerar media – alta gracias al alto abastecimiento de agua que le ofrece a la zona metropolitana dentro de la cuenca.

Debajo de la unidad intergranular e interdigitada a un costado de la misma, existen materiales granulares de origen fluvial formado por limos, arenas, gravas e incluso derrames de lava que forman un tipo de acuífero mixto granular fisurado, esta unidad presenta una productividad relativa media que de acuerdo a la zona, puede ser discontinua y limitada.

Las secciones hidrogeológicas correspondientes al área de estudio, muestran las elevaciones en su nivel estático y características hidráulicas que poseen (Figuras 27 – 30).

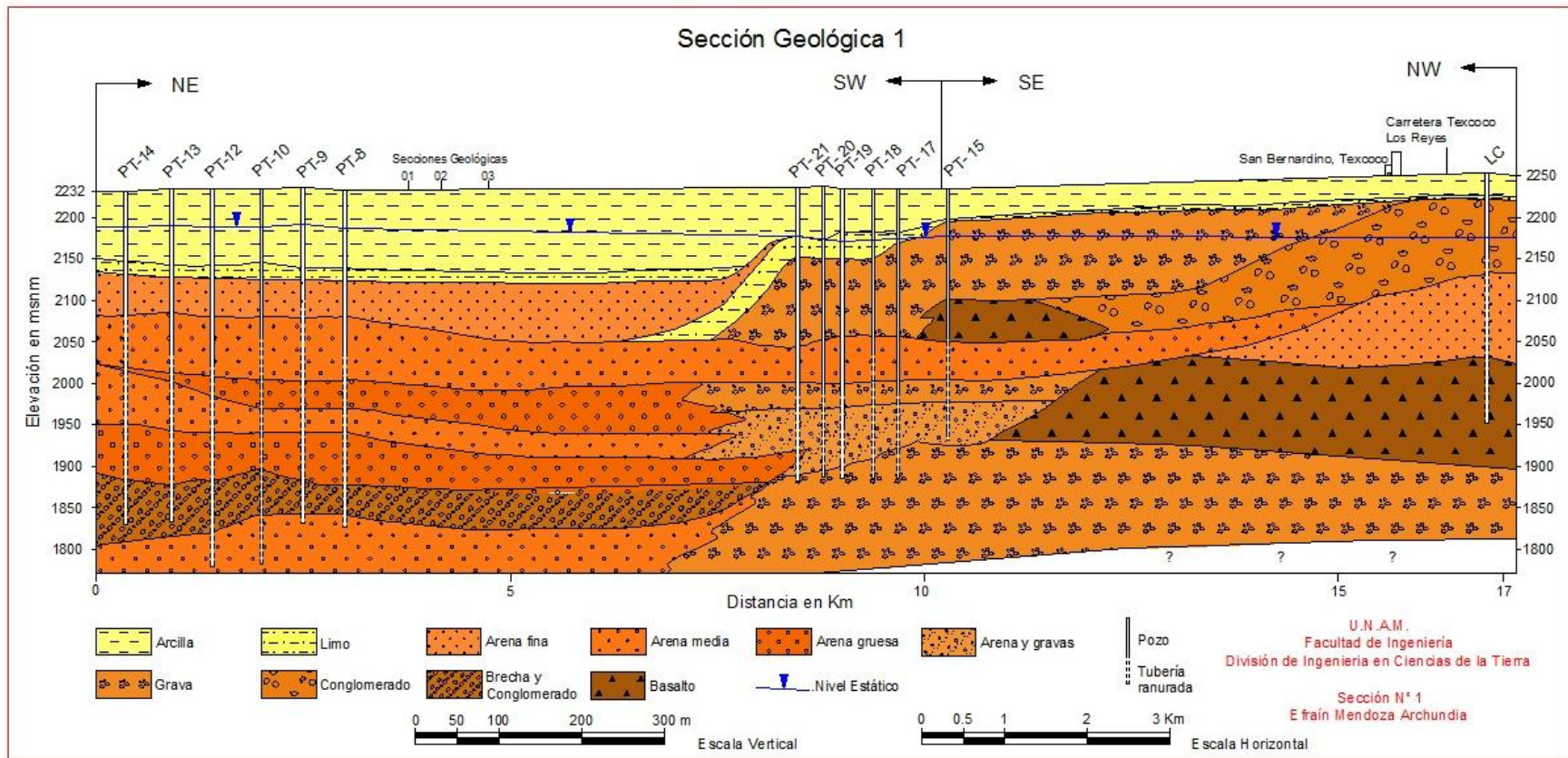


Figura 27. Sección hidrogeológica 1.

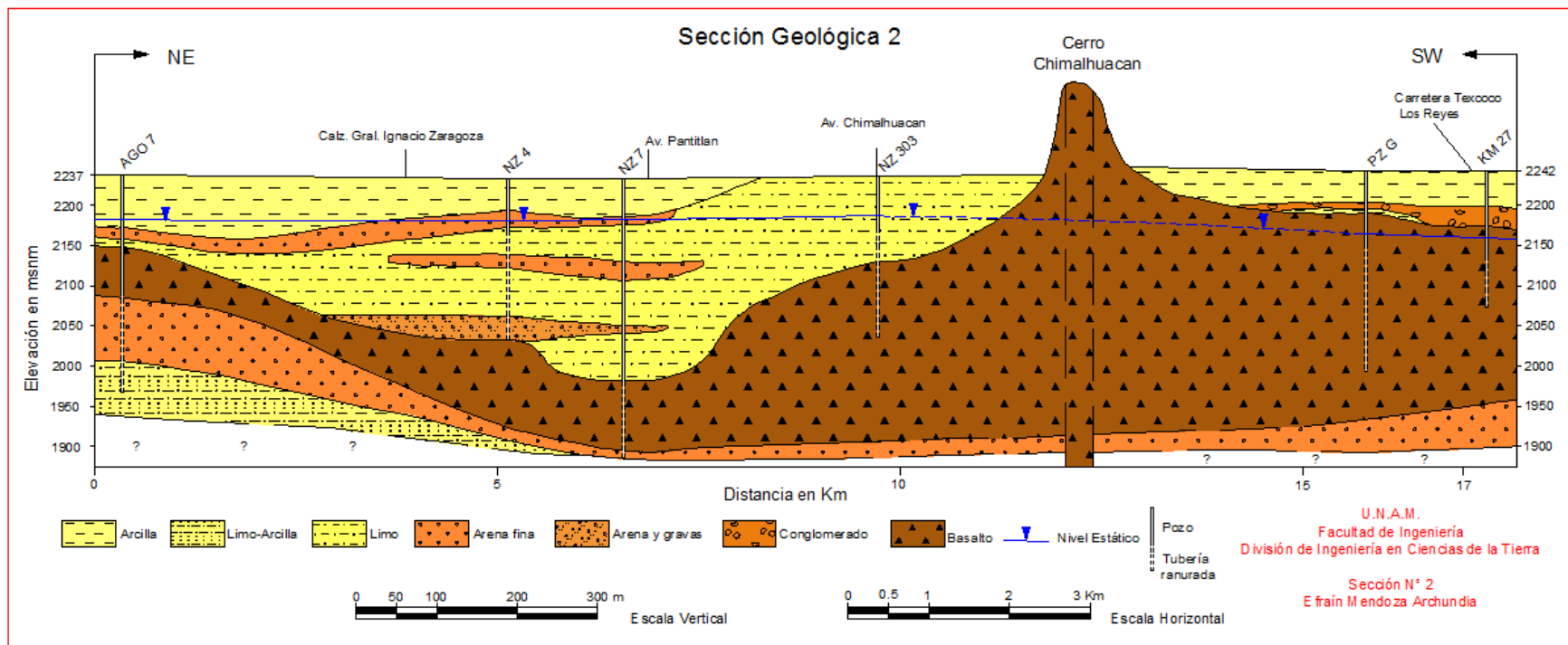


Figura 28. Sección hidrogeológica 2.

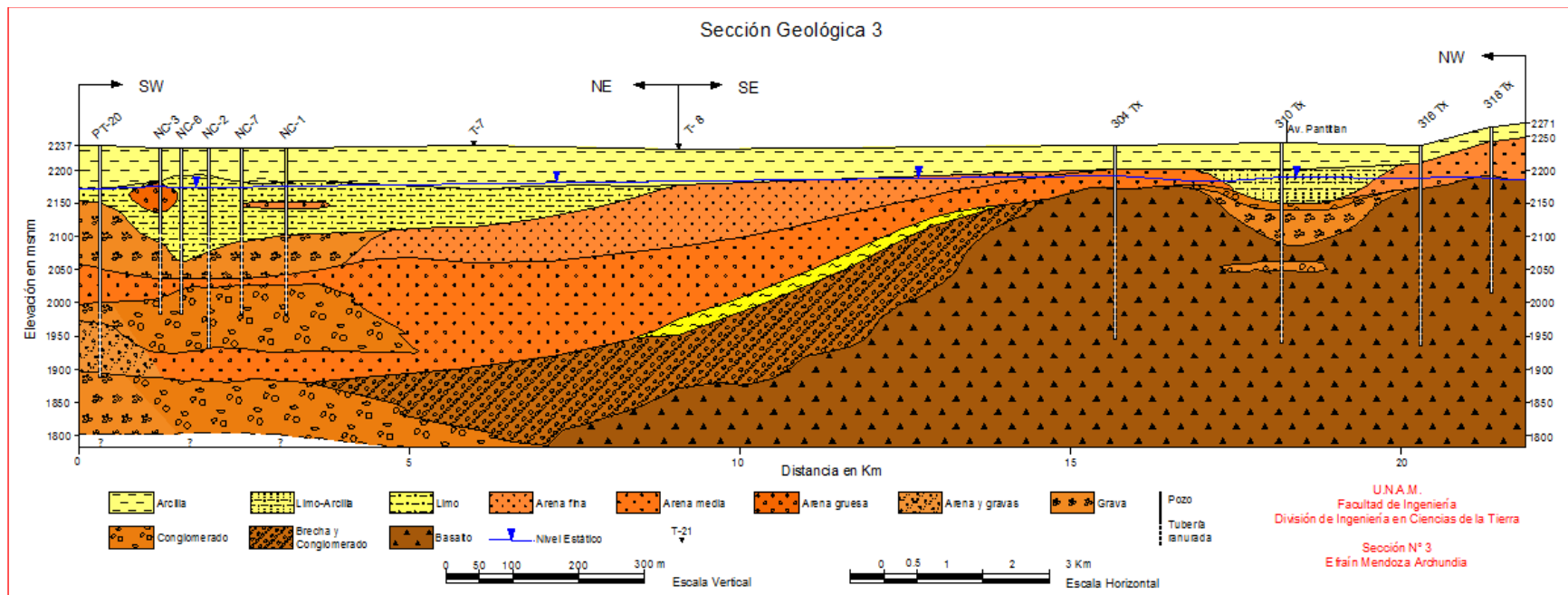


Figura 29. Sección hidrogeológica 3.

Tabla 15. Posible comportamiento de las unidades litológicas (modificado de Huizar Álvarez et al., 2011).

Unidad	Espesor (m)	Resistividad (Ohm-m)	Perfil	Asociación Litológica	Permeabilidad estimada
A	5 a 80	0.2 a 0.5	1, 2, 3, 4	Arcilla con alta concentración de sal	Muy pequeña
A'	1 a 80	0.6 a 0.8	1, 2, 4	Limos	Pequeña
A''	5 a 190	0.5 a 1	1, 2, 3, 4	Arena arcillosa	Pequeña
B	2 a 140	0.8 a 2	1, 2, 3, 4	Arena fina	Pequeña a media
B'	5 a 90	2 a 10	1, 2, 3, 4	Toba	pequeña
C	5 a 150	4 a 12	1, 2, 3, 4	Arena media	Media- alta
C'	1 a 150	5 a 20	1, 2, 3, 4	Arena gruesa	Media a alta
D	5 a 50	10 a 15	2, 4	Arena -Grava	Alta
E	5 a 80	12 a 20	1, 2, 3, 4	Grava	Media
F	3 a 100	1 a 10	1, 2, 3, 4	Toba arcillosa	Baja
G	50 a 150	15 a 40	1, 2, 3, 4	Conglomerado	Alta
H	20 a 100	8 a 60	1	Brecha, caliza	Media
I	5 a 250	> 60	1, 2, 3, 4	Basaltos	Alta

La amplia presencia de pozos en esta zona pueden explicar que la roca presenta buena conductividad hidráulica; la litología en la región de estudio está básicamente constituida por lentes de arena - grava (sección 2) con un espesor entre 30 y 40 m, sin embargo solo se observa un pozo sobre éste lente; la gran mayoría de los pozos se localizan a profundidades entre los 200 y 400 m, siendo los pozos del ramal Peñón - Texcoco los más profundos, los cuales extraen agua de las arenas gruesas y conglomerados, por otro lado, hay pozos como el Km 27, Pozo Guadalupe, 304 Tx, 310 Tx, 316 Tx, 318 Tx, NZ 303 y NZ 7 que atraviesan los derrames basálticos que probablemente se encuentran con alto grado de fracturación motivo el cual, seguramente los pozos se localizan sobre esta zona.

Aunque se observa que el nivel freático se encuentra entre los 30 y 40 m de profundidad, la baja conductividad hidráulica y permeabilidad que es producida por los sedimentos finos, impide la realización de pozos a baja profundidad, por lo que la mayoría alcanzan distancias mayores a los 200 m, aunque se puede estudiar la posibilidad de explotar agua de los acuitardos en sedimentos más gruesos pero con la incertidumbre de que el agua tenga buena calidad, ya que por la experiencia, se sabe que el agua superficial contenida en los sedimentos finos tiene alto contenido de sales, motivo por el cual se extrajo por mucho tiempo agua del acuitardo superior por la empresa Sosa Texcoco.

5.2 POTENCIOMETRÍA

Para conocer la dirección de los flujos principales subterráneos, así como la variación en su gradiente hidráulico en tiempo y espacio, es necesario conocer los niveles del agua en el subsuelo. Para ello se necesitan realizar mediciones de su nivel, mismas que son realizadas por diversos organismos municipales y estatales.

Gracias a la información recopilada con base a los datos de los diversos organismos que realizan las mediciones de los niveles estáticos del acuífero, además de poseer una base de datos histórica de los mismos, se han realizado configuraciones piezométricas en espacio y tiempo en la zona de interés, abarcando un área mayor para la mejor comprensión del sistema acuífero, de tal manera que se le pueda dar una mejor interpretación.

Las configuraciones mostradas en las Figuras (Figura 31 - 39), mantienen una estabilidad en los pozos en cuanto a la toma de lecturas, es decir, se han mantenido en un monitoreo constante, ya que hay periodos en los cuales varios pozos no han sido medidos por años y por ello no se pueden considerar debido a la inconsistencia de los datos.

En las configuraciones piezométricas para la mayoría de los años analizados, se observa que las curvas que mantienen un valor mayor en su elevación del nivel estático se encuentran sobre todo al centro de la planicie, con una dirección casi N - S con valores máximos para el año 1990 hasta 2002 con cota 2,230 m.s.n.m. aprox, sin embargo se nota un ligero aumento de 5 m a partir de 2004; esto puede ser un valor falso, debido a que se sabe que los niveles han ido disminuyendo a razón de un metro al año aproximadamente sobre todo en la porción noreste de la cuenca.

Los valores menores en su nivel se registran en las cercanías de la Sierra de Río Frío, generando grandes conos de abatimiento (niveles estáticos menores) condicionando a la formación de dos parte aguas unidos una especie de "T" (niveles estáticos mayores) con dirección NE-SW y al W de la planicie.

Se forman tres conos de abatimiento debido a la extracción de agua por medio de pozos, los cuales se encuentran en cuatro zonas de recarga principal dentro de la cuenca; al oriente se localiza el principal punto de recarga por poseer seguramente los mejores escurrimientos y características permeables para la recarga del acuífero, refiriéndonos a la Sierra de Río Frío; las otras dos zonas de recarga principal se localizan al SW y NW de la cuenca, es decir en las cercanías del Cerro de La Estrella y Sierra de Guadalupe respectivamente; por último al sur de la Cuenca la Sierra de Santa Catarina y cuerpos aislados como el Cerro de Chimalhuachi y Cerro del Pino son aquellos en los cuales no se localizan un gran número de pozos posiblemente a que las condiciones geológicas no permiten su realización y solamente ayudan a su recarga, por lo que no presentan grandes abatimientos pero si son visibles en las configuraciones piezométricas.

Para 1990 se observan tres conos principales ya mencionados previamente: el primero es aquel que se encuentra al oriente de la planicie y es aquel que muestra los valores más altos de abatimiento (2,172 m.s.n.m.) debido a que además se localiza una mayor densidad de pozos; el segundo cono se localiza al SW de la planicie, cuenta con menor densidad de pozos por lo que su nivel es más alto a diferencia del cono situado al oriente (2,188 m.s.n.m.) y por último al NW los niveles de abatimiento de 2,192 m.s.n.m. son muestra de la menor concentración de pozos de extracción en la zona.

Conforme al transcurso del tiempo, el tamaño del parteaguas supone que debe disminuir, esto es visible sobretodo en las cercanías de las zonas de recarga en los cuales los conos de abatimiento se han hecho más grandes, no solo en profundidad si no también en extensión. Éste fenómeno mantiene una estabilidad en su forma desde 1990 hasta el 2000; a partir de éste año se observa que los abatimientos cada vez son mayores, debido al incremento de la extracción del agua, provocando que los parteaguas mencionados sean cada vez menores en cuanto a su nivel piezométrico.

A partir de 2006 el parteaguas pareciera ser una especie de planicie en la región central del acuífero, respondiendo a la suposición ya mencionada previamente, siendo que hasta el 2010, solo la parte central y norte del acuífero pareciera mantener indicios del parteaguas en donde la cota 2,195 es aquella que se mantiene como la mayor que bordea a la porción oriental de la cuenca y al oriente de la misma, considerándose un abatimiento regional, provocando una pérdida de presión en el subsuelo generando el hundimiento general de la cuenca, sobretodo en esta zona, misma que se puede evidenciar en los pozos localizados sobre la carretera federal Peñón – Texcoco, La Catedral Metropolitana, el Ángel de la Independencia y sobretodo el hundimiento de las casas en la porción oriente de la Ciudad, principalmente en los municipios de Cd. Netzahualcóyotl, Ecatepec y Chalco.

La elevación del nivel del agua en el oriente de la ciudad (Delegaciones Iztapalapa, Iztacalco, Gustavo A. Madero; Municipios como Nezahualcóyotl, Los Reyes la Paz y Ecatepec) en la actualidad se ha mantenido en los últimos 5 años, aun considerando que municipios como el de San Vicente Chicoloapan son lugares que poseen un mayor abatimiento y Los Reyes una inversión en sus niveles piezométricos.

La extracción de agua en los pozos Peñón Texcoco y los localizados en el lago Nabor Carrillo, evidenciando un pequeño parteaguas al NE de la planicie, se podría decir que pertenece al parteaguas principal NE-SW que ya se menciona anteriormente. La mayor elevación de éste se encuentra entre las estaciones piezométricas 536-18 y 536-7 mismas que se observan a partir del año 2000 (2,236 – 2,234 m.s.n.m.); hay que considerar que el área de abatimiento en esta porción de la planicie se ha mantenido, por lo que éste cono (cono oriental principal) se puede suponer como regional.

La causa principal de la alteración piezométrica, puesta en evidencia con las configuraciones realizadas, es el exceso bombeo de agua para la zona urbana, sin lugar a duda es evidente que la explotación es alta a través del tiempo, por lo que en un futuro, las cotas piezométricas irán disminuyendo de manera progresiva sin una continuidad o constancia en el espacio, por lo que no es posible definir de manera optima la configuración del nivel estático para 5 o más años debido a que no se sabe cuál será el caudal extraído para ese momento, sin embargo, solo sabremos que los efectos causados por el hundimiento del nivel del suelo será causa de los problemas causados por el mismo, tales como son los hundimientos de los hogares, edificios; ruptura de ductos de agua, de gas , de sistema de drenaje; agrietamientos en las vías de comunicación, etc.

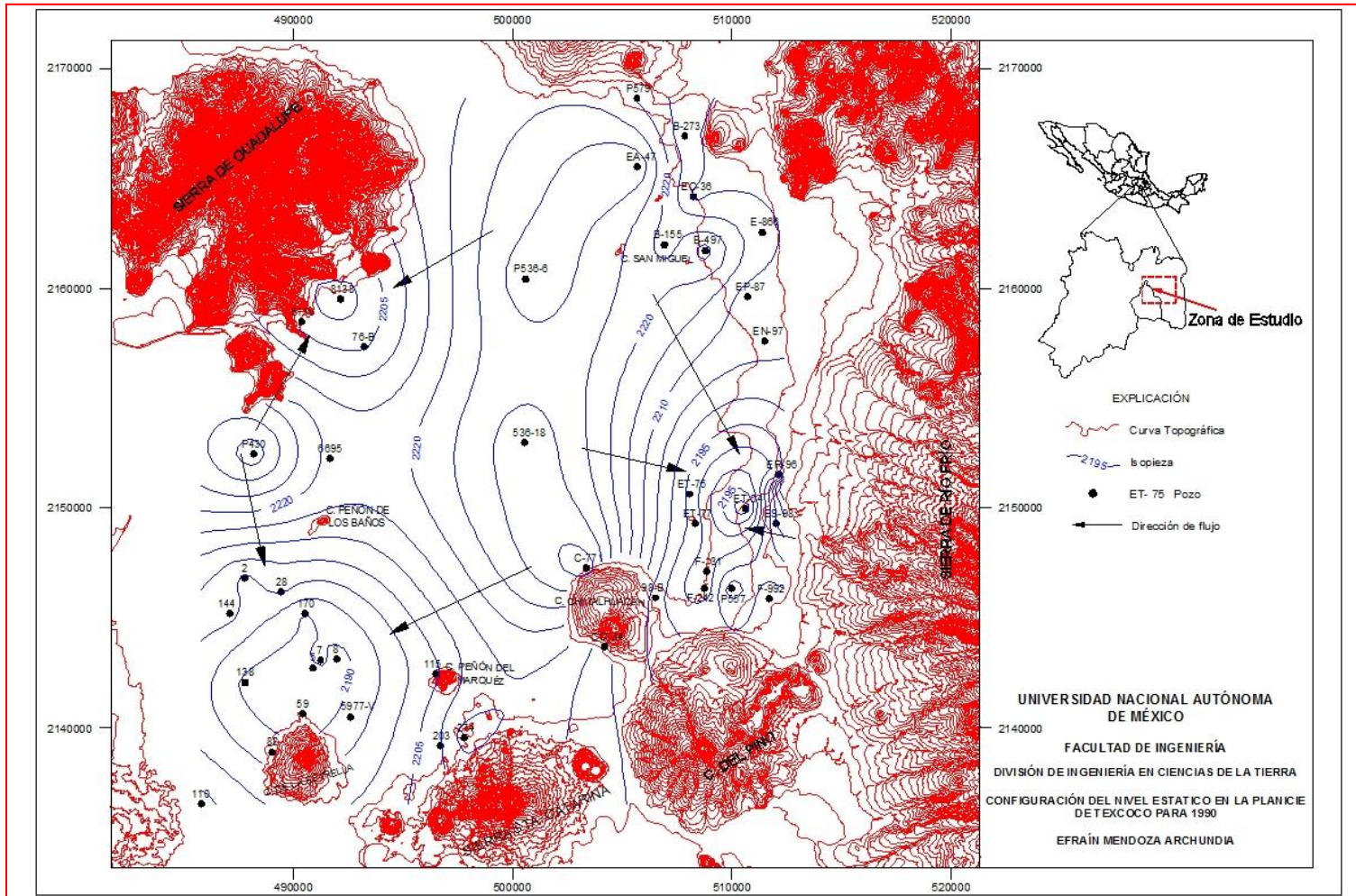


Figura 31. Configuración del nivel estatico para el año 1990.

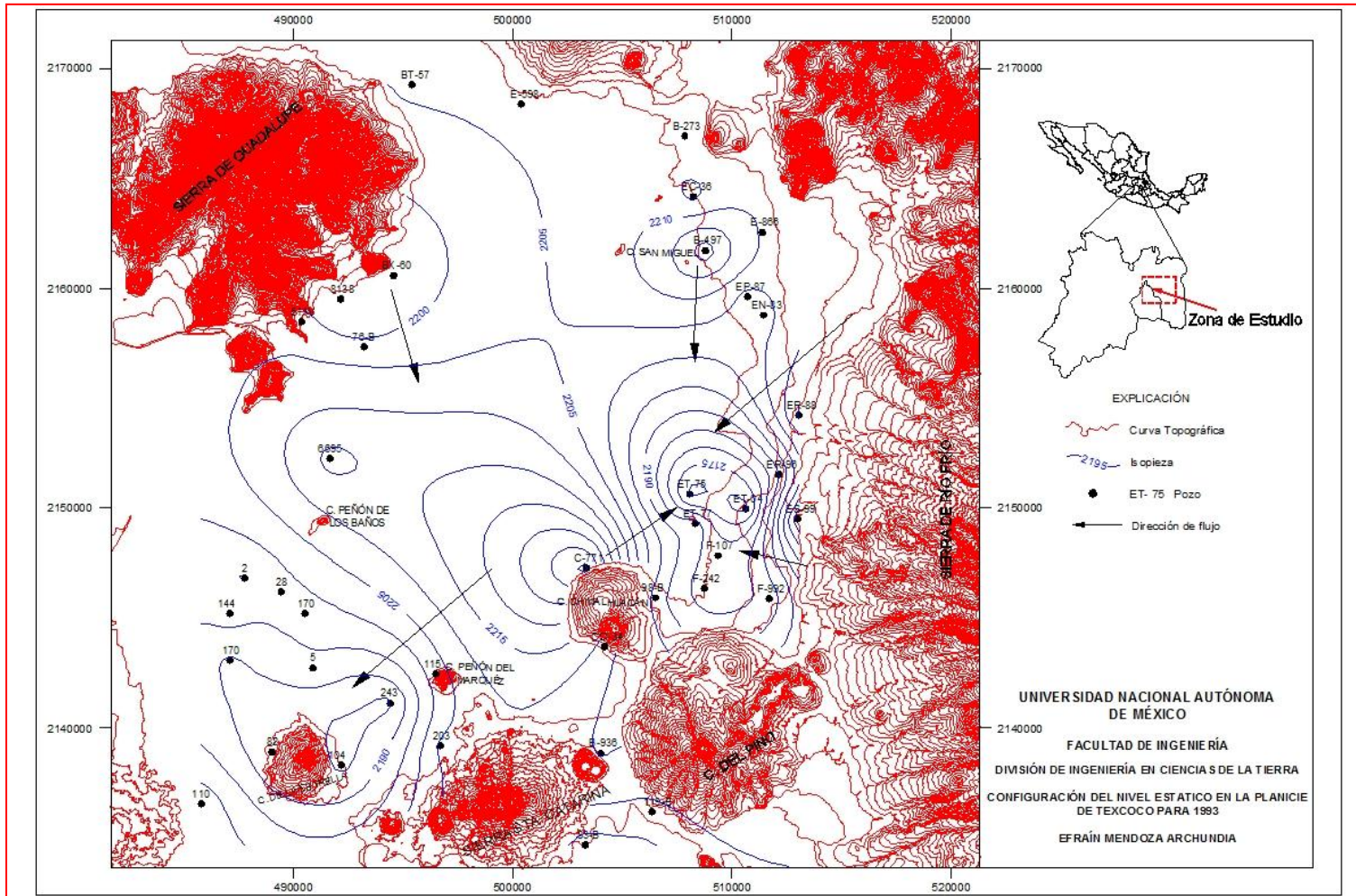


Figura 32. Configuración del nivel estatico para el año 1993.

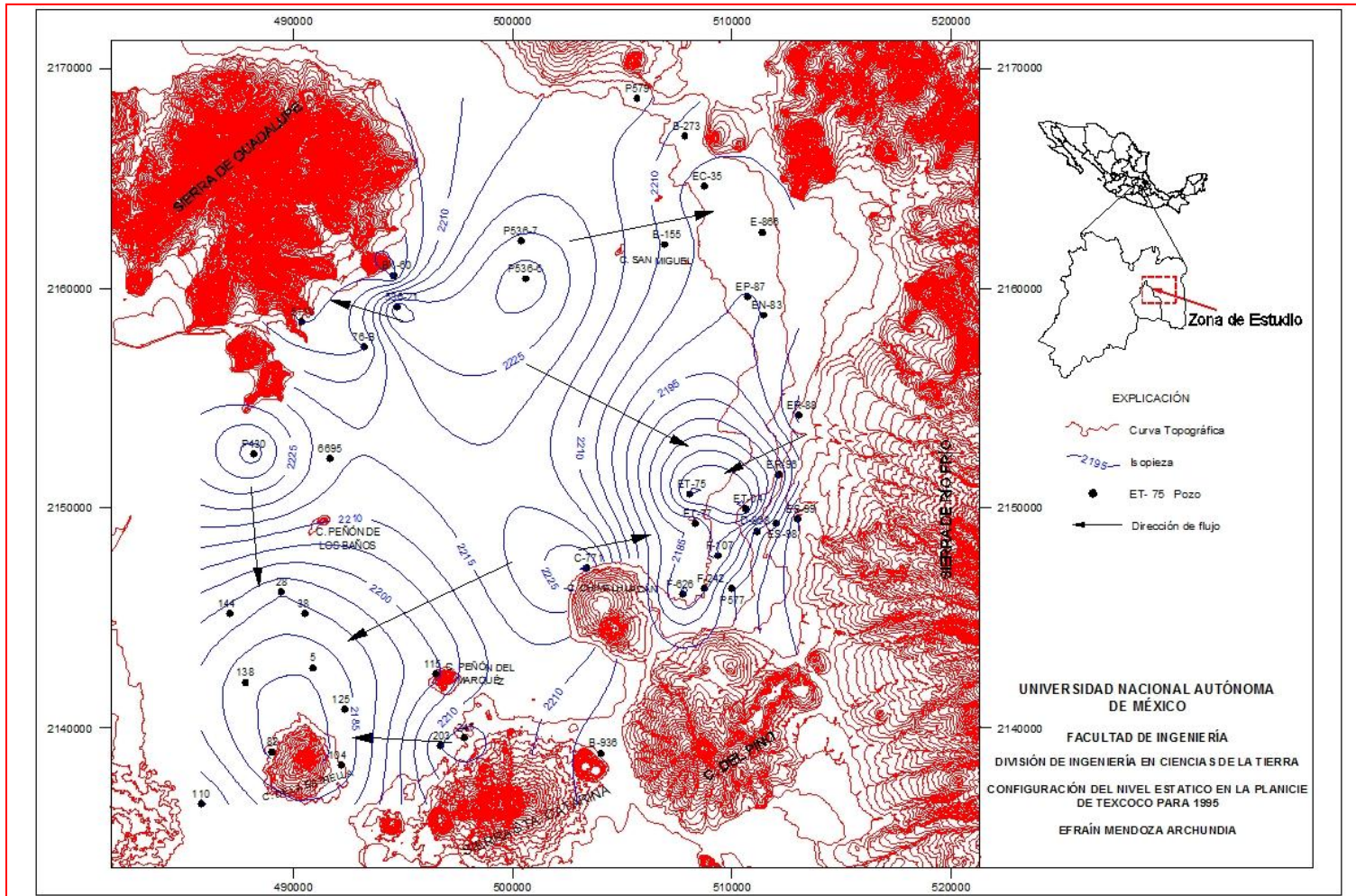


Figura 33. Configuración del nivel estatico para el año 1995.

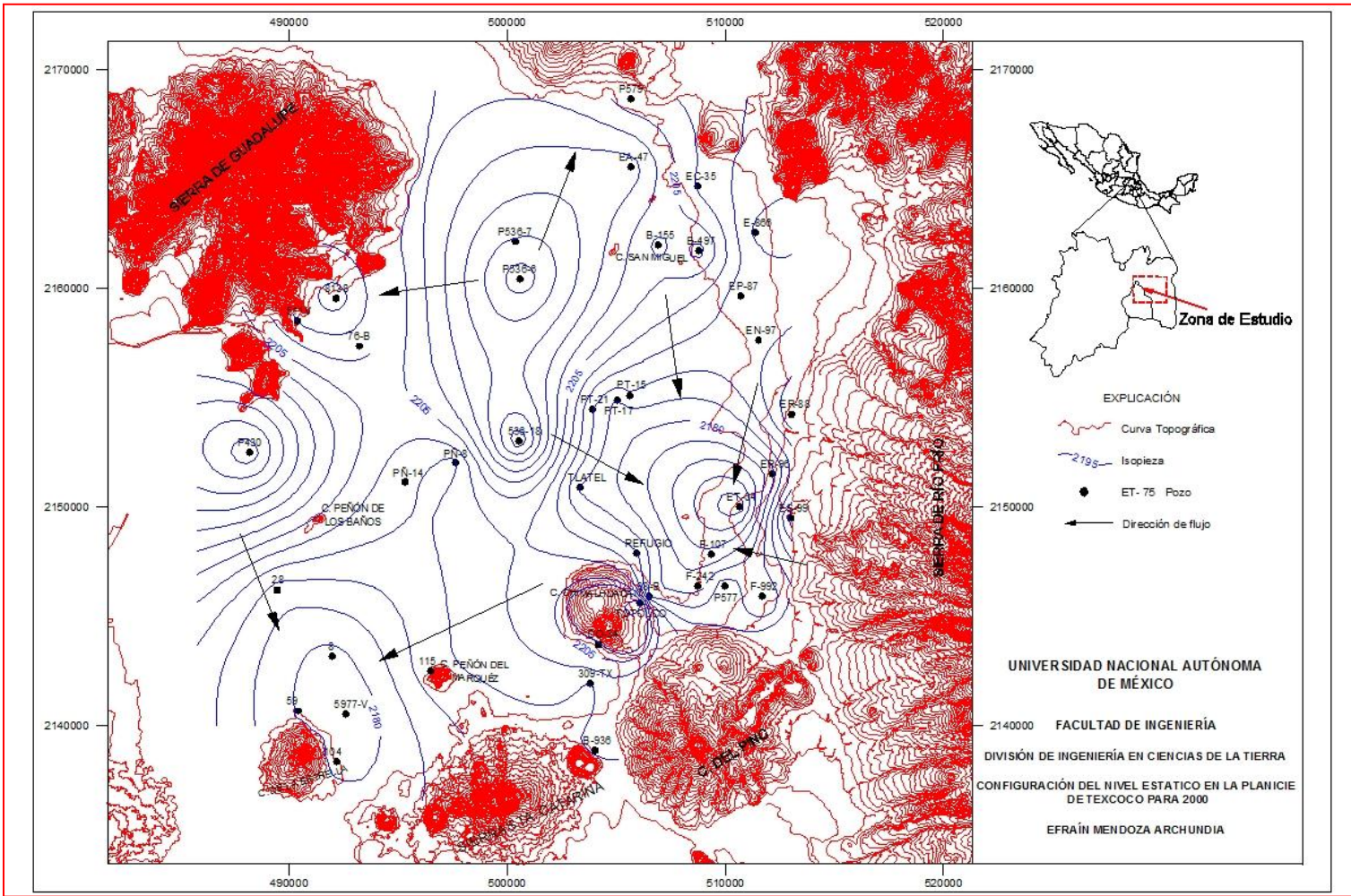


Figura 34. Configuración del nivel estatico para el año 2000.

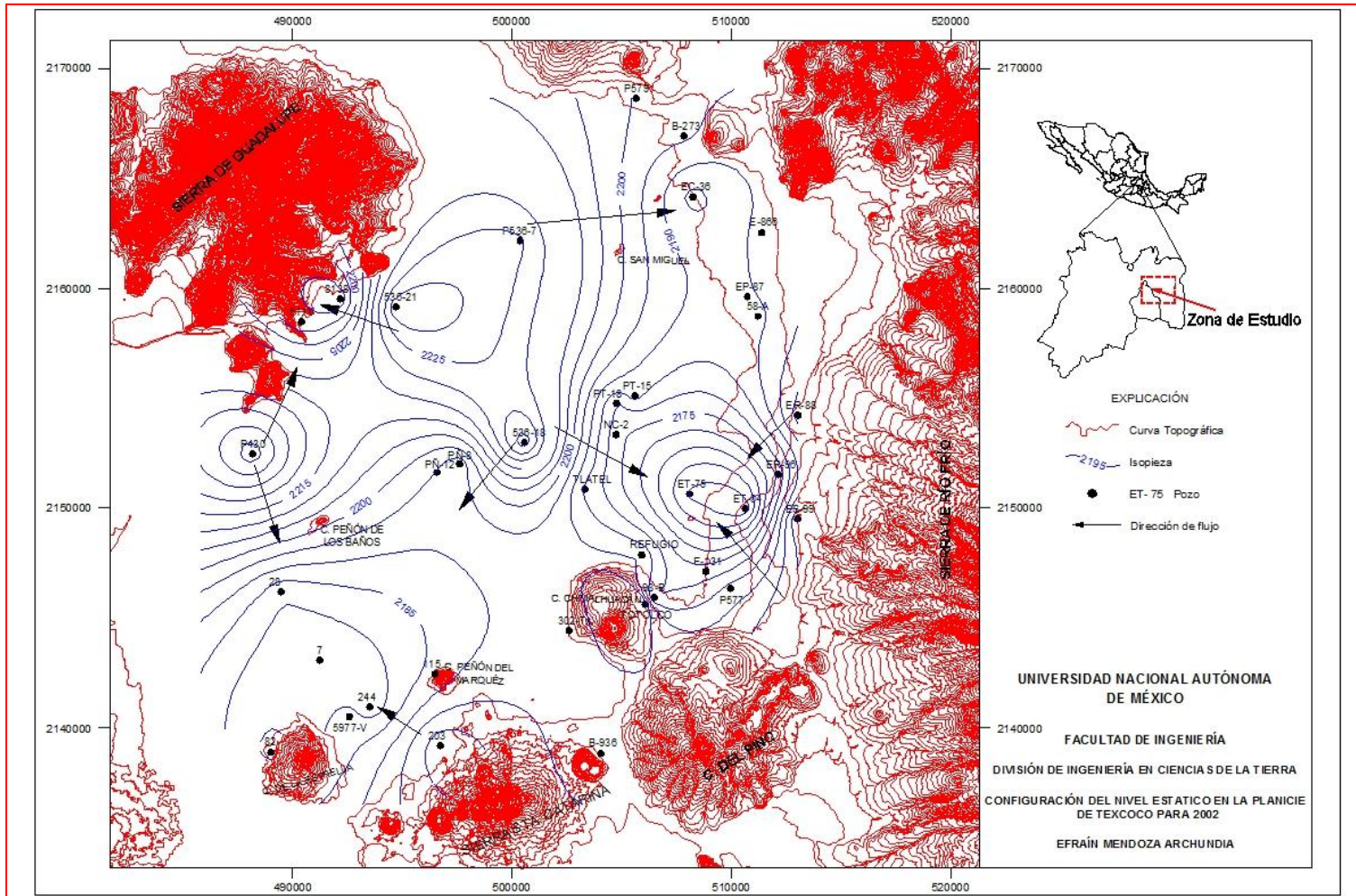


Figura 35. Configuración del nivel estatico para el año 2002.

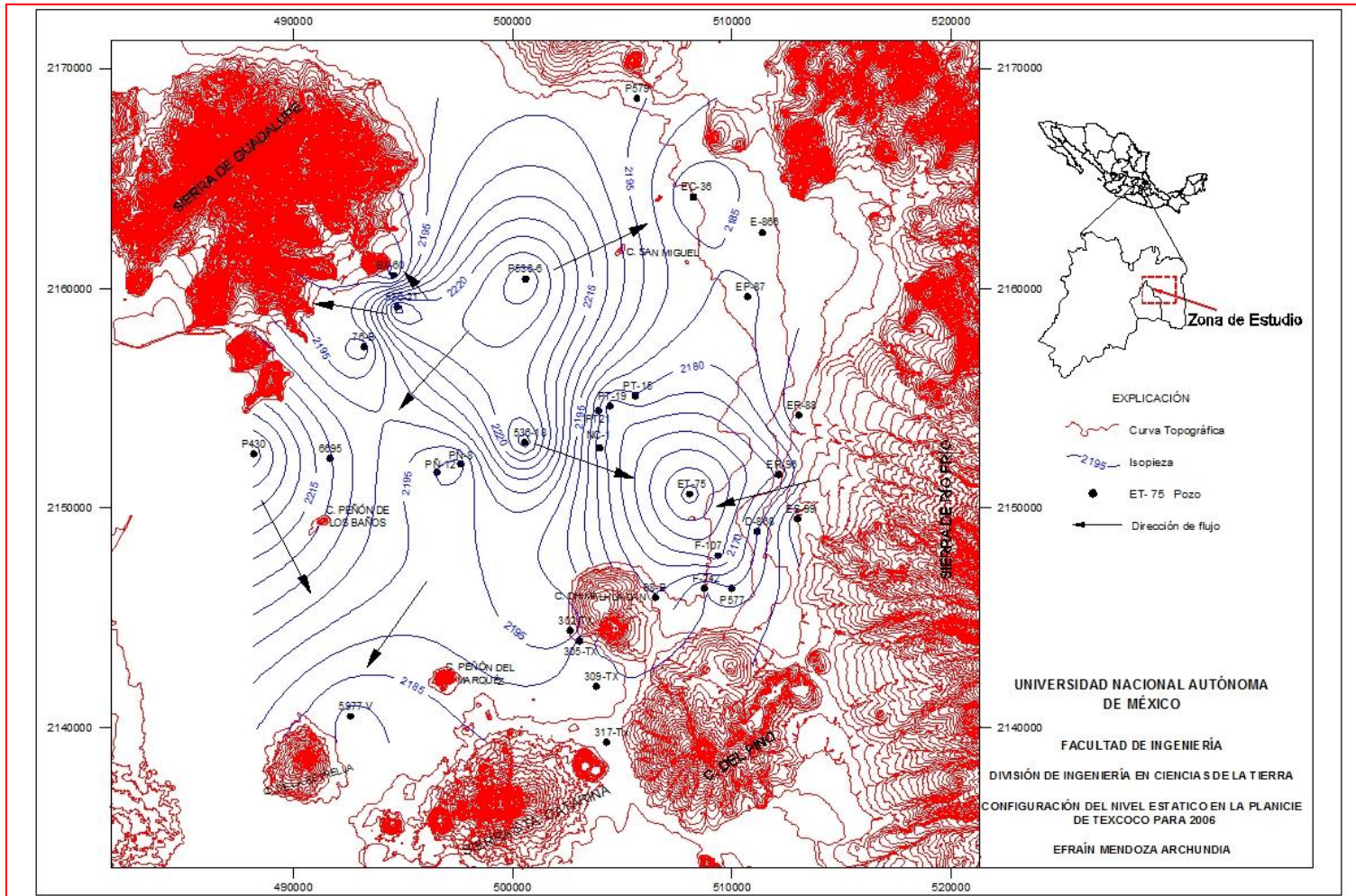


Figura 37. Configuración del nivel estatico para el año 2006.

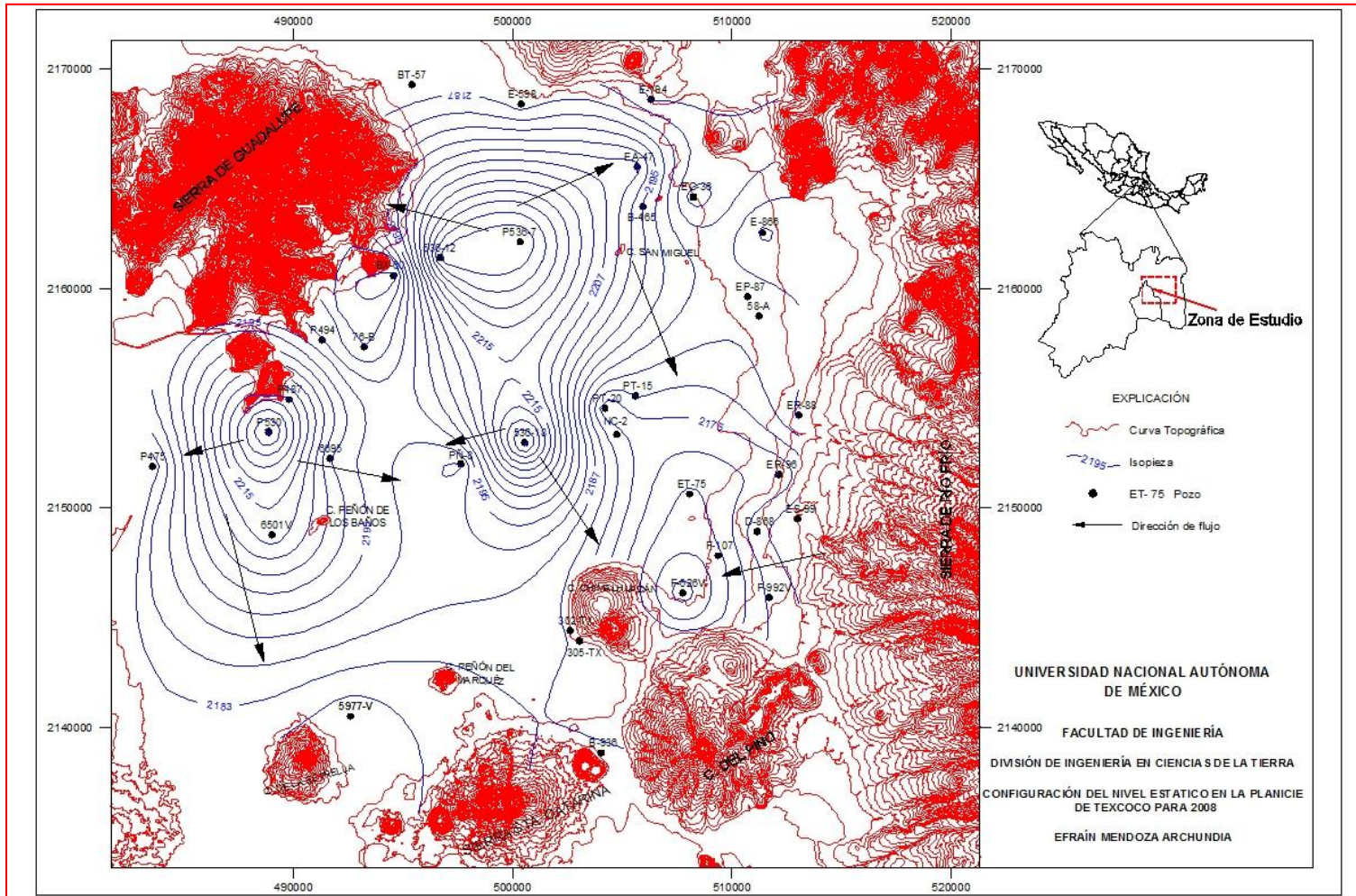


Figura 38. Configuración del nivel estatico para el año 2008.

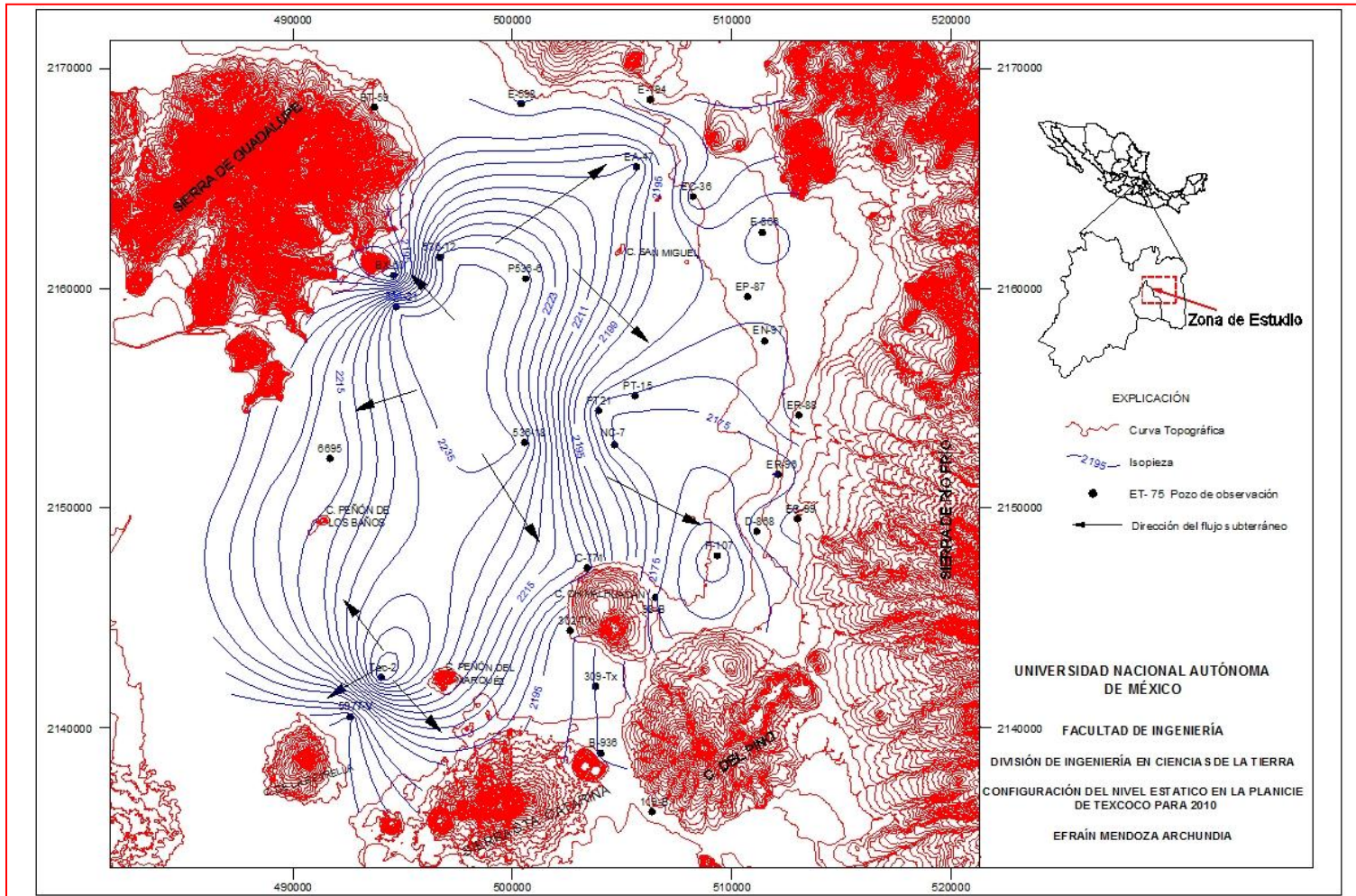


Figura 39. Configuración del nivel estatico para el año 2010.

6 HIDROGEOQUÍMICA

6.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La composición química y bacteriológica del agua extraída del acuífero, se determina mediante análisis cuantitativo de los diferentes iones que contienen y por análisis microbiológicos. Los análisis a realizar son los siguientes:

Los análisis a realizar son:

- Análisis Físicos
- Análisis Químicos
- Análisis Biológicos y Microbiológicos

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA

Son aquellas que le dan ciertos aspectos al agua y pueden ser medibles. Los parámetros físicos son; Turbiedad, Color, Olor, Sólidos en suspensión y flotantes, Conductividad eléctrica, Temperatura.

TURBIDEZ

Es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, como arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida (Davis and de Wiest 1971).

La turbidez es de gran importancia para el abastecimiento público ya que de acuerdo con (www.arturobola.tripod.com/turbi.htm) causa los siguientes inconvenientes: a) Estética: inmediatamente el consumidor manifiesta su rechazo a consumirla, y a utilizarla para el lavado de sus alimentos si ésta muestra un estado poco deseable. b) Filtrabilidad: Éste proceso se volverá cada vez más difícil en cuanto mayor sea su turbidez por lo tanto su costo a limpiarla aumentaría debido a la materia suspendida en el agua. c) Desinfección: La presencia de materia orgánica y de microorganismos aumenta el grado de turbiedad del agua por esto, el uso de cloro u ozono para desinfectarla será en mayor.

COLOR

Color es la capacidad del agua para absorber ciertas radiaciones del espectro visible. El color natural del agua existe debido al efecto de partículas coloidales cargadas negativamente. En general, el agua presenta colores inducidos por materiales orgánicos del suelo, ejemplo el color amarillento debido a los ácidos húmicos. La presencia de hierro puede darle un color rojizo entre otros (Davis and de Wiest 1971).

El color en el agua puede o no estar asociado a las sustancias en solución contenidas en él al cual le llamaremos color verdadero; por otro lado si está asociado a sustancias en suspensión y solución, incluyendo la turbidez se refiere al color aparente.

SOLIDOS

El término sólidos se hace énfasis a aquel compuesto suspendido o disuelto en un medio acuoso.

La determinación de los sólidos disueltos totales mide el total de partículas sólidas filtrables (sales y residuos orgánicos) a través de una membrana de 2 micrómetros o menos. Las aguas con un alto contenido de sólidos suelen ser tanto de mal agrado al paladar como muy dañinas a la salud por lo que establecen límites tal y como lo marca la NOM-127 en México.

OLOR Y SABOR

Estos parámetros son determinaciones organolépticas y subjetivas, para dichas observaciones no existen instrumentos de observación, ni registros, ni unidades de medida. Tienen un interés evidente en el agua potable para consumo humano. El agua adquiere un sabor salado a partir de 300 ppm de Cl^- y un gusto salado y amargo con más de 450 ppm de SO_4^{2-} ; el CO_2 libre en el agua le da un gusto "picante". Trazas de fenoles u otros compuestos le confiere un olor y sabor desagradable.

Lo que más caracteriza a estas propiedades son la presencia de materia orgánica en solución, el ácido sulfhídrico, el cloruro de sodio, sulfatos de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles y aceites, productos del cloro y diferentes especies de algas. Siendo todos estos con un olor más fuerte en cuanto más alta es la temperatura en la zona.

Su origen comúnmente se deriva de los óxidos de Hierro, Zinc, Coloides y Sólidos suspendidos en su gran mayoría provienen de las arcillas de los suelos que conforman los lechos de los ríos. Los principales tipos de arcillas encontrados en la naturaleza son: Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ó $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Montmorilonita (bentonita) $((\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$, illita $((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})])$ y moscovita $(\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$.

TEMPERATURA

La temperatura del agua subterránea depende principalmente del gradiente geotérmico de la Tierra, el cual es de 1°C por cada 33 m de profundidad, es decir a mayor profundidad mayor es la temperatura. Mientras más superficial fluye el agua, su temperatura tendrá correspondencia con la temperatura ambiente. Otro factor que influye en la temperatura del agua subterránea son algunas reacciones químicas que suceden en el interior del acuífero. Por otro lado los cuerpos ígneos activos debajo de la superficie influyen en el aumento de la temperatura del agua generando algunos puntos geotérmicos utilizados comúnmente para la generación de energía. Por todo lo anterior, el agua que fluye desde una profundidad disminuirá su temperatura conforme asciende.

La temperatura actúa primordialmente en los procesos biológicos, la precipitación de compuestos, absorción del oxígeno así como en el cambio de la viscosidad, determinando así la movilidad del agua en el medio.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. El agua es un buen conductor de electricidad, pero depende su eficiencia de acuerdo al tipo de iones y cantidad que tenga así como de su temperatura. Se estima que a cada aumento de 1°C aumentará un 2% su conductividad eléctrica. Es una medida de los sólidos disueltos contenidos en el agua, debido a que cualquier cambio en su cantidad, en la movilidad de sus iones o en su valencia, implicara un cambio de conductividad, por ello el valor de éste parámetro es muy usado en análisis estimativos de la cantidad de sólidos disueltos (Londoño Carvajal,2005).

PROPIEDADES QUÍMICAS DEL AGUA

Entre los múltiples parámetros químicos que se pueden determinar en el agua son: pH, dureza total, contenido de sulfatos, cloruros, Hierro, fosfatos, Manganeso, Amonio, alcalinidad, agentes oxidantes, Arsénico, Bario, Boro, Cadmio, Cromo, cianuros, fluoruros, Mercurio, nitratos, pesticidas, Plata, Plomo, Zinc, y otros elementos y sustancias que pueden estar contenidas en el agua y por tanto alteran a la misma.

pH

Es una manera de expresar la concentración de los iones de hidrogeno H⁺, y permite medir o indicar la acidez o alcalinidad del agua. La escala va del 0 al 14, siendo de 0 a 6.5 un agua acida, es decir el agua posee más protones en la solución y cuando el valores mayor a 7.5, es un agua de pH básico.

El valor de éste parámetro pH es un factor muy importante para que las diversas reacciones químicas que determinan la composición del agua subterránea se lleven a cabo ya que de él depende que se realicen diversos procesos químicos y varíe la calidad del agua.

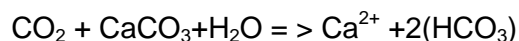
ACIDEZ

La acidez del agua es causado principalmente por el CO₂, pero además puede formarse por ácidos minerales como el H₂S o por la presencia de en el agua de sales fuertes provenientes de bases débiles. Su medición tiene por objeto cuantificar las sustancias ácidas contenidas en el agua, ya que estas como ya se menciono interfieren en la capacidad de reacción de algunas sustancias (www.gemini.udistrital.edu.co).

La acidez del agua puede estar asociada a la presencia de ácidos débiles como el dióxido de carbono o a la de ácidos fuertes como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico, o la presencia de sales fuertes que provienen de bases débiles, tales como el amonio (NH₄⁺), hierro III (Fe³⁺) y Aluminio III (Al³⁺) (www.gemini.udistrital.edu.co).

ALCALINIDAD

El término indica la capacidad de neutralizar los iones H^+ y se debe principalmente a las sales de los ácidos débiles, tales como los carbonatos y bicarbonatos que son los que contribuyen principalmente a la alcalinidad por que se forman en cantidades considerables por la acidez del CO_2 sobre la materia ácida del suelo (Londoño Carvajal. 2005):



Otras sales tales como los boratos, silicatos y fosfatos son formadores, así como algunos otros ácidos orgánicos que son lo relativamente resistentes a la acción biológica como es el caso del ácido húmico que son capaces de generar sales que se adicionan a la alcalinidad (Londoño Carvajal. 2005).

DUREZA

Se define como las concentraciones de calcio y magnesio expresadas ambas en mg/L de carbonato de calcio. Para calcular la dureza a partir de las concentraciones de calcio y magnesio, se deberá convertir estas concentraciones a miliequivalentes por litro (meq/L).

El valor de la dureza puede variar según la zona y el uso específico que se le de al agua, de acuerdo con Custodio y Llamas (1976), la clasificación de la dureza es de la siguiente manera, considerando que es de acuerdo al contenido de $CaCO_3$:

- Blanda: 0 – 60 mg/L $CaCO_3$
- Algo Dura: 61 – 120 mg/L $CaCO_3$
- Dura: 121 – 250 mg/L $CaCO_3$
- Muy Dura: > 250 mg/L $CaCO_3$

6.2 PRINCIPALES CONSTITUYENTES QUÍMICOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

Los compuestos principales o mayores son los siguientes:

ANIONES

- Anhídrido Carbónico (CO_2), Bicarbonato (HCO_3^-) y Carbonatos ($CO_3^{=}$)

El anhídrido carbónico, desde el punto de vista hidroggeoquímico tiene gran relevancia dado que éste se disuelve en el agua en función de su presión parcial. Una parte reacciona con el agua formando ácido carbónico (H_2CO_3), que posteriormente se disocia creando iones de bicarbonato y carbonato. Por otro lado el resto del compuesto se mantiene en forma de gas.

El CO_2 proviene de la zona edáfica, y es producto de la respiración de los organismos, así como de la materia en descomposición, la disolución de las calizas y dolomías son fuente principal de éste compuesto.

El ion bicarbonato se encuentra en mayor concentración cuando el pH es inferior a 8.3, variando entre los 50 y 500 mg/L y llega a alcanzar valores mayores cuando la concentración de Ca, Mg y/o sulfatos es menor (www.agua.uji.es).

- Ion Cloruro (Cl^-)

Con excepción de las evaporitas y rocas marinas, las rocas poseen una escasa concentración de éste ion, sin embargo, sus sales suelen pasar muy pronto a una fase acuosa, logrando alcanzar concentraciones muy altas, por lo que, son muy difíciles de eliminar del agua por procesos naturales de intercambio iónico, adsorción, actividad biológica, etc. Por tal motivo, es considerado comúnmente como un trazador casi ideal.

En un ambiente en donde el agua suele ser considerada como salmuera, próxima a la saturación de NaCl, la concentración de éste elemento tiende a tomar valores muy altos; su volumen se determina con cromatografía iónica (www.agua.uji.es).

- Ion Sulfato (SO_4)

Éste ion se encuentra en prácticamente toda el agua natural (Londoño Carvajal, 2005). La mayor parte de los compuestos sulfatados son producto de la erosión de las rocas marinas, además, de la oxidación de los sulfuros encontrados en rocas volcánicas y sedimentarias, sobre todo la presencia de yeso y anhidrita, así como esquistos, le dan un mayor aporte de éste ion al agua, representando su aporte en mayor cantidad al mismo (www.aguas.igme.es).

Cuando el SO_4 está en contacto con bacterias y materia orgánica a procesos de reducción. En ambientes reductores con un pH menor a 7, tiende a formar sulfuro de hidrogeno en forma de gas H_2S , mientras en condiciones alcalinas predomina la formación de HS^- (www.aguas.igme.es, www.lenntech.es).

Su concentración en agua dulce puede variar entre 2 y 150 mg/L; en aguas salinas, asociado al Ca puede llegar hasta 5000 mg/L; si está asociado al Mg y Na, en salmueras puede alcanzar hasta un valor de 200,000 mg/L en ambas asociaciones debido a que son compuestos que son parte de la dureza del agua, esta suele tener un efecto laxativo para el ser humano y para los animales que suelen beber agua de ríos o lagos provocando grandes pérdidas sobre todo a la economía ganadera (Fuente: www.aguas.igme.es).

La mayoría del agua subterránea sulfurosa posee altos contenidos de HS^- o de H_2S o incluso bajos, es posible percibir un olor fétido característico, típico al de huevos podridos.

- Ion Nitrato, Nitrito y Amonio (NO_3^-), (NO_2^-) y (NH_4^+)

Estos compuestos están relacionados al ciclo del nitrógeno, por lo que la mayor parte de estos se presenta en forma de gas en la atmosfera y en su forma oxidada sólo es presente en un valor muy pequeño en los suelos y aún menor en el agua subterránea.

El incremento del valor de estos compuestos en el agua subterránea, se nota cuando existe la presencia de actividades ganaderas y agrícolas alcanzando hasta cientos de

miligramos por litro. En general la concentración de agua potable no alcanza los 10 mg/L siendo los vegetales la fuente principal de la toma de nitratos para los seres humanos (www.agua.igme.es).

CATIONES

- Ion Calcio (Ca^{++})

El calcio es el catión principal como componente en las aguas subterráneas, debido a su alta difusión en las rocas ígneas como constituyente de los silicatos esencialmente en las plagioclasas, sedimentarias en rocas carbonatadas (calcita, aragonita, dolomita yeso o anhidrita) y metamórficas.

El calcio es transportado al agua por disolución cuando proviene de sulfatos como el yeso y silicatos por la acción del CO_2 disuelto cuando se trata de Ca presente en las calizas, margas o dolomías.

La presencia de Ca en el agua, le dota sabor, que dependerá a su vez del anión en mayor proporción, al mismo tiempo intervendrá en la incrustación de éste elemento en las tuberías y depósitos de almacenamiento. La concentración de éste catión varía entre los 10 y 250 mg/L en aguas dulces, mientras en terrenos yesíferos pueden alcanzar concentraciones de hasta 600 mg/L y en salmueras de CaCl_2 hasta 50,000 mg/L (www.agua.uji.es).

- Ion Magnesio (Mg^{++})

Aunque no es tan abundante como el ion de calcio en las aguas naturales, procede de rocas carbonatadas como dolomías y calizas magnesianas, evaporitas y alteración de silicatos ferromagnesianos.

En agua subterránea, la solubilidad de la magnesita (MgCO_3) es mayor que el de la calcita (CaCO_3), lo contrario pasa cuando la magnesita se encuentra en condiciones normales; además entre más contacto tenga éste ion con el oxígeno su reactividad aumenta.

El ion Mg^{++} no suele sobrepasar los 40 mg/L en aguas dulces naturales; sin embargo en condiciones con un alto contenido de Ca, su concentración suele aumentar hasta los 100 mg/L o más y en condiciones evaporíticas los 1,000 mg/L (www.agua.uji.es).

- Ion Sodio (Na^+)

Éste ion es liberado por el intemperismo de minerales como la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), de la disolución de rocas sedimentarias marinas y evaporíticas en el que la sal común (NaCl) tiene gran relevancia.

Las sales de sodio son altamente solubles y suelen permanecer en tal estado ya que no reaccionan con otros iones en su estado precipitado como sucede con el Ca^{++} , sin embargo, puede ser absorbida por las arcillas y producirse un intercambio catiónico por Ca^{++} , provocando una disminución en su dureza, aunque tiende a impermeabilizar los suelos si la presencia de sodio es muy elevada.

Su concentración raramente alcanza los 100 mg/L en aguas naturales dulces, pero en condiciones hipercalcáreas o magnesianas suelen poder llegar hasta los 100,000 mg/L (www.agua.uji.es).

- Ion Potasio y Sílice (K^+ y SiO_2)

Son dos iones que se encuentran en menor concentración, el ion potasio es producido por la meteorización de los feldspatos principalmente la silvina KCl o la Carnalita $KClMgCl_2$; éste ion tiende a ser fijado por adsorción en las arcillas, mientras el sodio es producido por la hidrólisis de los mismos y algunos silicatos.

Sus valores en concentración en aguas subterráneas no suelen rebasar los 10 mg/L, sin embargo la media en el ion sodio oscila entre los 17 y 25 mg/L, si esto llegara a pasar con el ion potasio se puede indicar que es un agua contaminada principalmente por vertidos industriales (www.agua.uji.es).

IONES MENORES

- Ion Hierro (Fe)

La concentración de éste, depende por los procesos de equilibrio químico como oxidación – reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros (de aguas.igme.es); sus óxidos abundan en la naturaleza en forma de minerales y como parte fundamental en la composición de las arcillas y limos (Londoño Carvajal, 2005).

El hierro III punta-hidratado puede presentar un alto peligro al medio ambiente (Fuente: www.lenntech.es). Sus valores pueden ser comunes entre 1 y 10 mg/L, aunque en agua con un pH entre 6 y 8 puede alcanzar valores de hasta 50 mg/L; sin embargo, cuando la presencia de bicarbonatos se encuentran por debajo de los 61 mg/L, lo más normal, es que la concentración de éste ion se mantenga en concentraciones menores a 0.1 mg/L (www.aguas.igme.es).

- Ion Manganeso (Mn)

De igual manera que el ion Hierro, sus óxidos minerales forman parte de las arcillas y limos (Londoño Carvajal, 2005).

Éste elemento es fundamental para el metabolismo de las plantas (de agua.igme.es). La concentración de éste ion en comparación con el ion Hierro siempre se encuentra por lo general por debajo de éste.

Cuando se encuentra en contacto el metal sólido con el agua su reacción es lenta, sin embargo cuando se encuentra en forma de polvo su reacción es muy rápida y en algunos casos muy vigorosamente (Fuente: www.lenntech.es). Éste ion es un compuesto muy común en la naturaleza y es considerado como uno de los tres elementos trazas tóxicas esenciales.

POLÍGONOS DE STIFF

En los **Diagramas de Stiff** o Polígonos de Stiff se representan la concentración de aniones (hacia la derecha) y cationes (hacia la izquierda) en semirrectas paralelas, uniendo los extremos generando un polígono. Tomando en cuenta que, sobre cada semirrecta se toma un solo ión (Figura 40).

La forma de las figuras resultantes da idea del tipo de agua, se presta a comparaciones, y resulta fácilmente demostrativa al insertarlas en mapas hidroquímicos. El valor de concentración se expresa en miliequivalentes por litro (meq/l).

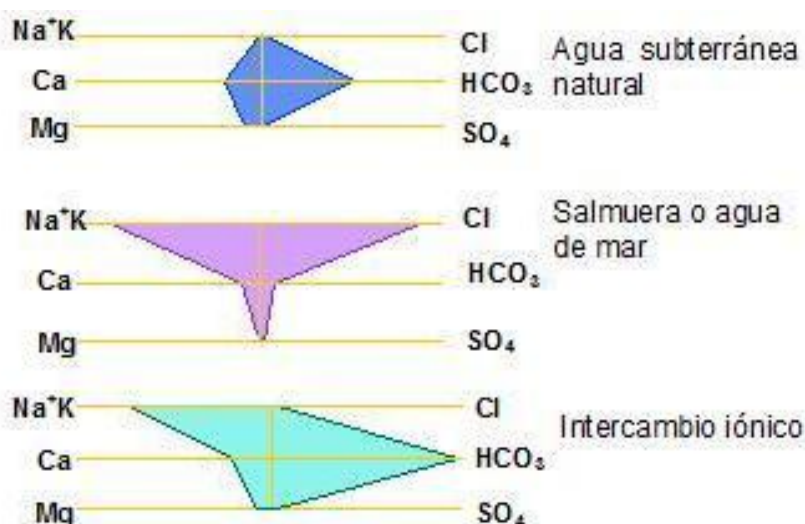


Figura 40. Esquemas comunes de los diagramas o polígonos de Stiff.

6.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

Comúnmente se ha considerado que la composición química del agua del agua se mantiene constante en el tiempo de extracción en un pozo, y por ende su calidad no presenta cambios; esto supone que el agua se desplaza dentro del sistema acuífero de manera radial, uniforme y horizontal a un valor de conductividad relativamente bajo a través de los años.

La calidad del agua en diversos puntos de muestreo difiere a la anterior afirmación debido a la profundidad que tiene el pozo, por lo que se puede afirmar la presencia de diversos acuíferos para poder explicar de manera separa cada sitio de muestreo.

La operación de un pozo se basa sobre todo en la interpretación de parámetros hidráulicos, es decir en la medición de los caudales de extracción y de los niveles de abatimiento asociados al mismo (prueba de aforo), la calidad del agua no es considerada como tal para poder considerar el caudal máximo de extracción.

Para todo ello, se requiere un conocimiento previo sobre el acuífero y de las interacciones desde el punto de vista agua-medio, de esta manera se trataran de aplicar las metodologías más precisas de muestreo, procesamiento y análisis de los datos para un mejor análisis del sistema acuífero y poder entender desde un punto de vista químico, cual es el origen de las fuentes contaminantes, su descarga, así como sus concentraciones en espacio y tiempo.

Cuando se toman muestras de agua y se tienen los resultados del mismo, por obligación se deben comparar con la Norma Oficial Mexicana (NOM), que en el caso de México es la NOM 127 de la Secretaria de Salud, considerando de esta manera el posible uso futuro que tendrá éste recurso. Al final de las pruebas de aforo se sugieren tomas de muestras físicas y químicas, lo cual no siempre sucede así, ya que los valores de temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox representan las condiciones naturales del agua en el sistema acuífero.

De acuerdo a la calidad se pueden tomar dos vertientes: 1) Si la calidad química del agua es buena, se planean acciones inmediatas para su uso, considerando que sus características van a cambiar a través del tiempo (empeora); 2) Si la calidad es mala, de acuerdo a su futuro aprovechamiento se tomaran en cuenta diversos métodos de tratamiento.

Cuando se realizan los análisis de los datos de la calidad del agua, en el orden de días o mes, las variaciones de los resultados se pueden considerar nulos, por otro lado si se realizan en el orden de años las variaciones suelen ser más notorios y aun más cuando el rango de tiempo aumenta, de esta manera puede considerarse éste cambio debido a diversos factores tales como la inconsistencia en los protocolos de muestreo o en los análisis de laboratorio, además de la contaminación antrópica generada en zonas urbanas.

VARIACIÓN ESPACIAL DE LA MINERALIZACIÓN QUÍMICA DEL AGUA

De acuerdo con la información sobre los análisis químicos proporcionados por las dependencias u organismos encargados en el control del agua en los municipios y delegaciones, se observa que existe una gran inconsistencia sobre el monitoreo de los pozos a través del tiempo, por éste motivo el análisis no es el adecuado, por tanto solo se eligen pozos que no precisamente son del área del estudio pero que si pueden mostrar una evolución en el tiempo de la mineralización interpolando de manera cualitativa su estado químico.

A lo anterior, sólo se escogen los años más representativos con el fin conocer la evolución de mineralización; de esta manera se han elegido los años 1990, 1994, 1998, 2002, 2006 y 2010 para el periodo de estiaje y la húmedo de acuerdo con la precipitación de la región cada año. Por ello, el realizar diagramas de Stiff mostrara de manera esquemática la composición hidrogeoquímica así como su familia en cada uno de los pozos elegidos.

En las Figuras 41 a la 50 se muestran los mapas correspondientes a la mineralización del agua en tiempo y espacio, sin embargo solo para los años 1990, 1996, 2000, 2003 y 2010 se muestra datos con mayor amplitud espacial por lo que no se podrá realizar un estudio con espacios temporales de cada 4 años debido a la escasez de información. De manera general, para los años 1990 y 1994, no se encuentra información de los pozos cercanos al lago Nabor Carrillo, si no de la porción suroeste del mismo. A partir de 1998 hasta 2010, se cuenta con la información necesaria para poder caracterizar la química del acuífero en los alrededores del lago, información que amplía la evaluación de la calidad del agua que se pretenderá utilizar en el proyecto de recarga, considerando que esta deberá ser de mejor calidad para ayudar al acuífero determinando si éste contiene niveles altos de contaminantes o si se pretende extraer en un futuro una calidad mejor en cuanto a sus niveles de salinidad.

FACIES HIDROGEOQUÍMICAS DEL AGUA

Con base a la información obtenida a través del análisis de los mapas, en los cuales se muestran las composiciones químicas-mineralógicas del agua existente, se pueden determinar las diversas familias hidrogeoquímicas de la misma.

Se caracterizan cinco familias químicas principales de agua en el área de estudio y dos familias que, aunque son de menor área son de gran importancia debido al caudal de agua que se extraen de ellos.

Las familias quedan distribuidas de la siguiente manera:

Familia hidrogeoquímica norte: de composición Ca-Na-Cl (Cálcica Sódico Clorurada), aquí se localiza una alta densidad de pozos de extracción de agua por lo que es una zona en donde se presentan los mayores hundimientos del terreno, generando que el agua extraída de esta zona mantenga altas concentraciones de sales. En esta zona se encuentran las dos subfamilias de agua: 1) Na-Ca-HCO₃ y Na-Ca-Cl, las cuales también presentan altos contenidos en sales.

Familia hidrogeoquímica sur: de carácter Na-Mg-HCO₃ (Sódica magnésica bicarbonatada), es una zona de recarga al zona sur de la cuenca, en donde el alto contenido de sodio es debido a la solución de las andesitas expuestas en altos paquetes de roca, éste fenómeno es causado por la solución principalmente de las plagioclasas encontradas en la andesita y el magnesio o calcio, elementos registrados en menor proporción en la composición química del agua es debido seguramente por la solución de sus piroxenos.

Al éste de la cuenca, la familia hidrogeoquímica Ca-Na-Mg (Cálcica Sódica Magnésica), es una amplia zona de recarga, que presenta un diferente tipo de solución comparada con la familia indicada al sur de la cuenca, siendo en esta una probable mayor disolución en los piroxenos que en las plagioclasas, considerando que los procesos volcánicos son de similar aparición.

Al oeste de la cuenca la familia hidrogeoquímica Na-HCO₃-Cl quizá sea de estas características debido a que los pozos localizados se encuentran a una mayor profundidad por su alto contenido en carbonatos, esto deberá ser comprobado con los diagramas de terminación de los pozos, estudios eléctricos y un monitoreo continuo de los mismos.

Al centro de la cuenca como debe de esperarse, el intercambio de calidad del agua proveniente de los puntos anteriormente mencionados y considerando una capa impermeable asfáltica superior, su calidad en general es del tipo Cálcica Sódica Bicarbonatada (Ca-Na-HCO_3), sin embargo es conveniente realizar el mismo esquema de estudio que en el anterior sitio (facies oeste).

Las dos subfamilias hidrogeoquímicas mencionadas anteriormente se localizan en el ramal Peñón - Texcoco y en los pozos localizados dentro del Lago Nabor Carrillo, estos pozos son de gran importancia debido al alto volumen extraído de agua para el abasto de agua potable en la zona oriente de la cuenca; aunque estas calidades son puntuales y definen características químicas propias mantienen una similitud en su análisis químico. Para los pozos NC-2, NC-5, NC-6 y NC-7, así como para los pozos PT-15 y PT-16 se calidad comprende a las facies Na-Ca-HCO₃; y para los pozos PT-17 y PT-18 facies Na-Ca-Cl.

Esta información servirá para poder determinar la calidad química del agua que se planea utilizar para el proyecto de recarga a realizar; esta calidad además de estar relacionada con la calidad química habida en el subsuelo, está íntimamente ligada a su posterior uso, esto quiere decir que si el agua se planea reutilizar para fines agrícolas, esta tendrá una calidad menor si se compara con la calidad química adecuada para uso urbano.

Las siguientes Graficas (3-12) corresponden a aquellos pozos que, de acuerdo a los resultados de laboratorio pueden considerarse como gráficas guía, debido a que mantienen un patrón constante en sus parámetros físicos y químicos comparados con el resto de los resultados de pozos situados a sus alrededores

VARIACIÓN TEMPORAL DE LA QUÍMICA DEL AGUA

Con base a la información recopilada de algunos pozos, la elaboración de gráficas correspondientes a los iones principales que posee el agua, así como de algunas características físicas es de gran relevancia para tener una mayor comprensión del sistema. Tomando en cuenta que los iones menores, aunque se tienen datos de ellos, no mantienen estabilidad en cuanto a su monitoreo, es decir mantienen los mismos valores; esto puede ser debido a diferentes factores tales como error del muestreo o simplemente de su análisis ya que en muchas ocasiones las determinaciones de ciertos elementos no son capaces de detectarse en las mediciones de laboratorio por ello, estos se encuentran en un valor por debajo de la norma, por lo que solo poner se dispone básicamente utilizar los iones de Fe y Mn, mismos que poseen más variabilidad en sus datos.

Por distribución geográfica y por importancia en el proyecto, los pozos se han dividido en 4 grandes grupos, estos grupos son correspondientes al Lago Nabor Carrillo, al ramal Peñón Texcoco, los pozos Peñón y por último los pozos Purísima-Iztapalapa, Agrícola Oriental e Iztapalapa. Todo esto para identificar aquellos momentos en los cuales el acuífero pudo haberse contaminado o pudo haber disminuido la concentración de alguno de sus elementos, esto es posible al analizar la tendencia de manera grafica de los compuestos y algunas propiedades físicas para definir el comportamiento físico-químico del sistema acuífero (tablas 17-46).

POZOS LAGO NABOR CARRILLO

Se observan dos momentos en los cuales el primero sus valores de Dureza, S.T.D. y C.E. descienden en un periodo comprendido entre el año 2005 y 2007, esto puede ser debido a altos volúmenes de agua almacenada en el acuífero por lo que las concentraciones tienden a descender, por otro lado en el periodo de dos años 2000 – 2001, sus valores aumentan.

Se observan ligeros incrementos entre los años 1999 y 2000 en la concentración del ion cloruro sobretodo en los pozos NC-1, NC-2, NC-4, NC-5 y NC-7 en los otros dos pozos no se observa tal fenómeno pero se puede considerar en términos generales que éste se produjo en todos debido a su escasa distancia de separación entre ellos.

El ion sodio mantiene una sincronía casi paralela al comportamiento del ion cloruro. Se puede pensar que la disminución de concentración de estos iones se debe a grandes periodos de estiaje con ligeras precipitaciones durante el año.

Los iones de carbonato, sulfato y magnesio se comportan de una manera estable, sin embargo, para los iones Ca y Mg existe en los años 1995 – 1996 un aumento en su concentración llegando a alcanzar valores de hasta los 150 -200 mg/L.

El contenido de Fe y Mn a partir de 1990 hasta 1999, en la mayoría de los pozos alcanza valores de concentración en los iones de Fe de hasta 4 mg/L y de Mn de 10 mg/L, sin embargo se observa que los valores decrecen de manera drástica, alcanzando valores menores a 1.

El comportamiento en las graficas de Fe y Mn es similar en todos los demás pozos que a continuación se detallaran, esto puede ser debido a un mal análisis de laboratorio, a la falta de equipo con la capacidad de medición con un rango mayor para la medición, etc.

POZOS PEÑÓN

Los valores d S.T.D. y C.E. incrementan a través del tiempo a razón de 15 a 20 mg/L al año, no obstante la dureza se mantiene en un valor estable (100 mg/L).

El ion Cl y Na en los pozos Peñón 1, 2 y 5 se comportan de la misma manera que los iones previamente mencionados pero estos incrementan su concentración a razón de 3 mg/L al año, pero hay un momento en que las curvas logran mantener un equilibrio alcanzado valores de concentración de 70 – 80 mg/L para el ion Na y de 20 – 35 para el ion Cl.

Si se supone una línea de flujo direccional que va del pozo Peñón 1 al 9, se observa que la concentración de sulfatos aumenta, llegando a alcanzar valores mayores a los 70 mg/L.

Los pozos analizados en éste ramal muestran un aumento en la concentración de iones Fe en casi todos los pozos en un periodo de 3 años (1997 – 2000) sobretodo alcanzando valores poco mayores a 0.1 mg/L y un aumento extraordinario en la concentración del ion Mn para el año 1995.

POZOS PEÑÓN TEXCOCO

El valor de S.T.D. aumenta conforme se avanza de pozo Peñón Texcoco 15 al 21, con valores iniciales de 500 hasta 2,500 mg/L y el mismo efecto pasa con el valor de la dureza.

El ion Cl y Na aumenta a razón de 100 mg/L del mismo modo en que aumento la concentración de los S.T.D., alcanzando valores de hasta 1,200 mg/L como lo muestra el pozo Peñón Texcoco 21 en un periodo de dos años (1995 – 1997), pudiéndose considerar con un dato falso o mal tomado, dado que después de éste periodo su valor se normaliza alcanzando como valor máximo los 800 mg/L de concentración.

El contenido de sulfatos a partir de 1995 se mantiene alrededor de los 70 mg/L, sin embargo su concentración disminuye drásticamente con valores por debajo de los 20 mg/L. Se observar una tendencia en la concentración de Mn, debido que esta disminuye conforme se avanza del pozo Peñón Texcoco 15 al 21.

POZOS IZTAPALAPA, PURÍSIMA IZTAPALAPA Y AGRÍCOLA ORIENTAL

Estos pozos como deberá de esperarse, las concentraciones en sus iones a través del tiempo aumentan, mostrando un mejor monitoreo en cuestión del análisis químico del agua, sin embargo la escasez de datos no ayuda a realizar un análisis a través del tiempo debido a que el comportamiento químico del agua no se observa en los últimos 8 o 10 años.

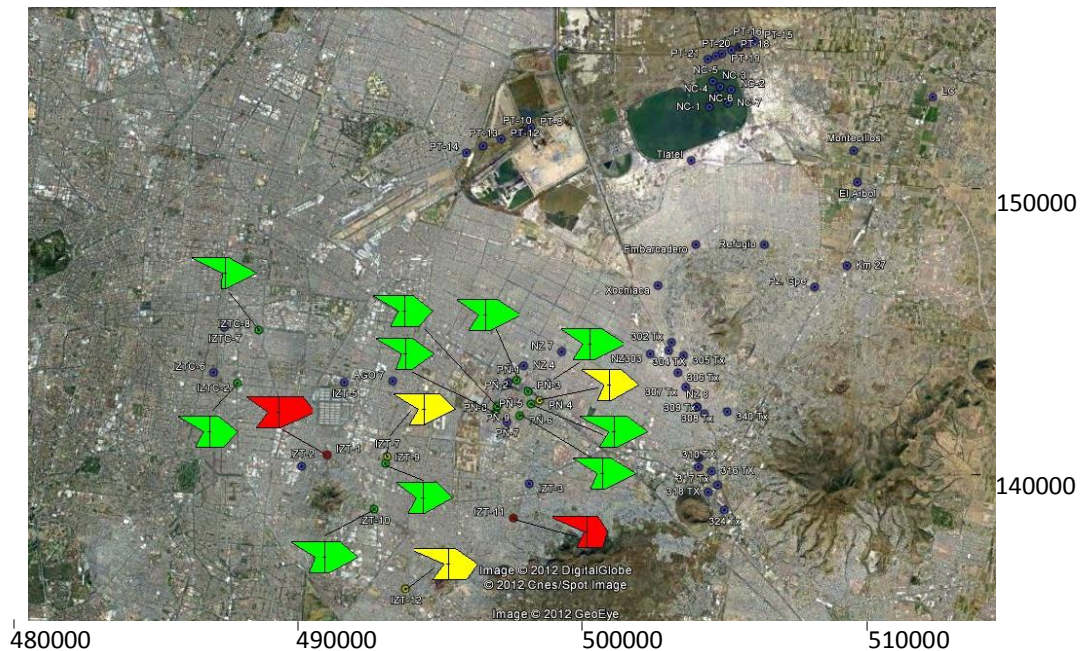


Figura 41. Mineralización del agua para el año 1990 en temporada húmeda.

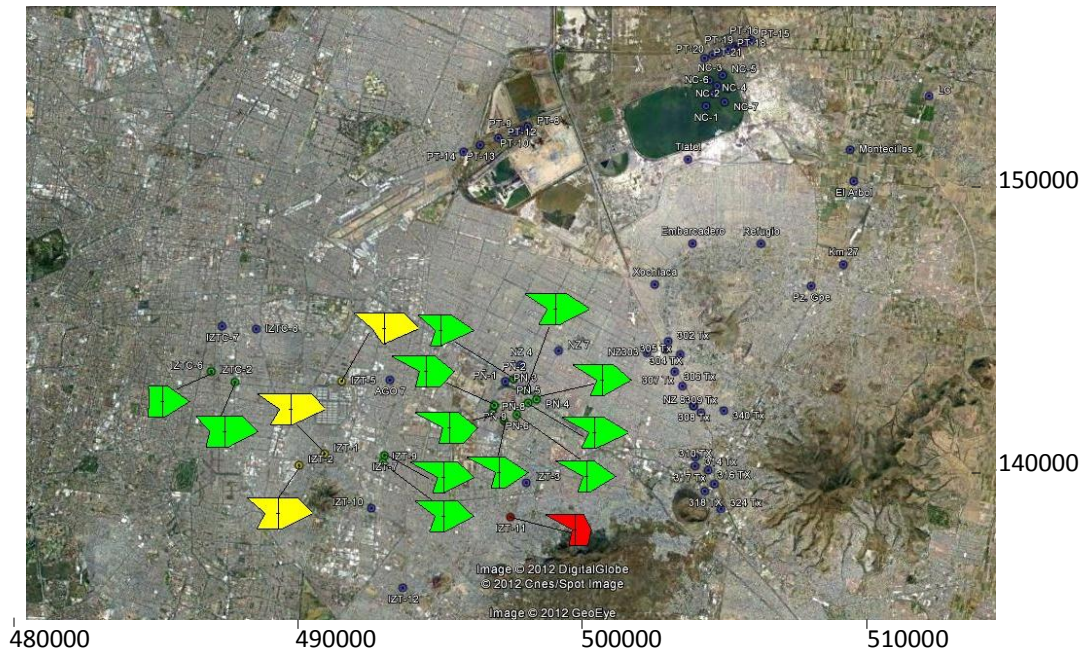


Figura 42. Mineralización del agua para el año 1990 en temporada de estiaje.

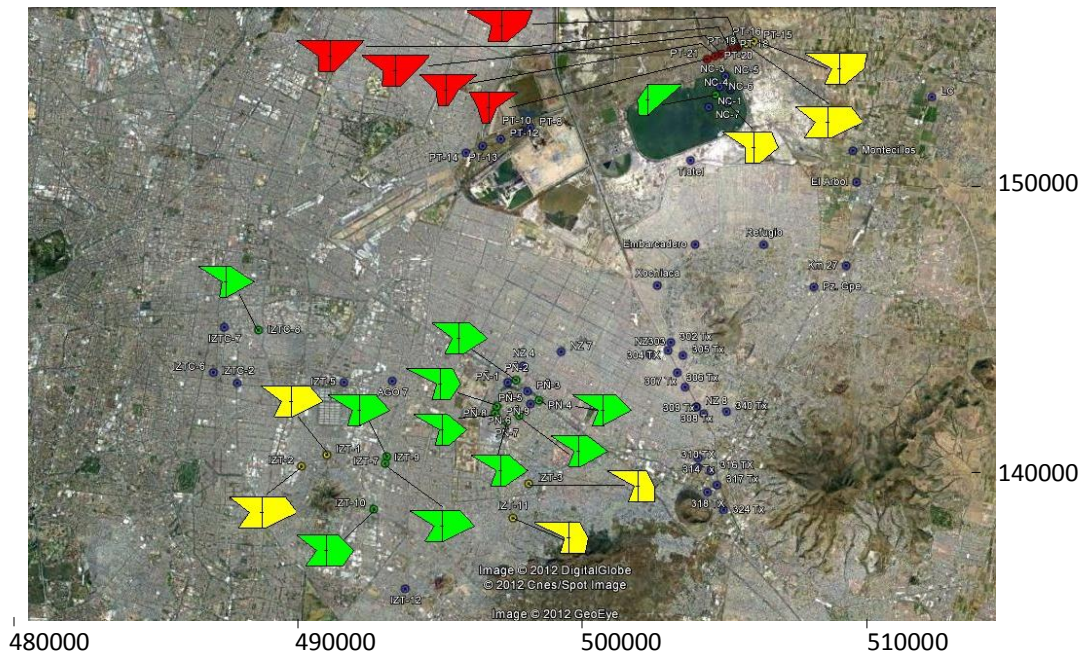


Figura 43. Mineralización del agua para el año 1996 en temporada húmeda.

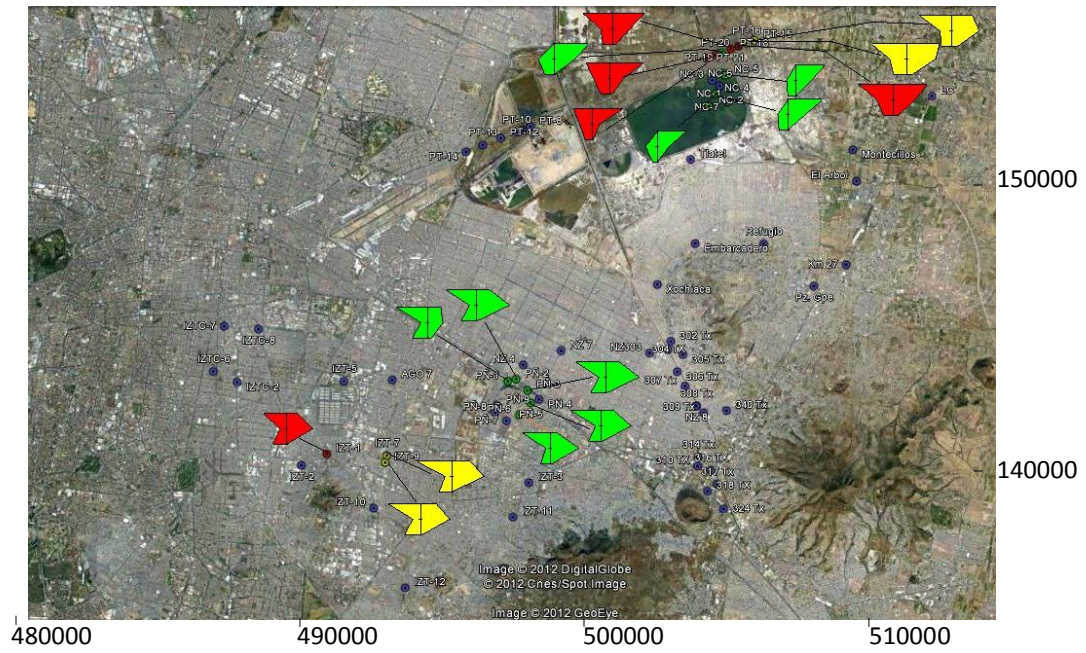


Figura 44. Mineralización del agua para el año 1996 en temporada de estiaje.

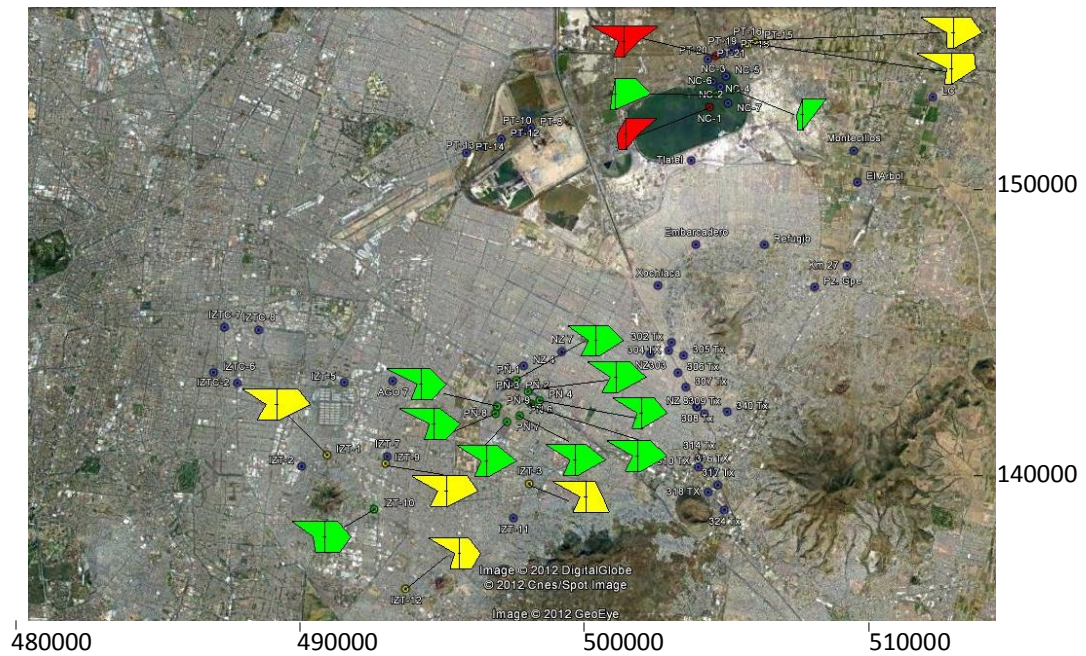


Figura 45. Mineralización del agua para el año 2000 en temporada húmeda.

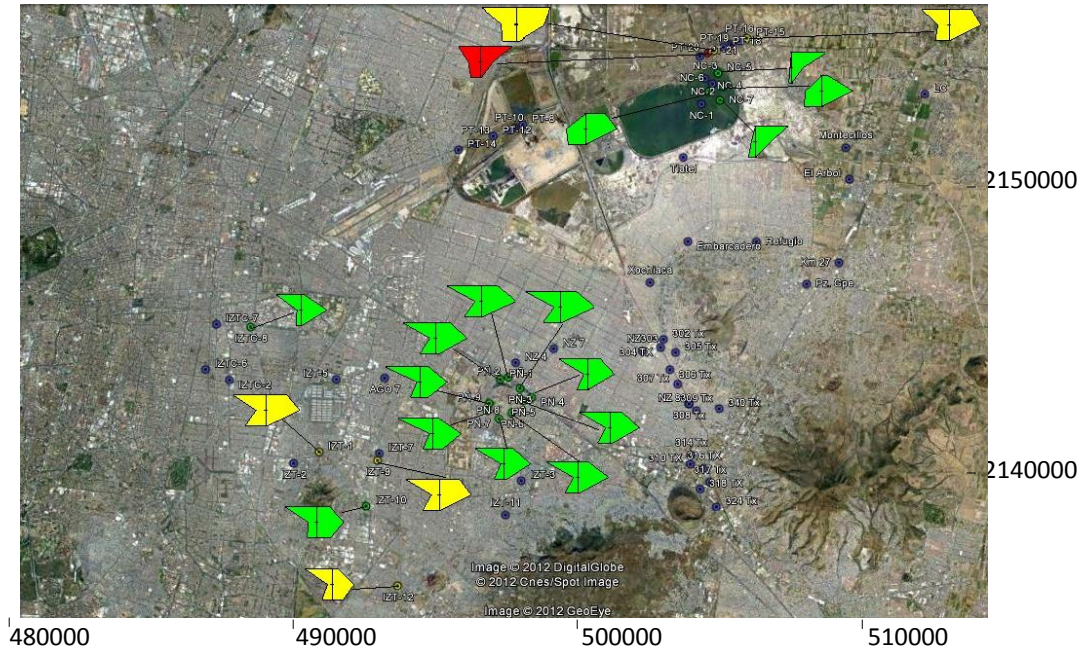


Figura 46. Mineralización del agua para el año 2000 en temporada de estiaje.

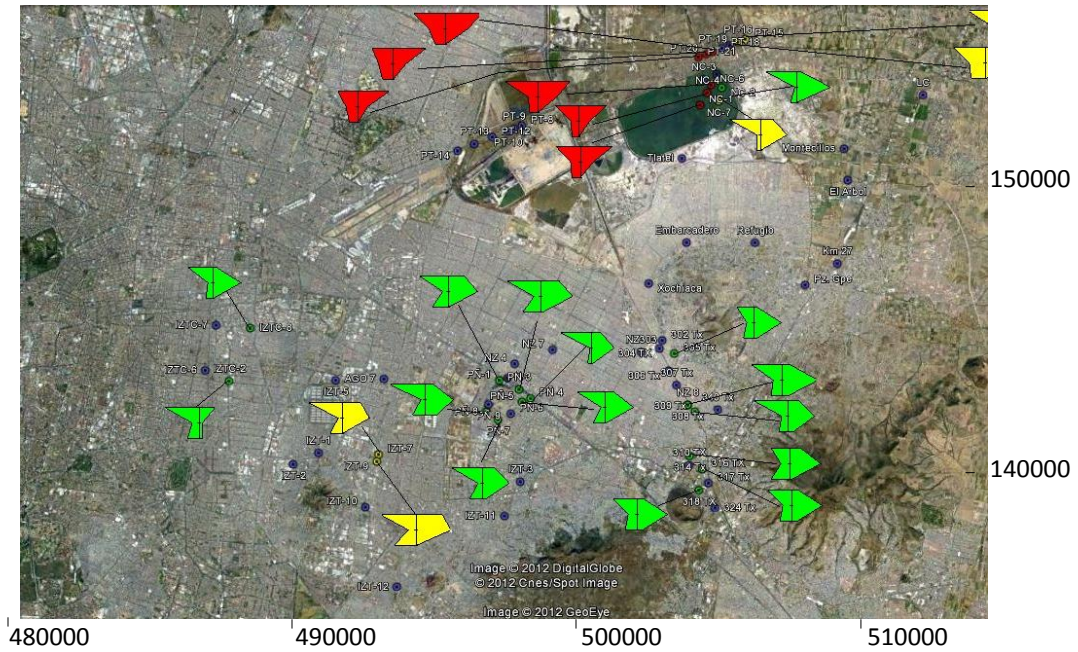


Figura 47. Mineralización del agua para el año 2003 en temporada húmeda.

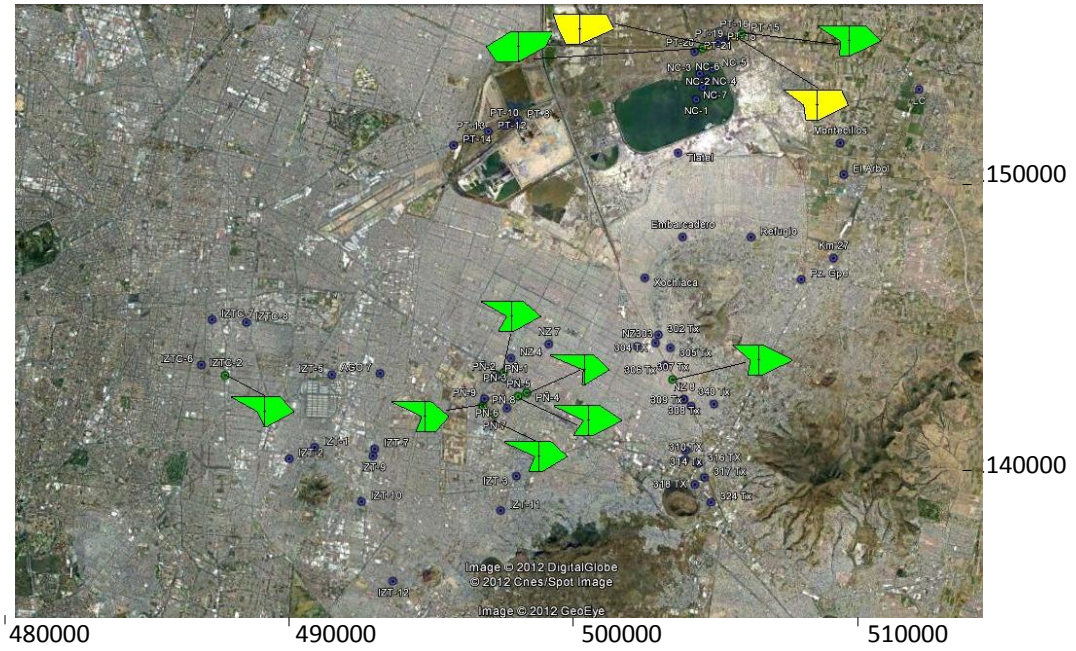


Figura 48. Mineralización del agua para el año 2003 en temporada de estiaje.

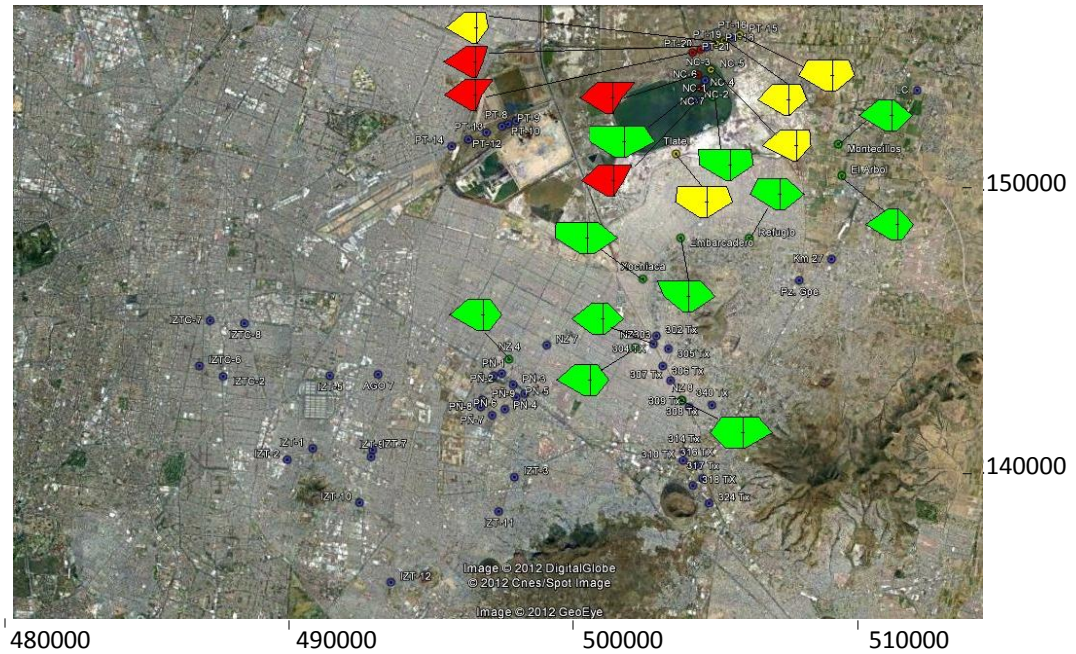


Figura 49. Mineralización del agua para el año 2010 en temporada húmeda.

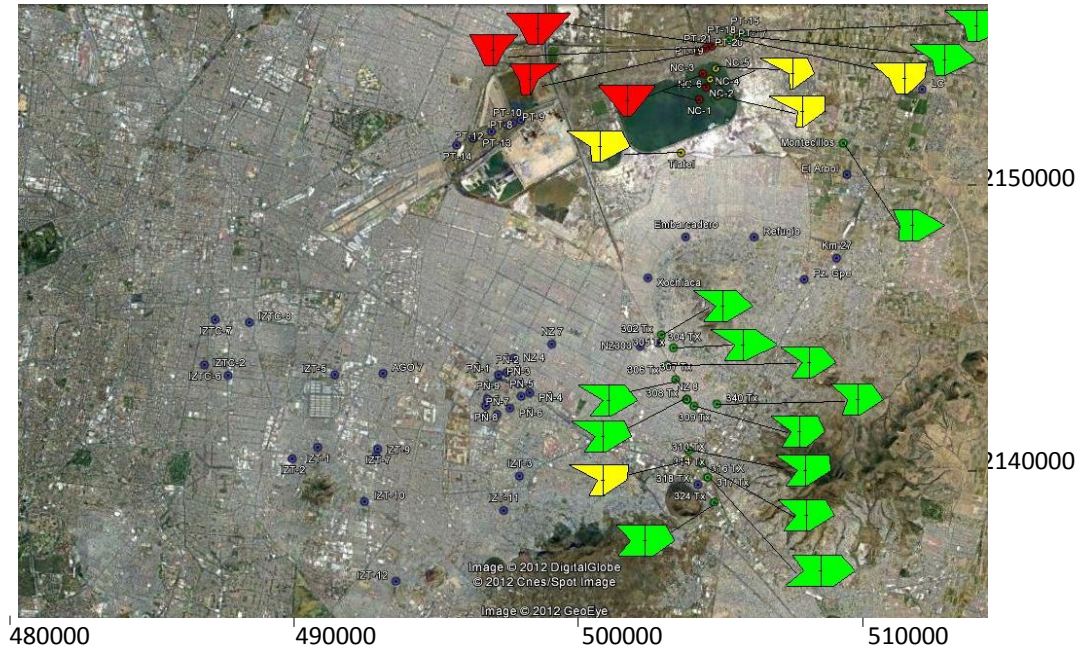
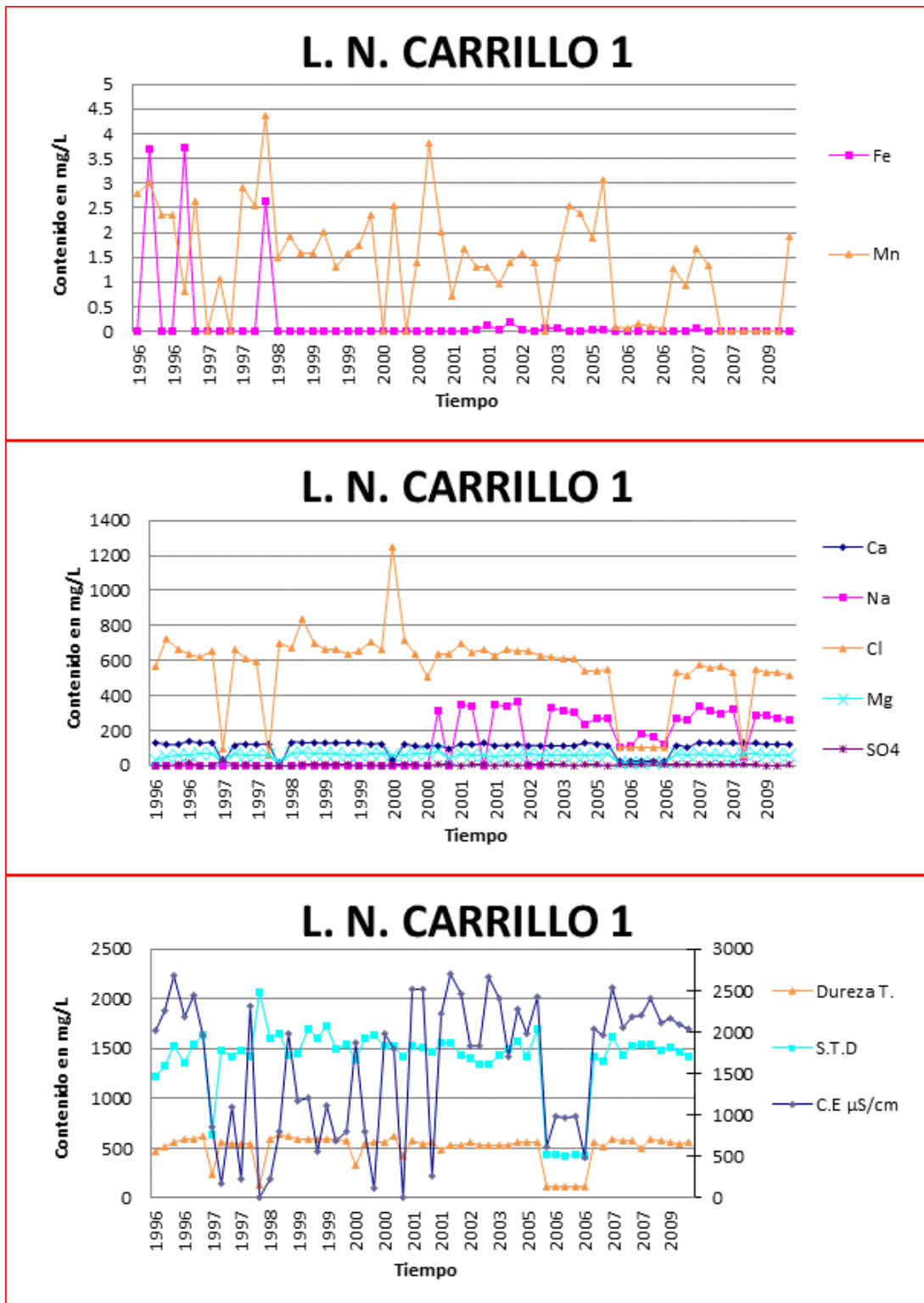
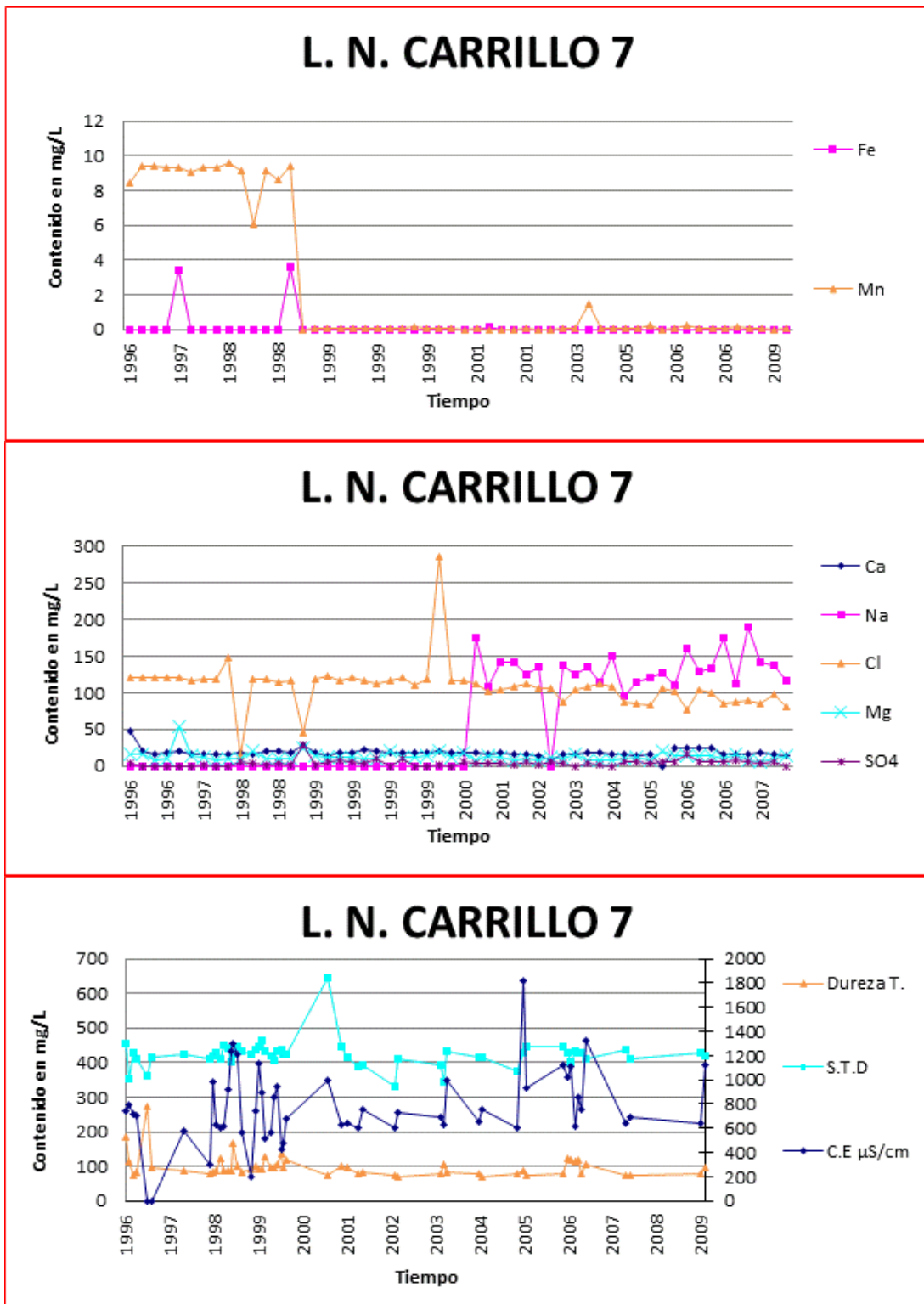


Figura 50. Mineralización del agua para el año 2010 en temporada de estiaje.

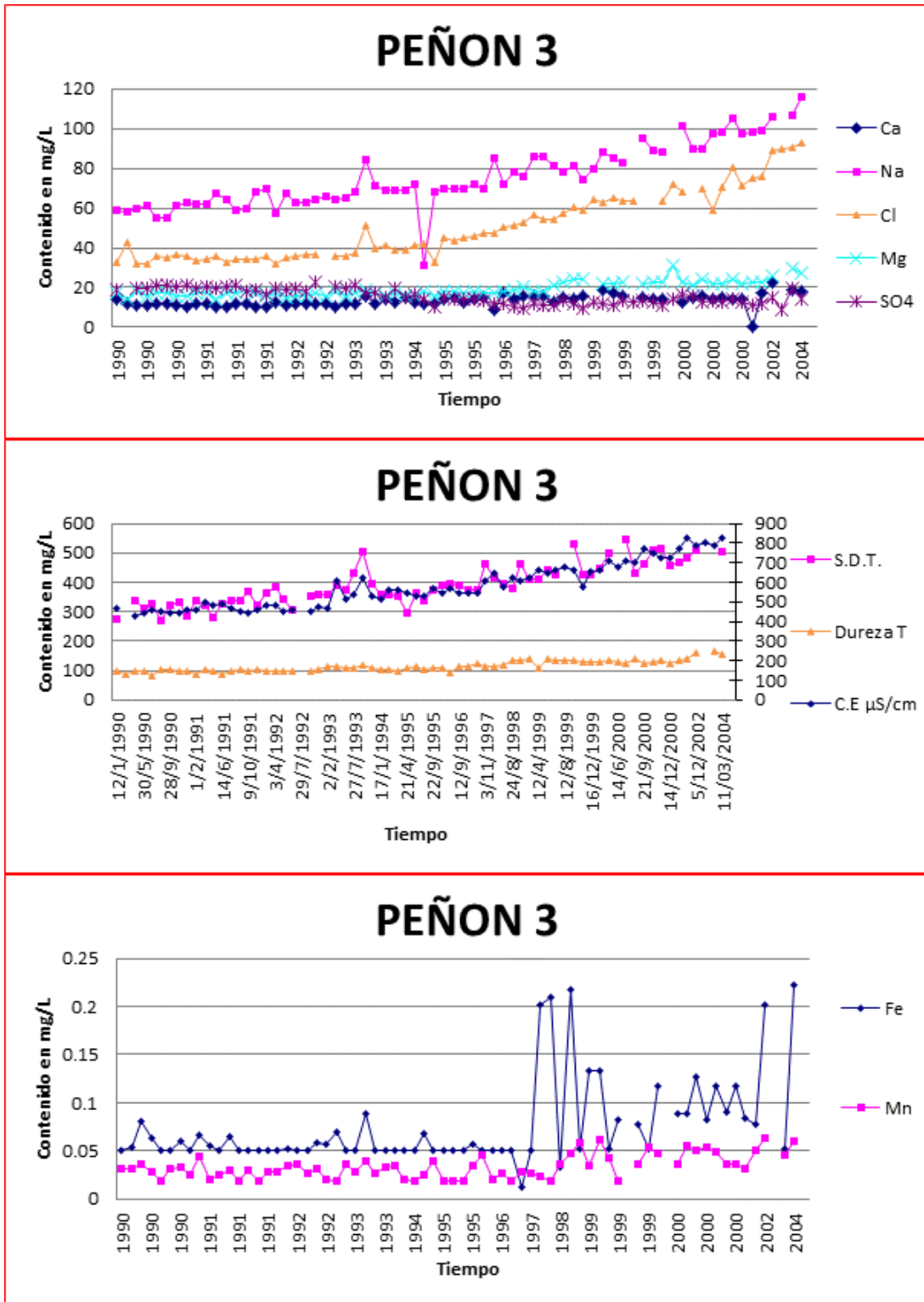
Grafica 3. Información química del pozo L.N.C. 1



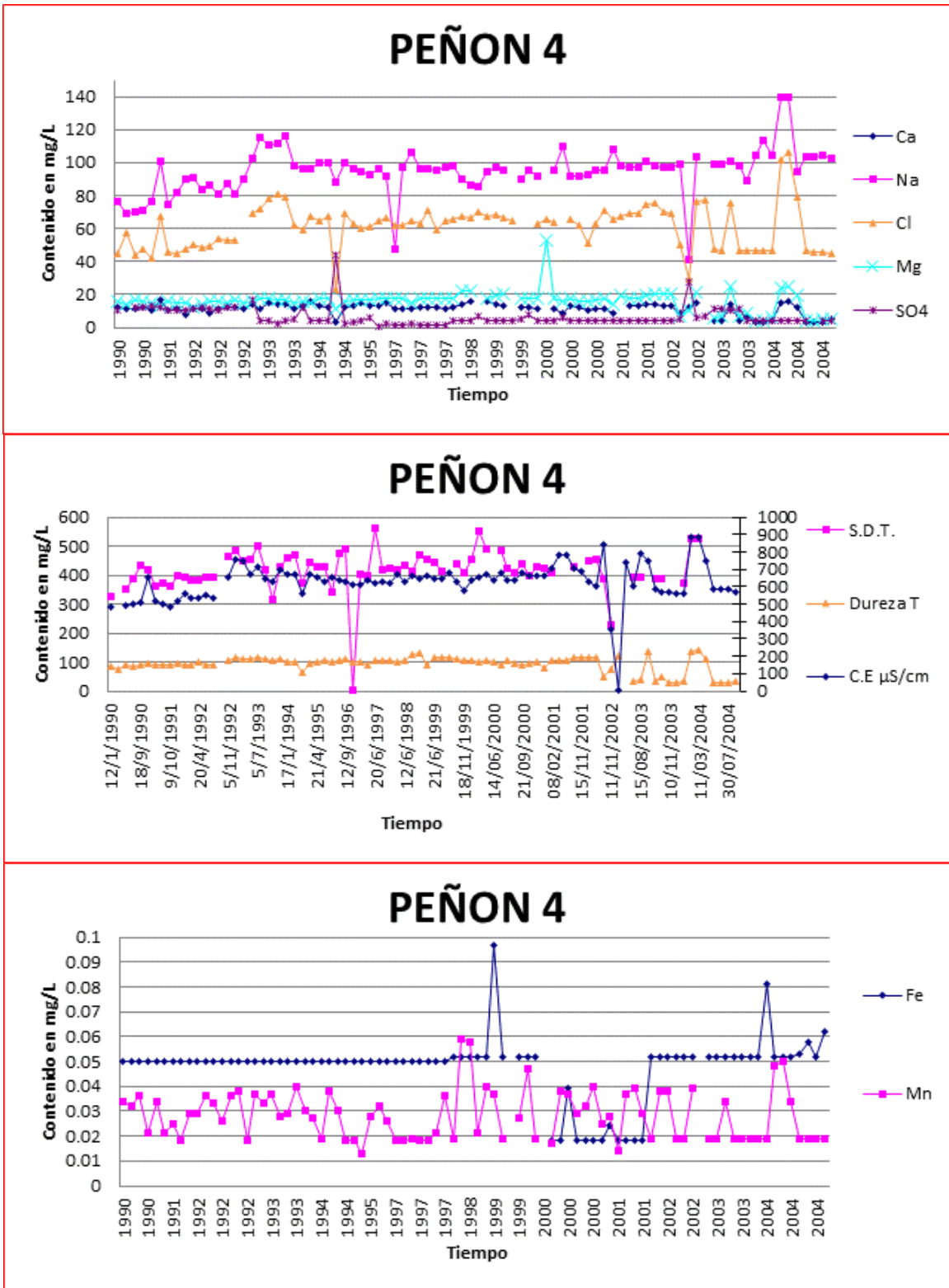
Grafica 4. Información química del pozo L.N.C. 7



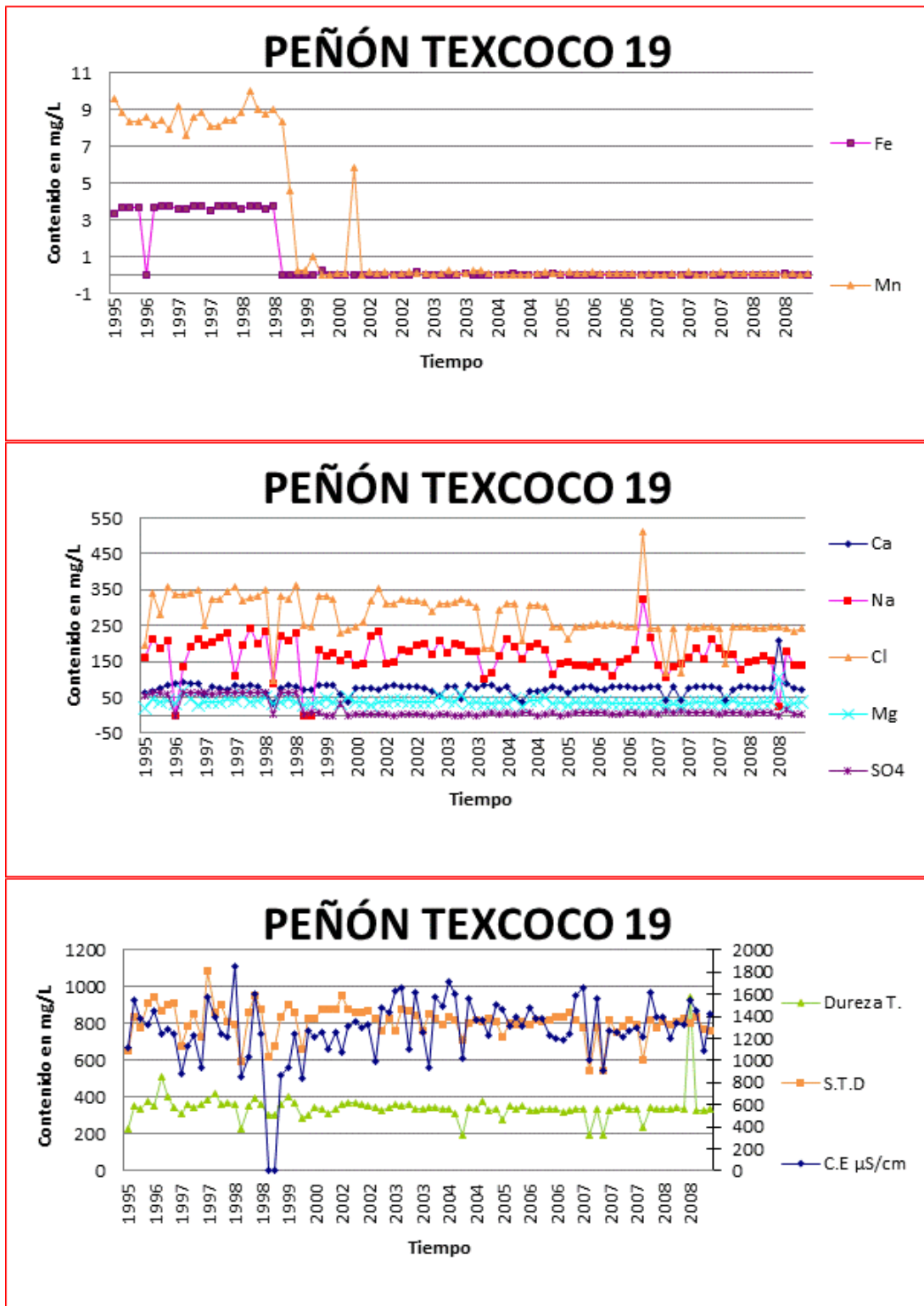
Grafica 5. Información química del pozo PEÑÓN 3.



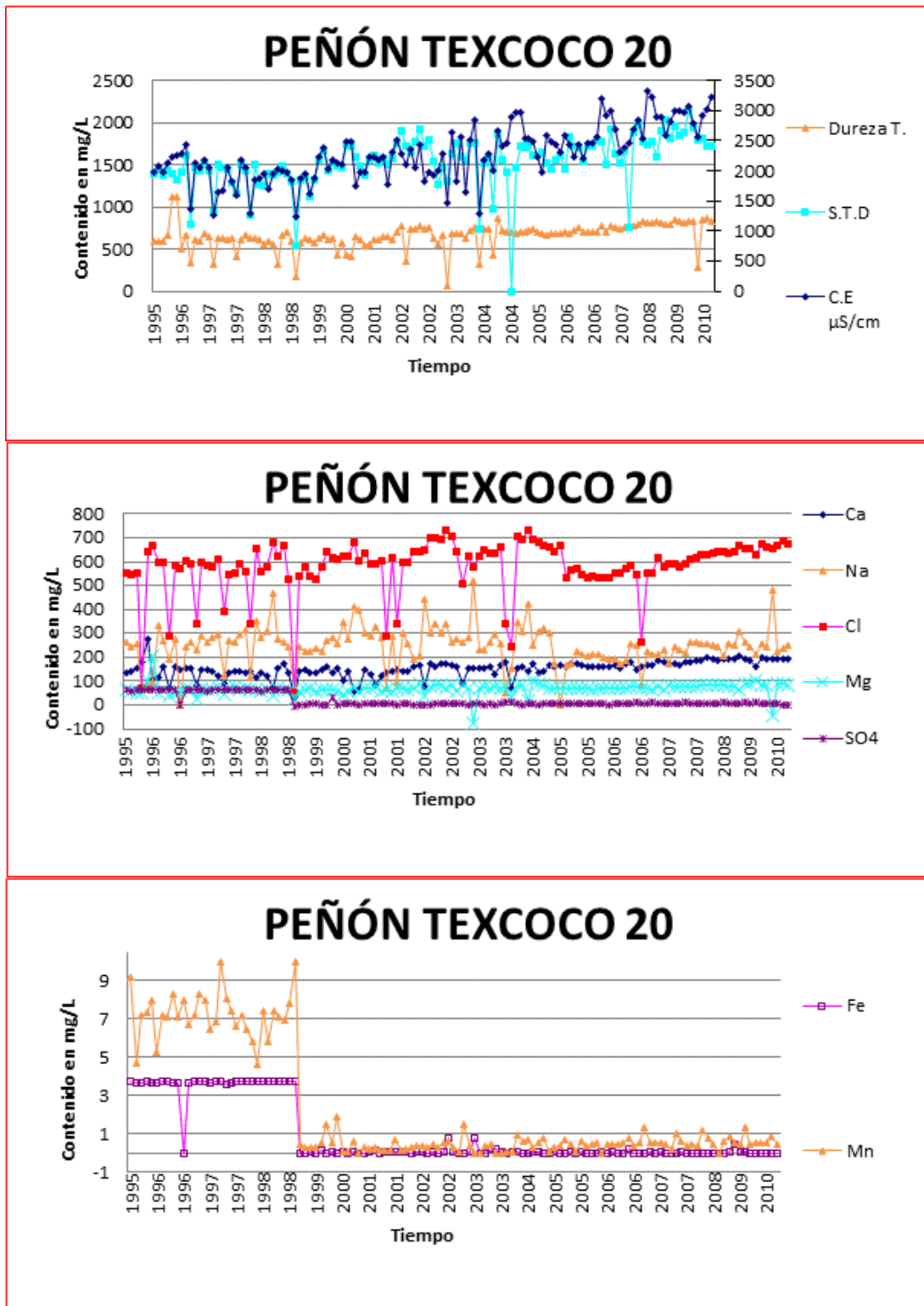
Grafica 6. Información química del pozo PEÑÓN 4.



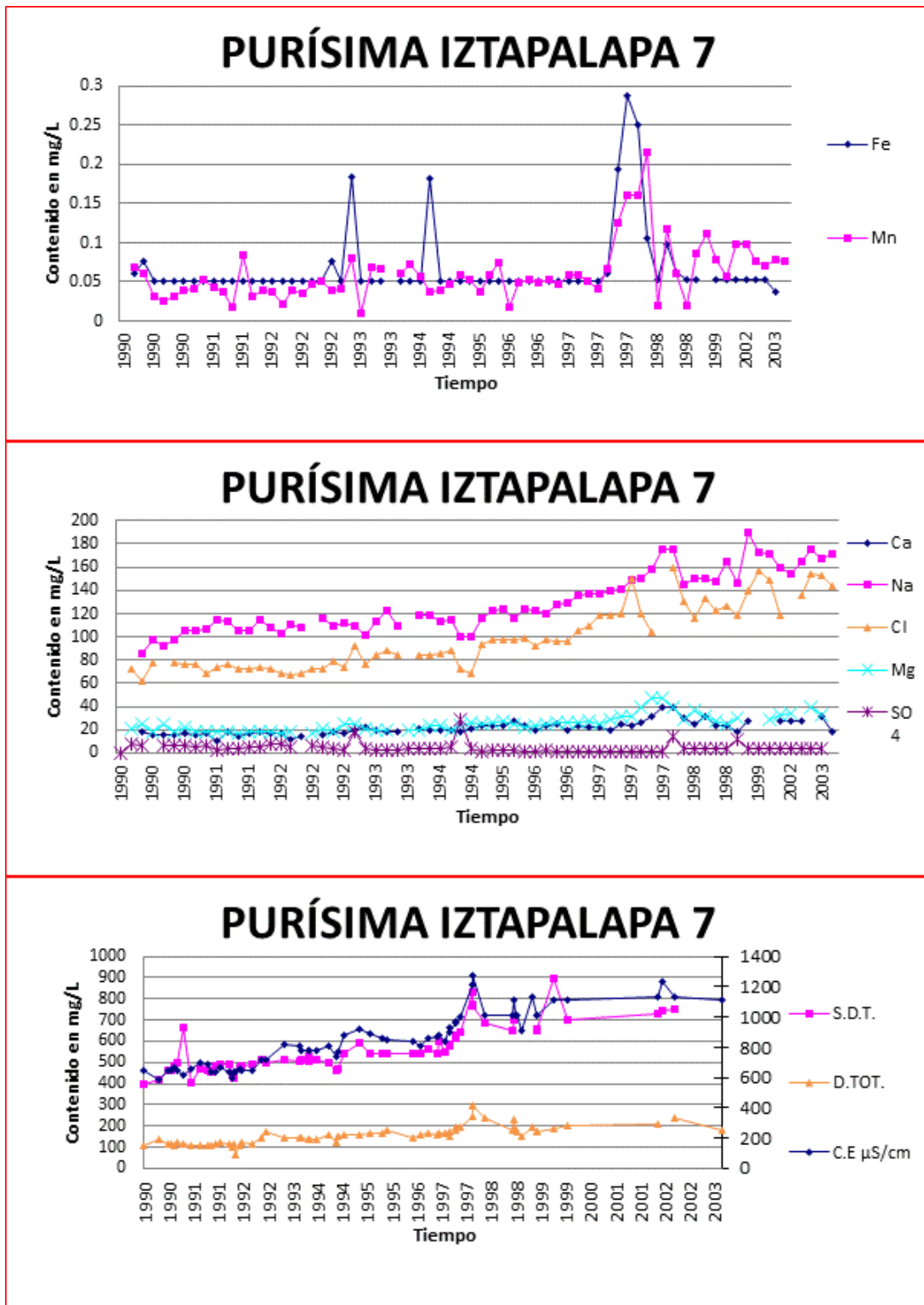
Grafica 7. Información química del pozo PEÑÓN-TEXCOCO 19.



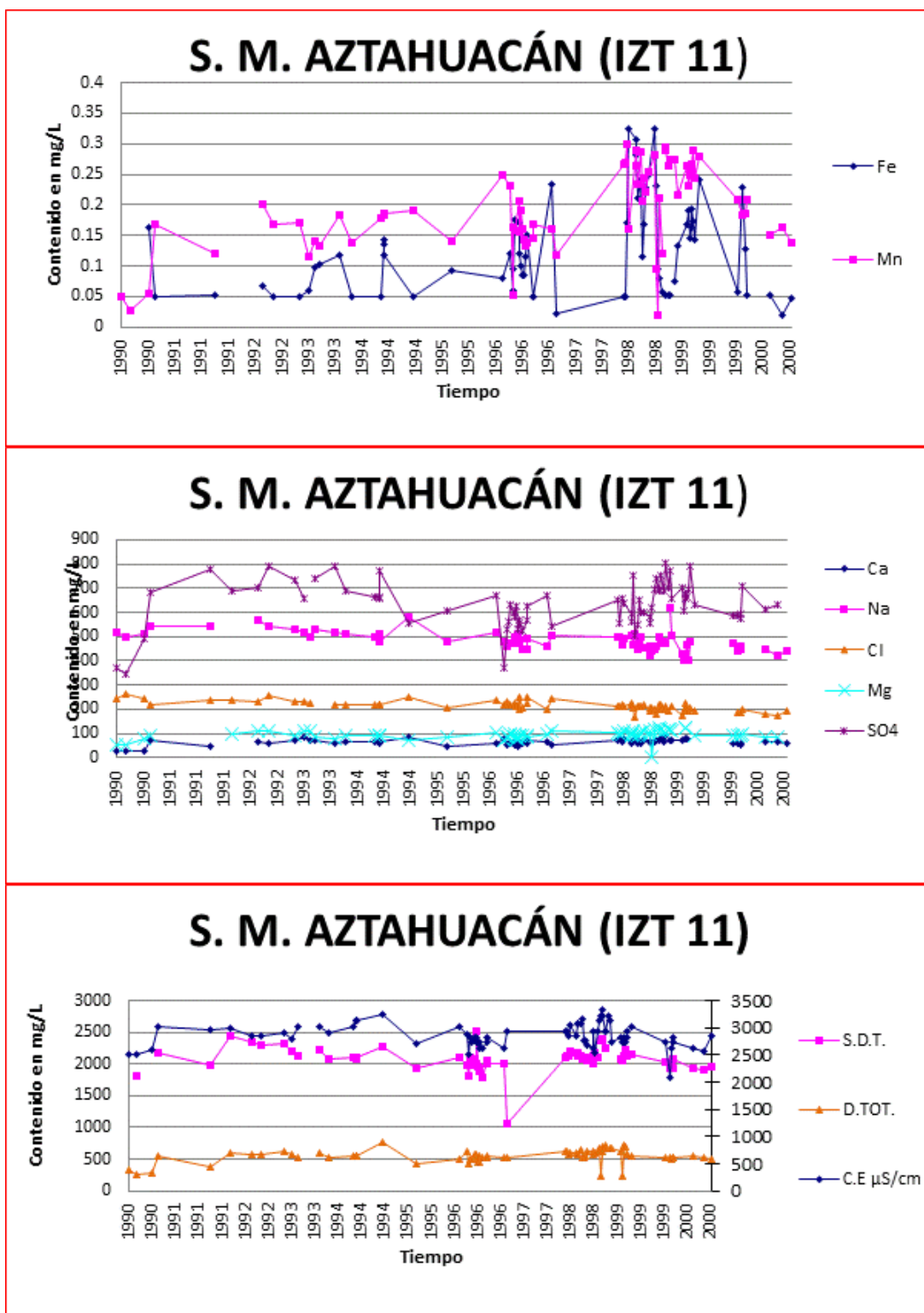
Grafica 8. Información química del pozo PEÑÓN-TEXCOCO 20.



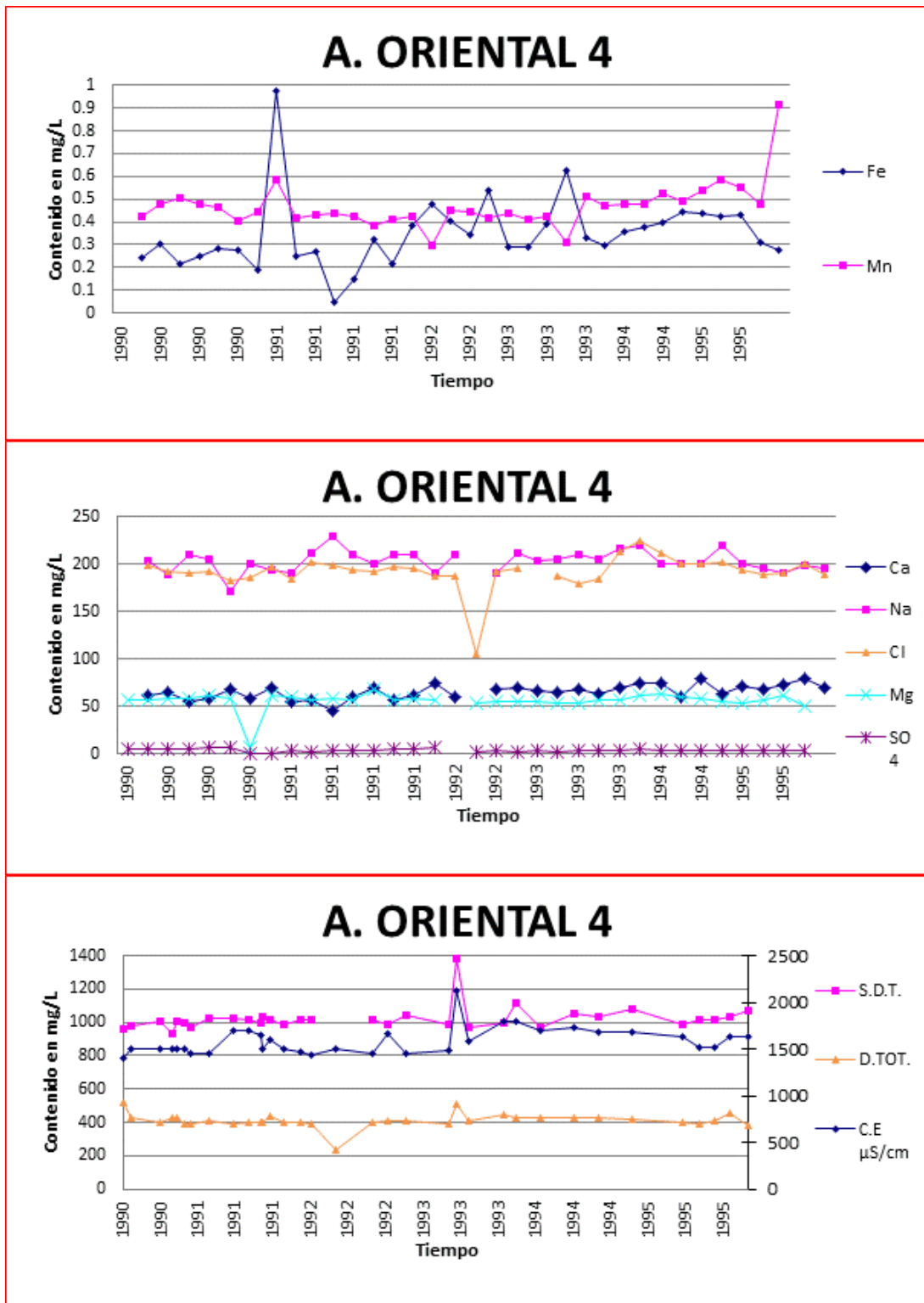
Grafica 9. Información química del pozo PURÍSIMA IZTAPALAPA 7



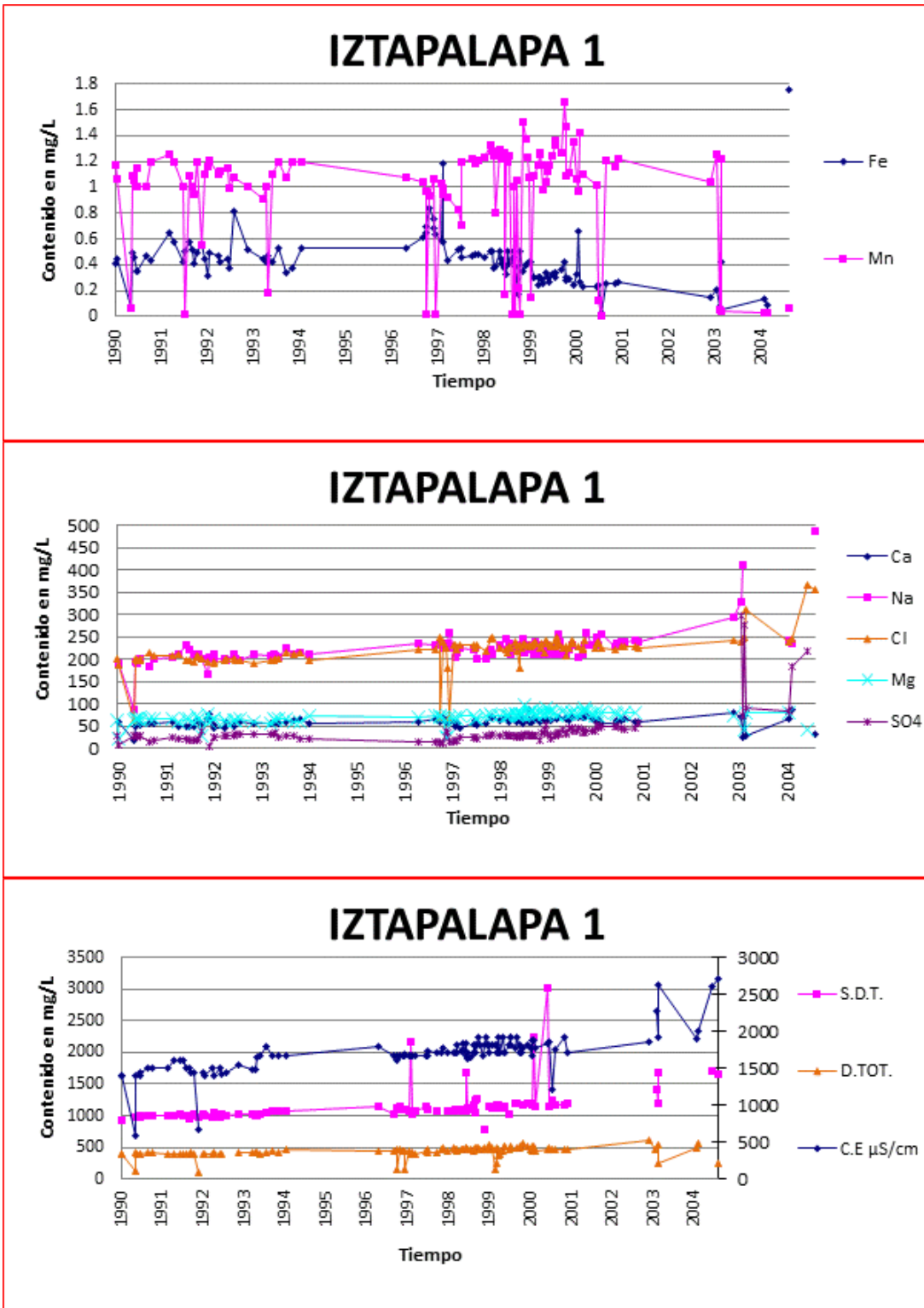
Grafica 10. Información química del pozo IZTAPALAPA 11



Grafica 11. Información química del pozo A. ORIENTAL 4.



Graficas 12. Información química del pozo IZTAPALAPA 1.



7. UBICACIÓN DEL SISTEMA DE RECARGA ARTIFICIAL

Teniendo en cuenta que el agua circula en el interior del subsuelo desde una zona de alta energía hacia otra de baja energía, se pueden identificar las zonas hacia las cuales disminuye el valor de las equipotenciales, estableciendo así el gradiente hidráulico (i) y la (s) dirección (es) del flujo subterráneo. Y con esto la identificación de las zonas de recarga y de descarga tanto naturales como artificiales

7.1 CONDICIONANTES

Con la información obtenida de acuerdo los estudios previamente realizados se identificarán aquellas capas en las cuales sus características físicas, geológicas y geomorfológicas permitan una libre infiltración del Sistema de Recarga Artificial, de esto depende poder localizar a aquellos estratos no saturados y cuyos espesores y compacidad no impidan lograr llegar a la zona permeable de manera óptima. Asimismo, se considera la opción de realizar inyección de agua tratada en la zona saturada.

Un factor importante a considerar es definir cuál es el posible uso futuro que tendrá el agua que se logre introducir en el subsuelo y constituya a la recarga, ya que los costos por transporte, conducción y/o bombeo pueden reducirse o incrementarse; por ello, de acuerdo a esta condicionante, se supondrán dos usos posibles: el primero para uso agrícola y el segundo para consumo humano o simplemente de riego.

El tratamiento de agua residual en principio debe responder a necesidades establecidas como, el reducir el volumen de agua subterránea extraída para diferentes usos; agrícola, comercio e industria, y con esto se haría el intercambio de agua para no extraer más agua del subsuelo.

Otra operación es la recarga artificial, la cual intenta lograr devolver un poco de lo que se extrae sin afectar el acuífero local regional

Un proyecto de recarga artificial depende de muchas condicionantes como lo es el área de terreno, éste dependerá de la zona en la cual se quiere que llegue el agua y la disponibilidad de área que se tiene, esto quiere decir que tanto terreno se tiene para poder realizar un proyecto, dado que pueden no tenerse los títulos suficientes para poder realizar un proyecto de éste tipo si se piensa realizar un embalse aunque las condiciones geológicas sean las ideales, por lo que la compra de los mismo será necesaria y aumentará el costo del proyecto.

7.2 UBICACIÓN REGIONAL PARA REALIZAR PROYECTOS DE RECARGA

Se seleccionará el área en el cual se planea realizar el proyecto, independientemente del marco legal en el que se encuentren los predios, se mostrarán solamente aquellos sitios en los cuales la implementación de un sistema de recarga artificial sea óptima.

El área de la zona de interés esta compuesta por un polígono definido por cuatro puntos los cuales tienen las siguientes coordenadas tal y como se muestra en la Figura 51:

- a) 2159861.74, 502262.36
- b) 2159603.19, 515158.29
- c) 2148560.46, 514933.07
- d) 2148943.95, 501991.08

De acuerdo con la información piezométrica, esta indica que los flujos de agua en el subsuelo tienen una dirección NW – SE condicionado por el alto bombeo de agua en la región, sin olvidar el flujo oriente – poniente correspondiente a la zona de recarga proveniente de la Sierra de Río Frío.

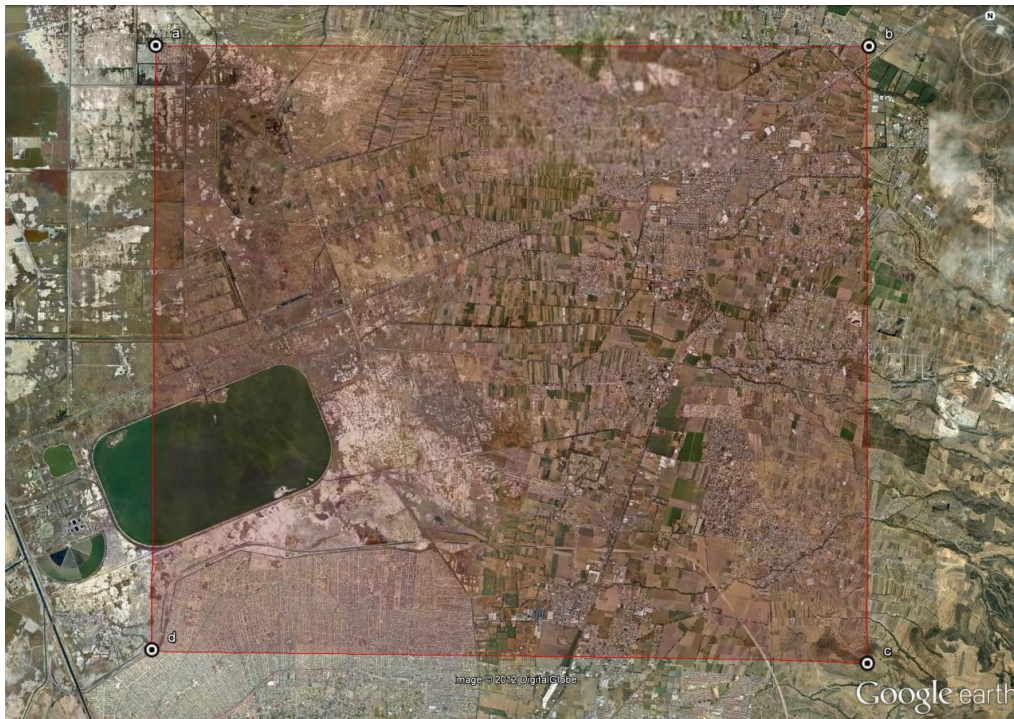


Figura 51. Área destinada al análisis para la ubicación de sitios de recarga artificial.

Con base a lo anterior sugiere que el área sea dividida en dos porciones: una oriental en la cual es característica por los distintos arroyos cuyo origen es la Sierra de Río Frío y cuyos volúmenes intermitentes son de gran importancia para la recarga, además de encontrarse una zona, en la cual los suelos son de buena permeabilidad, esto se puede

observar gracias a que no existe una prolongación de los arroyos hacia la planicie. La otra porción es el poniente, localizada en la planicie y cuyas características hidrológicas es la presencia de canales, producto de los arroyos localizados al oriente de la zona tal y como se muestra en la Figura 52; cabe resaltar que la altura a considerar para poder separar estas dos secciones se encuentra entre las cotas 2,238.0 y 2,243.0 m.s.n.m.

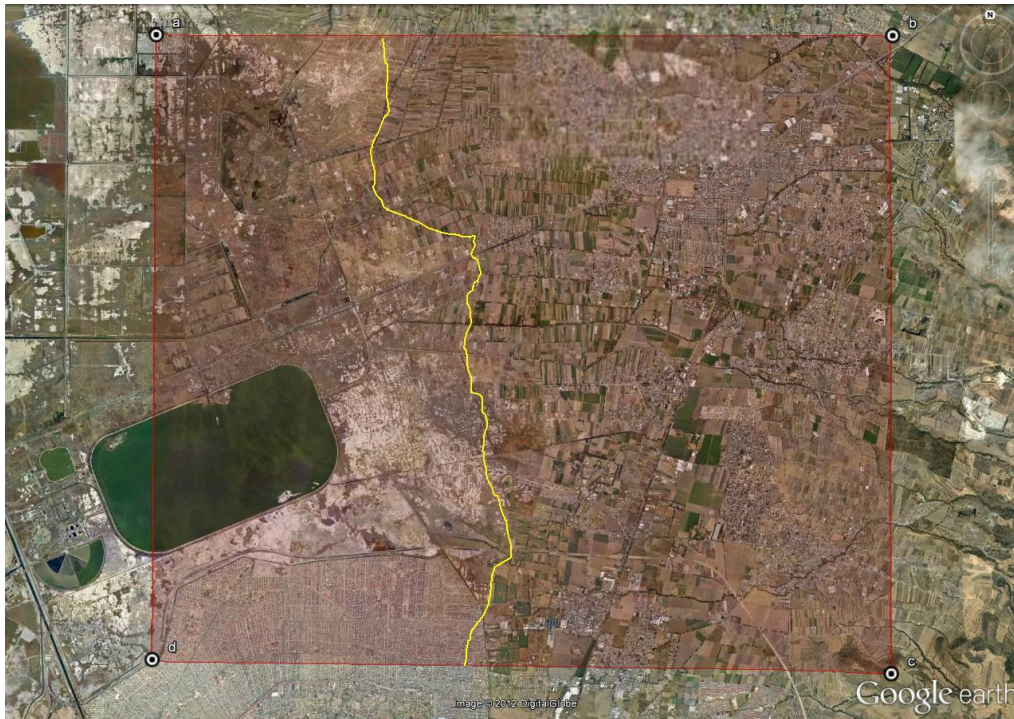


Figura 52. Porción Oriente y Poniente separados a la cota 2,243 m.s.n.m.

La alta concentración de sales en la planicie de Texcoco es visible de manera fácil en la fotografía aérea, esta presenta una tonalidad blanquecina sobretodo al sureste del Lago Nabor Carrillo y expandiéndose hacia la misma dirección y desapareciendo al N - NE hacían en donde el drenado de los suelos evita la presencia de sales y al sur en donde no se observa indicio alguno debido a la mancha urbana del municipio de Chimalhuacán tal como lo muestran las fotografías.

De acuerdo a la información química de los pozos cercanos a la zona de estudio se observa que la conductividad aumenta de oriente a poniente con valores desde los 400 $\mu\text{ohm/s}$ en el pozo PT-15 hasta los 2,000 $\mu\text{ohm/s}$ en el pozo LN-4, lo mismo sucede con los valores de los Sólidos Totales Disueltos, confirmando la relación que estos tienen y comprendiendo que la recarga se produce al oriente, el contenido de sales es menor por la alta disolución de los mismos.

En el área propuesta se encuentra una alta densidad de pozos de extracción de agua, la cual tienen una alta concentración de sales, que provienen de los sedimentos que

constituyen el acuitardo. La extracción de agua también está causando que esta región presente un importante hundimiento del terreno. De acuerdo a lo anterior y gracias a la disolución de diversos elementos componentes de los distintos paquetes de roca la familia química de agua que predomina es del tipo: Ca-Na-Cl (Cálcica Sódico Clorurada), además de dos subfamilias: 1) Na-Ca-HCO₃ y Na-Ca-Cl, las cuales también presentan altos contenidos en sales.

Desde el punto de vista geológico, en la sección 1 (Figura 27) en su parte oriental se muestra una alternancia de rocas clásticas y un paquete de roca volcánica que aportan agua a los pozos aquí ubicados como es el pozo LC. Esto permite suponer la buena permeabilidad que existe en esos paquetes de roca, y por ello la buena capacidad de infiltración que hay en la zona. En la sección 1 y 4 (Figuras 27 y 30), los paquetes litológicos correspondientes a los atravesados por los pozos PT 15, 17 y el PZ G, así como en las cercanías del TEM 10 corresponden a rocas basálticas, paquetes de arenas medias y gruesas, hasta gravas.

Al sureste del Lago Nabor Carrillo hacia los pozos Guadalupe y Km 27 se forma una pequeña depresión producida seguramente por el levantamiento del volcán Chimalhuachi en el momento de su formación; el mismo caso sucede en el extremo noreste del lago donde se encuentran situados los pozos NC; estas dos zonas son de gran importancia debido a que se sitúan varios pozos de extracción indicando la buena permeabilidad de las capas.

Hacia los extremos NW, SW y W del Lago Nabor Carrillo se nota la ausencia de rocas volcánicas predominando las arenas y conglomerados que presentan buena permeabilidad, pero cubiertas por un importante paquete de arcillas.

7.3 LOCALIZACIÓN DE SITIOS PARA RECARGA (Propuestas)

Recordando el concepto de recarga artificial, esta en general ayudará al aumento de las reservas de agua en el acuífero y por ello beneficia su calidad; además es aplicable en acuíferos sobreexplotados y/o donde la velocidad de circulación del flujo subterráneo sea lo suficientemente lento para que el agua inyectada escape por salidas naturales e impida alcanzar su tiempo de reposo en el acuífero para que esta se asimile y no se tengan riesgos de extraer agua de mala calidad.

La fuente de abastecimiento es un factor relevante para la realización de un proyecto de éste tipo, hay que considerar diversos factores tales como: el origen del agua, la calidad química y distancia entre la fuente - sitio de recarga, implicando en todas estas un factor común llamado costo beneficio. En éste caso las fuentes principales serán artificiales, es decir el agua de la planta de tratamiento ubicada SW del mismo, aunque será preferible construir otra planta para tratar el agua de los arroyos que descienden de la ladera de la Sierra de Río Frio localizados al oriente que posteriormente son canalizados.

A continuación se muestran los sitios considerados como los más factibles para a realización de diferentes proyectos de recarga artificial, estos sitios se proponen de acuerdo los factores de permeabilidad y conductividad hidráulica previamente mencionados, además se mencionará cual es el sistema más conveniente con base a las condicionantes antes indicadas.

Considerando el uso final que tendrá el agua incorporada como recarga y la forma en que se piensa realizar la recarga, las características químicas del agua tratada que se usará para infiltrar y del diseño del sistema de recarga, deberán estar sancionadas por las Normas NOM-015-CONAGUA, NOM-014-CONAGUA, NOM-003-ECOL-1997 Y NOM-127-SSA1.

- Primer Sitio Propuesto

El empleo de métodos de recarga superficial es relativamente poco posible de emplear debido a la baja permeabilidad del suelo y al alto contenido de sales encontradas la centro del área propuesta, logrando una pronta colmatación en la base de cualquier método superficial. Al mismo tiempo la calidad química del agua colocada en estos sistemas deberá mantener una mejor calidad a la monitoreada tal y como se mostro en el apartado de hidrogeoquímica debido a que es una zona en donde el contenido de sales es alta (Ca-Na-Cl).

Para ello el sistema de recarga que se adapta a las necesidades es un método a profundidad, de tal manera, que el proyecto se propone iniciando la perforación de un pozo de exploración en la cercanía al punto propuesto, con el objeto de corroborar la columna litológica. El pozo de exploración servirá en un futuro como un pozo de monitoreo para definir las características hidráulicas y químicas del acuífero en la zona de recarga.

De acuerdo con la información geológica obtenida para éste proyecto, el pozo alcanzara una profundidad de aproximadamente 250 – 300 m. alcanzando la zona permeable del acuífero. Éste punto deberá estar situado por lo menos de 500 a 800 m del pozo de extracción más cercano (PT-15 a 950 m aprox.) con el objeto de que el agua quede el suficiente tiempo almacenada al acuífero.

La fuente de agua será proveniente de la planta de tratamiento secundario o terciario de la CONAGUA localizada al poniente del Lago Nabor Carrillo debido a que la calidad de agua de estas plantas será la suficiente para el proyecto. Éste aspecto es indispensable debido a que se logrará disminuir el proceso de colmatación dentro del pozo generando un mayor beneficio al proyecto propuesto.

La colocación de pozos de monitoreo a los alrededores del pozo de inyección servirá para llevar una mejor base de datos físicos y químicos del agua, tomando en cuenta que esta calidad ya no será la original y que estar modificada debido a que se encuentra ya en contacto directo con el agua del acuíferos, esperando obtener valores menores en su contenido de sales.

El tubo deberá estar segado los primeros 150 m hasta que finalice el estrato de gravas para que posteriormente sea ranurado y se infiltre dentro de los estratos permeables.

El agua inyectada tendrá que estar el tiempo suficiente dentro del acuífero para que pueda ser asimilada y cambie las propiedades del agua preexistente, si el objeto primordial es disminuir la concentración salina, lo más recomendable es la programación de un sistema de extracción – inyección, siendo éste último el que deberá ser constante a través del tiempo y que la extracción se mantenga en ciertos periodos para que el valor en el contenido de sales sea cada vez menor.

El pozo se localiza en las coordenadas: 2155631.16 N – 506378.46 E (Figura 53 y 54).

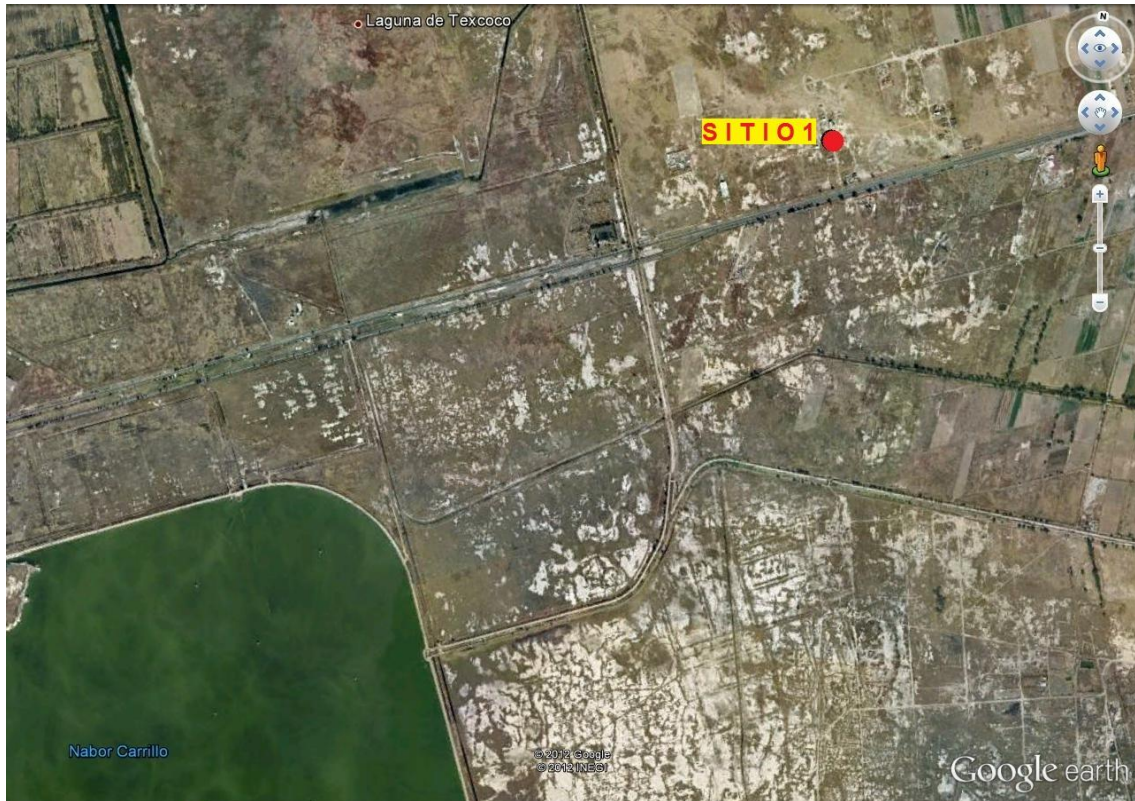


Figura 53. Primer sitio propuesto de recarga artificial.

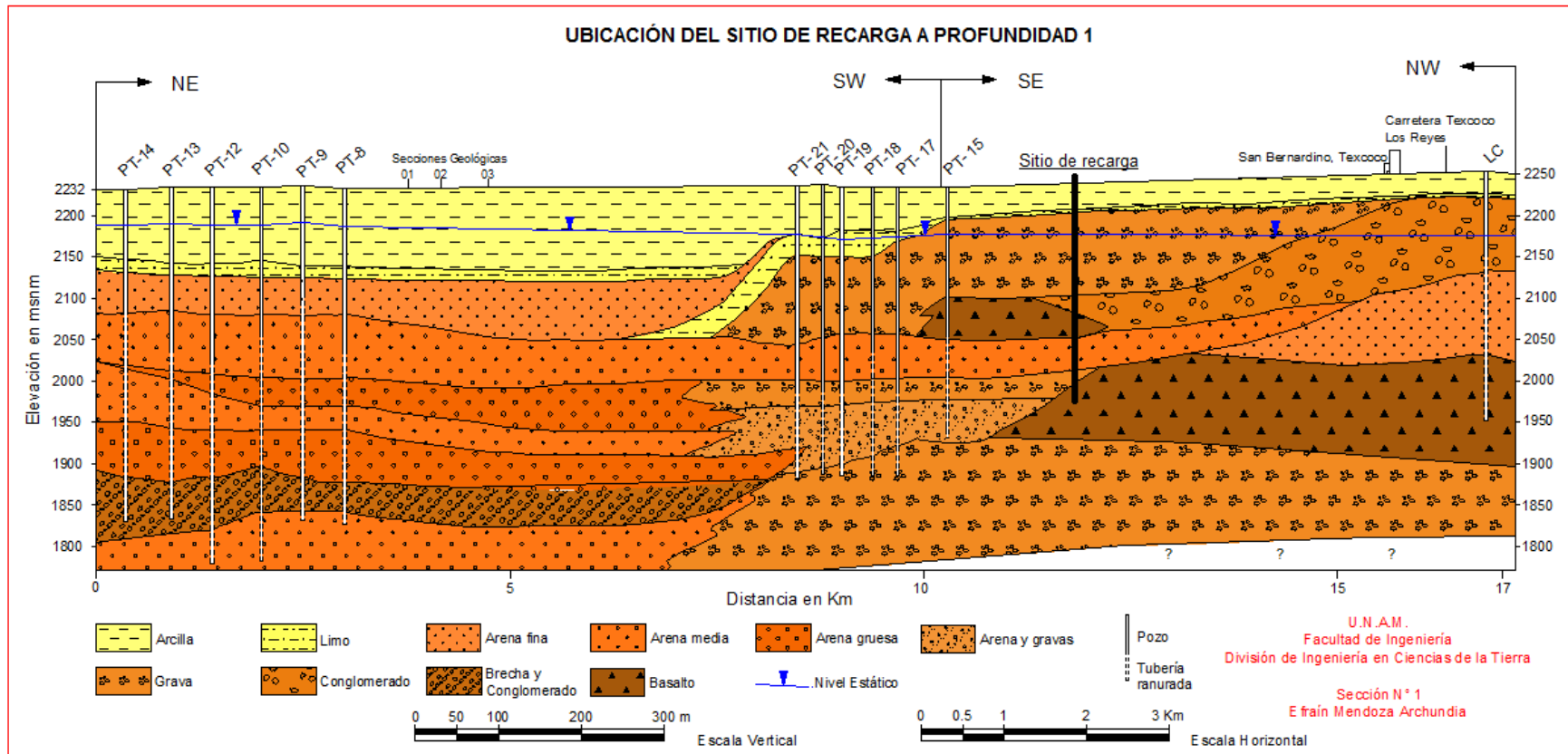


Figura 54. Ubicación del sitio de recarga profundidad 1.

- Segundo Sitio Propuesto de Recarga

Realizando una inspección visual a través de la vista satelital de la zona a estudiar, la región agrícola inicia en donde el contenido de sales es menor, esto es a partir de la centro hacia el oriente de la zona de estudio.

La presencia agrícola indica relativamente buena permeabilidad del sitio y en esta zona es donde varios arroyos comienzan a infiltrarse y/o los empiezan a canalizar. Los canales que pudieran aportar un caudal suficiente para la elaboración de un proyecto de recarga son el canal Sn. Bernardino y el canal Chapingo provenientes de los arroyos que llevan el mismo nombre.

El tipo de sistema de recarga que se puede adecuar con mayor facilidad es uno de tipo superficial, ya que los aportes de volumen de agua de los canales puedan ser suficientes para poder pensar en realizar un embalse de mediano tamaño 150 – 200 m, por lado considerándolo con una geometría cuadrada o rectangular y aprovechando que mientras más situado éste al oriente mayor permeabilidad presentara el suelo.

Éste tipo de proyecto se beneficiara aún más debido a que el embalse tendrá más agua gracias a las precipitaciones y a los escurrimientos superficiales que el drenaje puede aportar sobretodo en la temporada de grandes avenidas además de que el agua puede sufrir un proceso de purificación natural.

La calidad del agua es un factor tal que deberá ser monitoreado constantemente, procurando que en su composición mantenga niveles bajos en sales, lo cual pudiera ser posible ya que la fuente de esta agua provienen aguas arriba sobre la Sierra Río Frio.

Por otro lado, un inconveniente al elegir el sitio son las propiedades en las que encontraría el embalse debido a que es un área muy grande la que se requiere y se necesitaría la compra de varios terrenos, elevando el costo del proyecto; sin embargo, el beneficio es grande de éste es grande.

De igual manera, el considerar la colocación de pozos de monitoreo es necesario para observar los cambios químicos y del nivel piezométrico del agua, además debe realizarse el monitoreo del embalse para la remoción de los agentes colmatantes y la calidad química del agua estancada debido a que esta se encontraría sin movimiento, provocando la formación de materia orgánica.

Para poder tener una mejor comprensión de la filtración del agua a través de las capas arcillosas que poseen una baja permeabilidad será conveniente el realizar un proyecto piloto para observar e interpretar de manera optima el funcionamiento de un proyecto de recarga artificial en tales condiciones litológicas.

El embalse se localizaría en las coordenadas: 2154450.42 N – 510533.09 E (Figura 55).



Figura 55. Segundo sitio propuesto de recarga artificial.

- Tercer Sitio Propuesto

Ubicado en cercanías del Municipio de Chimalhuacán que es una zona urbana con alta densidad de población, situado a las faldas del volcán Chimalhuachi, y de acuerdo a las secciones hidrogeológicas es un sitio que presenta una alternancia de materiales de buena permeabilidad por lo que el implementar un sistema de recarga a profundidad se adecua a tales circunstancias. La fuente de origen quizá sea la parte inconveniente de éste sitio a proponer debido a que se propone utilizar agua del Lago Nabor Carrillo y/o del Canal Dren Chimalhuacán y/o del Canal Santa Mónica, lo cual implicaría la necesidad de darle un tratamiento avanzado, generando un mayor costo al proyecto por lo que sería innecesario realizar la recarga y por ello enviar directamente esta agua tratada hacia la red de agua potable municipal; sin embargo, el costo de la planta de tratamiento no se comparará con los gastos futuros de desalinización o del bombeo del agua desde otros acuíferos.

De igual manera éste sitio ayudara a mejorar la calidad química del agua en el acuífero, además de ser una zona de almacenamiento importante de agua sobretodo en la época de estiaje en donde la región oriente de la Ciudad de México tiende a sufrir de escasez de agua, por lo que la inyección de éste recurso en el resto del año deberá ser constante.

Se recomienda realizar un pozo de exploración para observar cual será la máxima profundidad del pozo de inyección, esto es con el objeto de reconocer la capa permeable

en la cual se depositara el liquido, aquí se recomienda realizar un monitoreo químico y piezométrico. Sin embargo y de acuerdo a la sección geológica 4 la profundidad de este pozo se encuentra entre los 220 y 300 m. considerando que esta se inyectara sobre las capas de arenas medias u quizá llegue hasta los basaltos.

El tubo deberá estar segado los primeros 140 m hasta que finalice el estrato de gravas para que posteriormente sea ranurado y se infiltre dentro de los estratos permeables.

La ubicación de esta propuesta estará en las siguientes coordenadas: 2151528.00 N - 505980.00 E (Figuras 56 y 57).



Figura 56. Tercer sitio propuesto de recarga artificial.

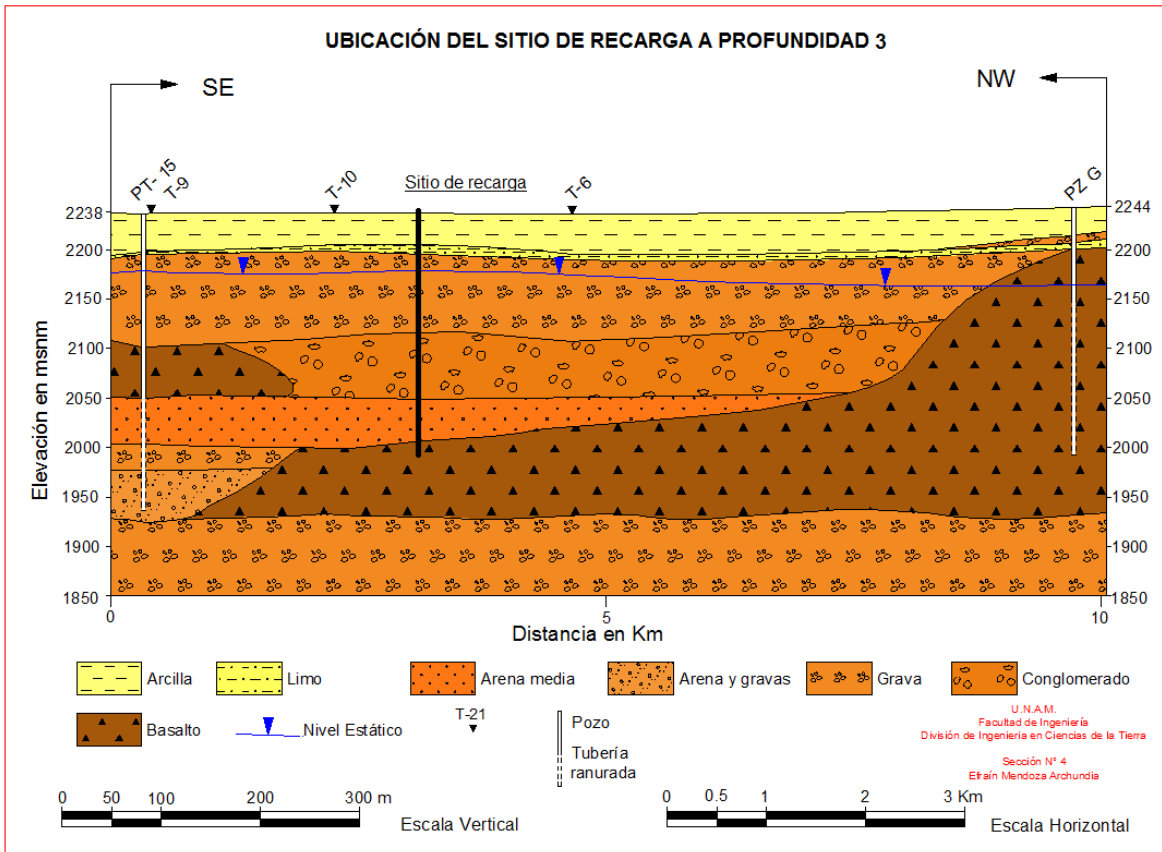


Figura 57. Ubicación del sitio de recarga a profundidad 3.

- Cuarto Sitio Propuesto

Al norte de el área propuesta para ubicar los diversos sitios para la realización de un proyecto de recarga, se encuentra una zona amplia que se localiza al poniente del Municipio de Texcoco, un municipio que necesita de grandes volúmenes de agua para uso agrícola, publico-urbano e industrial principalmente y que a su vez descarga un gran número de aguas residuales.

Gracias a la gran área es factible proponer un método de recarga a superficie (embalse de inundación conjunto a un método de serpenteo) debido a que se puede captar el agua residual proveniente del municipio.

El agua existente en el subsuelo en su calidad química y de acuerdo al apartado de hidrogeoquímica mantienen la misma calidad en esta zona, por lo que contiene un alto contenido en sales y sí se planea no alterar más su composición y utilizarla en un futuro con un posible uso agrícola o en su defecto con uso publico-urbano es necesario un previo empleo tratamiento del agua con respecto a su calidad, utilizando un método secundario de preferencia, que de acuerdo al censo realizado no existe una planta de éste tipo cercano a éste lugar por lo que se recomienda la construcción de una planta de tratamiento aguas arriba para que surta de agua con cierta calidad al embalse.

El serpenteo aunque es aplicable en los cauces de los ríos o arroyos, gracias a la morfología de la región, es posible emplear éste método adecuándolo en la balsa de inundación construyendo una serie de muros para que el agua proveniente de la planta de tratamiento a nivel secundario se mantenga mayor tiempo en contacto con éste sistema y deposite ciertos elementos colmatantes en el lecho de la balsa y que a su vez se infiltre al subsuelo. A su vez el agua contenida en el ambalse pudiera utilizarse para el riego intermitente sobre todo en temporada de estiaje.

La ubicación de éste sitio se encuentra en las coordenadas 2157809.00 N - 507471.00 E (Figura 58).



Figura 58. Cuarto sitio propuesto de recarga artificial.

Para mejor ubicación espacial de los sitios propuestos de recarga la Figura 59, muestra de manera general la ubicación en conjunto de los 4 sitios propuestos dentro del área principal de estudio.



Figura 59. Ubicación espacial de los sitios de recarga propuestos.

Para los sitios propuestos de recarga 2 y 4, es de vital importancia la construcción de una planta de tratamiento de agua para alimentar a los embalses ya que el transporte por bombeo de agua tratada a partir del Lago Nabor Carrillo es un factor económicamente no viable para el sustento de estas dos propuestas, además del monitoreo y mantenimiento de las conductos es otro factor a considerar ya que son varias decenas de metros que deberán estar sujetas a estas acciones. La implementación indispensable de la planta de tratamiento disminuye tiempos de monitoreo y agiliza su mantenimiento, además que los gastos por bombeo de la planta de tratamiento al sitio del embalse será menor.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a la información recopilada de cortes litológicos obtenidos a partir de la perforación de pozos de exploración y explotación de agua, y de información eléctrica generados a partir de las pruebas geofísicas realizadas en la planicie de Texcoco se observa que la profundidad de la unidad permeable principal para almacenar el agua por medio de la recarga artificial se localiza entre los 150 y 300 m de profundidad sobretodo en las unidades volcánicas (Secciones geoeléctricas 2, 3 y 4).

De acuerdo a los estudios químicos realizados por la CONAGUA y los diversos Organismos Municipales, la calidad del agua en la región oriental del Valle de México, es deficiente ya que presentan un alto valor en su contenido de Na, Cl, Ca y algunos elementos traza como Mn y Fe, así como sólidos totales disueltos (S.T.D.). Por lo anterior, si se decide recargar agua por métodos a profundidad o superficiales, se considera que el agua a infiltrar deberá tener una calidad adecuada para tal fin con el objeto de prevenir la colmatación y poder mejorar o mantener la calidad del agua subterránea existente.

Se proponen dos sitios de recarga artificial superficial; si bien las condiciones en las cuales se encuentra el terreno no permiten de manera optima la recarga artificial por medio de los embalses debido a la existencia de una capa arcillosa con un espesor apreciable y considerando que la purificación natural del agua tendrá un buen porcentaje de efectividad, el tiempo de almacenamiento del agua en el embalse será alto por lo que se tendrán problemas mayores de colmatación y no responderá de manera inmediata a la idea de recargar al acuífero; por ello es indispensable el empleo de un sistema de tratamiento avanzado para que el agua almacenada no quede retenida por tiempos prolongados y la colmatación en el lecho del embalse disminuya.

Las dos propuestas de recarga artificial a profundidad dependen en gran forma de la calidad química del agua, debido a que si esta se llegara a infiltrar con una calidad no aceptable, esta tiende a colmatar el pozo de recarga, causando grandes pérdidas económicas, por lo que el monitoreo y el mantenimiento de la infraestructura aumentara, aunado a las condiciones físicas que presenta la roca ya que esta deberá tener la suficiente permeabilidad para el su buen funcionamiento.

La existencia del Lago Nabor Carillo pudiera considerarse como un método de recarga de superficie se puede pensar como error el proponer otro sitio de recarga, sin embargo se menciona que este es a profundidad y por ello llega mas rápido a la zona basáltica fracturada, por tanto no se espera un tiempo prolongado para que el agua llegue a almacenarse en el sistema acuífero.

Si se planea realizar un proyecto de éste tipo es recomendable realizar un proyecto piloto, utilizando infraestructura pequeña y volúmenes de agua bajos pero que sean los suficientes para considerar de manera adecuada todos los fenómenos involucrados en la recarga, el diseño general deberá contener una planta de tratamiento a nivel terciario para evitar con mayor seguridad la colmatación en el pozo si se planea realizar a profundidad o en el lecho y paredes del embalse si es a superficie.

El proponer una batería de recarga parece ser buena opción para recarga un mayor volumen de agua al acuífero, esta se deberá considerar en una distancia amplia entre pozo y pozo de recarga para evitar la formación de domos y reducir la eficiencia de la infiltración.

El número de perforaciones dependerá en gran manera del gasto que aportará la planta de tratamiento y esta se calcula de acuerdo a un análisis a detalle sobre la conductividad, transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento de los estratos localizados en la zona, esto se obtendrá gracias a una serie de pruebas de bombeo, mismas que no se realizaron en este proyecto y que son clave para un futuro tema de investigación.

Existe información histórica de la transmisibilidad, conductividad y coeficiente de almacenamiento del acuitardo y acuífero superior, para saber cual es el valor del caudal óptimo a inyectar, existe una serie de formulas matemáticas que pueden dar un valor aproximado a lo esperado, sin embargo a través del tiempo y de acuerdo a la experiencia de diversos organismos encargados a realizar este tipo de proyectos, el realizar ensayos de recarga con un cierto caudal en un diámetro de pozo dado se define a base de prueba y error el valor de caudal ideal para el proyecto.

Si bien anteriormente se realizó una prueba piloto de recarga en el sector poniente del lago Nabor Carrillo, y se concluyó que con pozos de 4 in. de diámetro los estratos aceptan un caudal entre los 16 y 18 m³/s, no significa que este valor es permanente debido a la alta extracción de agua y el valor de la conductividad tiende a disminuir; sin embargo actualmente se sabe del proyecto en el Caracol se planea la recarga con una batería de más de 15 pozos, los cuales aceptarían un gasto entre 40 y 60 m³/s, esto significa, que aunque espacialmente los sitios de recarga se encuentran muy cercanos los valores de conductividad y el coeficiente de almacenamiento pueden cambiar drásticamente por lo que, para determinar de manera óptima y con menor rango de error la capacidad de recarga de los estratos permeables es recomendable trazar una red de flujo así como calcular la red de influencia; conociendo el gasto de descarga y esta área se podrá determinar la capacidad de infiltración de una manera aproximada.

Es bien conocido en todas partes del país que un pozo tiene la capacidad de tomar una cantidad de agua igual a la que se le extrae por bombeo. En la zona un pozo con diámetro de perforación de 4" sería capaz de absorber un estimado de 16 l/s. Si bien se puede dar una aproximación de caudal a inyectar con la formula de Darcy para un valor de conductividad, transmisibilidad y gradiente hidráulico dados, es mejor hacer las mediciones puntuales en un pozo realizando la prueba de bombeo en el sitio indicado para realizar los cálculos mencionados y realizar la recarga artificial.

Para la recarga artificial a profundidad, el tubo deberá estar segado los primeros 140 o 150 m hasta que finalice el estrato semi - impermeable para que posteriormente sea ranurado y se infiltre dentro de los estratos permeables, no se puede decir la profundidad exacta debido a que un proyecto de este tipo es puntual y la perforación puede mostrar una variación en los espesores y profundidades de los estratos.

Los pozos de monitoreo se recomiendan a una distancia aproximada de 300 m debido a que aun se puede observar algún cambio en el nivel del agua en tiempos cortos.

Es recomendable realizar estudios de la calidad química del agua, así como el monitoreo piezométrico de forma periódica y adecuada, para poder comprender exitosamente el comportamiento del sistema acuífero; ya que la falta de información provoca que existan dudas en sus lecturas y por ello en su interpretación.

Si bien no existe la suficiente información estratigráfica de la Cuenca de México, es recomendable realizar una serie de perforaciones de exploración profunda para poder determinar con mayor exactitud la litología y su posición estratigráfica, por ello se podrá comprender el comportamiento del sistema acuífero en cuanto a sus propiedades físicas ya que estas serán determinadas y correlacionadas con mayor exactitud.

Actualmente no se tienen valores recientes publicados de conductividad y transmisibilidad, por lo que es necesario realizar y publicar valores correspondientes a las pruebas de bombeo en toda la Cuenca del Valle de México ya que estos valores varían en tiempo y espacio debido a la sobre extracción de agua y no es factible utilizar estos valores cuando se realizaron en la época de los 90'.

El intercambio de experiencias entre los países es un factor decisivo para consolidar la práctica de la recarga artificial de acuíferos en México y sensibilizar a los responsables de la gestión del agua.

También es importante una mayor difusión de estas experiencias, con objeto de promover el debate en un número más amplio de participantes, que contribuya al conocimiento del tema, su aplicación y su aprovechamiento.

Es importante el llevar una conciencia moral con base al consumo del agua, considerando el reciclaje del mismo (considerando en el tratamiento de aguas residuales) y el mejor manejo de éste gran recurso; afortunadamente a hoy en día no se sufre en gran medida por el abastecimiento del agua en la Ciudad de México, sin embargo en un futuro el abasto del agua a la población se verá afectada ya que día a día la mancha urbana aumenta de manera incontrolada y por ende generará grandes problemas económicos, políticos y sobre todo sociales en donde el costo por contar con éste recurso aumentará y gran parte de la sociedad no podrá contar de manera adecuada con el servicio de abastecimiento de agua.

El reúso genera beneficios económicos importantes que pueden contribuir a financiar los costos de tratamiento de las aguas residuales.

El reúso incrementa la disponibilidad del agua de primer uso o la conservación y detenimiento del abatimiento del nivel del agua subterránea, permitiendo que este recurso mantenga mayores volúmenes.

El no poder contar con un sistema de abastecimiento de agua a una Ciudad y sobre todo en esta Ciudad de México implica que las industrias quiebren, que la sociedad se muestre inconforme y por ello busquen otras fuentes de supervivencia; por eso se puede pensar que el agua se encuentra en una región que tiende a una superación urbana general, en donde existe un equilibrio económico, político y social, por lo que si se lleva a cabo un sistema de regulación federal del agua, la sociedad en general comprenderá el verdadero valor de éste recurso.

9 TABLA RESUMEN

Sitio de estudio	Porción sureste de la planicie de Texcoco, Estado de México.
Cuenca	Cuenca del Valle de México
Acuífero	Texcoco
Formaciones Geológicas Regionales	Fm. Morelos, Fm. Cuautla y Fm. Mexcala del Mesozoico; Grupo Balsas del Paleógeno; Rocas volcánicas intrusivas y extrusivas del Mioceno; Grupo Anáhuac del Plioceno-Pleistoceno; Fm. El Pino, Fm. Tláloc, Fm. Iztaccihuatl, Fm. Popocatepetl; Fm. Chichinautzin y depósitos lacustres del Cuaternario.
Espesores de las Capas semi-impermeables Principales	Capa arcillosa 50-60 m. y capa limo arcillosa 50-200 m. se encuentra hasta los 200 m. de profundidad aprox.
Espesores de las Capas Permeables Principales	Capa basáltica encontrada a los 44 metros de profundidad y un espesor entre los 50 – 150m. y lentes de conglomerados a diferentes profundidades de espesores variables entre 20 y 100 m. Existen capas de arena de poco espesor.
Calidad del Agua	En general existe agua con alto contenido en sales sobre todo en el ramal Peñón – Texcoco. El agua mejora en su calidad al oriente del mismo por encontrarse en contacto con agua de resiente infiltración proveniente de la Sierra de Río Frio. Al sur del ramal Peñón Texcoco el agua disminuye gradualmente en su concentración de sales.
Agua Residual	Existe una alta generación de agua residual proveniente de los municipios encontrados al oriente del Distrito federal, mismos que se encausan en el canal de desagua La Compañía.
Agua Superficial	Existe un gran número de arroyos provenientes de la Sierra del Río Frio, mismos que se encausan posteriormente aguas abajo y que son dirigidos a las cercanías del Lago Nabor Carrillo.
Plantas de Tratamiento	En el área de estudio no se encontró alguna planta de tratamiento. Sin embargo en el municipio de Nezahualcóyotl se tienen conocimiento de una planta operada por ODAPAS del mismo Municipio; de igual

	manera el OCAVM tiene una planta de tratamiento de agua a nivel primario, secundario y terciario.
Conductividad Hidráulica	<p>En el acuitardo superior, la conductividad hidráulica horizontal (Kh) varía de 10^{-6} a 10^{-10} en el material fino y 10^{-5} en los horizontes limo-arenosos (Marsal y Masari, 1959; Rudolph, 1989; Vargas – Cabrera, 1995; Murillo y Huizar Álvarez, 1993 en Huizar Álvarez et al., 2002).</p> <p>De acuerdo con Vargas – Cabrera C. y Ortega – Guerrero M.A (2002) se propone la presencia de tres acuitardos según el método Hvorslev dentro del acuífero somero oscila entre 4×10^{-11} y 5×10^{-9}, mientras que el segundo acuitardo es de 4×10^{-11} a 5×10^{-9} y el último con un valor de 2.2×10^{-11}.</p> <p>En el acuífero superior, con un espesor promedio de 600 m. el valor de Kh referente a esta unidad, de acuerdo con diversas pruebas de bombeo oscila entre 1.5×10^{-4} y 3×10^{-4} m/s y una conductividad hidráulica vertical (Kv) de 1.1×10^{-6} m/s y un coeficiente de almacenamiento (S) de 10^{-3} en las rocas sanas y en las fisuradas $Kh = 1.1 \times 10^{-3}$ y $S = 4 \times 10^{-4}$ (Vásquez Sánchez, 1995; SMA, 1999; Huizar Álvarez et al., 2001 en Fajardo Rivera – Martínez Galicia, 2004).</p>
Proyectos de Recarga	Se proponen cuatro sitios de recarga artificial, dos a profundidad y dos a superficie, de acuerdo a las características estratigráficas, geomorfológicas y químicas del agua principalmente.
Proyecto Piloto	Es un proyecto que se debe realizar en base a un estudio mas a detalle en el sitio en donde se pretende realizar la recarga. Este trabajo da las bases para establecer únicamente los sitios.
Es poco factible la propuesta de establecer un sistema de recarga artificial superficial debido a las bajas conductividades que presentan las capas arcillosas en la zona, sin embargo pudiera establecerse un proyecto piloto con un tratamiento de agua residual bajo y que a su vez este se infiltre hacia las zonas con mayor permeabilidad como la capa basáltica a través de un pozo profundo.	

10 BIBLIOGRAFÍA

- Alanís – Álvarez. S.A., Nieto – Samaniego, A. F., Ferrari, L. 1998. *Effect of the strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican Volcanic Belt*: Geology, 26.
- Boletín Hidrológico N° 52; Datos del Valle de México correspondientes al año 1999, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 53; Datos del Valle de México correspondientes al año 2000, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 54; Datos del Valle de México correspondientes al año 2001, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 55; Datos del Valle de México correspondientes al año 2002, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 56; Datos del Valle de México correspondientes al año 2003, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 57; Datos del Valle de México correspondientes al año 2004, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 58; Datos del Valle de México correspondientes al año 2005, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 59; Datos del Valle de México correspondientes al año 2006, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 60; Datos del Valle de México correspondientes al año 2007, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 61; Datos del Valle de México correspondientes al año 2008, Comisión Nacional del Agua.
- Boletín Hidrológico N° 62; Datos del Valle de México correspondientes al año 2009, Comisión Nacional del Agua.
- Carrera–Hernández, J.J., Gaskin S.J. 2007. *The Basín of Mexico aquifer system: regional groundwater level dynamics and database development*. Hydrogeology Journal, Vol. 15.
- Custodio E. y Llamas Manuel R. 1976. Hidrología Subterránea, 1ª Edición, Edit. Omega.
- Damon, E. P., M. Shafigullah y F. K. Clark. 1981. *Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la Metalogénesis*. Revista del Instituto de Geología, UNAM.
- Davis S.N.& De Wiest, R. 1971 *Hidrogeología*. Ediciones ARIEL, Barcelona.
- De Cserna, Z; M. de la Fuente – Duch, M; Palacios - Nieto; L. Triay; L.M. Mitre – Salazar y R. Mota – Palomino. 1987 - 1988. *Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México*; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 104, Instituto de Geología, UNAM.
- Demant – Alain. 1982. *Interpretación Geodinámica del volcanismo del eje volcánico Transmexicano*. Revista del Instituto de Geología, UNAM. Vol. 5, N° 2.
- Díaz Rodríguez. 2006. *Los suelos lacustres; Revista Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, Vol. 6 N° 2.

Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica–Secretaría General de Obras DDF; Lesser y Asociados, S. A. de C. V. 1991. *Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del valle de México*. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 6, N° 2.

Dupuit, J. 1863. *Étude théorique et pratique sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. 2ª edición, París Francia: Dunod

Enciso de la Vega S. 1992. *Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México*. Revista del Instituto de Geología, UNAM. Vol. 10, N° 2.

CONAGUA. 2010. Estadísticas del agua en México. 2010. 10 años de presentar el agua en cifras.

CONAGUA. 2011. Estadísticas del agua en México. 2011.

Fernández Escalante A. Enrique, García Rodríguez Manuel. 2004. *La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias 1ª parte*. Estado de la cuestión VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, España.

Fernández Escalante A. Enrique, García Rodríguez Manue. 2004. *La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias 2ª parte*. Inventario de experiencias a nivel mundial VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, España.

Fernández Escalante A. Enrique. 2004. *Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales: Aspectos cualitativos y medioambientales; criterios técnicos derivados de la experiencia en La Cubeta de Santiuste (Segovia)*. Memoria otorgada para optar al grado de Doctor; Tesis Doctoral; Facultad de Ciencias Geológicas, Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, España.

Fernández Escalante A. Enrique, Cordero Sánchez Rosa Ma., Villarroja Gil Fermín, García Rodríguez Manuel. 2006. *La recarga artificial de acuíferos: Técnicas de divulgación y educación ambiental*; Tecnología y desarrollo; Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente Vol. IV; Universidad Alfonso X El Sabio, Escuela Politécnica Superior, Villa Nueva de la Cañada, Madrid, España.

Fernández Rubio Rafael. 2011. Sembrar Agua, pág. 18

Ferrari, Luca. 2000. Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. Boletín Sociedad Geológica Mexicana. N° 53.

Forchheimer, P. 1886. *Ueber die Ergiebigkeit von Brunnen-Anlagen und Sickerschlitzten*. Z. Architekt. Ing. Ver. Hannover 32: 539–563.

Freeze R., A. y Cherry J.A. 1979. *Groundwater*. Edit. Prentice Hall.

Fries C, Jr, 1960. *Geología del Estado de Morelos y de Partes adyacentes de México y Guerro, Región central meridional de México*; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 60, Instituto de Geología, UNAM.

G. Mesri, A. Rokhar, B.F. Bonor. 1975. *Composition and Compressibility of typical samples of Mexico City clay*; Geotechnique, Vol. 25, Issue 3.

Gómez - Tuena, A., Orozco - Esquivel, Ma. Teresa., Ferrari, L. 2005. *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, N°. 3.

Huizar- Álvarez, R. 2002. Definición del control de la calidad del agua subterránea extraída de la subcuenca de México (Delegación Iztapalapa). Instituto de Geología, UNAM.

Huizar-Álvarez, R.; Carrillo–Rivera, J.J.; Ángeles–Serrano, G.; Hergt, T.; Cardona, A. 2004. *Chemical response to groundwater extraction southeast of Mexico City*. *Hydrogeology Journal*, Vol. 12.

Huizar Álvarez Rafael, Mendoza A. Efraín, Espinoza J. Ma. Magdalena. 2011. *Proyecto de recarga artificial del acuífero con agua tratada del modulo experimental de tratamiento terciario en la zona federal del Lago de Texcoco*; Instituto de Geología, UNAM.

Ian Gale. 2005. *Estrategias para la gestión de Recarga de acuíferos (GIZA), en zonas semiáridas*; IAG, UNESCO.

ITGE. 2000. *Recarga artificial de acuíferos, Conceptos Generales*; Instituto Tecnológico, Geológico y Minero de España.

Iturbide A. Rosario. 1986. *Estado del arte referente a la predicción del mejoramiento de la calidad del agua por su paso al acuífero*; Proyecto 6304; Instituto de Ingeniería, UNAM.

Iturbide A. Rosario, Orta L. T., Acevedo A. L. 1987. *Asesoramiento general en un modelo experimental de recarga de acuíferos por medio de pozos*; Instituto de Ingeniería, UNAM.

Iturbide A. Rosario, Rosales C. Fernando, Flores T. Carlos. 1988. *Modulo experimental de recarga de acuíferos, en la Zona del Ex Lago de Texcoco con agua tratada (2ª etapa)*; Instituto de Ingeniería, UNAM.

J. M. Ruiz. 2003. *Utilización del balance de cloruros en la zona no saturada en la estimación de la recarga natural a un acuífero detrítico. Estudios de la zona no saturada del suelo*, Vol. VI J. Álvarez _ Benedi y P. Marinero; Dirección de hidrogeología y aguas Subterráneas; Instituto geológico Minero de España.

John S. Irasturtza. 2009. *Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia*; Ingeniería de caminos, canales y puertos; Proyecto o tesina d'especialitat; Universitat Politècnica de Catalunya; Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins i Ports de Barcelona, España.

Korenfeld Federman David, Hernandez Lopez Oscar Jorge. 2011. *Proyecto de planta piloto de tratamiento avanzado para la recarga artificial del acuífero*; Revista Digital Universitaria Vol. 12 No. 2, UNAM.

Lesser I., J.M.; Sánchez D., F. y González P., D. 1990. *Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México*. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 5, N° 1.

Lesser y Asociados, S.A. de C.V. 1995 *Piezometría y Balance Geohidrológico Zona Metropolitana de la Ciudad de México*,. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica-DF, 1995.

Lesser I., J.M.; Cortés P., M.A. 1998. *El hundimiento del terreno de la ciudad de México y sus implicaciones en el sistema drenaje*. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XIII, N° 3.

Lesser y Asociados S. A. de C. V. 2000. *Estudio de mediciones en la red de pozos piloto para la parte sur de la cuenca del Valle de México y actualización de balance hidrogeológico. Sinopsis de la piezometría del Valle de México año 2000*. Departamento del Distrito Federal, Contrato núm. 0-07-CO-04-1-0328.

Lesser I., J.M.; González P., D. 2005. *Evolución piezométrica del acuífero de la Ciudad de México*. V Congreso de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Sonora.

Leyva Suárez Esther. 2010. *Acuíferos semiconfinados y su modelación: aplicaciones al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis de Maestría, UNAM.

Londoño Carvajal, Adela. 2005. *Química del Agua*; Departamento de Ingeniería Química, Sede Manizales; Facultad de Ingeniería y arquitectura, Universidad Nacional de Colombia; Vol. 1.0.

Lugo – Hubp, J., Salinas – Montes, A. 1996. *Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (Al norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales*. Revista mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 13, N° 2; Instituto de geología, UNAM.

Macías, José Luis. 2005. *Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México*, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Vol. 42 N° 3; Instituto de geología, UNAM.

Mooser, F. 1961. *Informe sobre la Geología de la Cuenca de México*. Mex. Secretaría de Recursos Hidráulicos. C.H.C.V.M.

Mooser, F., Ramirez M. T. 1987. *Faja volcánica Transmexicana: Morfoestructura, Tectónica y Vulcanotectónica*; Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo 48, N° 2.

Murillo Díaz José Manuel. 2004. *Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del bajo de Guadalquivir*. Tesis Doctoral; Departamento de Ingeniería Geológica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid; Universidad Politécnica de Madrid, España.

Nabor Carrillo. 1969/1981. *El hundimiento de la Ciudad de México*; SHCP.

Ortega G. A and R. N. Farvolden. 1988. *Computational analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basín of Mexico*. Accepted for publication in the Journal of Hidrology, Vol. 110.

Rodríguez C,R y Ochoa A, C. 1989. *Estudio geoelectrico del Sistema Acuífero de la Cuenca de México*. Geofísica Internacional, Vol. 28, N°. 2.

SACM. 2011. Recarga Artificial al Acuífero a partir de agua de lluvia y residual potabilizada. Presentación.

SARH, Comisión del Lago de Texcoco. 1981. *Tratamiento y rehúso de aguas residuales en el área del Ex – Lago de Texcoco*; Estudio Preliminar.

Schoeller, H. 1962. *Les eaux sauterrains (Groundwater)*.Ed. Masson, Paris.

Slichter, C.S. 1899. Theoretical investigation of the motion of ground water.U.S. Geological Survey 19th Annual Report, Part 2.

Sukia Irastortz, Jon. 2009. Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia; Projecte o Tesina d'especialitat; Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona; Universitat Politècnica de Catalunya.

Tapia – Varela, G. y López–Blanco, J. 2002. *Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogénicas a escala 1:100,000*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 19, n. 1.

UNESCO. 2005. *Recharge systems for protecting and enhancing groundwater resources. 5° International symposium on management of aquifer recharge*; ISMARS, Berlin, Germany.

Vargas – Cabrera C, Ortega Guerrero M. A. 2002. *Propiedades y comportamiento hidráulico de los depósitos lacustres de la Cuenca de México*; centro de Geociencias, UNAM.

Vázquez–Sánchez, E. y Jaimes–Palomera, R. 1989. *Geología de la Cuenca de México*. Geofísica Internacional, Vol. 28, N°. 2.

XV Congreso Nacional de Hidráulica.

- Nuñez garduño Cesar. Tema I Infraestructura Hidráulica. *El sistema hidráulico de la ciudad de México*.

PÁGINAS ELECTRÓNICAS

www.cgwb.gov.in: Central groundwater board ministry of water resources guide on artificial recharge to groundwater; New Delhi, May 2000.

www.lenntech.nl: Creado en 1933 en la Universidad de Delft, en los Países Bajos. Su objetivo es diseñar, fabricar, desarrollar e instalar sistemas de purificación de aire y de agua no dañinas con el medio ambiente y para la industria.

www.csir.co.za: Consejo de Investigación Científica e Industrial (CSIR) de sud-África por sus siglas en Ingles, los cuales llevan a cabo investigación científica para el desarrollo económico.

www.igrac.net:	Centro de Evaluación de Recursos de Aguas subterráneas; realiza el intercambio de información respecto a agua subterránea y experiencias a escala mundial.
www.iah.org/recharge:	es un foro de información sobre los trabajos dentro de las comunidades internacionales sobre agua subterránea, de la gestión y mejora de la recarga de los acuíferos.
www.dina-mar.es	Es un proyecto de gestión hídrica, cuyo objetivo es determinar que zonas de España son susceptibles para la recarga artificial de acuíferos.
www.igme.es:	Página del Instituto Geológico y Minero de España.
www.asrforum.com:	ASR empresa Norteamericana que brinda servicios de recuperación de acuíferos.
www.waterfootprint.org:	Es una organización que promueve la transición hacia el uso sostenible, equitativo y eficiente de los recursos de agua dulce en el mundo.
www.inegi.gob.mx:	Página del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
www.sgm.gob.mx:	Página del Servicio Geológico Mexicano
www.cna.gob.mx:	Página de la Comisión Nacional del Agua
www.geologia.unam.mx:	Página del Instituto de Geología de la UNAM
www.igepgcu.unam.mx:	Página del Instituto de Geofísica de la UNAM
www.smn.cna.gob.mx:	Página del Servicio Meteorológico Nacional
www.agua.uji.es:	Página del grupo de investigación de recursos hídricos adscrito al Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (IUPA) de la Universidad Jaume I. de Castellón, España
www.aguas.igme.es:	Página de la Dirección de Hidrogeología y aguas subterráneas del Instituto Geológico y Minero de España
www.fao.org:	Página de Food and Agriculture Organization of the United Nations
www.water.usgs.gov:	Página del Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norte América

NORMAS OFICIALES MEXICANAS

NOM-014-CONAGUA-2003
 NOM-015-CONAGUA
 NOM-003-SEMARNAT
 NOM-127-SSA1