



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

**OPTIMIZACIÓN DE LOS POZOS PROFUNDOS DE AGUA EN LA
CIUDAD DE MÉXICO,
PARA SU APROVECHAMIENTO EFICIENTE Y SUSTENTABLE.**

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

PRESENTA:

VELÁZQUEZ TREJO SERGIO ARMANDO

TUTOR PRINCIPAL
DR JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS, INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO. MARZO 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

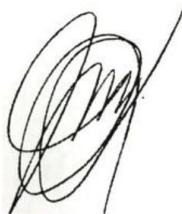
JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Aguillón Martínez Javier Eduardo.
Secretario: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia.
Vocal: Dr. Fernández Zayas José Luis.
1 er Suplente: Dr. Solís Ávila Juan Carlos.
2 do Suplente: M.I. Jiménez Bernal Jorge Huescani.

Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS



FIRMA

CONTENIDO

Agradecimientos	6
Introducción	7
Objetivo.....	8
Capítulo I. El agua como fuente vital para la vida y la industria.	9
1.1. El agua y su importancia.....	9
1.1.1. La naturaleza del agua.	9
1.1.2. La importancia del agua.....	11
1.2. Tipos y ubicación del agua en el Mundo.	14
1.2.1. Tipos de Agua en el Mundo.	14
1.2.1.1. Clasificación por procedencia.....	14
1.2.1.1.1. Agua fósil	14
1.2.1.1.2 Agua subterránea.....	14
1.2.1.1.3. Agua superficial	15
1.2.1.2. Clasificación por características fisicoquímicas.....	15
1.2.1.2.1. Agua destilada.....	15
1.2.1.2.2. Agua dulce	15
1.2.1.2.3. Agua salada	16
1.2.1.2.4. Agua salobre.....	16
1.2.1.2.5. Agua dura.....	16
1.2.1.2.6. Agua blanda.....	16
1.2.1.3. Clasificación por Usos	16
1.2.1.3.1. Aguas residuales, negras o servidas	16
1.2.1.3.2. Aguas claras o aguas de primer uso	17
1.2.1.3.3. Agua estancada.....	17
1.2.1.3.4. Agua potable salubre	17
1.2.1.3.5. Agua potable.....	17
1.2.2. Ubicación del agua en el mundo.	18
1.3. El agua en México.	19
1.3.1. Distribución y obtención del agua en México.	19
1.3.2. Tipos de agua en México.	21
1.3.3. Acuíferos en México	21
1.3.4. Situación actual del agua en México.....	22
1.3.4.1. Calidad del agua en México.....	23

1.4. Ciclo del agua en la Ciudad de México.	24
1.5. Usos del agua en México y en el Mundo.....	27
1.6. Disponibilidad actual de agua potable.....	27
1.6.1. ¿Qué es el agua potable?	28
1.6.2. Sobre explotación de los acuíferos.....	29
1.7. Acciones y alternativas implementadas en la actualidad para el ahorro y mejor aprovechamiento del agua.	30
Capítulo II. “Valle de México”: El acuífero principal de la Ciudad de México.....	32
2.1. Hidrología en el país y en la CDMX.	32
2.1.1. Aguas superficiales.	35
2.1.2. Aguas subterráneas.	36
2.2. Acuífero de la CDMX.....	38
2.2.1. Características físicas e hidrogeológicas de la Cuenca del Valle de México.....	40
2.2.2. Antecedentes del acuífero del Valle de México.....	43
2.3. Características Químicas del Acuífero.....	46
2.3.1. Calidad del agua según el indicador <i>Demanda Química de Oxígeno (DQO)</i>	47
2.3.2. Calidad de agua según indicador <i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)</i>	48
2.3.3. Calidad del agua según indicador <i>Sólidos Suspendidos Totales (SST)</i>	48
2.4. Aportaciones y recargas al acuífero de “Valle de México”	49
2.5. Estado actual del suministro de agua potable y del acuífero en la Ciudad de México.....	52
2.5.1. El acuífero y su explotación.....	53
Capítulo III. Explotación de pozos profundos de agua en el Valle de México.....	56
3.1. Problemas de la sobreexplotación del acuífero de la CDMX.	56
3.1.1. Descenso de los niveles piezométricos.	57
3.1.2. Compartimentación de acuíferos.	57
3.1.3. Aumento de los costos de explotación.	57
3.1.4. Deterioro de la calidad del agua.....	58
3.1.5. Inducción de hundimientos y colapsos.....	58
3.2. Tipos de pozos de agua.	60
3.2.1. Pozos Someros.	61

3.2.2. Pozos Perforados.	62
3.2.3. Pozos Hincados.	63
3.2.4. Pozos Excavados.....	63
3.2.5. Pozos Taladrados.	64
3.3. Pozos profundos de agua.	64
3.3.1. Exploración de un pozo profundo de agua.	67
3.3.2. Perforación de un pozo profundo de agua.	68
3.3.3. Terminación de un pozo profundo de agua.....	70
3.3.4. Explotación de un pozo profundo de agua.....	73
3.4. Ventajas y desventajas de los pozos profundos de agua.	74
3.4.1. Ventajas.	74
3.4.2. Desventajas.	76
3.5. Análisis de un pozo profundo de agua.	77
3.6. Pozos de agua en la CDMX.	83
Capítulo IV. Los pozos profundos de agua en la CDMX y sus altas temperaturas.	87
4.1. Análisis de la optimización de los pozos profundos de agua.....	87
4.2. La actividad geotérmica en México.	90
4.2.1. Pozos con muy baja temperatura.....	92
4.2.2. Pozos con baja temperatura.	92
4.2.3. Pozos de mediana temperatura.	93
4.3. ¿Pozos geotérmicos en la Ciudad de México?	94
4.4. Pozos con altas temperaturas en la CDMX.....	96
4.5. Aprovechamiento termodinámico de los pozos profundos de agua. ..	98
4.5.1. Aplicaciones para pozos geotérmicos con baja entalpía.....	99
4.5.1.1. Colectores horizontales enterrados.....	100
4.5.1.2. Sondas geotérmicas.....	101
4.5.1.3. Cimientos geotérmicos.	102
4.5.2. Uso de la energía geotérmica obtenida del Volcán Popocatépetl.	103
4.5.3. Aplicaciones para los pozos profundos de agua en la Ciudad de México.....	105
4.6. Sustentabilidad de los pozos profundos de agua en la CDMX.	108
Conclusiones y recomendaciones.	112
<i>Bibliografía</i>	121

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al programa SENER-CONACYT por la beca otorgada a lo largo de mis estudios de maestría, sin su vital apoyo este logro no hubiera sido posible.

Al Dr. José Luis Fernández Zayas por su gran apoyo, consejo y paciencia para la realización de este proyecto.

A todos mis maestros de posgrado, que sin su vital enseñanza y apoyo, este proyecto no hubiera sido posible.

A mis padres y a mi esposa que con sus consejos ayudaron a la culminación de este paso tan importante en mi vida.

Introducción

Actualmente en la Ciudad de México, se tiene un grave problema de desabasto de agua potable para el consumo doméstico, en especial en la delegación Iztapalapa que es una de las delegaciones más grandes y sobrepobladas; por lo que se busca implementar una serie de alternativas para abastecerla.

Una de estas alternativas, la cual será el caso de estudio de este proyecto, es la perforación de pozos de agua profundos que según la literatura consultada y los datos que proporciona la CONAGUA los pozos son de alrededor de 2,000 [m] de profundidad, cuyos datos fueron tomados de los dos pozos que se tienen perforados actualmente con “éxito” (Santa Catarina 3A y San Lorenzo Tezonco) de los que se tiene poca información debido a que no se cuenta con una correcta planeación o caracterización de este acuífero descubierto a estas profundidades.

Por lo que para caracterizar este acuífero se utilizarán técnicas usadas en la caracterización de yacimientos de petróleo con excepción de la exploración Sísmica, la cual no puede utilizarse para este tipo de fluidos, ya que una de las características del agua con dicha exploración, es que las ondas P se pierden al momento de encontrar este fluido en el subsuelo, además de que la respuesta de ésta es para volúmenes muy grandes de fluidos o de roca y para el caso de los acuíferos son solo pequeños volúmenes; por lo que se deben usar métodos eléctricos.

Finalmente, el agua que se ha obtenido de estos dos pozos tiene una temperatura mayor a la obtenida en el acuífero superficial, en donde se encuentran temperaturas del orden de 20° C mientras que en el nuevo acuífero se tienen temperaturas del orden de 70°C o incluso más. Dicha temperatura no es utilizada de manera adecuada, por lo que se busca implementar algún método para aprovechar esta energía y así poder crear energía eléctrica, en un futuro.

Uno de los métodos con los que se busca aprovechar de una manera sustentable esta energía es mediante el uso de la diferencia de temperaturas como en una termoeléctrica; existe un dispositivo en el mercado cuya función consta de introducir agua caliente de un extremo y del otro, agua fría con una diferencia de temperaturas de más o menos 50 grados lo que logra generar aproximadamente 2.5 [W] cada 10 [cm] de la tubería. Pero existe el problema de que este dispositivo está diseñado para uso doméstico lo cual se puede usar como referencia para su implementación en estos pozos profundos de agua.

Objetivo

Conocer la caracterización del acuífero “Valle de México” y con ello poder realizar una correcta selección de técnicas petroleras para la perforación y extracción de agua de pozos profundos, así como la implementación de algún método para el aprovechamiento de las altas temperaturas del agua proveniente de estos pozos, basándose en los pozos “Santa Catarina 3A” y “San Lorenzo Tezonco” actualmente en producción en la Ciudad de México.

Capítulo I. El agua como fuente vital para la vida y la industria.

El agua es uno de los recursos naturales más importantes en el mundo y en especial para cualquier ser vivo sobre el planeta Tierra, dicho recurso la podemos encontrar en todas partes, sin embargo, en diferentes proporciones, y así como la importancia de este recurso radica en la necesidad para la vida, también es necesario en las industrias, la investigación y, en especial, para la generación de energía.

La importancia de este tema radica en que prácticamente todo ser viviente en el mundo necesita agua para vivir, además de que ésta se encuentra en todas partes y en diferentes cantidades. Así mismo, este recurso natural es muy importante para la industria, y en especial para la generación de energía.

Por esto y por más razones que el agua debe de tener una gran importancia en la investigación y en la prioridad de toda persona en el planeta.

1.1. El agua y su importancia.

1.1.1. La naturaleza del agua.

Uno se preguntaría, ¿cómo algo tan simple como son dos átomos de Hidrógeno (H) y uno de Oxígeno (O) pueden llegar a convertirse en algo tan importante para la vida y la industria?

Esta pregunta se resuelve al considerar que es el componente más abundante en los medios orgánicos. Los seres vivos contienen en promedio un 70% de agua, sin embargo, no todos tienen la misma cantidad. Los vegetales tienen más agua que los animales; y ciertos tejidos como, por ejemplo, el sistema nervioso tiene un 90% de agua.

Por otro lado, cualquier sector industrial utiliza este recurso para la generación de sus productos o materiales. En temas energéticos, por ejemplo, en la energía nuclear, este recurso se utiliza para el enfriamiento del reactor ya que si este no se enfría puede causar accidentes como el sucedido en Chernóbil.

Es así que nos damos cuenta, que el agua no es de uso particularmente para la sobrevivencia del ser vivo, también lo es para las industrias que nos permiten tener ropa, calzado, automóviles, etc.

Pero, ¿cómo se forma el agua?, la explicación es más sencilla de lo que parece. Los átomos de hidrógeno y oxígeno en la molécula contienen cargas opuestas, moléculas de agua vecinas se atraen entre sí. Esta estructura permite que muchas moléculas iguales se unan con gran facilidad, formando enormes cadenas, las cuales constituyen el líquido que da la vida a nuestro planeta; asimismo su composición y estructura molecular son responsables de las propiedades fisicoquímicas que la distinguen de otras sustancias.

Es importante mencionar los estados físicos en los que podemos encontrar el agua: sólido, líquido y gaseoso, debido a que existen muchos estudios en los cuales se menciona que este recurso está por acabarse, sin embargo, debemos considerar que debido a las diferentes formas en las que se encuentra, en algunos casos resulta más complicado el acceso.

El agua que era fácil de obtener ya está escaseando, no obstante, el agua de los mares sigue siendo suficiente, sin embargo, no es agua consumible para el ser humano.

El volumen de agua en nuestro planeta se estima en unos 1 460 millones de kilómetros cúbicos (km³). Un km³ son mil millones de metros cúbicos, es decir, aproximadamente toda el agua que llega a la Ciudad de México durante nueve horas.

El 94% del volumen total del agua existente en la Tierra está en los mares y océanos; 4% dentro de la corteza terrestre, hasta una profundidad de 5 km. El 2% restante lo podemos encontrar en los glaciares, nieves eternas, en lagos, humedad superficial, vapor atmosférico y ríos.

Sin embargo, los porcentajes y medidas que se muestran en la siguiente tabla son cifras que nos ayudan a tener una idea de la magnitud del recurso. Los científicos que se dedican al estudio de este recurso consideran que sus cálculos fácilmente tienen un error de entre 10 a 15% o más; lo anterior debido, principalmente, a que las aguas están en continuo movimiento: se evaporan, se condensan, se filtran por la tierra o son arrastradas por los ríos al mar, los hielos de los polos se rompen, migran y se funden.

En los océanos y los mares	1 370 000 000	km ³
En la corteza terrestre	60 000 000	"
En los glaciares y nieves perpetuas	29 170 000	"
En los lagos	750 000	"
En la humedad del suelo	65 000	"
En el vapor atmosférico	14 000	"
En los ríos	1 000	"
TOTAL	1 460 000 000	km³

Tabla 1. Volumen de agua en el Planeta.

1.1.2. La importancia del agua.

Como se mencionó en el apartado anterior, el agua es un recurso muy abundante en el mundo, sin embargo, solo el 1% es agua potable que es la que utilizamos los seres humanos para consumo y utilización en la industria.

Pese a que el agua de lluvia puede ser reutilizable para actividades que no requieren de agua potable, no disponemos de forma gratuita e ilimitada de este recurso. La Tierra cada vez está más caliente debido a la sobrepoblación y los gases de efecto invernadero. Las sequías van creciendo en zonas que antes contaban con grandes ríos o pantanos, y lo complicado que resulta poder cultivar y regar la tierra se está convirtiendo en el principal problema de hambre a nivel mundial.

Como se ha dicho anteriormente, el 70 % del cuerpo humano es agua, por lo tanto, el ser humano no puede estar más de una semana sin beberla ya que trae grandes consecuencias a nuestra salud.

Se conocen casos de personas que han naufragado en una isla desierta, rodeadas de agua por todas partes, pero acaban muriendo de sed; debido a que beber agua salada solo deteriora tu estado, ya que el cuerpo intentará corregir el exceso de sal añadiendo más agua para diluirla, por lo que nos el cuerpo se deshidrata con mayor rapidez.

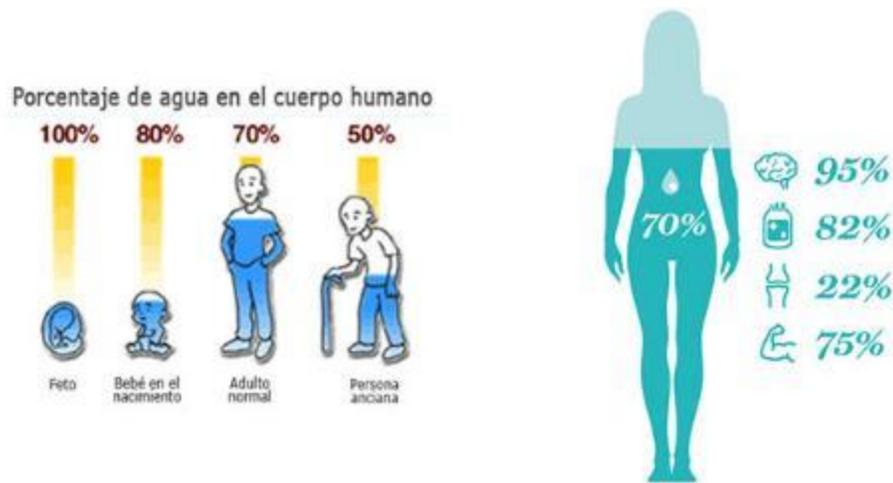


Figura 1. Porcentaje de agua en el cuerpo humano.¹

Otro aspecto curioso del por qué es importante el agua, es que no sólo puede disolver casi cualquier cosa, sino que también es uno de los pocos recursos que pueden existir como sólido, líquido y gas dentro de un rango relativamente estrecho de temperaturas.

Así mismo, toda la vida en la Tierra utiliza una membrana que separa el organismo de su entorno. Para mantenerse con vida, el organismo toma materias importantes

¹ Tu blog del agua. 28/06/2018 Salud gracias al agua. Recuperado de: <https://blogdeagua.es/salud-gracias-al-agua/>

para asimilar la energía, mientras expulsa todas las sustancias tóxicas tales como productos de desecho.

En este sentido, el agua es esencial simplemente porque es un líquido a temperaturas similares a la Tierra. Debido a que fluye, el agua proporciona una solución eficiente para transferir sustancias a partir de una célula con el medio ambiente lo cual genera energía.

Incluso existe una teoría de cómo surgió la vida en la Tierra, llamada "Panspermia", la cual postula que cometas helados se estrellaron contra la Tierra, aportando pequeñas moléculas orgánicas que formaban los precursores de la vida. Pero viajar a través del espacio es un duro viaje, con niveles de radiación que normalmente degradan las delicadas moléculas. Sin embargo, en su forma sólida, el agua podría haber proporcionado una manera de proteger a las moléculas de la radiación.

Otros aspectos que marcan la importancia de este recurso son, que la sociedad recurre al agua para generar y mantener el crecimiento económico, a través de actividades como la agricultura, la pesca, la producción de energía, la industria, el transporte y el turismo. El agua es un elemento importante a la hora de decidir dónde establecerse y cómo utilizar los terrenos. También puede ser fuente de conflictos geopolíticos, en particular cuando escasea.

Nuestro propio bienestar exige no sólo agua potable para beberla, sino también agua limpia para la higiene y el saneamiento. También se utiliza el agua en actividades recreativas, como la pesca, o el mero disfrute de la belleza natural, la cual se obtiene de costas, ríos y lagos.

El agua es esencial para los ecosistemas naturales y la regulación del clima mediante los ciclos que tiene este recurso en el planeta. Asimismo, como se mencionó anteriormente el calentamiento global está afectando en gran medida la disponibilidad de este recurso, por lo que se espera que se reduzcan las capacidades de refrigeración de la industria y en las centrales eléctricas.

El agua es tanto un servicio de aprovisionamiento (un material básico) como un servicio de regulación, que regula el clima y la meteorología, permitiendo el correcto funcionamiento de nuestro planeta. Y aunque la humanidad conoce desde hace mucho tiempo su dependencia al agua, aún no se tiene la suficiente conciencia ni educación al ahorro de este recurso, por lo que es de vital importancia concientizar a la población sobre el futuro de este recurso, ya que, sin agua no puede haber vida.

1.2. Tipos y ubicación del agua en el Mundo.

1.2.1. Tipos de Agua en el Mundo.

El agua como hemos venido observando se encuentra en diversas formas, pero existen clasificaciones más específicas de cómo podemos encontrarla en el mundo. Estas clasificaciones se dividen en tres grandes rubros:

- Por procedencia
- Por características fisicoquímicas
- Por usos

1.2.1.1. Clasificación por procedencia.

1.2.1.1.1. Agua fósil

Se le conoce como agua fósil, al agua subterránea que ha permanecido por miles o millones de años retenida en las rocas sedimentarias desde su formación.

1.2.1.1.2 Agua subterránea

Agua que ocupa la zona saturada del subsuelo, la cual puede estar estancada o en circulación, moviéndose de zonas elevadas a zonas bajas. El subsuelo mexicano aloja un gran número de acuíferos; se han definido 653 para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales.



Figura 2. Representación del agua subterránea. "Cenote subterráneo en Yucatán".²

1.2.1.1.3. Agua superficial

Toda agua natural abierta a la atmósfera, en donde se incluyen los ríos, lagos, corrientes, océanos, mares y humedales. Fluye o se almacena en la superficie de la Tierra.

1.2.1.2. Clasificación por características fisicoquímicas.

1.2.1.2.1. Agua destilada

Es aquella en la que no se encuentra ninguna sal diluida, pues ha sido purificada o limpiada mediante destilación.

1.2.1.2.2. Agua dulce

Tiene una baja concentración de sales, generalmente es considerada como la adecuada para producir agua potable.



Figura 3. Representación del agua dulce.³

² Foto tomada del cenote "Tak be ha", ubicado en Tulum, Quintana Roo.

³ Lago ubicado en Ottawa, Canadá.

1.2.1.2.3. Agua salada

Agua en la que la concentración de sales minerales es relativamente alta (35 gr/l). Se puede encontrar en los océanos y mares de la Tierra.

1.2.1.2.4. Agua salobre

Tiene más sales disueltas que el agua dulce, pero menos que el agua de mar. Puede resultar de la mezcla de agua de mar con agua dulce, como ocurre en estuarios, deltas o en algunos acuíferos fósiles.

1.2.1.2.5. Agua dura

Es aquella que contiene cantidades relativamente grandes de sales disueltas, principalmente de calcio y magnesio.

1.2.1.2.6. Agua blanda

Agua en la que se encuentran disueltas mínimas cantidades de sales, tiene menos de 0.5 partes por mil de sal disuelta.

1.2.1.3. Clasificación por Usos

1.2.1.3.1. Aguas residuales, negras o servidas

Se le llaman aguas residuales a aquellas que han sido contaminadas por diversos usos. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales, las primeras sólo provendrían del uso doméstico, mientras que las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales.

En todo caso, están constituidas por todas aquellas aguas que son transportadas por el drenaje e incluyen a veces, las aguas de lluvia y las infiltraciones de agua del terreno. Para cuantificar el grado de contaminación y poder establecer el sistema de tratamiento más adecuado, se utilizan varios parámetros expresados en la Norma Oficial Mexicana de la Secretaría de Salud.

1.2.1.3.2. Aguas claras o aguas de primer uso

Aquellas provenientes de distintas fuentes naturales y de almacenamientos artificiales, que no han sido usadas previamente.

1.2.1.3.3. Agua estancada

Es el agua que queda atrapada en la superficie del suelo porque está saturado o porque es impermeable y no hay suficiente desnivel para que escurra. Como dato curioso, el agua estancada tiene un típico olor a “podrido”, debido a la emisión de gases como sulfuros, metano e hidrógeno, producto de la respiración anaerobia de los microorganismos presentes en este tipo de agua.



Figura 4. Representación de agua estancada

1.2.1.3.4. Agua potable salubre

Es el agua cuyas características microbianas, químicas y físicas cumplen con las pautas de la Organización Mundial de la Salud o los patrones nacionales sobre la calidad del agua potable.

1.2.1.3.5. Agua potable

Definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la UNICEF como el agua utilizada para los fines domésticos y la higiene personal, así como para beber y cocinar. Se considera que se tiene acceso al agua potable, cuando la fuente de ésta se encuentra a menos de 1 kilómetro de distancia del lugar de utilización. Y que existe un acceso óptimo cuando se dispone de al menos 100 litros diarios para cada miembro de la familia.

1.2.2. Ubicación del agua en el mundo.

La ubicación y la distribución del agua, y en especial del agua potable, alrededor del mundo es muy importante, ya que ésta se encuentra de manera desigual. Como por ejemplo, Brasil, Canadá o Colombia, son países muy ricos en agua; mientras que otros como Jordania o Malta tienen una escasez crónica de agua potable.

Asimismo, algunos países que son ricos en agua no tienen una buena distribución dentro de su territorio, como por ejemplo Colombia es rico en agua, pero cuenta con algunas zonas del país en las cuales hay bastante escasez de agua; y aunque las nuevas tecnologías e infraestructuras facilitan su distribución, no siempre se pueden implementar debido a cuestiones técnicas o por falta de presupuesto.

Por otra parte, el avance del cambio climático ha tenido un mayor impacto en la ubicación de este recurso ya que gracias a este fenómeno, han aumentado las sequías y olas de calor. Eso, sin contar con que las inundaciones, huracanes y tsunamis lo cual afecta al ciclo normal del agua y por lo tanto a la ubicación de este recurso.

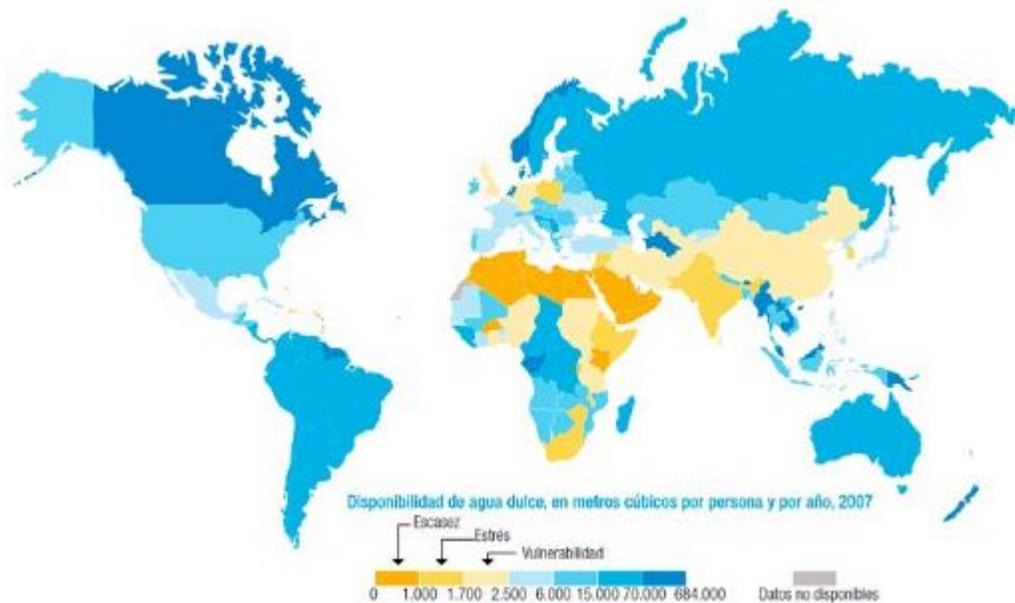


Figura 5. Distribución del agua potable en el Mundo. 2017. Consejo mundial del Agua.

1.3. El agua en México.

México tiene una extensión territorial de 1.96 millones de km² de superficie compuesto por 32 entidades federativas y 2457 municipios, localidades y alcaldías, ocupando el lugar número 14 de extensión territorial a nivel mundial. Más de la mitad de este país, que involucra norte y centro, está compuesto por zonas áridas y semiáridas, donde la cantidad aproximada fluctúa entre 500 a 700 mm de lluvia al año; mientras que, para el área sur, que es zona húmeda y que cuenta con grandes extensiones de selva, presenta cantidades superiores a 2000 mm de lluvia al año.

De acuerdo con el censo 2017 que informó el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en México viven aproximadamente 123.5 millones de personas; alrededor del 65% de esta población dispone de agua en servicios como tubería, sistemas de riego, uso sanitario y drenaje.

La Comisión Nacional del Agua (Conagua), es el organismo gubernamental que tiene la responsabilidad y compromiso de administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales en México, donde a través de regiones hidrológicas administrativas a lo largo de la República Mexicana.

1.3.1. Distribución y obtención del agua en México.

El agua en México, en especial la potable, tiene una muy mala distribución a lo largo del país, debido no sólo a la escasez de este recurso sino también a las pérdidas por fugas, mala infraestructura o tomas clandestinas, y la inequidad en la distribución junto con la demanda del recurso que incrementa proporcionalmente el crecimiento de la población.

Las entidades que presentan el menor porcentaje de acceso al agua entubada son: Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Veracruz y Puebla; mientras que los Estados con mayor acceso son Aguascalientes, Colima, Ciudad de México, Nuevo León y Jalisco.

La distribución y disponibilidad del agua se puede dividir de la siguiente forma: de la precipitación pluvial anual total de México (1,519 km³ de agua al año), el 70% se evapora y el 27% escurre formando los cuerpos de agua superficiales (410 km³/año), y el 3% se infiltra en el subsuelo, formando las aguas subterráneas o acuíferos (53 km³/año).

Los cuerpos de agua superficiales del país están formados por 60 lagos naturales y 137 lagunas costeras. Asimismo, contamos con 4,500 presas.

México no está considerado como un país con escasez de agua, si comparamos el total de su lluvia durante el año con el de otros países. Sin embargo, cuando tomamos en cuenta la distribución del agua en las diferentes regiones y la distribución temporal en las distintas épocas del año, la realidad cambia completamente.

Es por esto, que México tiene incluso que exportar agua de otros países, las exportaciones para el año 2017 fueron de 70,000 millones metros cúbicos, entre agua potable y agua contenida en alimentos cuyo principal exportador es Estados Unidos.

Por otro lado, en el 20% del territorio sur del país se produce el 80% del escurrimiento, habita el 24% de la población y se genera el 23% del Producto Interno Bruto (PIB), mientras que en el centro y el norte del país (80% del territorio) el escurrimiento es únicamente del 20%, pero allí habita el 76% de la población y se genera el 77% del PIB.

Es decir, en donde se concentran la población y la actividad económica, el agua escasea fuertemente, mientras que en donde abunda el agua, la población y el desarrollo no constituyen una presión.

1.3.2. Tipos de agua en México.

Es importante mencionar, el tipo de agua tenemos disponible en el país, que a pesar de estar rodeados por dos océanos, o de grandes cadenas montañosas, esto no nos hace ricos en agua, o al menos no en agua para el consumo humano.

Por lo que, según datos de la Conagua, el total del agua dulce que tiene el país, es de 446 mil 777 millones de metros cúbicos, de los cuales, el 67% se encuentran en la región sureste, a la vez que el resto del territorio nacional sólo posee el 33% de este líquido.

La Conagua, explica que el agua renovable o agua dulce, que nutre los 633 mil kilómetros de longitud de los ríos mexicanos, las 731 cuencas del territorio y los 653 acuíferos, de los cuales se obtiene el 39% del agua que se usa en el país; cuya cantidad es la máxima de líquido que es posible explotar sin modificar el ecosistema.

En términos generales, a nivel nacional de acuerdo con cifras de la Conagua, el agua renovable per cápita disponible es de tres mil 692 metros cúbicos por habitante al año.

1.3.3. Acuíferos en México

Como se pudo observar, una de las clasificaciones de los tipos de agua son los acuíferos, los cuales son una de las principales fuentes de agua potable del país, además de ser uno de los principales objetivos de este trabajo, conocer a fondo el acuífero principal de la Ciudad de México (CDMX).

En el país se tienen 653 acuíferos, distribuidos en las 13 Regiones Hidrológico-Administrativas, y su importancia radica en que éstos ayudan al crecimiento socioeconómico del país, ya que al depositarse pueden ser utilizados en cualquier parte del año. Además, cerca del 37% del agua potable que se utiliza proviene de este tipo de agua. Es decir, 30 mil 374 millones de metros cúbicos al año aproximadamente.

Sin embargo, a pesar de su importancia, hay ciertos acuíferos que sufren de sobreexplotación, por lo que la Conagua creó la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, que marcó delimitación y estudio de los acuíferos para dar a conocer de manera oficial la disponibilidad media anual de éstos.

Y aunque esta agua no sea visible todo el tiempo, la realidad es que su uso en el riego agrícola, por ejemplo, es una piedra angular en el desarrollo de muchas regiones en todo México.



Figura 6. Distribución de los acuíferos en México. CONAGUA

1.3.4. Situación actual del agua en México.

Existe un reporte realizado por el Foro Económico Mundial en donde se establece que México presenta un consumo de agua de 366 litros diarios por habitante en promedio en el año 2017. Dicho valor lo coloca en los primeros lugares de los países con mayor consumo de este recurso.

Los siete países que encabezan la lista en relación con el consumo de agua por habitante son:

País	Litros/hab
Estados Unidos	575
Australia	493
Italia	386
Japón	374
México	366
España	366
Noruega	301

Tabla 2. Países con mayor consumo de agua por habitante.

Según este reporte, la ciudad de México ha crecido a un número por encima de la capacidad de sus sistemas de agua y saneamiento lo cual indica que menos del 20% de la población posee acceso al agua potable.

Sin embargo, este 20% se refiere a tener acceso al agua potable directamente de algún acuífero o una fuente de agua superficial, cuyo porcentaje es el apropiado, pero el agua que en su mayor parte consume la población de la CDMX es proveniente de ríos cercanos y plantas potabilizadoras, aumentando este porcentaje.

1.3.4.1. Calidad del agua en México

La calidad de agua es otro de los grandes problemas que actualmente tiene el país y en especial la Ciudad de México. Una vez que el agua ha sido utilizada se regresa ya contaminada a la naturaleza, asimismo es usada como medio para transportar los desechos por lo que casi todos los cuerpos de agua superficiales importantes del país están contaminados.

Los contaminantes principales son plaguicidas y fertilizantes provenientes de la agricultura; metales pesados y sustancias tóxicas de la industria; materia orgánica y contaminación bacteriológica de las aguas negras domésticas y tóxicos de las fábricas conectadas al alcantarillado. Las cuencas del Panuco, Lerma, San Juan y Balsas son las que reciben la mayor cantidad de descargas residuales, los cuales terminan en los océanos.

México tiene la capacidad para tratar 31% de las aguas residuales, sin embargo, a causa de la ineficiencia de los sistemas de tratamiento sólo se trata el 20% de éstas.

Un dato importante es que se estima que la industria produce una contaminación equivalente a lo que generarían 95 millones de personas. Siendo la industria más contaminante la azucarera, seguida por la química y la petrolera.



Figura 7. Derrame de hidrocarburos en el río Grijalva. CONAGUA

1.4. Ciclo del agua en la Ciudad de México.

Algo tan básico como el ciclo del agua es muy importante para conocer la situación en la que se encuentra el país, y por supuesto la Ciudad de México, el territorio tiene un ciclo del agua muy particular al que normalmente se conoce.

El ciclo del agua normalmente conocido no se inicia en algún lugar en específico, sin embargo, para fines educativos se seleccionan los océanos como inicio de este ciclo. El sol, que dirige el ciclo del agua, calienta el agua de los océanos, la cual sube hacia la atmósfera como vapor de agua. Corrientes ascendentes de aire llevan el vapor a las capas superiores de la atmósfera, donde la menor temperatura causa que el vapor de agua se condense y forme las nubes. Las corrientes de aire mueven las nubes sobre el globo, las partículas de nube colisionan, crecen y caen en forma de precipitación.

Parte de esta precipitación cae en forma de nieve, que se llega a acumular en capas de hielo y en los glaciares. En los climas más cálidos, la nieve acumulada se derrite cuando llega la primavera. La nieve derretida corre sobre la superficie del terreno como agua de deshielo. La mayor parte de la precipitación cae en los océanos o sobre la tierra donde, debido a la gravedad, corre sobre la superficie. Una parte de este escurrimiento llega a los ríos; en la corriente de los ríos el agua se transporta de vuelta a los océanos y de igual forma el agua de escurrimiento se filtra y se acumula formando los acuíferos.

El agua subterránea que se encuentra a poca profundidad es tomada por las raíces de las plantas y transpirada a través de la superficie de las hojas, regresando a la atmósfera lo cual completa el ciclo del agua.

Ahora bien, en la CDMX este ciclo es distinto, debido a que no se tienen grandes hectáreas en donde se pueda filtrar el agua y recargar los acuíferos, además de tener un exceso de población en un área pequeña, la cual es definida como *Cuenca del Valle de México*.

En donde el desperdicio de agua, y por lo tanto la alteración del ciclo del agua, lo causan las fugas de la red hidráulica y, según las autoridades de la Conagua, alcanza un 38%.

Asimismo, el cambio climático ha traído alteraciones a nivel local o regional en los ecosistemas y por lo tanto en el ciclo del agua. Por ejemplo, el desvío de cauces de ríos debido a grandes obras de infraestructura ha destruido ecosistemas enteros, como los manglares y muchos humedales costeros. La alteración de los ecosistemas ocurrida por la deforestación genera impactos severos en los procesos del ciclo del agua, ya que los árboles y las plantas ayudan a fijar el suelo y a retener el agua.

En cuanto al ciclo del agua en la CDMX comienza con la precipitación del agua de las nubes, la cual una parte pasa a recargar el acuífero y otra parte se va al drenaje, esta última, se lleva la mayor parte de la precipitación debido a la falta de vegetación, la cual ayuda con la recarga natural del acuífero.

En cuanto al acuífero se tiene una recarga adicional de agua superficial que llega a la CDMX, dando después la extracción de agua del acuífero en donde se pierde una gran cantidad de lo que se extrae por fugas que se tienen en las conexiones y las tuberías. El agua extraída se une con el agua proveniente de los Ríos Lerma y Cutzamala para abastecer a la población, después de utilizar el agua, es transportada al drenaje en donde se une con el agua proveniente de las industrias cercanas y de la lluvia que después son tratadas y utilizadas como agua de riego o mandadas a los ríos para su reintegración, con la naturaleza lo cual completa el ciclo del agua en la CDMX.

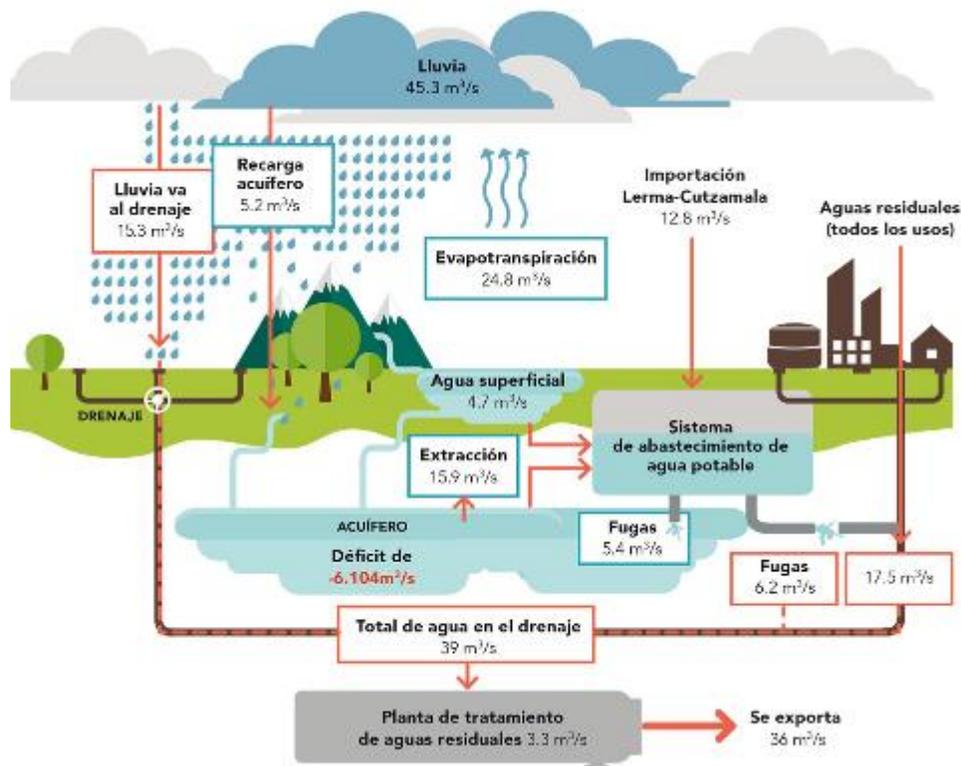


Figura 8. Ciclo del agua en la Ciudad de México. USOS DEL AGUA EN MÉXICO.

1.5. Usos del agua en México y en el Mundo.

Es de suma importancia conocer el uso que se le da al agua, ya que éste es esencial para conocer el desarrollo económico y social de cada país.

Del agua disponible que hay en México, el 16% se utiliza con fines consuntivos (agua que no se puede volver a utilizar), el 63% es de origen superficial y 37% es subterráneo. De esta cantidad, el 83% se destina a la agricultura, el 12% a usos urbanos y el 5% a la industria.

Uno de los mayores problemas que se presenta, es la baja eficiencia del uso de este recurso. La agricultura desperdicia el 53% y en el consumo urbano se pierde el 40%. Es decir, que el 53% del agua utilizada en México se pierde por ineficiencia, tecnología e infraestructuras obsoletas e inadecuadas.

Sin embargo, en el país aún existen rezagos considerables en cuanto al suministro de agua potable y se estima que 13 millones de mexicanos no cuentan con este servicio. Por otro lado, 26 millones de los habitantes carecen de sistema de alcantarillado. Las diferencias entre el medio rural y urbano son muy agudas; en el campo el 36% de la población carece de agua potable y 69% de alcantarillado.

1.6. Disponibilidad actual de agua potable.

Estudios recientes, han arrojado que el agua con la que se dispone actualmente por habitante en México ha disminuido a casi la mitad en los últimos cuarenta años, es decir, de 11 mil a 4,900 m³ anuales; y si se mantiene dicha tendencia en aproximadamente 25 años, la cantidad descenderá a 2,500 m³ lo que podría provocar grandes problemas y conflictos en el país.

1.6.1. ¿Qué es el agua potable?

El agua potable es toda aquella que podemos consumir o beber sin que exista peligro para nuestra salud, es por esto, que este tipo de agua no debe de contener sustancias o microorganismos que puedan provocar alguna alteración o perjudicarnos.

Existen varias normas que regulan la calidad del agua para que sea catalogada como potable, en las cuales se establecen valores máximos y mínimos de los minerales o los diferentes iones que puede contener el agua potable.

Así mismo el pH del agua es importante, el cual debe de estar entre 6.5 y 9.5 para que sea catalogada como potable. Cabe recalcar que las normas especifican que el agua potable debe de pasar mínimo 5 controles de calidad, que son menos que a los que se someten el agua embotellada.

Aunado a estos requerimientos, también es importante conocer los usos que se le dieron al agua para después tratarla, de ser posible, ya que por ejemplo en zonas con una gran actividad agrícola, el agua encontrada en pozos cercanos tiene mayores concentraciones de nitratos y nitritos, además de compuestos fitosanitarios que superan lo permitido.

La razón radica en que se tiene un uso masivo de abonos, que debido a filtraciones y combinado con los microorganismos que se encuentran en la zona, son transformados en nitritos y luego son arrastrados por el agua de lluvia al nivel freático de los pozos.

Las causas de que el agua no sea potable son:

- Bacterias, virus;
- Minerales (en formas de partículas o disueltos), productos tóxicos;
- Depósitos o partículas en suspensión;
- Sustancias orgánicas:

- Radiactividad.

Y al observar el agua que se obtiene de algunos pozos en la Ciudad de México se pueden tener mediciones de algunos de estos componentes, lo que hace que el agua no sea potable y sólo pueda usarse como agua de riego.

En el siguiente capítulo se retomará más a fondo la calidad que tiene el agua en ciertas zonas de la CDMX.

1.6.2. Sobre explotación de los acuíferos.

En México el 60% del agua subterránea extraída se destina al riego de la superficie agrícola del país, y el 65% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene de los acuíferos, por lo tanto, es de vital importancia el análisis de estos acuíferos, ya que se obtiene más de la mitad del suministro para las principales actividades económicas del país.

Para mantener el tipo de vida urbano actual y el alto consumo de agua en la producción agrícola, al cierre de 2016 se tenían 105 acuíferos sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. Dentro de los que se encuentran en estado crítico están el del Valle de México, la Cuenca del Lerma, la Región de La Laguna y los pertenecientes a los estados de Aguascalientes, Sonora, Chihuahua, Baja California y Baja California Sur.

La sobreexplotación de acuíferos no solo presenta un problema para el ser humano, sino que también presenta graves consecuencias en la disponibilidad de manantiales, desaparición de lagos y humedales, merma de los ríos y alteración de los ecosistemas naturales con su flora y su fauna.

1.7. Acciones y alternativas implementadas en la actualidad para el ahorro y mejor aprovechamiento del agua.

Como se ha podido observar la disponibilidad de agua potable está siendo cada vez más limitada, y los usos que tiene van siendo mayores, por lo que es importante tomar una importante conciencia del cuidado del agua y por supuesto de una correcta administración de los acuíferos que se lleguen a descubrir o que se estén actualmente explotando, de tal modo que éstos no lleguen a ser sobreexplotados, lo cual, veremos más adelante es un serio problema en cuestiones de que no se extrae todo el líquido vital debido a su explotación irracional.

Debido a la importancia de esto, se han implementado varias acciones que han traído fabulosos resultados en ahorro o tratamientos del agua, los cuales deben de estar dentro de una política nacional del manejo sustentable del agua, en donde se deben incluir aspectos como:

- El uso urbano.

Hace falta aumentar la inversión para cubrir los rezagos y la demanda de la población futura en agua potable y alcantarillado. Asimismo, elevar el índice de aprovechamiento de la infraestructura para tratamiento de aguas residuales y construir más infraestructura, cuyos costos deben ser compartidos entre gubernamentales y particulares.

- El uso agrícola.

La producción de alimentos en el país necesita aumentar la superficie de riego y hacer más eficiente la actual. Lo cual requiere de gestión y tecnologías adecuadas e innovadoras que integren las múltiples causas y efectos de este problema.

- En el uso industrial.

Es necesario mejorar la tecnología de uso de agua en los procesos industriales con el fin de disminuir la demanda, así como garantizar que ésta sea tratada antes de ser devuelta a los cuerpos de agua naturales. La normatividad es abundante pero

el cumplimiento muy escaso por lo que se debe buscar un mayor cumplimiento de estas normas.

- En la gestión del agua.

Es indispensable contar con instituciones y con el marco legal y regulatorio adecuados para una gestión del agua, moderna, profesional, técnica y de alto nivel que mejore la calidad de los servicios; por lo que es necesario establecer medidas transparentes, realistas y justas para el cobro del agua.

Esto es en cuanto a la política del cuidado del agua, sin embargo, se han tomado medidas, aunque pequeñas pero significativas, como por ejemplo el cambio de escusados y mingitorios secos, o simplemente el hábito de cerrar la llave del agua mientras te enjabonas al bañarte; asimismo la construcción de captadores de agua de lluvia para su posterior uso como riego, condensadores que capturen la humedad del ambiente y lo conviertan en agua potable, entre muchas otras tecnologías o acciones.

Sin embargo, a pesar de existir en la actualidad muchas de ellas, aún se tiene que realizar una conciencia mayor sobre su cuidado, y sobre todo una inversión más fuerte en la actualización y sanación de las instalaciones de agua potable, sobre todo en México y por supuesto en el caso de estudio que es la Ciudad de México, que como se mencionó anteriormente se pierde casi la mitad de este líquido en las fugas que se tienen en las instalaciones.

Capítulo II. “Valle de México”: El acuífero principal de la Ciudad de México.

El Valle de México debido a su compleja geología ha proporcionado a lo largo de la historia abundantes recursos de agua a sus habitantes a pesar de la escasez de agua superficial, esto mediante acuíferos o manantiales ubicados en esta zona.

En este capítulo se describen brevemente las características físicas-químicas y la hidrogeología de la cuenca, especialmente de la porción sur, donde la presencia humana ha sido un factor importante desde la época de Tenochtitlán. La historia de la explotación del acuífero de la Ciudad de México y los problemas de hundimiento asociados a él se examinan brevemente, asimismo se estudia la disponibilidad de agua en el acuífero.

2.1. Hidrología en el país y en la CDMX.

Para entender mejor la importancia de este acuífero para la Ciudad de México es necesario entender un poco sobre la hidrología que se tiene en el país y con ello extrapolarlo y analizar lo que ocurre en la ciudad.

Comenzando con el ciclo hidrológico, que como ya se sabe, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de vapor, mientras que el resto escurre por corrientes y cuerpos de agua siguiendo la conformación del terreno, constituyendo las aguas superficiales; o bien se infiltra al subsuelo como agua subterránea, formando los acuíferos.

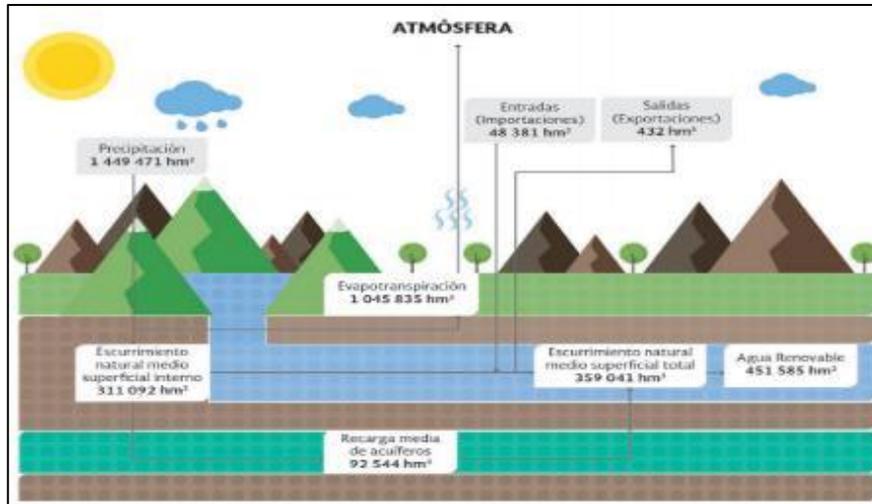


Figura 9. Ciclo hidrológico en México, 2017. CONAGUA.

Para propósitos de administración de las aguas nacionales, la Conagua ha definido 757 cuencas hidrológicas en total, pero sólo 649 se encuentran disponibles, las cuales son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de las aguas superficiales.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas que se muestran en la siguiente figura, que para efectos de administración se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).



Figura 10. Cuencas hidrológicas de México, 2017. CONAGUA.

Asimismo, la Conagua en 2017, contó con 3079 estaciones en operación para medir las variables climatológicas, entre ellas temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento. De éstas, 81 son observatorios que transmiten en tiempo real la información meteorológica. Las estaciones hidrométricas miden el caudal de agua de los ríos, así como la extracción por obra de toma de las presas; lo que nos ayuda a definir mejor las condiciones del ciclo hidrológico en el país.

Anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapora y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con los países vecinos, el país cuenta anualmente con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, es decir, el agua que es factible explotar anualmente en una región.

Este último valor dividido por la población de cada región se obtiene el valor de agua per cápita disponible por estado. Cuyo valor, entre más bajo, quiere decir que esa región se encuentra en un estado crítico o de escasez de agua. Como, por ejemplo:

- La Península de Baja California.
- Río Bravo.
- Lerma-Santiago-Pacífico
- Aguas del Valle de México,

Siento esta última región en donde se encuentra la Ciudad de México.

Región o cuenca hidrológica	Agua renovable (hectómetro cubico/año)
<i>Península de Baja California</i>	4858
<i>Noroeste</i>	8274
<i>Pacífico Norte</i>	26747
<i>Balsas</i>	21668
<i>Pacífico Sur</i>	30836
<i>Río Bravo</i>	12844
<i>Cuencas Centrales del Norte</i>	8024
<i>Lerma-Santiago-Pacífico</i>	35071
<i>Golfo Norte</i>	28655
<i>Golfo Centro</i>	94363
<i>Frontera Sur</i>	147195
<i>Península de Yucatán</i>	29647
<i>Aguas de Valle de México</i>	3401
Total	451585

Tabla 3. Agua renovable en México, 2017.

El agua renovable se debe analizar desde tres perspectivas:

- **Distribución temporal:** en México existen grandes variaciones del agua renovable a lo largo del año. La mayor parte de la lluvia ocurre en el verano, mientras que el resto del año es relativamente seco.
- **Distribución espacial:** en algunas regiones del país ocurre precipitación abundante y existe una baja densidad de población, mientras que en otras sucede lo contrario.
- **Área de análisis:** la problemática del agua y su atención es predominantemente de tipo local. Los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

2.1.1. Aguas superficiales.

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de aproximadamente 633 mil kilómetros de longitud, donde destacan 51 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional. Por su superficie destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por longitud destacan los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma y Nazas-Aguanaval pertenecen a la vertiente interior.



Figura 11. Aguas superficiales en México, 2017. CONAGUA.

2.1.2. Aguas subterráneas.

Como se ha mencionado anteriormente, México es un país rico en recursos naturales, entre ellos el agua. México se encuentra en el lugar 94 en términos de agua renovable per cápita, según datos de la ONU y en cuanto a consumo de agua el país presenta un consumo de 366 litros diarios por habitante ocupando el quinto lugar entre los países con mayor consumo siendo Estados Unidos el número uno con 575 litros por habitante.

Cabe destacar que a pesar de que se tiene el 96% del abastecimiento de agua en el país (96% urbana y 92% rural) este es muy ineficiente y no se tiene la distribución apropiada, además de que las mayores pérdidas de agua potable se tienen en este proceso como las tuberías, conexiones o transporte en general.

El agua subterránea aportó 34,385 millones de metros cúbicos en el 2017 para usos consuntivos (es decir, cuando existe diferencia entre el volumen extraído y el descargado, en contraposición a usos donde el volumen extraído y el descargado son iguales, como por ejemplo la generación hidroeléctrica). Esto representó el 39.1% del volumen total concesionado.

En función de la relación extracción/recarga se define si los acuíferos están o no sobreexplotados, pudiendo variar su condición de acuerdo a los estudios más actuales disponibles. A partir de 2001, el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106. Al cierre de 2017, se tenían 105 acuíferos sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres.

En la actualidad, según datos de CONAGUA y del Sistema de Aguas de la ciudad de México (SACMEX), en México se tienen 653 acuíferos distribuidos en todo el territorio, de los cuales 115 se encuentran sobreexplotados y uno de ellos es el acuífero que abastece a la Ciudad de México. De igual forma se tienen 32 acuíferos con intrusiones salinas, lo cual hace que el acuífero no sea apto para el consumo humano o incluso para la agricultura, estos datos nos ayudan a dimensionar la importancia que tiene el cuidado de estos acuíferos, ya que fácilmente pueden pasar de un estado sustentable a un sobreexplotado.

Aunque los 115 acuíferos sobreexplotados solo representan el 12% de los disponibles en el país; debido a la ubicación del resto de los acuíferos sería muy complicado y costoso traer agua desde otros estados a los lugares en donde se este recurso se agote, como es el caso de la CDMX.

En las siguientes imágenes podemos apreciar la disponibilidad, ubicación y estado de los acuíferos a lo largo del país, dándonos una mejor idea de la situación actual, no solo a nivel ciudad sino a nivel país.

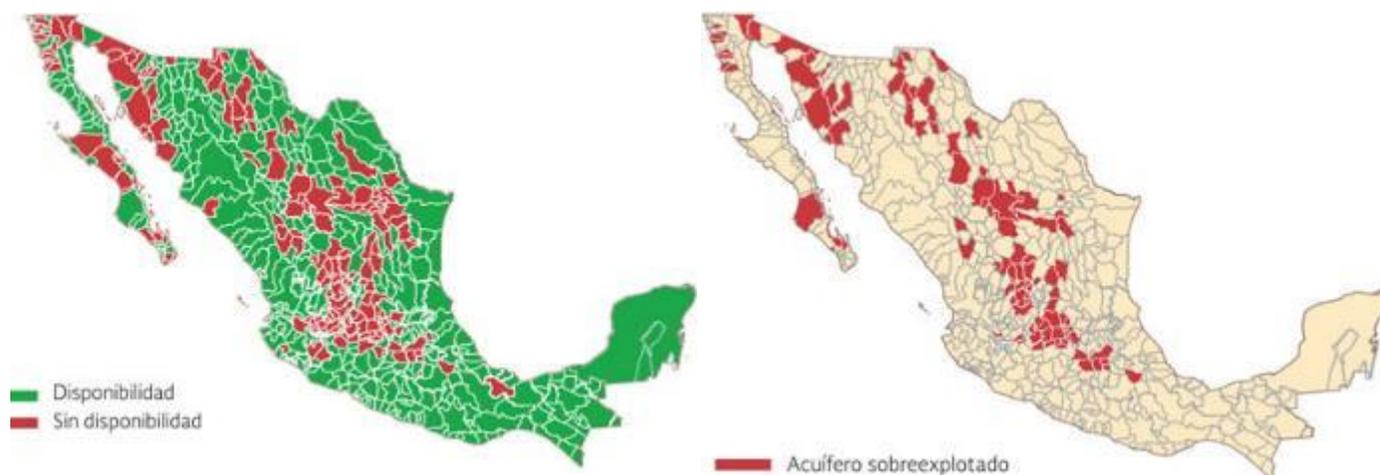


Figura 12. Disponibilidad y estado actual de los acuíferos en México, 2017. CONAGUA.

Al observar las imágenes anteriores podemos concluir que en la zona sur del país se tiene una gran disponibilidad de agua, sin embargo, la lejanía de estos acuíferos impide que el agua se transporte a zonas en donde este recurso es escaso, como los es la Ciudad de México, además de considerar el alto costo que esto implica. Por lo anterior, es de suma importancia revisar los diferentes escenarios para aprovechar y explotar mejor el acuífero del “Valle de México”, que revisaremos a lo largo de este trabajo.

2.2. Acuífero de la CDMX.

Bajo el Valle de México se encuentra uno de los acuíferos más importantes del país, tanto por su tamaño como por el destino de sus aguas, del cual se extraen alrededor de 45 m³/s mediante más de 100 pozos, tanto particulares como municipales, de los cuales solo se reponen 25 m³/s.

De acuerdo con su constitución y su funcionamiento hidrológico, el Valle se divide en tres subsistemas acuíferos: el granular de la zona metropolitana de la ciudad, que incluye la Formación Tarango de las lomas del poniente y los materiales granulares permeables del valle; el localizado en el área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, que incluye un paquete acuífero de basaltos y aluviones en su parte central, y de basaltos y piroclásticos en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin; y el

correspondiente al Lago de Texcoco del cual se tiene escasa información; aparentemente, el agua se encuentra estática o con movimiento muy reducido hacia el oeste.

El abatimiento anual de los niveles estáticos varía de 0 a 3 m y los mayores se localizan en Azcapotzalco y Tlalpan, donde se han formado conos de abatimiento. Debido a esto se compacta el suelo y propicia el hundimiento, de 0.10 m por año, aunque en ciertos lugares como Xochimilco, Tláhuac, Ecatepec, Netzahualcóyotl y Chalco el suelo se ha compactado hasta 0.40 m en tan solo un año; por ello el agua que se extrae contiene cada vez mayor cantidad de minerales, que la hacen de menor calidad. Registros estadísticos muestran hundimientos anuales de 0.15 a 0.25 m alrededor del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Mediante el análisis de 225 pozos en la Ciudad de México, se obtuvo el nivel estático y dinámico de acuífero. En varios pozos se pudo medir ambos niveles, pero en ocasiones sólo se midió uno de los niveles, ya sea por desuso del equipo de bombeo o que no se podía dejar de operar el pozo.

Con el análisis multitemporal se analizaron y compararon las áreas de abatimiento y recarga de cada uno de los sistemas con los que cuenta la red de pozos de la Ciudad de México, los cuales se dividen en: Sistema Centro, Sistema Norte, Sistema Oriente, Sistema Poniente y Sistema Sur. También se pudo conocer el grado de sobreexplotación del acuífero.



Figura 13. Comparación del estado del acuífero hace 4000 años y actualmente.

2.2.1. Características físicas e hidrogeológicas de la Cuenca del Valle de México.

La Cuenca del Valle de México se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano y tiene un área aproximada de 9,000 kilómetros cuadrados. El Valle, situado a una altitud cercana a los 2,400 metros sobre el nivel del mar, es el más alto de la región y se encuentra rodeado por montañas que alcanzan elevaciones superiores a los 5,000 metros. La temperatura promedio anual es de 15 grados centígrados. La mayor parte de los 700 milímetros de agua de lluvia que caen anualmente en la región se concentra en unas cuantas tormentas intensas, las cuales se presentan por lo regular de junio a septiembre; durante el resto del año las precipitaciones pluviales suelen ser escasas o nulas.

Esta Cuenca es una depresión cerrada de manera natural, que a finales del siglo XVIII fue modificada artificialmente para controlar las inundaciones en la ciudad. Las fuentes de recarga del agua subterránea en la Cuenca se derivan, en gran medida, de las precipitaciones infiltradas y de la nieve derretida en las montañas y cerros que la rodean; este flujo se desplaza en forma de una corriente subterránea hacia las zonas menos elevadas.

En su estado natural, la Cuenca tenía una serie de lagos, desde los de agua dulce en el extremo superior, hasta los salados del extremo más bajo, en los que se concentraba la sal debido a la evaporación. La corriente de agua subterránea originaba numerosos manantiales al pie de las montañas, así como pozos en el valle.



Figura 14. Sección transversal de la cuenca del Valle de México. UNAM.

Geológicamente, el área sur de la Sierra Guadalupe es la porción mejor investigada de la Cuenca de México. A esta área, que abarca la Ciudad de México, suele denominársele Valle de México, o porción sur de la cuenca, ya que está parcialmente dividida por varias montañas de menor elevación, al cual se le conoce como acuífero del Valle de México.

Los detalles de la geología subsuperficial de esta área están basados en datos tomados de una serie formada por cuatro pozos profundos de exploración y perfiles realizados por sísmica de reflexión, llevados a cabo por Petróleos Mexicanos (Pemex).

Los depósitos de arcillas lacustres superficiales (por ejemplo, la capa de arcilla existente tanto en el fondo del lago antiguo como en el del actual) cubren el 23 de las elevaciones menos pronunciadas del Valle de México. Los depósitos aparecen en formaciones divididas, por lo que se conocen como “capa dura”. Compuesta principalmente de sedimentos y arena, la capa dura se localiza entre los 10 y los 40 metros de profundidad y sólo tiene unos cuantos metros de espesor.

A las capas de arcillas lacustres superficiales que alcanzan una profundidad de 100 metros se les denomina acuitardo⁴, y son considerablemente menos permeables que la capa dura o los sedimentos aluviales subyacentes. En el siglo XIX, al explotarse el agua del subsuelo por primera vez, la capa dura dio origen a los primeros pozos artesianos.

El relleno aluvial se encuentra por debajo de las arcillas lacustres y tiene un espesor de 100 a 500 metros. Este material está interestratificado con depósitos de basalto, tanto del Pleistoceno como recientes; juntos, abarcan la porción superior del acuífero principal en explotación. Otra unidad inferior del acuífero, compuesta por depósitos volcánicos estratificados que tienen de 100 a 600 metros de espesor, alcanza una profundidad que va de los 500 hasta los 1000 metros, aproximadamente. Esta unidad más profunda está limitada por un depósito de arcillas lacustres del Plioceno.

Tres principales zonas hidrológicas han sido definidas para el Valle de México: la zona lacustre, arriba descrita, el piedemonte o zona de transición y la zona montañosa. El modelo conceptual de la porción sur de la cuenca ha permitido identificar dos unidades permeables más profundas: un acuífero intermedio y otro profundo.

Históricamente, el principal acuífero abastecedor de agua estuvo sujeto a la presión artesisana, de manera que todos los pozos del fondo del valle llevaban el agua a la superficie sin necesidad de bombeo. Los gradientes hidráulicos naturales provocaban que el agua ascendiera sobre los acuitardos arcillosos.

⁴ Acuitardo: Tipo de acuífero que contiene agua y la transmite lentamente.

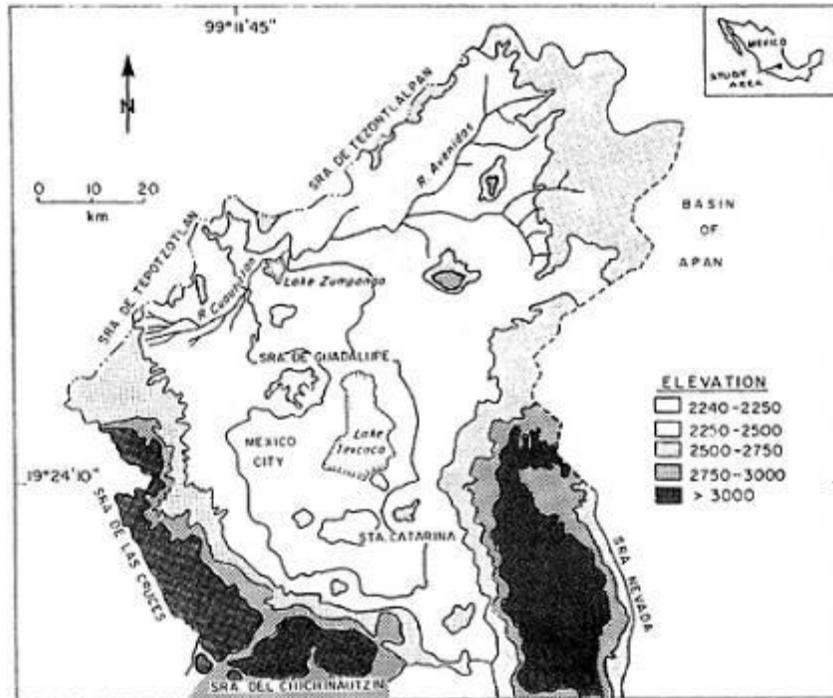


Figura 15. Zonas de elevación en la Cuenca de México. La zona lacustre ocupa las elevaciones menores de la cuenca (tono claro). La región de piedemonte, o zona de transición (tono sombreado), se encuentra en las pendientes altas y bajas, 2010. UNAM

2.2.2. Antecedentes del acuífero del Valle de México.

Como se mencionó anteriormente el área estudiada corresponde a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y su prolongación hacia el Valle de Texcoco al noreste y al Valle de Chalco al sureste.

En el subsuelo de esta región, se encuentra una alternancia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, los cuales permiten la infiltración y circulación de agua subterránea, dando origen al acuífero.

El Valle se encuentra cubierto por una capa de arcillas lacustres, las cuales se encuentran saturadas y funcionan como acuitardo debido a su reducida permeabilidad; cubren al acuífero y en parte lo confinan.

En la porción central del Valle, el acuífero funciona como semiconfinado debido a que el nivel piezométrico⁵ se encuentra a la altura de las arcillas lacustres que confinan al acuífero. En la porción occidental y oriental del Valle, el nivel piezométrico del acuífero se encuentra bajo las arcillas, ocasionando que el acuífero funcione como libre.

La principal recarga de agua al acuífero corresponde a la infiltración de la lluvia que se genera sobre los flancos de las elevaciones topográficas, principalmente en la Sierra del Chichinautzin al sur de la Ciudad de México, debido a la alta permeabilidad de las rocas basálticas que forman el subsuelo, seguido por la Sierra Nevada al oriente y la Sierra de Las Cruces al poniente, con una permeabilidad media. El agua subterránea circula en forma radial, de las sierras hacia el centro del Valle.

En la siguiente figura se puede observar el acuitardo ubicado en la porción superior del terreno, el cual está formando por arcillas lacustres y, bajo él, la zona no saturada; posteriormente en la parte inferior se encuentra el acuífero. Debido a que el acuitardo se encuentra saturado y permite el paso del agua muy lentamente, ésta corresponde a un aporte al acuífero que se denominó “*drenado vertical de las arcillas hacia el acuífero*”. La baja permeabilidad de las arcillas que constituyen el acuitardo, hace que el flujo del drenado vertical sea lento.

En la porción central del Valle, el acuífero se encuentra semiconfinado por las arcillas lacustres, mientras que en la porción oriental y occidental el nivel piezométrico del acuífero se encuentra bajo las arcillas, ocasionando que este último funcione como libre.

⁵ Nivel piezométrico: Altitud o profundidad (en relación a la superficie del suelo) del límite entre la capa freática y la zona vadosa en un acuífero.

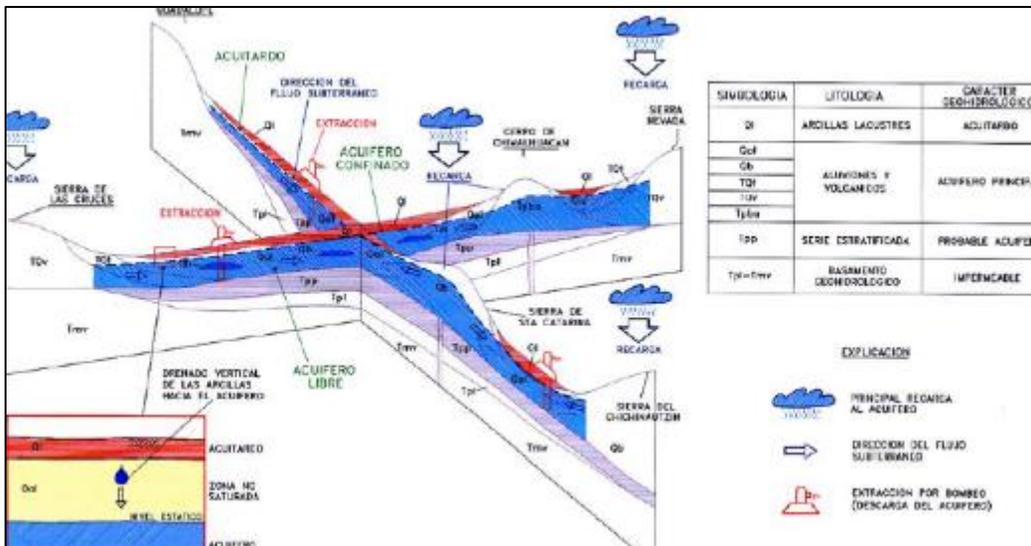


Figura 16. Representación de las recargas y proporción del acuífero, 2018. SACMEX.

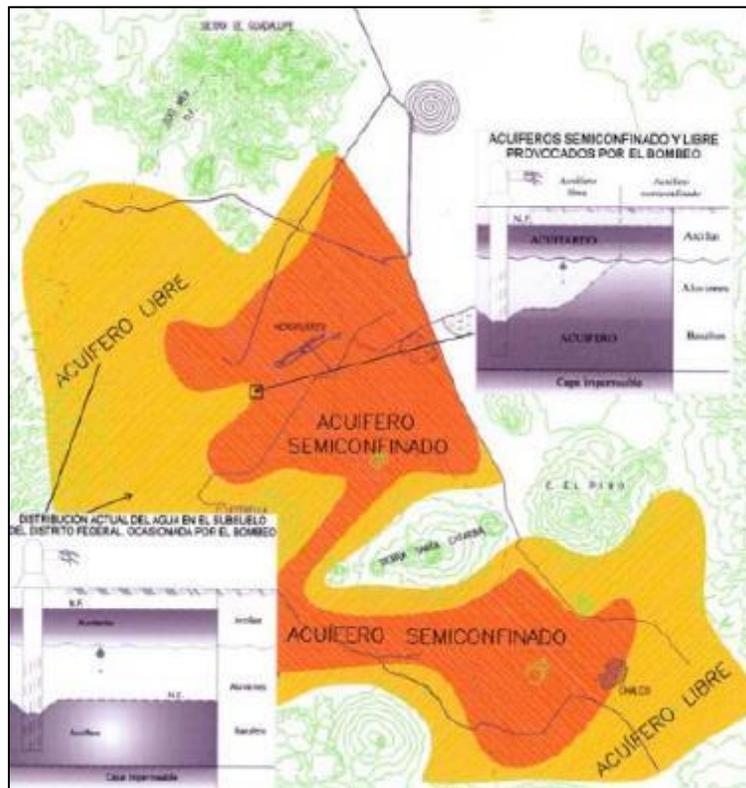


Figura 17. Delimitación del acuífero libre y semiconfinado, 2015. CONAGUA.

2.3. Características Químicas del Acuífero.

Las características químicas del acuífero se refieren a la calidad del agua que se tienen dentro del mismo. Estas características se obtienen gracias a sitios de monitoreo, a constantes observaciones y mediciones en los pozos.

Para el año 2017, se contaban con 5,028 sitios de monitoreo de la calidad del agua, operados por CONAGUA en todo el país, considerándose principalmente tres indicadores obtenidos en el laboratorio: Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST). Los resultados para 2017 mostraban que tenían una calificación de *Excelente* el 53.6% de los sitios para DBO5, el 18.5% para DQO, el 58.1% para SST y para Coliformes Fecales el 24.9%. Para el resto de los sitios su calificación variaba de Buena Calidad a Fuertemente Contaminada.

Aunado a estas medidas se realizan las medidas comunes de campo: sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio, sodio y potasio. Así mismo, se determinó conductividad, pH, sólidos disueltos, elementos minoritarios, como F, Fe y Mn, y elementos traza, como Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr total, Hg, Pb y Zn.

Parámetros	Límites recomendados	Medidas año 2017		
		Min	Max	Media
pH	6.5-8.5	7.2	8	7.6
Conduct.		111	351	219
HCO ₃		71	264	123
SO ₄	400	1	21	7
Cl	250	6	24	13
NO ₃	43	0.1	29.6	5.5
Mg		8	29	13
Ca		5	21	12
Na	200	6	43	20

Tabla 4. Límites químicos del agua potable medidos en el acuífero del Valle de México. (UNIDADES: mg/l y conduc. $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Los SST pueden tener su origen por contaminación con aguas residuales o procesos de erosión hídrica. Un aumento en este parámetro puede ocasionar turbiedad en el agua, además de una disminución en el paso de luz solar a través del agua, impidiendo o reduciendo la actividad fotosintética de organismos acuáticos de gran importancia para la producción de oxígeno disuelto. El monitoreo de dichos parámetros es muy importante ya que con él se miden los niveles de contaminación por aguas residuales tanto domésticas como industriales, además de los desechos agrícolas y los procesos erosivos en tierras de cultivo y zonas deforestadas.

2.3.1. Calidad del agua según el indicador *Demanda Química de Oxígeno (DQO)*

Del total de sitios muestreados, un 3.7% muestra condiciones excelentes, 15.5% de buena calidad, 35.6% aceptable, lo que representa un 54.8% de sitios con calidad aceptable o mejor. Por el contrario, un 40.2% de sitios están contaminados y un 5% altamente contaminados, dando un 45.2% de sitios con calidad por debajo de lo aceptable.

Los sitios con mayores niveles de DQO se encuentran en los mayores núcleos urbanos del país, sobre todo en el centro y occidente

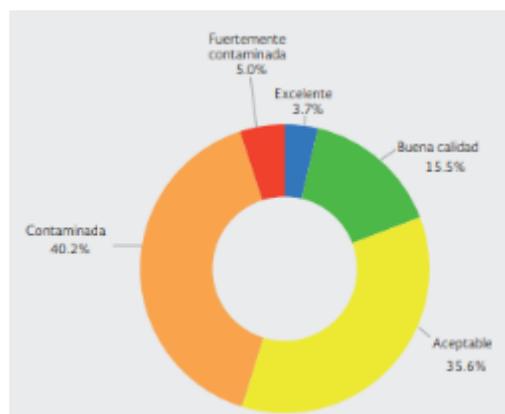


Gráfico 1. Calidad del agua según la demanda química de oxígeno, 2017. CONAGUA.

2.3.2. Calidad de agua según indicador *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)*

Un aumento en la DBO₅ provoca una disminución en la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, indispensable para que se mantenga la vida en los ecosistemas acuáticos. El origen de la materia orgánica susceptible a biodegradarse es el agua residual doméstica. De los sitios muestreados, un 31.4% mostró calidad excelente, un 27.1% tuvo buena calidad y 33.6% fue de calidad aceptable, lo que nos da un 92.1% de sitios con calidad aceptable o superior. El restante 7.9% estuvo por debajo de lo aceptable, con un 6% contaminado y 1.9% fuertemente contaminado. Los valores más altos de DBO₅ se encuentran en zonas altamente pobladas, principalmente las del centro del país

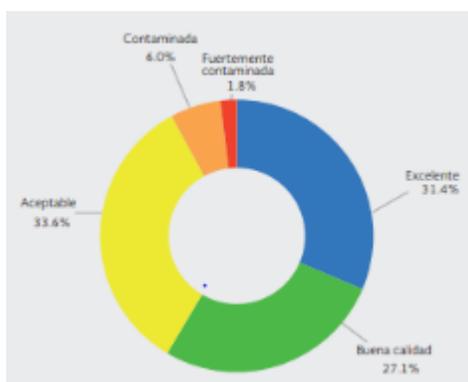


Gráfico 2. Calidad del agua según su demanda bioquímica de oxígeno, 2017. CONAGUA.

2.3.3. Calidad del agua según indicador *Sólidos Suspendidos Totales (SST)*

El origen de los SST puede ser antropogénico, por medio de aguas residuales o procesos erosivos, principalmente en zonas agrícolas y altamente deforestadas. El 93.2% de los sitios muestreados resultaron con calidad aceptable o superior, un 52.2% con calidad excelente, 32.3% con buena calidad y 8.7% con calidad aceptable. El 6.8% restante estuvo por debajo de la calidad aceptable, con 4.9% contaminado y 1.9% fuertemente contaminado.

Los sitios con mala calidad se encuentran principalmente en las zonas agrícolas.

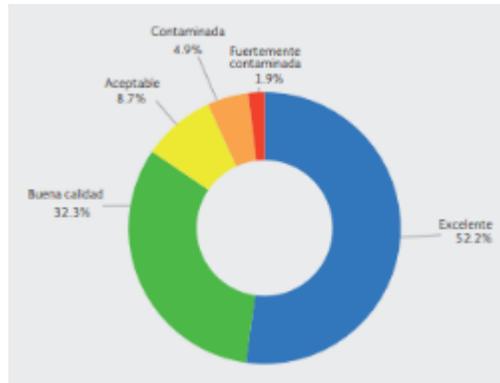


Gráfico 3. Calidad del agua según los sólidos suspendidos totales. 2017. CONAGUA.

Otro de los parámetros que se toman para evaluar la calidad del agua subterránea es su salinidad, clasificadas en dulces (menor a 1000 mg/l), ligeramente salobres (entre 1000 y 2000 mg/l), salobres (entre 2000 y 10000 mg/l) y salinas (más de 10000 mg/l)

El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994⁶, que “establece los límites máximos permisibles que debe cumplir el agua para consumo humano y tratamiento en materia de calidad del agua para consumo humano”.

2.4. Aportaciones y recargas al acuífero de “Valle de México”

La importancia de conocer las fuentes de recarga o aportaciones al acuífero, radica en que sin éstas el acuífero se acabaría por completo y a un ritmo más elevado del que ya está sucediendo.

La entrada de agua al sistema corresponde al aporte por flujo subterráneo o entrada subterránea proveniente de las infiltraciones que se generan en las fronteras del acuífero, mientras que hacia la parte plana de la zona metropolitana no existe

⁶ NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".

infiltración vertical de agua de lluvia debido a la existencia de la mancha urbana y por otra, a la presencia de arcillas lacustres que corresponden al sedimento de los antiguos lagos de México. Sin embargo, dichas arcillas lacustres forman un acuitardo que se encuentra saturado y presenta un drenado vertical que alimenta al acuífero.

Fuentes de recarga

Existen dos fuentes principales:

- Agua superficial continua (agua fluvial) o discontinua (agua pluvial).
- Agua residual tratada.

Para el análisis de las fuentes de recarga, es necesario considerar varios aspectos como son: la localización de los puntos de toma, el caudal disponible y régimen temporal, así como las características de su calidad y variabilidad temporal; adicional, es necesario tomar en cuenta que no todas las recargas son de manera natural, sino que en algunos casos es necesaria la recarga artificial debido a que la distribución espacial y temporal de las lluvias no es uniforme en todo el Valle de México.

En la zona poniente de la Ciudad de México, el agua que escurre a través de ríos y arroyos presenta mala calidad, lo que limita su utilización para la recarga. Una alternativa expuesta fue el saneamiento de la cuenca para evitar el deterioro del agua de lluvia al circular por los cauces.

Respecto a la zona sur, específicamente en la Sierra Chichinautzin, las rocas presentan buena permeabilidad, por lo que todos los escurrimientos superficiales se infiltran de manera natural antes de llegar al Valle.

En el oriente (Texcoco y Sierra Nevada) se considera factible captar agua superficial de buena calidad para inyectarse al subsuelo. En las estribaciones de la Sierra

Nevada se ha identificado menor densidad de asentamientos humanos, por lo que se recomienda la recarga con escurrimientos superficiales en época de lluvia.

Finalmente, respecto al agua residual tratada, existen alrededor de 150 plantas de tratamiento cuya localización se extiende en todo el Valle de México. Considerando el funcionamiento conjunto de todas ellas, se trata un caudal aproximado de 5 m³/s, parte del cual se reusa en distintos cuerpos receptores, tales como ríos, arroyos, lagos y al riego de áreas verdes.

Se estima que al menos 50 plantas se encuentran ubicadas en sitios donde se podría realizar la recarga al acuífero a través de pozos. Las restantes se localizan cerca de pozos de abastecimiento de agua potable, razón principal por las que no se consideran.

Una parte del agua tratada por estas plantas, o bien la proveniente de futuras ampliaciones o de incrementos en la eficiencia de su operación, es la que podría destinarse a su infiltración en el subsuelo. Los expertos recomendaron la adaptación y acondicionamiento de pozos cegados y la utilización de infraestructura existente.

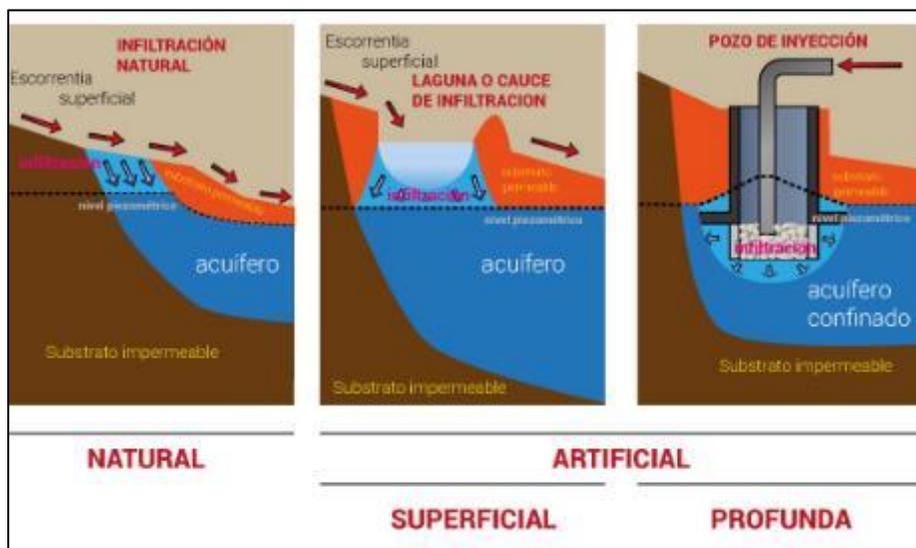


Figura 18. Clasificación de la recarga de los acuíferos.

2.5. Estado actual del suministro de agua potable y del acuífero en la Ciudad de México.

Actualmente la Ciudad de México cuenta con una red de distribución de agua potable que cubre el 98% de la población; el restante 2% no cuenta con el servicio por medio de la red debido a que se trata de asentamientos en situación irregular que son abastecidos por tanques cisterna (pipas) y mediante la captación de agua de lluvia.

Esta red de distribución consta de varios elementos y equipos que permiten garantizar el suministro de agua a la población, sin embargo, a pesar de tener un buen porcentaje de la ciudadanía con agua potable, debido al tiempo y al mal mantenimiento que tienen ciertos equipos e instalaciones, éstos cuentan con muchas fugas y problemas, lo que provoca que se pierdan muchos litros de agua potable antes de llegar al consumidor.

Intalación	Cantidad
<i>Pozos en total</i>	<i>884</i>
<i>En la CDMX</i>	<i>450</i>
<i>Sistema Lerma</i>	<i>395</i>
<i>Sistema Chiconautla</i>	<i>39</i>
<i>Plantas de bombeo</i>	<i>268</i>
<i>Plantas potabilizadoras</i>	<i>58</i>
<i>Estaciones de cloración</i>	<i>15</i>
<i>Tanques de almacenamiento</i>	<i>357</i>
<i>Líneas de conducción y acueductos</i>	<i>732 km</i>
<i>Red primaria</i>	<i>1274 km</i>
<i>Red secundaria</i>	<i>11972 km</i>
<i>Subestaciones eléctricas</i>	<i>23</i>

Tabla 5. Instalaciones disponibles en la CDMX, 2017. SACMEX

Adicionalmente se tiene una constante medición del caudal, volumen, presión, nivel de almacenamiento y la altura e intensidad de la precipitación pluvial ya que con estos datos se pueden implementar estrategias para mejorar el transporte del agua potable, mediante la regulación de presiones en la red primaria, una mejor distribución de caudales y para la operación de puntos críticos del sistema de drenaje con base en la información de intensidad de precipitación registrada en tiempo real.

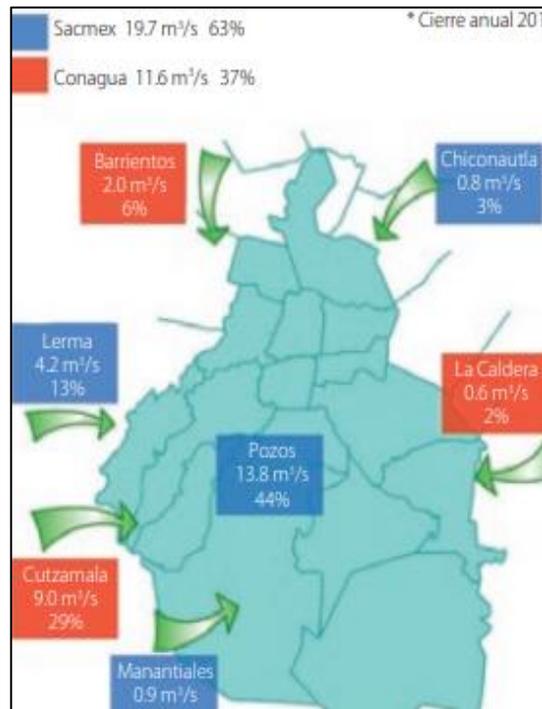


Figura 19. Suministro de agua potable a la CDMX, 2017. SACMEX

2.5.1. El acuífero y su explotación.

La porción del acuífero subterráneo que abastece a la Ciudad de México se localiza bajo la superficie metropolitana, en el suroeste de la cuenca del Valle de México, que está rodeada por montañas y cubierta parcialmente por una zona lacustre, como se mencionó anteriormente, integrada por un conjunto de lagos someros; hacia el centro del área metropolitana se halla el Lago de México, al este el de Texcoco, al sur los de Xochimilco y Chalco, y al norte el de Zumpango.

Sobre la mayor parte del acuífero se extiende un acuitardo o estrato arcilloso de baja permeabilidad, con alrededor de 50 metros de espesor, que en algunas zonas actúa como estrato confinante. Bajo esta capa se localiza el acuífero propiamente dicho, con espesores que llegan a los 800 metros, conformado por capas de intercalaciones granulares de productos volcánicos, como lavas y tobas, con permeabilidad variable y buena capacidad de almacenar agua.

El aprovechamiento natural del acuífero a través de los manantiales de Chapultepec para abasto de agua, data de la época prehispánica; a mediados del siglo XIX se inició propiamente la explotación del agua subterránea mediante norias o pozos someros rudimentarios, ya que el nivel freático en esa época se encontraba a poca profundidad.

Con el crecimiento acelerado de la población en la Ciudad de México y su zona metropolitana se incrementó la extracción mediante la perforación de pozos cada vez más profundos para abastecer la creciente demanda del servicio.

En las últimas décadas, el nivel freático se ha abatido a causa de extracciones muy superiores a la recarga del acuífero, y así se ha mantenido un altísimo grado de sobreexplotación; esta realidad se ha erigido como uno de los peores ejemplos mundiales por sus efectos negativos, como el incremento en el costo de perforación y operación de pozos cada vez más profundos, el hundimiento del suelo y el deterioro de la calidad del agua nativa.

La Conagua estima la recarga media anual del acuífero en $8.9 \text{ m}^3/\text{s}$, y la extracción concesionada de agua subterránea en $39.6 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que resulta en un grado de sobreexplotación del acuífero de aproximadamente $30.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Como un dato importante, ante la necesidad de reducir la drástica extracción de agua y para mitigar los efectos de la sobreexplotación, a partir de 1950 se

trasladaron los pozos fuera de la zona del Centro Histórico, sin embargo, el problema no se resolvió, solo cambio de lugar.

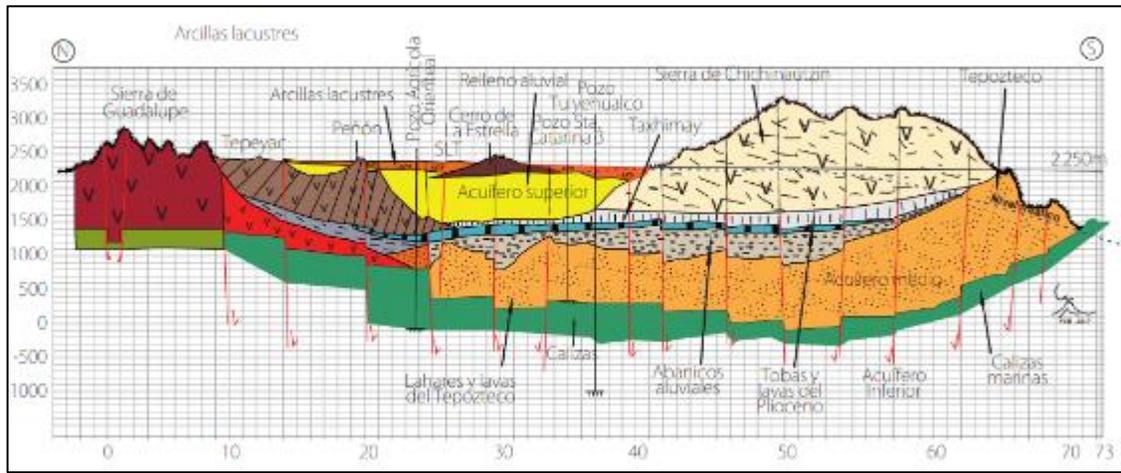


Figura 20. Sección transversal Oeste-Este, de la cuenca del Valle de México, 2017. SACMEX

Capítulo III. Explotación de pozos profundos de agua en el Valle de México.

Con los avances de la tecnología y las técnicas de extracción de hidrocarburos, la explotación del agua que se encuentra en el subsuelo ha sido más accesible, evolucionando desde pozos artesanales hasta los pozos profundos de agua.

Estos últimos son una obra de ingeniería hidráulica diseñada para cubrir la falta de agua de una o varias comunidades, sin la necesidad de transportar el agua por grandes distancias. Es por ello que los pozos profundos de agua son una opción para los problemas de dotación y abasto de agua potable, ayudando a evitar la sobreexplotación de los someros.

3.1. Problemas de la sobreexplotación del acuífero de la CDMX.

Como se ha tratado en los capítulos anteriores la sobreexplotación del acuífero es un problema grave, el cual no solo trae consigo la escasez de agua para la Ciudad de México, sino también una serie de problemas que aumentan el riesgo de la ciudadanía que vive en la CDMX.

Estos problemas han incrementado debido a que cada año crece la población en la ciudad y con ello disminuyen las zonas de recarga naturales, aunado a la sobreexplotación del acuífero, el mal mantenimiento de los ductos de transporte y la mala distribución, lo cual da lugar a los siguientes problemas:

- Descenso de los niveles piezométricos.
- Compartimentación de acuíferos.
- Aumento de los costos de explotación.
- Deterioro de la calidad del agua.
- Inducción de hundimientos y colapsos.

3.1.1. Descenso de los niveles piezométricos.

Este fenómeno se presenta con la extracción del agua subterránea, sin embargo, aunque se presente este fenómeno, no significa que el acuífero se encuentre sobreexplotado. Para saber si estos niveles, han alcanzado un nivel crítico, es necesario dejar pasar un periodo de tiempo y observar si el nivel estático vuelve a ser el original; si esto no sucede significa que se tiene una sobreexplotación. Si el nivel medio en un periodo de 5 o más años es constante o tiende a crecer, es el indicativo más seguro de que no existe sobreexplotación.

En el caso de que el volumen extraído en un año sea mayor que el volumen recuperado al acuífero, se producirá un descenso de año con año del nivel piezométrico, ésta es una señal clara de que puede estar en una situación de sobreexplotación, y debe procederse a la implementación de algún método para evitarla.

3.1.2. Compartimentación de acuíferos.

Cuando la estructura tectónica es compleja, en presencia de escalones en el substrato impermeable, con sectores levantados y otros hundidos, al bajar el nivel piezométrico puede producirse la separación de una parte del acuífero.

Esto provocará una rápida y sustancial reducción de la capacidad del acuífero, lo cual se puede apreciar en algunas zonas de la Ciudad de México, en donde la cantidad de agua que antes se obtenía del acuífero ya no es la misma debido a las alturas, a la geología del acuífero y de las zonas permeables.

3.1.3. Aumento de los costos de explotación.

Como consecuencia del descenso del nivel piezométrico y de la sobreexplotación del acuífero, los pozos que actualmente están en uso pueden quedar secos y por

lo tanto quedarían en desuso; lo que implica que esos sean profundizados e incluso en algunos casos deben cambiarse las bombas por otras más potentes, lo que implica un aumento en los costos de extracción del agua.

Un ejemplo de este caso es la perforación de los pozos profundos de agua, tema de esta investigación, los cuales por ser más profundos implica que se ocupan más materiales, equipos más sofisticados y técnicas diferentes de perforación para estos pozos, dando lugar a mayores costos de inversión para obtener agua.

3.1.4. Deterioro de la calidad del agua.

Esto se debe a varios factores, uno de ellos es cuando el acuífero es recientemente explotado, el agua que se está extrayendo es prácticamente nueva y conforme pasa el tiempo y crece la explotación, el agua de las zonas más alejadas del acuífero van siendo acarreadas al pozo, y en ocasiones esta agua viene de una calidad menor, e incluso puede ser agua que no es apta para el consumo humano.

Así mismo, la explotación de un acuífero, independientemente de que se trate de una sobreexplotación o no, puede provocar mezclas de aguas de diferentes calidades debido a las recargas y a otros factores, lo que se puede traducir en una desmejora de la calidad. Un caso particular es cuando el sustrato o alguno de los bordes del acuífero está ocupado por materiales evaporíticos, de igual forma también se presenta en acuíferos costeros, donde un bombeo excesivo favorece la intrusión salina.

3.1.5. Inducción de hundimientos y colapsos.

Este fenómeno se puede verificar principalmente en los acuíferos confinados, donde la disminución de la presión intersticial puede llevar a un reacomodo irreversible de las partículas sueltas, en los acuíferos detríticos, lo que puede

causar hundimientos en el suelo. Los ejemplos más conocidos internacionalmente son los de Venecia y La Ciudad de México.

El hundimiento del suelo de la Ciudad de México es uno de los mayores problemas por los incuantificables daños y costos que provoca. Se han desarrollado medidas mitigatorias, como implantar una veda para nuevas extracciones o reubicar los pozos fuera de la zona más afectada del Centro Histórico hacia áreas menos críticas.

Sin embargo, esto no ha resuelto el problema, sólo lo ha atenuado y trasladado a otras áreas. En los años 2007 y 2017 se llevaron a cabo nivelaciones de primer orden con la finalidad de dimensionar correctamente la evolución de los hundimientos y contar con información confiable para proyectos de ingeniería del SACMEX.

Los estudios realizados del hundimiento de la CDMX muestran un promedio anual entre 5 y 10 cm en la zona centro, de 20 cm en el área del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, y los valores máximos se dan en la zona oriente, en un rango que va de 30 a 36 centímetros.

Como se puede observar en la siguiente figura el hundimiento de la ciudad es tan grave que el gradiente natural que ayudaba al drenaje, a la distribución del agua y a la recarga natural del acuífero, se ha invertido por lo que ahora es necesaria la implementación de bombas o de la construcción de drenajes más profundos para solucionar el problema del hundimiento; aunado a esto, se implementan otros métodos como el que se propone en esta tesis, que es la extracción del agua del acuífero más profundo, mediante los pozos profundos, evitando o disminuyendo la velocidad del hundimiento de la ciudad.

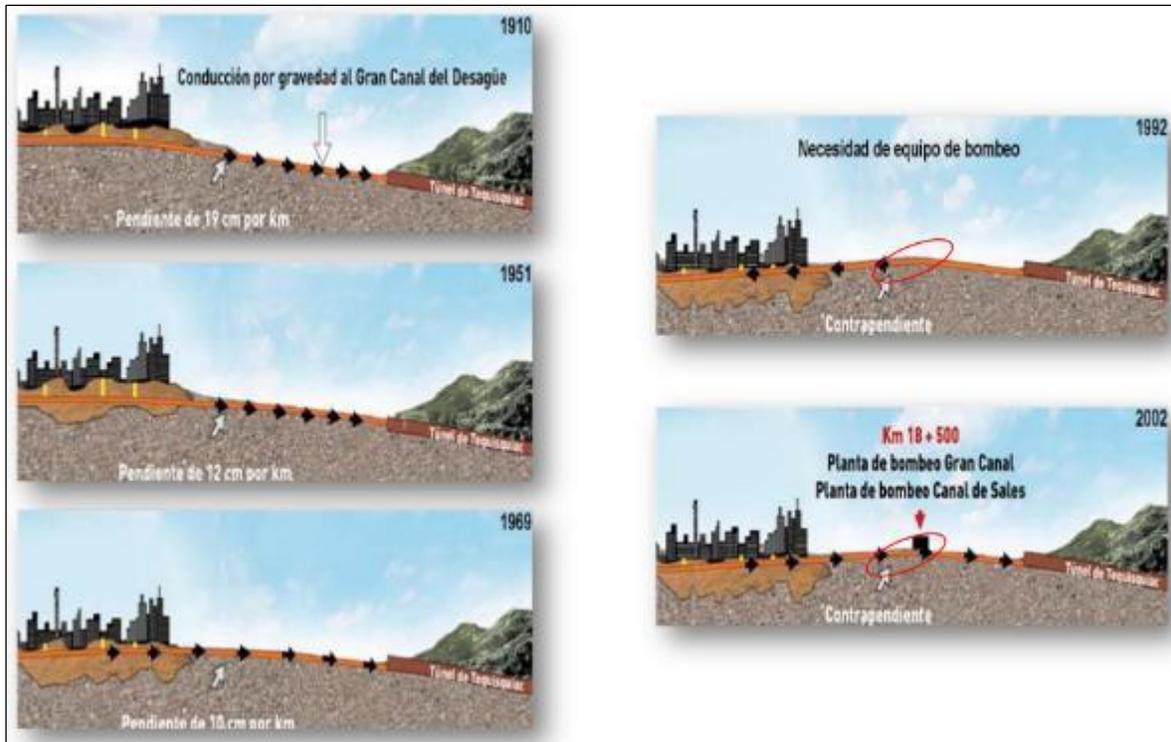


Figura 21. Hundimiento de la Ciudad de México, 2015. CONAGUA

3.2. Tipos de pozos de agua.

Para entender y hablar de los pozos de agua, es necesario saber que son perforaciones forradas o encamisadas que interceptan las corrientes o acumulaciones de aguas subterráneas con el fin de extraerlas.

Por lo general, son de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. El agua penetra a lo largo de las paredes creando un flujo de tipo radial. Se acostumbra clasificar a los pozos en someros y profundos.

Por un lado, un pozo profundo es un agujero, excavación o túnel vertical que se perfora en la tierra, hasta una profundidad suficiente para alcanzar lo que se busca, en este caso una reserva de agua subterránea almacenada en un acuífero.

En cambio, un pozo de tipo aljibe o artesanal, es aquel que tiene poca profundidad y maneja un nivel freático; el cual está gobernado por la recarga del agua de lluvia, por lo que en tiempos de sequía o en temperaturas extremas, tienden a secarse.

Una clasificación más detallada sobre los tipos de pozos de agua, es como fueron perforados:

- Pozos Someros.
- Pozos Perforados.
- Pozos Hincados.
- Pozos Excavados.
- Pozos Taladros.
- Pozos Profundos.

3.2.1. Pozos Someros.

Los pozos someros a cielo abierto, (Norias), son aquellos que permiten la explotación del agua subterránea. Éstos se construyen artesanalmente, tienen diámetros mínimos de 1.5 m y no más de 30 m de profundidad.

Para permitir el paso del agua a través de las paredes de los pozos someros, se dejan perforaciones de 25 mm de diámetro con espaciamiento entre 15 y 25 cm de centro a centro.

El rendimiento de este tipo de pozos es incierto, debido a que el nivel freático fluctúa con facilidad. Una ventaja de este tipo de pozos es que su costo de perforación es bajo, comparado con los pozos profundos; mientras que una desventaja es la calidad sanitaria debido a su cercanía con la superficie y a las posibles filtraciones en subsuelo.

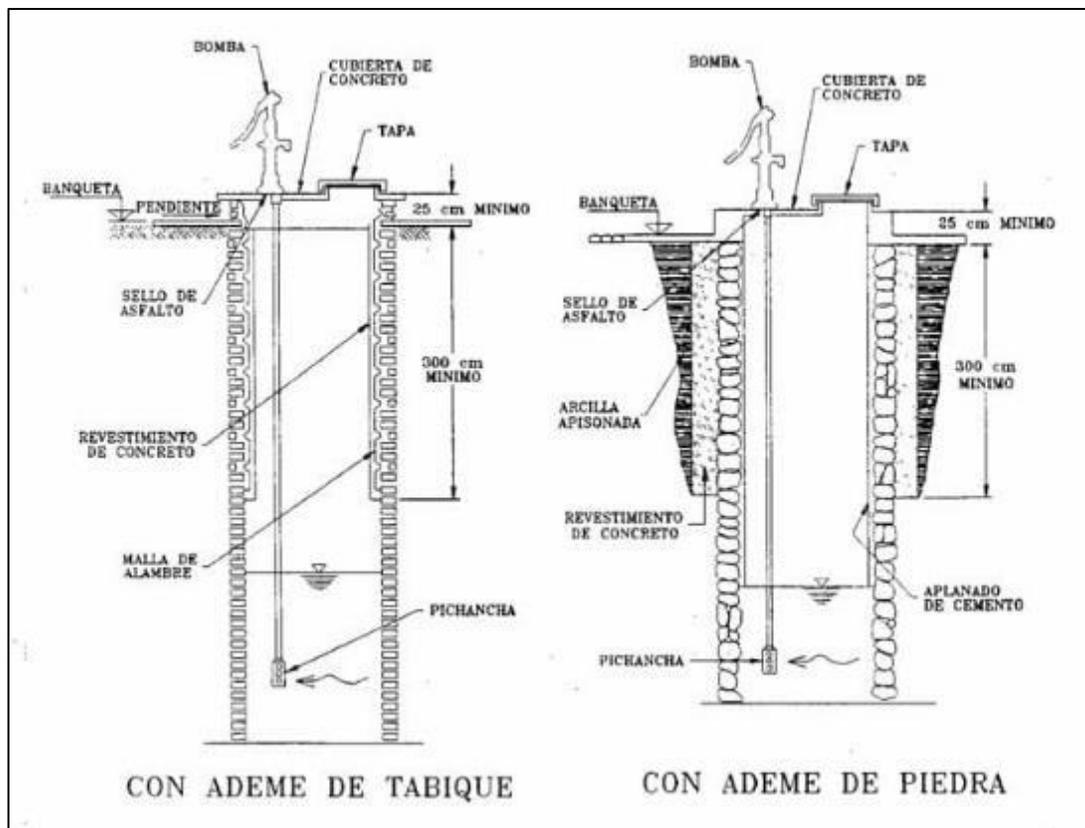


Figura 22. Representación de un pozo somero, SACMEX.

3.2.2. Pozos Perforados.

Son aquellos en los cuales se utiliza maquinaria hecha de distintos materiales, dependiendo del tipo de roca que se vaya a perforar. Si la roca a perforar es muy dura, se utilizan barrenas con dientes de diamante para ser más abrasivas y poder triturar este tipo de roca. Sin embargo, si se tienen rocas medianas o deleznales se usan barrenas con dientes de carburo de tungsteno.

Aunado a la selección del tipo de broca, es necesario definir cómo se sacará el material recortado del fondo del pozo, para evitar atascos de la barrena y para recuperar muestras cada 5 metros o cada que el geólogo lo requiera, para elaborar el perfil litológico del pozo que nos da finalmente la secuencia estratigráfica de los diferentes tipos de roca.

Esta obtención de recortes puede ser mediante lodos bentónicos, aire comprimido o espumas.

3.2.3. Pozos Hincados.

Consiste en la colocación de tuberías generalmente galvanizadas y de alta resistencia con una punta en su extremo interior o una punta en sistema de rejilla, las cuales se van hincando a golpes, generalmente en estratos arenosos en los cuales cualquier otra perforación no soporta mantener sus paredes estables, por lo tanto, la tubería va quedando inmediatamente instalada; con la única desventaja de que son tuberías de diámetros 2" a 3" y para profundidades muy someras máximo de entre 10 y 15 m que restringe el caudal a explotar por el tamaño de la bomba a instalar.

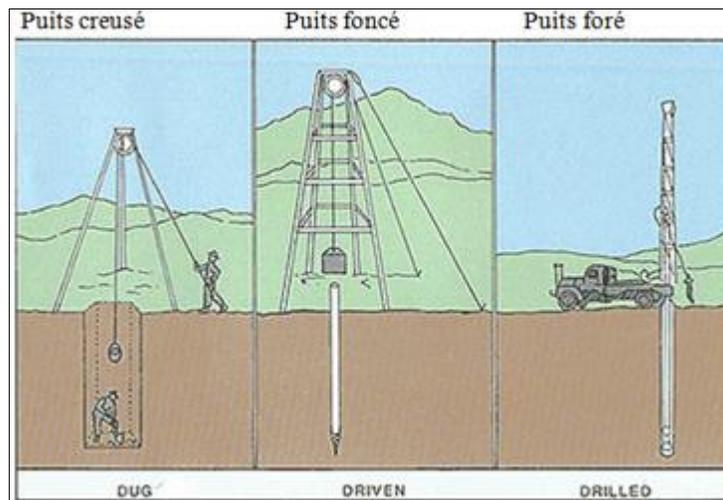


Figura 23. Tipos de pozos. Artesanal, Hincado y perforado respectivamente. Wikiwater.

3.2.4. Pozos Excavados.

Son pozos artesanales, también conocidos como pozo malacate, ya que son operados manualmente mediante bombas de mano o bien simplemente la

extracción de agua con un recipiente amarrado de un lazo o mecate. Generalmente son pozos de diámetros mayores de 1 m y que son hechos a pocas profundidades.

3.2.5. Pozos Taladrados.

Es una metodología de perforación utilizada generalmente en suelos blandos limosos o también en suelos granulares mediante un sistema helicoidal similar a un tornillo llamado *Auger*, el cual va sacando el material enrollado en el tornillo, previa instalación de una tubería de ademe. También ésta es una perforación poco profunda.



Figura 24. Pozo de agua taladrado. www.fracturahidraulicano.info

3.3. Pozos profundos de agua.

Como se mencionó anteriormente, existen varias clasificaciones de los pozos de agua, sin embargo, los pozos profundos de agua (PPA) son los más interesantes y tema de esta investigación. Estos pozos tienen varias ventajas y desventajas, las

cuales se abordarán más adelante. Además de esto, dichos pozos tienen grandes similitudes con los pozos petroleros, por lo que considero importante la comparación entre ambos pozos, así como la combinación de algunas características, herramientas y metodologías de los pozos petroleros a los PPA.

Como primera instancia es importante conocer lo mejor posible qué es un PPA, y para ello es necesario entender las etapas que comprenden un pozo profundo, las cuales van desde la exploración, perforación y explotación de este tipo de pozos para después hacer una comparación con los pozos petroleros y así finalmente hacer sugerencias de que se puede combinar de ambos para un mayor aprovechamiento del recurso, que en este caso es el agua.

Para que un pozo de agua sea considerado profundo debe tener una profundidad mínima de más de 30 m, que en el caso de los pozos que se encuentran en la CDMX es de más o menos 2000 m.

Además de la profundidad, los PPA deberán tener como mínimo los siguientes elementos:

- **Ademe.** Es el tubo que recubre y protege la integridad del pozo, usualmente se utiliza acero al carbón, aunque también puede ser usada tubería de PVC, dependiendo de las características químicas del agua.

A su vez esta tubería puede ser lisa o ranurada. Como su nombre las describe, la tubería lisa es recta y se utiliza en las zonas en que no va a haber ningún tipo de absorción o flujo de agua; por el contrario, la tubería ranurada es la que permite el paso del agua.

- **Profundidad total.** Es determinada por un estudio de geofísica el cual toma en cuenta tres factores principales: el nivel de aguas freáticas, el nivel de contaminación y el acuífero del cual se va a extraer el agua.

- **Contrademe sanitario.** Es una tubería de diámetro mayor al de *ademe* y es usada para proteger la zona más somera del pozo en caso de algún tipo de contaminación.
- **Tubería de la columna.** Son tuberías que se acoplan al equipo de bombeo y éstas conducen el líquido a la superficie. Dichas tuberías suelen medir entre 3 y 6 m de largo, los diámetros varían dependiendo de las necesidades individuales de gasto y del pozo.
- **Cable sumergible.** Es el medio de alimentación eléctrica para el motor del equipo de bombeo, el cual puede ser de diferentes medidas según las necesidades de energía eléctrica requeridas por el proyecto.
- **Empaque de grava.** Éste sirve para estabilizar el acuífero, minimizar el bombeo de arena y proporcionar una zona anular de alta permeabilidad que aumenta el radio efectivo del pozo y su gasto de explotación.

La diferencia con un pozo petrolero es mínima ya que se tienen los mismos elementos en un pozo de este tipo, solo que con nombres diferentes como por ejemplo el contrademe sanitario, es conocido en el ramo petrolero como tubo conductor.

Cabe destacar que antes de realizar cualquier estudio y por supuesto perforación de algún pozo de agua, es necesario obtener los permisos correspondientes, proporcionados por CONAGUA, encargada de la administración y custodia de las aguas nacionales y sus bienes públicos; estos permisos se obtienen mediante un título de concesión o asignación, el cual estipula que el aprovechamiento del agua no puede ser menos a 5 años ni mayor a 30 años.

3.3.1. Exploración de un pozo profundo de agua.

El primer paso para la exploración, es tener un estudio de hidrogeología el cual está encaminado a localizar, evaluar o desarrollar el recurso hidráulico a escala regional, éste se puede obtener gracias a datos de pozos que ya se tengan perforados, cartas geológicas, cartas topográficas, fotografías aéreas, mapas, imágenes satelitales, etc.

Una vez teniendo este estudio y delimitada el área de exploración, se procede a los estudios geofísicos, los cuales consisten en evaluar las características del subsuelo con la finalidad de determinar las posibilidades de explotación de agua del subsuelo.

Estos estudios geofísicos pueden ser mediante herramientas y métodos eléctricos, así como sísmica, sin embargo, esta última sólo se utiliza para conocer a gran escala lo que se encuentra debajo de la zona a explorar (básicamente tipo de rocas, espesores, porosidades y permeabilidades). Cuando se obtiene el registro sísmico, en la zona del acuífero no se verán datos debido a que el agua propaga más rápido el sonido, causando una pérdida de señal, dando una lectura errónea. Lo cual puede llegar a interpretarse como contenido de agua, gas o algún otro cuerpo que haga que se pierda la señal sísmica.

Es por eso que la principal herramienta de estudio son los métodos eléctricos, mientras que para los pozos petroleros existe una innumerable cantidad de registros incluyendo la sísmica y registros de imagen en 3D.

Con base a lo antes mencionado, se puede localizar el mejor sitio para llevar a cabo la perforación de dicho pozo, proponiendo la profundidad del mismo, los diámetros de dicho pozo y establecer las características geológico-estructurales y estratigráficas que gobiernan el comportamiento del agua subterránea dentro de la

zona de estudio, con la finalidad de programar un gasto mínimo y máximo del pozo sin afectar pozos cercanos o el mismo acuífero.

3.3.2. Perforación de un pozo profundo de agua.

Muchos son los métodos de perforación que se han desarrollado, principalmente como respuesta a la amplia variedad de condiciones geológicas, al avance y a las necesidades en la industria petrolera.

Es por esto que no se puede solo seleccionar algún método al azar, sino que deben de analizarse las condiciones en dónde se usarán los equipos, para qué tipo de rocas y los resultados que se han obtenido en pozos previamente perforados.

Para construir los pozos destinados a la explotación del agua subterránea se utilizan, de manera general, 2 sistemas básicos de perforación: el de percusión y el rotatorio.

En la Ciudad de México, la mayor parte de los pozos se han perforado mediante percusión. No obstante, los nuevos pozos profundos se han perforado con el método rotatorio y en especial los últimos PPA, en los cuales ha sido necesaria la ayuda de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Este último punto es muy importante a considerar para la perforación de los PPA ya que al ser de profundidades mayores a los 1000 m se tienen más riesgos como contaminación de mantos superiores, como es el caso de la CDMX, colapsos de agujero, una permeabilidad y porosidad más baja debido a la compactación de las rocas, fluidos, formaciones y eventos inesperados debido a que no se tiene la información suficiente del acuífero inferior.

Es por ello que se debe de tener más cuidado en el lodo de perforación que se usará, los tipos de aditivos, la base del mismo e incluso implementar tipos de fluidos

más amigables con el ambiente, lo cual nos ayudaría, además de proteger el pozo durante la perforación mediante un enjarre⁷, enfriar la barrena, ayudar con el levantamiento de los recortes y a un avance más rápido de la perforación, nos ayudaría a no contaminar tanto este acuífero y por lo tanto obtener agua con una mejor calidad.

Además de esta adición de la industria petrolera, se debería de considerar el uso de nuevas técnicas de perforación, como por ejemplo el Casing Drilling, cuya técnica a grandes rasgos consiste en la perforación con la tubería de revestimiento lo cual nos ayuda en los tiempos de perforación y terminación del pozo; ya que mediante el método convencional, una vez que se perforó el pozo con la barrena y la sarta de perforación, se retira toda la tubería y las herramientas usadas en esta etapa, para después meter la tubería que se va a quedar permanentemente a lo que en la industria petrolera se conoce como tubería de revestimiento; mientras que con la técnica de Casing Drilling ya no es necesario el paso de sacar y meter tubería nueva.

Incluso podrían correrse registros más especializados que nos den mayor información sobre las formaciones, el tipo de roca y las condiciones del acuífero para al final recabar toda la información, y realizar una mejor y más apropiada explotación del acuífero, evitando lo que está pasando en la actualidad con la sobreexplotación y la falta de agua en la ciudad.

⁷ Se le llama enjarre a la pared delgada, formada por el lodo ocupado durante la perforación el cual, entre otras cosas, es usado para evitar derrumbes, enfriar la barrena, acarrear los recortes a la superficie, etc.



Figura 25. Equipo de perforación usado en el pozo Santa Catarina 3A. SACMEX.

3.3.3. Terminación de un pozo profundo de agua.

Una vez terminada la perforación del pozo, se procede a la terminación y a las operaciones de limpieza y desarrollo, así como la desinfección del mismo. Esta etapa es una de las más importantes en un pozo, ya que se realizan una serie de acciones de carácter físico o químico, con la finalidad de mejorar la eficiencia del pozo.

Esta etapa debe de iniciarse lo más pronto posible después de concluir la etapa exploratoria, ya que mientras más tiempo transcurra, más difícil y menos efectiva es la reparación del daño causado a las formaciones acuíferas por la perforación.

Entre las principales mejoras que se pueden lograr con una apropiada terminación, se tienen:

- Mejorar la capacidad específica del pozo al limpiar las ranuras del cedazo y el filtro, además de mejorar la permeabilidad del acuífero en la zona del pozo.
- Estabilizar la formación arenosa alrededor del pozo, retardando la entrada de las arenas al pozo.
- En pozos perforados con máquina rotaria y lodos bentoníticos, la limpieza del pozo, es la única posibilidad de eliminar el enjarre de lodo, que disminuye la permeabilidad en el entorno del pozo.

Para llegar a estos objetivos es importante conocer, al menos de manera general, el proceso de la terminación de un pozo. En primer lugar, una vez con el pozo ya perforado a la profundidad deseada y con las herramientas y tubería de perforación extraídas, se hace circular agua limpia a través del pozo, con el objetivo de extraer todo el enjarre, dejándolo totalmente limpio para proceder al ademado.

Seguidamente, con base en el diseño del pozo, se hace una relación de la tubería que se va a instalar, de preferencia, numerando los tramos en el orden en que van a introducirse. Cada tramo debe alinearse, nivelarse y colocarse a tope con los adyacentes, a fin de asegurar la verticalidad del entubado. La tubería debe entrar holgadamente en el agujero, quedando descartado su hincado a golpes. Los tramos se conectan con soldadura y cuando la tubería a colocar es de PVC, los tramos se unen por coples o por medio de roscas de diferentes tipos.

Una vez que se concluye su colocación, la tubería se gira y se deja tensada con el propósito de asegurar su verticalidad. A continuación, se vuelve a introducir la sarta de perforación para reanudar la circulación del fluido de perforación e iniciar la colocación del filtro de grava.

El filtro de grava se instala en el espacio anular entre el cedazo y las paredes de la perforación, siendo necesario para incrementar la permeabilidad en el entorno del

pozo y asegurar su estabilidad, así como para prevenir o retardar la incrustación del cedazo en el caso de los acuíferos carbonatados; y si el pozo es de roca no deleznable, puede evitarse la instalación del filtro de grava.

El filtro también puede colocarse utilizando tubos engravadores, que se introducen en el espacio anular hasta que su extremo inferior queda bajo los estratos más erosionables por el paso de la grava. Este último procedimiento es más conveniente que el primero, aunque más lento.

Es importante resaltar que, durante su instalación, el filtro debe desinfectarse, su colocación se inicia con el fluido en circulación para extraer todas las impurezas mezcladas con la grava.

Finalmente se realiza la cementación del pozo, para asegurar la integridad del mismo y dar rigidez a la cámara de bombeo y protección sanitaria al pozo, previniendo así el ingreso de agua superficial contaminada a través del espacio anular.

La cementación es una operación rutinaria en la terminación del pozo y también es común en la rehabilitación de pozos, cuando se emplea para formar un sello sanitario superficial.

Para llevar a cabo la cementación o sellado de ademe o contrademe, se amplía el agujero a un diámetro mayor y una vez que se haya terminado la perforación, ampliación y colocado el ademe y el filtro de grava seleccionado, hasta la profundidad que se pretende sellar.

3.3.4. Explotación de un pozo profundo de agua.

Finalmente, ya que el pozo esta perforado y terminado, se pone en operación, lo cual comienza con una prueba de aforo que tiene como objetivo establecer cuál es el caudal óptimo al que se debe explotar el pozo. Es la operación que culmina la construcción del mismo, pero es también una operación de rutina en la rehabilitación de pozos, ya que, por lo general, los pozos rehabilitados cambian sus condiciones de operación y por consecuencia es necesario conocerlas.

En un aforo se pueden diferenciar dos tipos de actividades:

- Las de instalación, operación y desmantelamiento de la bomba.
- Los análisis e interpretación de los resultados de la prueba.

Se selecciona la bomba adecuada para el tipo de pozo, el caudal apropiado, y toda la instalación necesaria para la explotación del PPA para su posterior instalación. Así queda concluido el proyecto de un pozo profundo de agua.

Como se puede observar el proceso para realizar un PPA es muy similar a los pozos de petróleo, sin embargo, tienen algunas diferencias que se mencionaron anteriormente y que pueden servir para la perforación de futuros PPA. Si aumentamos esos pequeños pero valiosos detalles a la realización de estos proyectos, ayudarán a tener una mejor explotación del agua.

Y aunque algunas herramientas o métodos de perforación como el Casing Drilling son más caros y elevarían el costo de los pozos, a la larga ese costo sería insignificante, ya que se tendría mayor información para futuros pozos o incluso se tendrá una producción más duradera y por lo tanto no se presentarían los problemas que se tienen en la actualidad con el acuífero del “Valle de México”, el cual está sobreexplotado e incluso se evitaría o reduciría considerablemente el hundimiento de la Ciudad de México.



Figura 26. Agua del pozo Santa Catarina 3A, durante su inauguración. EL UNIVERSAL.

3.4. Ventajas y desventajas de los pozos profundos de agua.

Como se puede apreciar los pozos profundos de agua no son tan sencillos de hacer, sin embargo, ya que se tiene la experiencia de la perforación del primero, el segundo es más sencillo, y así sucesivamente, gracias a la información que se va recabando con cada perforación.

Además de la dificultad para perforar estos pozos, tenemos una serie de ventajas y desventajas que hacen a estos pozos apropiados o inapropiados para su inversión y explotación. Estas ventajas y desventajas se enlistan a continuación:

3.4.1. Ventajas.

- La explotación inteligente tiene la ventaja de que requiere un pequeño espacio comparado con sistemas convencionales de explotación.
- Son una excelente opción de obtener agua, sin tener que influir mucho en el terreno y paisaje, dentro de sus ventajas destacan la fiabilidad y economía en relación a los pozos artesanales excavados en la antigüedad.

- Su puesta en marcha es casi inmediata.
- En un pozo profundo no existe riesgo de la caída de una persona o animal dentro del pozo, comparado con los pozos artesanales en donde se tienen muchos registros de este tipo de accidentes.
- Ayudan a mitigar la sequía, debido a que se deja de explotar el acuífero superficial el cual aporta el agua necesaria para la flora local.
- Generación de empleos.
- El agua al estar más profunda, es de mejor calidad para el consumo humano con respecto a la del acuífero superior o incluso la proveniente de un río como el Cutzamala.
- Es más económico explotar el agua subterránea que tratar el agua para su consumo o transportarla desde zonas más alejadas.
- La perforación y explotación de estos pozos aumenta la posibilidad de un aumento y una mejora en la distribución del agua, no solo en Iztapalapa sino en todo el Valle de México.
- Al ser PPA se evita la contaminación con posibles filtraciones de contaminantes, las cuales sólo se presentan en las zonas superficiales del terreno.
- Se espera que, al explotar este acuífero, se tenga una disminución en el hundimiento de la CDMX y disminuir los problemas al presentarse un movimiento telúrico como el del 19 de septiembre del 2017; esto debido a

que se cree que este acuífero está confinado entre capas compactas y no arcillosas como el acuífero superior, lo que evita el hundimiento de la ciudad.

- Estos pozos son un buen avance en cuestiones de investigación y de ciencia para futuros proyectos tanto nacionales como internacionales, ya que éstos en algunas publicaciones no los consideran como pozos profundos de agua sino como pozos ultra profundos debido a que tienen una profundidad cercana o incluso mayor a los 2 mil metros.

3.4.2. Desventajas.

- Los costos de instalación por cada pozo son altos por lo que se requiere optimizar su número.
- Se requiere información cualitativa acerca del sitio donde se van a perforar los pozos, la cual es costosa y se necesita más tiempo para interpretarla.
- Debido a que estos pozos son nuevos, no se tiene la suficiente capacitación del personal que realiza este tipo de proyectos.
- De igual forma se tiene un marco legal inapropiado para este tipo de pozos debido a su recién hallazgo.
- Se necesita una mayor inversión, ya que el costo de la instalación de estos pozos es alto, la perforación de los mismos es elevada ya que entre más profundidad y mayor diámetro, el costo del pozo se encarece.
- Al ser más profundos y por lo tanto el nivel freático también, se tienen que implementar bombas con mayor capacidad para transportar el agua del fondo del pozo a la superficie.

- Algunos investigadores, como el Dr. Luis Zambrano del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), asegura que estos pozos son un riesgo ambiental debido a la falta de información y al exceso de pozos perforados en la actualidad.
- Debido a que no se tiene toda la información de la composición del acuífero inferior, existe una pequeña posibilidad de que el hundimiento de la ciudad sea mayor, en embargo, es por ello la importancia de realizar investigaciones para mitigar esta incertidumbre que tienen muchos.
- Dado que para la perforación de estos pozos se tienen que usar equipos de perforación más robustos y todo lo que ello implica, es un problema el espacio en dónde se perforarán estos pozos ya que se necesitan grandes áreas para la colocación de todo el equipo que se utilizará.

Como se puede observar, se tienen más ventajas para la construcción de estos pozos que desventajas. Sin embargo, el costo es un punto muy recurrente para la aprobación de proyectos, por lo que se debe de tener una mayor seguridad de los objetivos y de los beneficios que traerá consigo la construcción de estos PPA.

3.5. Análisis de un pozo profundo de agua.

En este punto se analizará el pozo profundo de agua "*San Lorenzo Tezonco*", el cual fue considerado como pozo exploratorio; este pozo tiene una profundidad de 2008 m y permitió investigar las características hidrogeológicas de las formaciones profundas de la cuenca del Valle de México; dicho pozo fue ubicado y perforado por SACMEX, en las coordenadas 19° 22' 44.27" N y 99° 5' 5.25" O, cerca de la Central de Abastos, como se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 27. Ubicación del pozo San Lorenzo Tezonco. SACMEX.

Con base en el análisis de los registros de litología y eléctrico que se tomaron en el pozo se pudieron identificar cinco principales unidades hidrogeológicas:

- De 0 a 70 m acuitardo compuesto por sedimentos lacustres arcillosos.
- De 70 a 500 m acuífero superior compuesto por materiales vulcanoclásticos.
- De 500 a 750 m acuífero en lavas y flujos piroclásticos (con una intercalación lacustre de 590 a 604 m)
- De 750 a 1140 m acuitardo compuesto por ignimbritas, arcillas y materiales vulcanoclásticos.
- De 1140 a 2008 m acuífero en rocas volcánicas con intercalaciones de acuitardos.

Como se puede observar, el acuífero inferior se encuentra en rocas más consolidadas por lo que su explotación no causaría más hundimientos de la Ciudad

de México, aunque éste sólo es un pozo, se necesitan más para dar una conclusión final.

En este pozo solo se tuvieron muestras de recorte, por lo que se recomienda que para futuros pozos se implemente el corte de núcleos para reducir la incertidumbre en el corte litológico.

En cuanto a la perforación de este pozo, fue perforado mediante el método rotatorio con circulación directa en donde se utilizó un lodo a base de bentonita, mientras que para el resto del pozo se agregaron polímeros y barita para evitar derrumbar y más pérdidas de circulación; la perforación de este pozo duró 18 meses.

Cada dos metros se tomaron muestras de los recortes, los más aproximados al fondo del pozo, los cuales eran tratados con agua para su limpieza, registro y análisis, así como la limpieza de los canales de lodo y las temblorinas para evitar la contaminación de las muestras.

La perforación de este pozo fue en tres etapas. Durante la primera etapa, de 0 a 500 m de profundidad, únicamente se recuperó muestra de 0 a 70 m y otra muestra aislada correspondiente a una profundidad de entre 100 y 120 m debido a que a los 72 metros ocurrió pérdida total de circulación; al llegar a los 500 m se amplió la perforación, se corrió un registro eléctrico, posteriormente se colocó ademe ciego y finalmente el espacio anular entre el ademe y la perforación fue cementado.

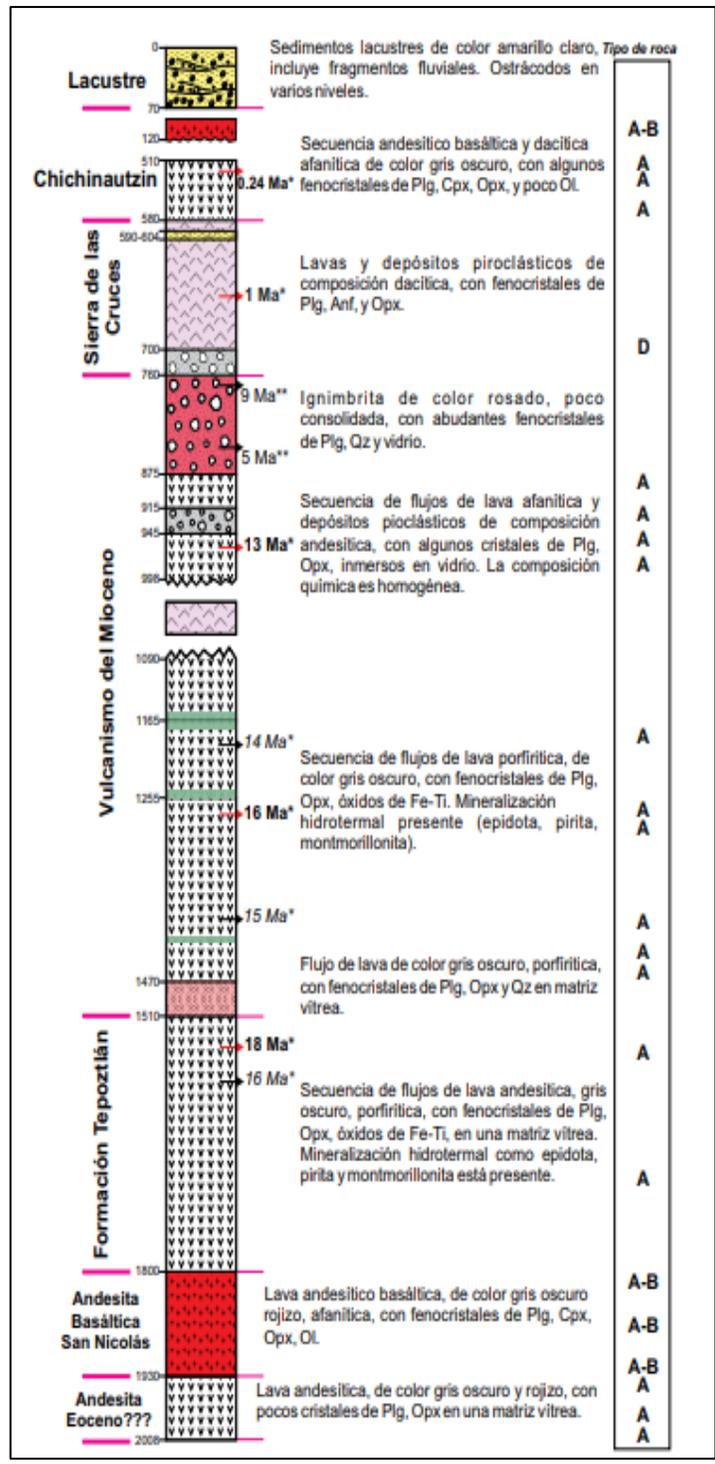


Figura 28. Columna estratigráfica generada con las muestras de recorte del pozo San Lorenzo Tezonco, SACMEX.

Para evitar cualquier contaminación de muestras de agua posteriores, se cementó el tramo ranurado y se reperforó el tapón de cemento para continuar con la tercera etapa; la cual fue de 1140 a 2008 m y se corrió un registro eléctrico, pero sólo de 1140 a 1640 m debido a que la temperatura superó los 65 °C que era el límite operativo del equipo de registro.

Finalmente, se instaló un ademe ranurado de 1176 a 2008 m, terminando el pozo sin filtro de grava debido al limitado espacio anular. Se extrajo el lodo de perforación inyectando agua desde la superficie, para después realizar tres aforos.

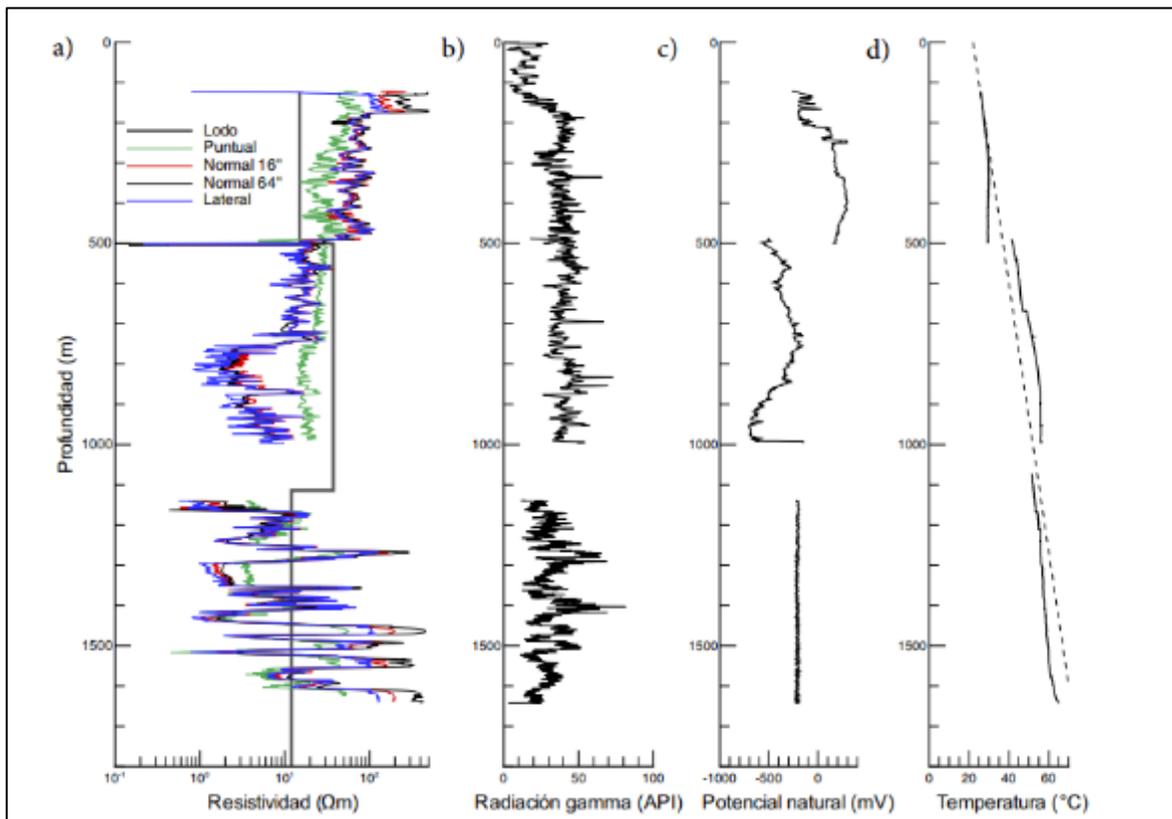


Figura 29. Registros tomados en el pozo San Lorenzo Tezonco. Resistividad, Radiación gamma, Potencial natural y Temperatura, respectivamente. SACMEX.

Las pruebas de aforo se realizaron para el intervalo probado fue de 1176 a 2008 m que es la longitud del cedazo del pozo cuya longitud corresponde a la unidad

hidrogeológica del acuífero a explotar. El primer aforo duró 35 horas y una hora en recuperar el nivel freático.

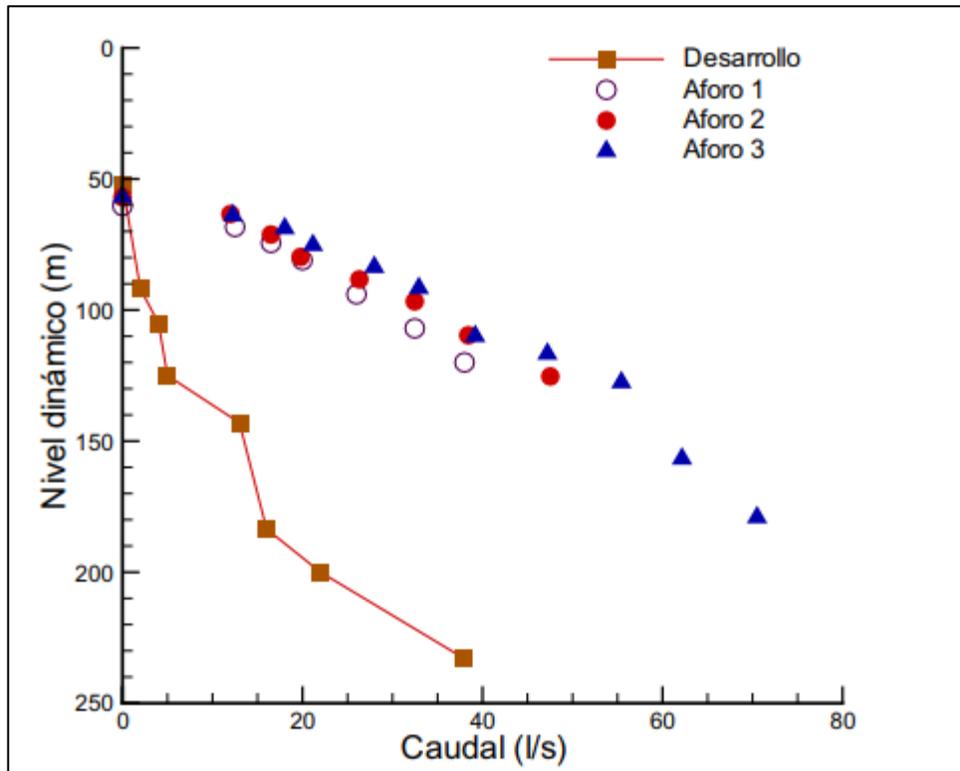


Figura 30. Aforos tomados en el pozo San Lorenzo Tezonco. SACMEX.

Con la realización de estos aforos también se pudieron obtener características fisicoquímicas e isotópicas del agua, una de las principales características que nos interesan es la temperatura, que como se puede observar en los registros tomados, a partir de los 1640 m, la temperatura era de 65°, sin embargo, ésta es la temperatura del pozo y con los aforos fue posible obtener la temperatura del agua.

En total se recolectaron 23 muestras de agua, de las cuales se obtuvieron medidas de temperatura que oscilan entre los 40 y 65°C; y según parte de esta temperatura se debe a la regla o disposición de que la temperatura aumenta con cada metro perforado, dando 20°C solo por la profundidad. Sin embargo, la temperatura que se tiene del agua proveniente de este pozo es alta comparada con el agua proveniente de los pozos someros.

Y en cuanto a las características químicas e isotópicas del agua más destacadas, es que se sugiere que este recurso tiene un origen de recarga pluvial y que el tiempo de residencia, es de aproximadamente $14,237 \pm 265$ años obtenida por carbono 14.



Figura 31. Pozo San Lorenzo Tezonco, SACMEX.

3.6. Pozos de agua en la CDMX.

Como se ha mencionado el acuífero del “Valle de México” es muy importante y por lo tanto los pozos de agua lo son, ya que el 67% del agua que abastece a la Ciudad de México proviene de éstos.

Se estima que se tienen alrededor de 4 mil 500 pozos de los cuales SACMEX tiene registrados 976, de los cuales 77 se encuentran sólo en Xochimilco, como se puede observar, más de la mitad de los pozos son clandestinos lo que provoca un abatimiento mayor y con más rapidez del acuífero del “Valle de México” provocando la aceleración del hundimiento de la CDMX.

Otro punto muy importante, es que cerca de 1600 pozos clandestinos se encuentran en la alcaldía de Iztapalapa, según datos tomados de un estudio hecho por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), así como información oficial de la Conagua, el SACMEX y de la dirección general de Obras de la delegación Iztapalapa.

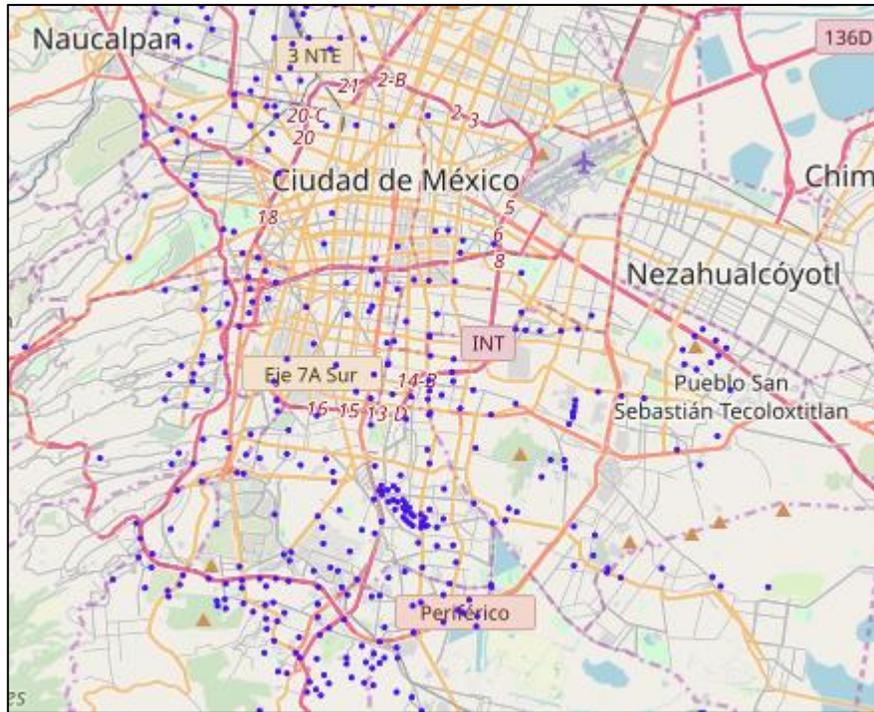


Figura 32. Pozos en explotación al 2016. SACMEX

Es por ello que SACMEX retomó una propuesta formulada en 1986, sobre la posible existencia de un acuífero ultra profundo como nueva fuente de agua potable para el Valle de México. Este proyecto se inició con el pozo *San Lorenzo Tezonco* tratado en el punto anterior, la exploración de este acuífero se dio por terminada en diciembre del 2012 y se concluyó con un caudal máximo de explotación de 150 litros por segundo; sin embargo, debido a las necesidades de la CDMX, se tiene explotando este pozo a una razón de 70 litros por segundo.

Para la perforación de los siguientes pozos se necesitó la participación de PEMEX, los siguientes pozos exploratorios que se perforaron fueron el pozo *Agrícola*

Oriental 2B y 2C, ubicados en las instalaciones de la Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca, en la alcaldía Iztacalco.

La perforación del pozo *Agrícola Oriental 2B* llegó a 2000 m de profundidad, y entre los 1500 y los 2000 m se encontró roca caliza fracturada con aportación de gran cantidad de gas; mientras que en el pozo *Agrícola Oriental 2C* llegó a 1570 m de profundidad, no aportó agua y también se detectó en él la presencia de gas.

Seguido de estos pozos se realizó la perforación del pozo *Santa Catarina 3ª*, el cual se perforó a 2030 m de profundidad, se ubica dentro del vivero Nezahualcóyotl, en la delegación Xochimilco, fue terminado en julio del 2017 y fue el primero en el que se recurrió a tecnología direccional con una desviación de 25° de la vertical, con objeto de tener una mayor intercepción de las fracturas en vulcanitas.

Los aforos de este pozo arrojaron que era apropiado un caudal máximo de 105 litros por segundo y actualmente está suministrando agua a la alcaldía de Iztapalapa.

Con los resultados favorables de este último pozo, el expresidente Enrique Peña Nieto, junto con el jefe de gobierno Miguel Ángel Mancera, pusieron en marcha el programa de pozos profundos cuyo objetivo es mejorar el suministro de agua a la ciudad y en especial a la alcaldía de Iztapalapa.

Por lo que se decidió perforar un quinto pozo profundo llamado el *Mirador 2*, ubicado en las instalaciones del SACMEX, al suroeste del Cerro de la Estrella, en la alcaldía Iztapalapa.

Este pozo fue perforado a 2300 m y su perforación tomó 8 meses. Sin embargo, una vez concluido este proyecto, se tomó la decisión de no seguir con el programa de perforación de más PPA.

Decisión que fue tomada por SACMEX y CONAGUA debido a que se tiene que analizar toda la información obtenida de los cinco pozos perforados, las altas temperaturas e incluso el gas que emana de dos de éstos, así como reparar todas las fugas y recuperar caudales para el abasto del agua.

SACMEX está iniciando un programa que se espera continúe durante el mandato del actual presidente Andrés Manuel López Obrador; para recuperar el 40% de fugas que se tienen actualmente en la red de transporte, ya que, si se recupera este porcentaje o al menos la mitad de él, bastaría para abastecer por completo a la ciudad sin la necesidad de explotar más el acuífero superior o el inferior.



Figura 33. Representación de los pozos profundos de agua en la CDMX. EL REFORMA.

Capítulo IV. Los pozos profundos de agua en la CDMX y sus altas temperaturas.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los pozos profundos de agua en la Ciudad de México se han convertido en un punto muy importante para mejorar la situación de escases de agua en dicha entidad. Sin embargo, al perforar estos pozos ha surgido el problema de presencia de gas y el inconveniente de que el agua se encuentra a una mayor temperatura comparada con el agua obtenida del acuífero superior.

Así mismo en el anterior capítulo se menciona la forma en cómo se han venido perforando los pozos de agua y cómo se han ido mejorando estas técnicas para hacer más eficiente su perforación, caracterización y extracción del agua, en especial en los pozos profundos en la CDMX. Pese a ello, estas mejoras no han sido las correctas o no han representado una importante contribución, ya que los PPA que se tienen actualmente perforados son considerados como exploratorios, lo que significa que son a prueba y error, es por esto la importancia de analizar estas técnicas y avances en la perforación de pozos.

4.1. Análisis de la optimización de los pozos profundos de agua.

Como se mencionó anteriormente, los avances que se han tenido alrededor de los PPA van acorde con los avances que se tienen en la industria petrolera, sin embargo, no todos pueden encajar en este tipo de pozos, debido a que los fluidos, las presiones, las formaciones, el tipo de roca, los objetivos, entre otras variables, son muy distintas e incluso llegan a variar entre los mismos PPA. Es por ello la importancia de analizar con detenimiento qué cosas son apropiadas para estos pozos.

Comenzando con la exploración, los métodos de exploración geofísica que se tienen actualmente son muy efectivos, hablando de los métodos eléctricos,

gravimétricos y magnetométricos, son efectivos en pozos someros y ayudan para darse una idea general de lo que puede haber en el subsuelo, sin embargo, para los PPA son insuficientes, debido a que éstos tienen muy poca penetración en la superficie. Es por esto que se deben de implementar métodos más invasivos, como por ejemplo la sísmica, pese a que es más costosa, ayudaría a conocer las dimensiones del acuífero profundo y así poder planear de una mejor manera su explotación.

En cuanto a la perforación y a la terminación de los PPA, existen tecnologías que se han incorporado, pero al ser pozos exploratorios, éstas han sido insuficientes y en algunos casos inadecuadas, como es el caso de los registros usados durante la perforación, los cuales no eran apropiados para las temperaturas que se presentan en estos pozos, de igual forma se necesitan registros más especializados como por ejemplo algún sónico, algún registro de imagen o algún composicional, los cuales nos darían mejor información sobre estos pozos.

Tenemos el caso de los PPA en Mixhuca los cuales presentan vapores de metano, pero no se sabe el lugar de su procedencia, esto se podría mitigar con los registros anteriormente mencionados. Aunado a esto, la forma en cómo son perforados puede mejorarse con la tecnología de Casing Drilling la cual reduciría los tiempos de perforación en un 40% y aunque esta tecnología es cara, al reducir los tiempos de terminación y perforación del pozo, se compensa la inversión en este tipo de tecnología, además de otros beneficios como evitar derrumbes, mejorar la estabilidad del pozo, entre otros.

Por otro lado, si se implementaran tipos de terminación más inteligentes con monitoreo constante de las propiedades y condiciones del agua de los pozos, se tendría un mejor control del acuífero y por supuesto de los pozos que al final ayudaría a evitar una posible explotación o un mal mantenimiento de las instalaciones y del equipo en el pozo.

Tomando en cuenta lo anterior, estos pozos pueden llegar a ser fácilmente sustentables y eficientes lo que da como resultado que estos eleven sus costos en general, pero si se consideran los beneficios que trae consigo con el mejoramiento de estos pozos, es mucho mayor; ya que, con el paso del tiempo el mantenimiento y el cuidado del ambiente será más sencillo.

Por lo que la optimización de estos pozos, sumado al mejoramiento de la red de transporte del agua en la Ciudad de México, un uso o cuidado apropiado del agua y un monitoreo constante del acuífero, dará como resultado un apropiado abastecimiento y la mitigación de la escasez del agua en la ciudad; sin mencionar que evitaría la sobreexplotación del acuífero.

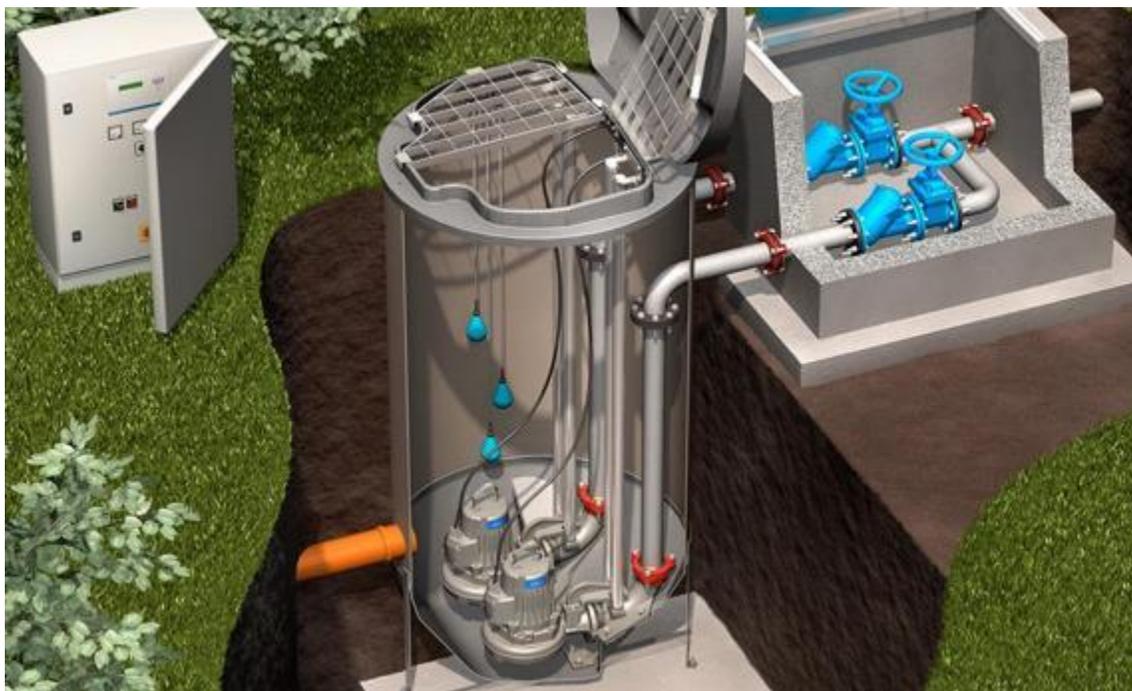


Figura 34. Pozo inteligente de Agua. Xylem, Let's Solve Water.

4.2. La actividad geotérmica en México.

La geotermia, es definida como la energía que se encuentra en el interior de la Tierra que, para el caso de México, es una fuente de energía con un alto potencial debido a la ubicación geográfica y a su actividad volcánica.

Esta energía puede ser aprovechada para generar electricidad, así como para calefacción, climatización, secado, calentamiento de agua, refrigeración, aplicaciones agroindustriales, etcétera.

Se estima que con las reservas probadas, probables y posibles; el potencial geotérmico en el país es de 13.4 (GW). Sin embargo, de ese potencial sólo se aprovecha menos del 1%, dado que la capacidad geotérmica nacional instalada es de 936.2 mega watts eléctricos (MWe) distribuida en cinco campos geotérmicos concesionados y se espera que para el 2032 la generación de energía geotérmica alcance el 3%.

Este tipo de energía, además de ser renovable, tiene la gran ventaja de no tener intermitencia como otras fuentes energéticas. Lo que significa que después de las perforaciones profundas en el subsuelo para extraer el vapor y de pasarlo por algunas turbinas se puede generar electricidad las 24 horas del día los 365 días del año, además de que no es necesario detener la planta para fines de mantenimiento y su factor de capacidad neta es el más alto, en comparación con el resto de las energías renovables. De manera que la principal ventaja de la energía geotérmica es la no dependencia de condiciones climáticas.

Sin embargo, esta energía tiene una gran desventaja. Las inversiones y el riesgo por inversión son altas, ya que para confirmar un potencial que valga la pena, es preciso llevar a cabo investigaciones muy especializadas y costosas.

Así mismo, es importante mencionar que los gastos y la tecnología que se utiliza son muy semejantes a los de la exploración de hidrocarburos y su proceso de generación es parecido al de un ciclo combinado, puesto que para la producción de electricidad se emplean turbinas que utilizan gas o vapor.

Debido al problema de las altas inversiones se tiene un mecanismo de financiamiento que ayuda a minimizar este problema, se le conoce como el Programa de Financiamiento y Transferencia de Riesgos para Geotermia en México, cuyo fondo de 51.5 millones de dólares y es provisto por el Fondo de Tecnología Limpia, el cual es operado por el Banco Interamericano de Desarrollo y funciona mediante un concurso público en el cual se seleccionan cuatro proyectos de exploración geotérmica, una vez seleccionados los proyectos, se procede a la perforación de los pozos geotérmicos y si estos resultan exitosos, la empresa encargada del proyecto solo tendrá que pagar el préstamo mediante un crédito concesional, pero en el caso de no existir potencial geotérmico, es decir, que los pozos perforados no resultaran rentables, el servicio de perforación proporcionado por el fondo, se convierte en una donación por lo tanto la compañía encargada del proyecto no tiene que pagar nada.

Existe una pequeña clasificación de los pozos geotérmicos, la cual se divide de acuerdo a su entalpía y/o temperatura, de la siguiente manera:

- Alta entalpía $>220^{\circ}\text{C}$ generación de energía eléctrica.
- Media entalpía $150\text{-}220^{\circ}\text{C}$ ciclo binario y/o uso directo.
- Baja entalpía $<150^{\circ}\text{C}$ uso directo.

En el caso de México se tienen estos tres tipos de energía geotérmica, pero para los pozos profundos de agua de la Ciudad de México solo se aplica la clasificación de baja entalpía; que a su vez está se puede clasificar en pozos con muy baja temperatura la cual es menor a 30°C , pozos de baja temperatura de 30°C a 90°C y de mediana temperatura que va desde 90°C a 150°C .

4.2.1. Pozos con muy baja temperatura.

En cualquier punto de la superficie de la tierra se puede obtener esta energía que en este caso es el calor que se encuentra por naturaleza en la superficie del subsuelo a unos pocos metros de profundidad, o en acuíferos poco profundos. Dicha energía generalmente es utilizada para el calentamiento de viviendas o de edificios.

Esta temperatura oscila de acuerdo a las variaciones de la interacción del sol con la superficie y de acuerdo a las estaciones del año. Estas variaciones son perceptibles a una profundidad de 10 metros y a partir de esta profundidad el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo de tal forma que el terreno permanece prácticamente a una temperatura constante.

Mientras que a partir de 15 metros la temperatura de las rocas no depende solo de la radiación de la superficie sino de las condiciones geológicas y geotérmicas del subsuelo y aproximadamente a partir de 20 metros de profundidad, la temperatura aumenta a razón de 3°C por cada 100 metros como consecuencia del gradiente geotérmico.

4.2.2. Pozos con baja temperatura.

Estos pozos son los más parecidos a los PPA, ya que las condiciones geológicas requeridas para la existencia de éstos es que tengan una profundidad de 1500 a 2,500 metros y que sean formaciones geológicas permeables capaces de almacenar y permitir la circulación de los fluidos que extraen el calor de las rocas, en este caso agua; considerando que se tiene un gradiente geotérmico normal a una profundidad de 2,000 metros tendríamos una temperatura aproximadamente de $\pm 70^{\circ}\text{C}$.

Un ejemplo de este tipo de pozo geotérmico se encuentra en la cuenca de París, en donde se encuentran cinco acuíferos en diferentes capas sedimentarias, de éstos el más explotado es el de la región de Francia, que tiene una extensión de 15,000 km² que proporciona agua a temperaturas que oscilan entre los 56°C y 85°C en pozos de 1,800 a 2,000 metros de profundidad.

Como se puede observar los PPA encajan perfectamente en esta clasificación por lo que estos pozos podrían ser considerados, además de pozos de agua, también como una posibilidad de obtener energía geotérmica de ellos.

4.2.3. Pozos de mediana temperatura.

Este tipo de pozos se encuentran entre los 2000 y 4000 metros de profundidad en zonas de adelgazamiento litosférico, en zonas con elevada concentración de isotopos radioactivos con la diferencia de que éstos si deben de contar con la presencia de una intrusión magmática como fuente de calor y de un acuífero con una buena recarga.

Este tipo de pozos podría presentarse en la Ciudad de México debido a que en algunos PPA se encontró metano el cual podría provenir de alguna fuente magmática. De igual forma existe la evidencia de que podrían presentarse anomalías geotérmicas debido a la existencia de volcanes inactivos que se encuentran en la ciudad, lo que puede provocar que el agua de estos pozos se encuentre con altas temperaturas.

Un ejemplo de este tipo de pozo, se encuentra en Alemania, en el poblado de Pomerania de donde se extrae agua con una temperatura de 97°C, de una profundidad de 2550 metros, esta energía se usa para producir electricidad y calefacción para los hogares cercanos.

4.3. ¿Pozos geotérmicos en la Ciudad de México?

Como se mencionó anteriormente, para que un pozo sea considerado geotérmico y económicamente viable, debe verificarse la existencia de un fluido a alta temperatura y una recarga constante de éste para posteriormente determinar su potencial energético.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, los PPA cumplen con estas características, solo que las temperaturas que se manejan en estos pozos no son lo suficientemente altas para considerarse como un pozo de alta temperatura en términos geotérmicos; sin embargo, entran en la clasificación de un pozo geotérmico de baja, muy baja y mediana temperatura o bien de baja entalpía.

Todos los pozos de baja entalpía tienen en común que, en su mayoría, la energía obtenida es utilizada para calefacción de viviendas, o el aprovechamiento de la temperatura para algunas industrias que necesitan calefacción o la obtención de fluidos, en este caso agua, con altas temperaturas para usos domésticos e industriales.

Además de la temperatura como factor importante para ser considerado un pozo geotérmico, es importante que se cuente con una fuente constante de recarga de fluidos al pozo, así como la presencia de algún cuerpo magmático, algún volcán o algún indicio de una alteración anormal de temperatura bajo estos pozos.

Para el caso de los pozos profundos de agua que tenemos en la Ciudad de México no se tiene un estudio específico de lo que se encuentra debajo de estos pozos, sin embargo, se tiene la evidencia de que la CDMX se encuentra dentro de la franja volcánica que atraviesa nuestro país. Así como la evidencia de que en el pasado la CDMX ha presenciado el nacimiento, erupciones y extinción de volcanes dentro y en los alrededores del centro de la ciudad.

Existe la evidencia de que existen 5 volcanes en la CDMX, los cuales son:

- El volcán Teuhtli.
- El volcán Tláloc.
- El volcán de Guadalupe.
- El volcán del Ajusco.
- El volcán de Chichinautzin.

Estos volcanes se caracterizan por ser monogenéticos, es decir, son más pequeños, tienen una potente erupción, así como una vida breve, mientras que los volcanes poligenéticos, como el Popocatepetl, pueden tener diversas erupciones, una larga vida y son de gran tamaño.

Actualmente, estos volcanes se encuentran inactivos, sin embargo, pueden volver a activarse. De acuerdo a científicos de la Universidad de Washington, las cámaras magmáticas, es decir, los depósitos de roca fundida que se encuentran en el interior de los volcanes inactivos, están llenos de una pasta pegajosa y viscosa la cual puede mezclarse con magma caliente y podría dar lugar a una nueva erupción, por lo tanto, a la activación del volcán.

Adicionalmente, se tiene la evidencia de que existen anomalías geotérmicas en México. Dentro de las anomalías cercanas a la CDMX que se tienen reportadas al año 2014, se encuentran 6 en el Estado de México. Estas anomalías cambian con el paso de los años, debido al constante movimiento de las placas tectónicas y al constante movimiento del magma que se encuentra debajo de la corteza terrestre.

Estas anomalías se presentan cuando algún fluido, por lo regular agua, se manifiesta con aguas termales o vapor de agua. Como estas anomalías son variables, cambian con el tiempo y las que se encuentran reportadas están cerca de la CDMX; es posible que actualmente se tengan anomalías alrededor de los pozos profundos de agua, lo que provoca las altas temperaturas de agua, la

presencia de gases como el metano y en algunos casos la emanación de vapor de agua en estos pozos.



Figura 35. Salida de vapor en pozo de agua de Mixhuca. Reforma.

4.4. Pozos con altas temperaturas en la CDMX.

Los pozos profundos de agua que se han perforado durante los últimos años en la CDMX, como ya hemos mencionado son de alrededor de 2 mil metros de profundidad y debido a estas profundidades se han tenido que implementar técnicas petroleras para su perforación. Sin embargo, estos pozos en especial los pozos que se encuentra en la colonia Magdalena Mixhuca, tienen características diferentes a los pozos convencionales.

Una de estas características es la temperatura del agua proveniente de estos pozos, la cual oscila entre los 48°C y 70°C incluso en los pozos Agrícola Oriental 2B y 2C, ubicados en las instalaciones de la Ciudad Deportiva Magdalena Mixhuca, en Iztacalco. Entre los 1500 y los 2000 metros, se encontró roca caliza fracturada con aportación de una gran cantidad de gas metano con vapor de agua.

Es por ello que los pozos profundos de agua, además de ser una fuente potencial para abastecer y erradicar la falta de agua en la ciudad, pueden convertirse en una fuente de energía. Esto, gracias a las altas temperaturas que podrían permitir la generación de energía eléctrica o energía térmica para abastecer las viviendas aledañas a los pozos, o simplemente utilizar la energía para el uso propio de los pozos, como bombas o compresores para la distribución del agua.

Como se mencionó en el punto anterior, estos pozos pueden ser considerados pozos geotérmicos de baja entalpía; sin embargo, este posible uso de la temperatura, no es utilizado hasta el momento debido a que la prioridad solo es abastecer de agua a la Ciudad de México.

Actualmente el agua que sale a altas temperaturas es llevada a una planta potabilizadora en donde es descargada en los tanques de “aguas claras” para enfriarla. Mientras que para el caso de los pozos que han presentado vapor de agua y gas metano quedaron inhabilitados para su explotación.

Se pensaba que tal vez, fuera solo una burbuja de vapor y metano, la cual al dejar el pozo libre se acabaría y se podría explotar; sin embargo, la columna de vapor era muy alta, el sonido muy estruendoso y el olor muy desagradable, por lo que los vecinos de las colonias aledañas comenzaron a alarmarse y a entrar en pánico; así que decidieron cerrar momentáneamente los pozos.

Sin embargo, con el paso de los meses la presión de los gases y del vapor volvieron a destapar el pozo, causando un constante y fuerte silbido por lo que se instaló un dispositivo que permite mitigar el sonido mientras se sigue permitiendo la salida del vapor y de los gases, que son procesados para ser inertes y ser liberados al ambiente.

Observando estas características de emisiones de gas metano, de vapor, la profundidad de los pozos y las altas temperaturas del agua son razones suficientes

para considerar implementar algún método de aprovechamiento de esta energía el cual permita la sustentabilidad y la larga vida de estos pozos que son de vital importancia para la vida en la Ciudad de México.



*Figura 36. Dispositivos silenciadores de los pozos en Mixhuca.
Reforma*

4.5. Aprovechamiento termodinámico de los pozos profundos de agua.

Finalmente, tomando en cuenta todas las características y propiedades que se tienen en los pozos profundos de agua podemos concluir que sí se puede y debe aprovecharse la energía que podríamos obtener de estos pozos. Debido a esto se menciona una serie de alternativas de usos y propuestas para utilizar este valioso recurso que actualmente se está desperdiciando.

De acuerdo al tipo de pozos geotérmico, que en este caso son de baja entalpía, se tienen destinados ciertos usos que, en su mayoría, son enfocados a las cuestiones térmicas ya que según la literatura consultada en los capítulos anteriores la energía que se puede extraer no es suficiente para la generación de electricidad; sin embargo, existen ciertas formas y tecnologías que lo permiten.

Como primer punto se analizarán las técnicas y medios de aprovechamiento que se encuentran en la literatura y que pueden ser aplicados al tipo de pozos que

tenemos en la CDMX, seguido de investigaciones que se tienen pendientes y finalizando con la mejor opción para estos pozos.

4.5.1. Aplicaciones para pozos geotérmicos con baja entalpía.

Para este tipo de pozos con baja entalpía, la mayor parte de la energía térmica obtenida se usa para la calefacción o el calentamiento de agua para uso doméstico. Esto está basado en las necesidades energéticas más comunes de los seres humanos, las cuales se centran en la calefacción y el agua caliente sanitaria.

Para aprovechar esta temperatura se utilizan diversos métodos los cuales son usados de acuerdo a las condiciones que se tengan disponibles, estas instalaciones son:

- Colectores horizontales enterrados.
- Sondas geotérmicas.
- Cimientos geotérmicos.

Para la selección de la tecnología es importante considerar la temperatura del subsuelo que se tiene en el área en donde se va a implementar, la cual está en función F, tal que:

$$T_{sp} = F(T_{ss}, x, k, Ce, t)$$

T_{sp} = Temperatura del suelo a una determinada profundidad.

T_{ss} = Temperatura del suelo en superficie.

x = Profundidad bajo superficie.

k = Conductividad térmica del terreno.

Ce = Calor específico del terreno.

t = Tiempo de intercambio de calor.

Así mismo, para las transferencias de calor por convección, la permeabilidad del terreno también es un factor importante ya que no es lo mismo tener gravas a tener arcillas para absorber y transferir la temperatura.

4.5.1.1. Colectores horizontales enterrados.

El objetivo fundamental de estas instalaciones, es proporcionar el calor proveniente de la radiación a las bombas de calor geotérmicas, con la finalidad de reducir a climatización de viviendas o locales como plazas comerciales, por ejemplo.

Con solo una perforación de 80 cm es posible colocar estos colectores, que son tubos de polietileno de 25 a 40 milímetros de diámetro, por los cuales circula agua con un anticongelante, que al conectarse con una bomba de calor geotérmica pueden satisfacer las necesidades de una vivienda de alrededor de 150 m².

Sin embargo, existe un problema, el cual radica en el espacio que se necesita para colocar los colectores. Es necesario contar con un espacio despejado que sea 1.5 veces mayor que la superficie de la vivienda siempre y cuando está, tenga un buen aislamiento térmico.

Debido a la escasa profundidad a la que están enterrados los tubos, el clima influye y hace que la eficiencia de los colectores baje, así mismo dependiendo de la altitud topográfica del terreno, las capas de tubos que forman los serpentines o bucles geotérmicos permiten obtener 20 a 30 watts de energía térmica por cada m² de colector.

No obstante, esta tecnología tiene varias ventajas, como por ejemplo, su costo es bajo ya que no se necesita una gran excavación, no se tienen instalaciones exteriores, no se requiere de permisos especiales, es limpio y ecológico, además de que no se tiene la necesidad de mantenimiento en los captadores.

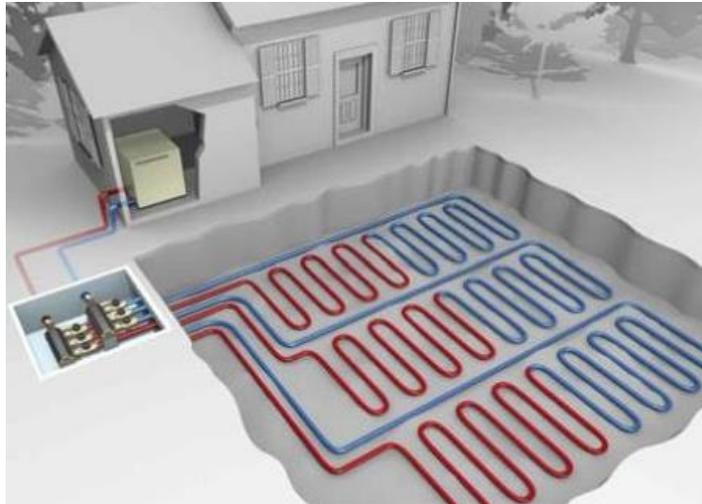


Figura 37. Colectores horizontales. Técnicas Reunidas de calefacción y gas.

4.5.1.2. Sondas geotérmicas.

Este tipo de sondas son implementadas cuando el calor del subsuelo es muy bajo y cuando no se tiene el suficiente espacio para instalar los colectores horizontales, es por ello que, en lugar de hacer un tendido horizontal, los colectores se colocan de forma vertical. Éstos pueden ser insertados a profundidades que van desde los 20 m a los 100 m y diámetros de perforación entre 10 cm a 15 cm.

Por cada metro lineal de colector vertical se pueden obtener alrededor de 20 y 70 watts. Para llegar a obtener esta energía es necesario dimensionar el número de sondas que se deben instalar, es necesario conocer como mínimo tres de las cuatro propiedades de la zona a explotar.

- Conductividad térmica del terreno.
- Humedad natural del suelo.
- Presencia o ausencia de agua subterránea.
- Permeabilidad.

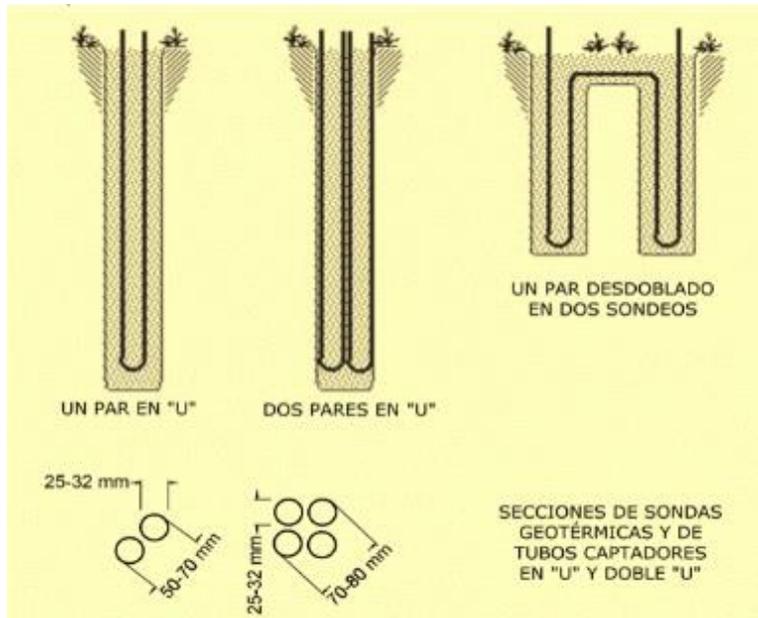


Figura 38. Diversos tipos de instalación de tubos captadores verticales. Aplicaciones. Climate Master. 2006

4.5.1.3. Cimientos geotérmicos.

Este tipo de aprovechamiento geotérmico es muy parecido al mencionado anteriormente, con la diferencia de que se busca que los cimientos de las edificaciones o de las viviendas sean construidos con sondas geotérmicas dentro de los pilotes que componen la edificación. Esta aplicación puede ayudar con el ahorro de la climatización del edificio o vivienda, ya que ésta va incluida con la construcción de los cimientos.

Los tubos captadores son de polietileno de alta densidad, y se conforman como tubos en forma de "U". En cada pilote o columna se acomodan varios pares de tubos independientes, los cuales van sujetos a los castillos metálicos y que convergen en la superficie en una misma.

Una vez realizada la excavación, se insertan los castillos con los captadores colocados para posteriormente ser rellenados con cemento, quedando la red de captadores cementados juntos con los pilotes.

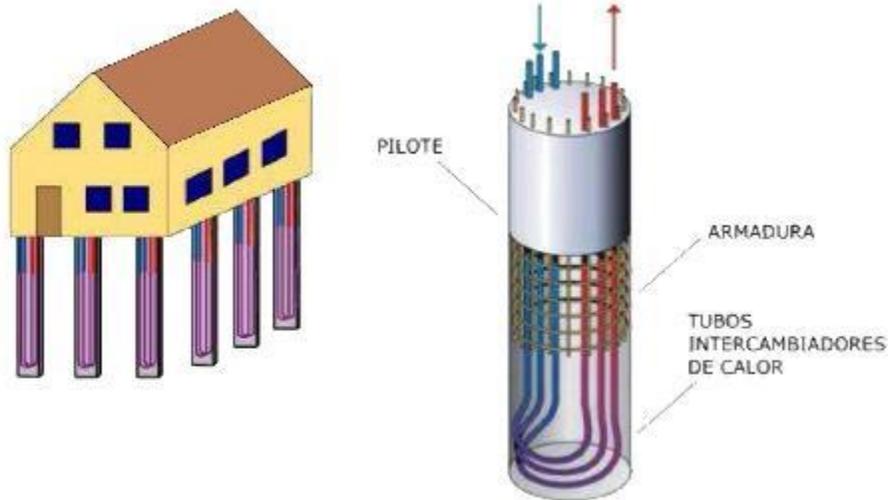


Figura 39. Cimientos geotérmicos. Instalaciones y mantenimiento.

4.5.2. Uso de la energía geotérmica obtenida del Volcán Popocatepetl.

El ingeniero Manuel Frías, egresado del Instituto Politécnico Nacional (IPN), tiene la idea de resolver el hundimiento de la Ciudad de México con la ayuda del potencial geotérmico del Volcán Popocatepetl. Su plan consiste en dos proyectos, los cuales van de la mano.

El primero consiste en la construcción de una presa en el Río Chuazingo, un proyecto que se viene arrastrando desde hace varios años. Ésta, se espera que sea construida con cuatro plantas de bombeo que enviarían el agua a la ciudad en un acueducto de más de 100 kilómetros.

Aunado a esto, el ingeniero menciona, que las condiciones climáticas de lluvia constante de la zona, que se genera por el vapor del volcán, permitirían que se recargue la cuenca de la presa. De esta forma, en lugar de extraer agua del manto de la ciudad, se propone transportarla desde la presa y terminar con el ciclo de extracción subterránea.

Debido a la gran cantidad de agua y a la distancia que tiene que transportarse, se requiere una gran cantidad de energía eléctrica. Es aquí en donde inicia el segundo proyecto, el cual consiste en aprovechar el potencial geotérmico del Popocatepetl.

El proyecto pretende captar el vapor de alta presión debajo del Popocatepetl y transformarlo en electricidad, con ayuda de tres turbogeneradores, ubicados a cuatro kilómetros del cráter.

Para conseguir el vapor, explica el ingeniero, se utilizarían pozos direccionales, como los que se emplean en la industria petrolera. Los primeros 100 metros van en forma vertical, y luego cambian su dirección en forma horizontal, hasta llegar a los yacimientos de la chimenea volcánica.

El proyecto se coordinaría con la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, con la cual colaboró el ingeniero en la investigación. Para la construcción de los generadores, se estima una inversión inicial de 200 millones de dólares (mdd) y para la presa se necesitarían entre 2,000 y 3,000 mdd.

Otro dato interesante que se menciona para este proyecto, se espera que la energía eléctrica que se produciría sería capaz de abastecer, por lo menos, a 50% de la zona metropolitana. La capacidad de producción eléctrica del PGT sería de 7,440 gigavatios-hora anuales, similares a lo que produce la Central Nuclear Laguna Verde.

Existen problemas con este plan, como la falta de inversión en proyectos geotérmicos y la actividad volcánica del Popocatepetl, así como la posibilidad de la explosión volcánica y los sismos que trae consigo. Sin embargo, el ingeniero Frías opina que esto no pasará, al menos no en un futuro cercano, por el momento lo más preocupante es la falta de agua y el hundimiento constante de la Ciudad de México; por lo que considera importante implementar esta o dar alguna solución a dichos problemas.

4.5.3. Aplicaciones para los pozos profundos de agua en la Ciudad de México.

Todas las aplicaciones anteriormente mencionadas pueden ser implementadas en los pozos profundos de agua en la Ciudad de México, incluyendo la investigación del ingeniero Frías, con sus respectivas excepciones.

Las aplicaciones antes mencionadas solo hablan sobre calentamiento de viviendas, spa, balnearios y agua caliente, debido a que son considerados pozos geotérmicos de baja entalpía por sus bajas temperaturas, lo que no los hace candidatos para generación de electricidad, sin embargo, existen nuevas tecnologías que permiten generarla, aunque a bajas intensidades, comparado con los pozos que poseen entalpías altas.

Las primeras aplicaciones mencionadas con anterioridad, pueden ser aplicadas en los PPA de la Ciudad de México, sin embargo, debido a las condiciones climatológicas que se encuentran en la ciudad, la climatización no sería una prioridad ya que la mayor parte del año la temperatura es agradable y solo un par de meses son de clima invernal, el cual no es tan extremo como en otros lugares del país.

No obstante, se podría utilizar estas aplicaciones para el calentamiento del agua y así ahorrar dinero en las colonias aledañas a estos pozos; ya que teniendo agua caliente se evitaría el uso del calentador de agua que, además de ahorrar dinero a las personas, ayudaría con el ambiente pues evita el uso de combustibles fósiles y por lo tanto sería una reducción en las emisiones de CO₂.

Para cumplir con este objetivo solo podrían implementarse los colectores verticales o sondas geotérmicas, ya que no existe el área necesaria para los horizontales ni para realizar cimientos geotérmicos y, aprovechando que ya se tienen perforados los pozos, solo es cuestión de meter la sondas y poner el resto de la infraestructura para aprovechar su temperatura.

La investigación del ingeniero Frías puede ser aplicada a la CDMX, lo cual facilitaría la transmisión de la electricidad adquirida a partir de estos pozos, sin embargo, como ya se trató anteriormente, su energía no es la suficiente como para que se implementen turbinas y con ellas generar la electricidad, a pesar de ello, se puede generar electricidad a partir de un pequeño dispositivo en el cual se genera una diferencia de temperaturas y así genera electricidad.

Existen otras maneras de generar electricidad mediante el aprovechamiento de la temperatura del agua, ya sea mediante un motor, turbos termoeléctricos o membranas nanotecnológicas; todas ellas basadas en el efecto termo eléctrico, o efecto *Seebeck*, el cual menciona que mediante la diferencia de temperatura un dispositivo, es capaz de crear un pequeño voltaje. A escala atómica, un gradiente de temperatura aplicado provoca portadores cargados en el material, si hay electrones o huecos para difundir desde el lado caliente al lado frío, similar a un gas clásico que se expande cuando se calienta; por consiguiente, la corriente es inducida termalmente.

Este efecto se puede usar para generar electricidad, medir temperatura, enfriar objetos, calentarlos o cocinarlos. Porque la dirección de calentamiento o enfriamiento es determinada por el signo del voltaje aplicado, dispositivos termoeléctricos producen controladores de temperatura muy convenientes, así mismo este efecto es termodinámicamente reversible.

Aprovechar el calor del agua de los pozos profundos mediante una membrana o mediante un motor que transforme la temperatura en electricidad, es viable, sin embargo, debido al poco espacio para la instalación de motores o al alto costo de estas membranas, la alternativa más viable son los tubos termoeléctricos, por ser pequeños y de fácil instalación.

Esta tecnología es gracias a los investigadores de Panasonic, quienes desarrollaron estos tubos, en los cuales se puede generar 10 Watts por cada 10 cm de tubería, con la que se puede alimentar un ventilador, una luz LED o un televisor portátil.



Figura 40. Tubos termoeléctricos. Panasonic.

Así mismo, existe la evidencia de que dos pozos profundos de agua que se encuentran en Mixhuca presentaron vapor de agua lo cual indica temperaturas superiores a los 100°C, además se presentaron emanaciones de metano a altas presiones.

Por lo que, para aprovechar este metano, que actualmente solo se ventea y se deja libre, podrían implementarse tuberías que conduzcan el gas y así ser utilizado como combustible, iluminación, fertilizante o para generar electricidad.

Para la generación de electricidad, además de ser necesario la instalación de tuberías, es necesario implementar turbinas y generadores, así como líneas de transmisión que transporten la electricidad a los hogares o bien que esta electricidad sea utilizada para el mismo equipo de bombeo de agua de los pozos cercanos.

Debido a que el metano que emana de estos pozos no es en grandes cantidades como en pozos puramente de gas, se podrían instalar microturbinas las cuales se utilizan cuando el gasto del gas es menor a 8 m³ por minuto y en estos pozos se

tienen medidas menores a éstas de alrededor de 3 m³ o 5 m³ por minuto y aunque estas microturbinas tienen una generación de electricidad menor, debido a su tamaño son fáciles de retirar y de dar mantenimiento por lo que implica un menor costo y con la finalidad de incrementar la eficiencia de las microturbinas, generalmente se incorpora un recuperador que precaliente el aire de combustión.



Figura 41. Ejemplo de una microturbina. <https://tecnoturbines.com/>

4.6. Sustentabilidad de los pozos profundos de agua en la CDMX.

La sustentabilidad es un término usado muy frecuentemente en la actualidad, debido a que las condiciones actuales del planeta, del crecimiento poblacional y de las actividades humanas han desencadenado un deterioro de todo a su alrededor, es por ello su importancia.

Este término se refiere en realidad a una especie de proceso que tiene como objetivo encontrar el equilibrio entre el medio ambiente y el uso de los recursos naturales. Así mismo, la sustentabilidad tiene enfoques, entre los principales se encuentra, que el desarrollo sustentable es la capacidad del ser humano para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras.

En diversos estudios se menciona que para lograr esta meta es necesario cumplir con tres objetivos principales: el económico, el social y el ambiental. No obstante, cumplir con estos tres rubros y mantenerlos equilibrados no es sencillo, por lo que en la mayoría de los casos la sustentabilidad es parcialmente cumplida.

Para que estos pozos profundos de agua cumplan con estos tres enfoques es necesario hacer las evaluaciones tanto sociales, económicas y ambientales de manera individual para posteriormente integrarlas, tratar de que éstas estén en equilibrio y así tener un proyecto y evaluación de estos pozos de manera sustentable. Lo que permitirá y logrará la reactivación de la perforación de estos pozos, trayendo consigo mejoras para la ciudad como se mencionó en capítulos anteriores.

A lo largo de este trabajo de investigación se han tratado estos enfoques a profundidad, con excepción del enfoque económico al cual falta agregarle una pequeña descripción del dimensionamiento del costo y los beneficios de estos pozos.

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, estos pozos son significativamente más caros que un pozo convencional, sin embargo, éstos a la larga significan una mejora para la ciudad y combinado con un aprovechamiento de sus propiedades pueden llegar a convertirse en unos pozos más económicos que los que se tienen hasta el momento.

La perforación de un pozo profundo de agua cuesta alrededor de 1 millón de pesos, casi el doble de un pozo convencional, lo cual no es práctico si solo se considera su costo, no obstante, al tener en cuenta que con ellos se evitarán pérdidas millonarias por los hundimientos de la ciudad y en transporte de agua de lugares más lejanos, estos costos se minimizan y prácticamente el costo de los pozos que se tienen hasta ahorita es nulo.

Ahora bien, si al costo de los pozos se le suma la implementación de alguna tecnología, mencionadas en el punto anterior, los costos aumentan, pero de la misma manera si estos costos son comparados con los beneficios y ahorros que trae su aprovechamiento, la inversión resulta ser a favor.

Considerando que la generación de electricidad normalmente cuesta \$2.25 pesos por kilowatts (KW); si se implementa la generación por microturbinas más la aplicación de generación de electricidad por tubos termoeléctricos se podrían generar alrededor de 6 a 8 KW, electricidad suficiente para implementar una bomba de agua de 3HP que consume 2240 watts, para extraer el agua del pozo o poder bombearla a las colonias cercanas, lo cual aún deja disponibles de 4 a 6 KW que podrían ser utilizados en alguno de los siguientes equipos que se encuentran en un hogar (Tabla 6). Todo esto considerando que se implementen los tubos termoeléctricos en el pozo, pero si se colocan en la cabeza del pozo y con una longitud mayor se puede obtener una mayor cantidad de electricidad.

Esto traducido en pesos nos arroja un ahorro de 14 a 20 pesos por los kilowatts generados, lo cual no es una ganancia significativa con todo lo que implica generarla, pero, considerando que esta energía puede utilizarse para uso propio del pozo sin la necesidad de traer energía de otro lugar, es una ventaja mayor por todo lo que implica.

Equipo	Potencia (Watts)
Refrigerador	575
Horno de microondas	1500
Aire acondicionado	1700
Lavadora	550
Televisor	80
Ordenador (portátil)	30
Focos (Led)	10
Móvil	5
WiFi	30

Tabla 6. Potencia requerida por equipo comúnmente encontrado en una vivienda.

Finalmente, si también se implementa algún método para el aprovechamiento de la temperatura del subsuelo y de los pozos para ser transformado en calefacción hace más viable la inversión para seguir perforando estos pozos profundos de agua.

Lo antes mencionado, solo podría aplicarse para los PPA que no presenten vapor de agua, ya que los pozos con esta característica adicional pueden generar incluso dos veces más energía tanto calorífica como eléctrica y, si después de realizar un estudio de la vida útil de estos pozos resultan viables para ser pozos geotérmicos de alta entalpía, convendría más explotarlos para la generación de electricidad que como pozos de abastecimiento de agua.

En suma de lo anterior y de los enfoques sociales y ambientales que se han venido tratando a lo largo de este trabajo; la sustentabilidad de estos pozos es posible, siempre y cuando la prioridad sea mejorar las condiciones de la Ciudad de México, sin importar las inversiones que se realicen al inicio, ya que con el paso del tiempo se recuperará la inversión con todo lo ahorrado en la subsanación de la ciudad y en el aprovechamiento de las propiedades que se pueden aprovechar de estos pozos profundos.

Conclusiones y recomendaciones.

No cabe duda que el agua es un recurso muy importante en todos los sentidos, tanto económicos, sociales y ambientales, por lo tanto, el cuidado de este recurso es de vital importancia y como se ha visto a lo largo de este trabajo, se busca optimizar o mejorar su explotación a través del descubrimiento de un acuífero inferior en la Ciudad de México, el cual actualmente se está estudiando y explotando mediante la perforación y extracción pozos profundos de agua. Los cuales tienen ciertas características, con las cuales obtuvieron las siguientes conclusiones:

- La Ciudad de México es uno de los estados en donde se presenta más escasez de agua, en especial en la delegación Iztapalapa.
- El agua que actualmente llega a una gran parte de los hogares no es de buena calidad, por lo que no es remendada para ningún uso doméstico que tenga que ver con la ingesta de este recurso.
- El agua de los acuíferos es muy importante y más para la CDMX, ya que el 65% del agua potable proviene del acuífero de Valle de México. Por lo que es importante darle un mayor valor y prioridad al estudio del acuífero inferior, para subsanar estos problemas de escasez en la ciudad.
- Se tiene una mala cultura sobre el cuidado y el reciclado del agua en todo el país y en especial en la Ciudad de México.
- No se tienen sanciones rigurosas ni normas que regulen el uso y tratamiento del agua y de los pozos de extracción de la misma.

- La sobre explotación del agua es un problema grave ya que se extrae más agua de lo que se puede recuperar.
- Se tienen muchos pozos clandestinos, lo cual evita un control apropiado de la medición de la sobre explotación de acuífero.
- El aprovechamiento de los pozos profundos de agua está siendo desaprovechado, ya que sólo se manda a una presa para que pierda temperatura y posteriormente ser bombeado para su uso.
- La información documentada sobre estos pozos es de difícil acceso y a la que se tiene acceso vario en los datos reportados. Por lo que es complicado interpretar y dar una conclusión apropiada al analizar los pozos y por lo tanto al acuífero.
- Los datos que se tienen del acuífero superior no son recientes por lo que se dificulta conocer su estado actual de sobreexplotación.
- El acceso a la toma de datos de campo para estos pozos es complicado ya que no se tiene una referencia o persona encargada a estos proyectos.
- La toma de mediciones de temperatura en distintos puntos entorno a estos pozos en especial el que se encuentra en la Zona de la Central de Abastos fue exitosa y arrojó un promedio de 27 a 30 [°C] lo cual indica que los valores reportados en los documentos oficiales son correctos; reportando 48 a 70 [°C]. La diferencia de estos valores medidos respecto a los reportados es debido a las pérdidas que se tienen en la transportación y en el bombeo del agua.

- El compactamiento de la Ciudad de México también es un problema grave que, entre otras razones, una de ellas es la sobreexplotación del acuífero superior. Ya que éste se encuentra en formaciones de arcilla y arena que al momento de que los poros se queden sin el fluido contenido en ellas éstas se colapsan provocando hundimientos y debido a la velocidad de extracción este fenómeno se presenta más rápido.
- El hundimiento de la ciudad no solo causa problemas estructurales sino inundaciones y sobre todo contaminación y baja calidad del agua presente en el acuífero ya que, al momento de colapsarse algunos sedimentos caen al agua, provocando la disminución de la calidad del agua, debido a su contenido alto en minerales.
- Es importante que antes de proceder a cualquier diseño o evaluación económica, se debe contar necesariamente con la información de la topografía e hidrología de la zona que se va a explotar, así mismo como la información urbana en donde se piensa perforar para poder realizar un análisis de factibilidad del proyecto y se debe tener un especial cuidado ya que se tiene la experiencia que los pozos pueden venir con metano, como es el caso de los pozos de Mixhuca.
- No se tiene la información más que de dos pozos, de los 5 que se han perforado; y la información que se tiene de éstos se encuentra incompleta y no se tomaron todas las medidas necesarias para un pozo exploratorio como lo fueron estos proyectos.
- Los pozos profundos de agua no son considerados como pozos petroleros, pero cumplen con las características principales como son presión, temperatura y profundidades elevadas.

- Los pozos que se encuentran en Mixhuca con presencia de gas metano y vapor de agua están siendo desaprovechados, ya que tienen un potencial grande para la generación de electricidad, combustible, calefacción y agua caliente en los hogares cercanos.
- Debido a la actividad geotérmica que se tiene en el país y a las anomalías geotérmicas que se encuentran en constante movimiento, son las responsables de las altas temperaturas y gases que se han presentado en estos pozos.
- No sólo los pozos que se encuentran en Mixhuca pueden ser acondicionados para la generación de electricidad o calefacción, sino que todos los pozos profundos pueden usarse de una u otra manera, sólo varía el nivel de generación entre uno y otro.
- La forma en que se han perforado los últimos dos pozos profundos de agua, ha sido la correcta, sin embargo, se puede mejorar esta técnica mediante la implementación de nuevas tecnologías de terminación y perforación de pozos que se tienen en la industria petrolera.
- Se tiene una infraestructura para la transportación del agua potable a los hogares. Alrededor de 53% del agua potable se pierde en el trayecto de los pozos a los hogares.
- El ciclo hidrológico que se tiene en la Ciudad de México es inapropiado si lo que se quiere, es tener una mayor recuperación del acuífero.
- La inversión que se debe de realizar en estos pozos es elevada, sin embargo, los beneficios que se tienen con su explotación y con su posible aprovechamiento térmico, son mayores, y a largo plazo los beneficios que

trae consigo, como son evitar o reducir los hundimientos de la ciudad, un mejor abasto de agua potable, mejor calidad de agua para la comunidad y beneficios intrínsecos como más empleos y ahorro de combustibles, calefacción, entre otros.

- La sustentabilidad de estos pozos es posible, debido a todos los beneficios que traen consigo tanto sociales, ambientales y económicos.

Recomendaciones.

- Se debe realizar una campaña de concientización sobre el uso del agua, su aprovechamiento eficiente y sobre todo su reciclado y tratamiento. El cual no sólo debe de ser enfocado a las familias sino a la industria y a todo el que interactúe con este recurso.
- El gobierno debe implementar sanciones más rigurosas y realizar normas que regulen el uso del agua, ya que durante la realización de este trabajo las leyes que involucran algún permiso de perforación o disposición del agua, son muy ambiguos lo que se presta a que hagan mal uso del agua.
- Crear un plan de extracción de los acuíferos, ya que no se toma en cuenta el volumen de extracción con respecto al volumen de recuperación de los acuíferos, causando su sobreexplotación y por lo tanto agotando el agua que contienen. Este plan debe implementarse inmediatamente, ya que si se sigue manteniendo la extracción a razón de 45 m³/s y recuperando solo 25 m³/s el acuífero no soportará mucho tiempo esta sobreexplotación y la población se encontrará en un grave problema, más del que se tiene actualmente.

- Así mismo es importante reactivar el plan de perforación de los pozos profundos de agua y por lo tanto de su investigación, para determinar si este acuífero se encuentra o no comunicado con el superior, si la continuidad de la capa Taxhimay es uniforme y se mantiene, cual es la recarga de este acuífero, etc.
- Si se decide implementar el método de exploración sísmica como principal método de exploración, se debe de tener una correlación apropiada y bien estudiada al momento de interpretar el registro sísmico debido a las anomalías que se pueden presentar con este tipo de fluidos.
- Los métodos de exploración deben estar seleccionados apropiadamente, ya que algunos métodos eléctricos no arrojan valores apropiados debido al tipo de roca o a los espesores que se quieren estudiar.
- Invertir en una mayor toma de información en los pozos profundos de agua para tener una mayor certeza del estado y el volumen del acuífero inferior, ya que no se tiene la información más que de dos pozos, de los 5 que se han perforado.
- Los pozos profundos de agua deben ser considerados como un pozo petrolero, en términos de las complicaciones y retos que éstos pueden presentar debido a sus altas profundidades y temperaturas.
- El monitoreo constante de los pozos y por lo tanto del acuífero es importante ya que de esta manera se puede realizar un plan correctivo o de explotación sustentable de los pozos. Como, por ejemplo, una medición regular del nivel estático por pozo para darnos una idea de la explotación el acuífero.

- Se debe tener especial cuidado en el tipo de bomba que se implementará en estos pozos, como recomendación, las bombas semisumergibles son las más apropiadas ya que no se necesita tanto mantenimiento como en una vertical.
- Limitar y realizar un apropiado plan de perforación de los pozos, así como invertir en proyectos de recarga artificial para evitar la sobre explotación de los acuíferos.
- Ampliar el conocimiento sobre la permeabilidad, porosidad y conductividad hidráulica de la porción en donde se tiene el acuífero inferior.
- Actualizar constantemente los valores hidráulicos presentes en los pozos y en el acuífero de tal modo que se tengan siempre valores recientes y correctos para realizar evaluaciones mas apropiadas al momento en que sea necesario.
- Para el caso de la agricultura y para el riego en general es importante hacer una concientización y pláticas sobre reutilización y eficientización de las aguas tratadas.
- Podría realizarse un plan en donde se baje el nivel de población, de tal modo que la demanda de agua reduzca y sea apropiadamente distribuida.
- Reorientar la tecnología y la gestión de los riesgos de degradar el agua tanto en su calidad como cantidad.
- Realizar un modelo de optimización del recurso para proponer los escenarios técnicos y sociales más viables, así como la evaluación

económica que involucra tomar medidas y acciones que se propongan, además de conocer el impacto que tendrán tanto en el ecosistema como en la sociedad.

- Se recomienda una inversión en la renovación o mantenimiento de toda la red de transporte del agua potable en la Ciudad de México, ya que es el punto en donde más se pierde este recurso.
- Deben de reactivarse y crearse mas zonas o áreas verdes, evitando el concreto lo cual evita la filtración del agua y por lo tanto su incorporación al acuífero, haciendo menor la recarga del mismo.
- La implementación de nuevas técnicas de perforación y terminado de los pozos es necesaria para ahorrar costos y mejorar estos procesos en los pozos profundos de agua. Como por el ejemplo, la implementación de la técnica de Casing Drilling y la terminación inteligente mediante cedazos y sensores de medición.
- El aprovechamiento térmico de los PPA mediante los tubos termoeléctricos es muy interesante y apropiada para este tipo de pozos que no tienen la capacidad de generación eléctrica como un pozo geotérmico de alta entalpía.
- La implementación del aprovechamiento termoeléctrico en los PPA es recomendada, siempre y cuando se tenga una evaluación más detallada sobre las características de los gases y de las temperaturas que se pueden encontrar en estos pozos.
- Es importante realizar un detallado estudio sobre las anomalías geotérmicas que se pueden tener actualmente en la Ciudad de México. Y así tomar la

decisión de un aprovechamiento mayor de estas anomalías que podrían estar presentes en los pozos profundos de agua.

- El estudio sobre el aprovechamiento energético del volcán Popocatepetl puede ser una referencia para ser aplicado en los pozos que se tienen en la Ciudad de México, solamente que para este caso de estudio las generaciones eléctricas y de calefacción serían menores ya que no se tiene la misma energía que se puede presentar en el volcán.
- El metano que está presente en los pozos en Mixhuca debe de ser aprovechado mediante alguna mini turbina o en su defecto ser entubado para ser transportado y consumido por los usuarios que se encuentren cerca de estos pozos.

Bibliografía

- Instituto de energías renovables UNAM. (25 de Agosto del 2014) Entre el calor y el frío hay una corriente eléctrica. Recuperado de: <http://acmor.org.mx/?q=content/entre-el-calor-y-el-fr%C3%ADo-hay-una-corriente-el%C3%A9ctrica>
- Thermoelectric Handbook, Ed. Rowe DM. Chemical Rubber Company, Boca Raton (Florida) 1995.
- Dr. Fco. Ramón Zúñiga Dávila Madrid. (Febrero del 2011) Sismología. Recuperado de: <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/sismo/IntroSism.pdf>
- The guardian. (12 de noviembre del 2015) La crisis del agua en la Ciudad de México Recuperado de: <https://www.theguardian.com/cities/2015/nov/12/la-crisis-del-agua-de-la-ciudad-de-mexico>
- Michael Kimmelman. (17 de Febrero del 2017) El cambio climático amenaza con llevar a la megalópolis mexicana hacia una crisis ambiental sin precedentes. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/es/interactive/ciudad-de-mexico-al-borde-de-una-crisis-por-el-agua/>
- López Jimeno, Carlos (7 de mayo de 2014). La energía geotérmica; un recurso energético inagotable bajo nuestros pies. COITMA. Dirección General de Industria, Energía y Minas, Comunidad de Madrid.
- Carlos Lara. (27 de Octubre del 2017) Peña Nieto presentará el programa "Pozos Profundos". Recuperado de: <https://www.elsoldemexico.com.mx/mexico/sociedad/pena-nieto-presentara-el-programa-pozos-profundos-304637.html>
- Presidencia de la Republica. (27 de Octubre del 2017) Sistema de Pozos Profundos en la CDMX. Recuperado de: <https://www.gob.mx/presidencia/articulos/sistema-de-pozos-profundos-en-la-cdmx>
- Grupo Base del GW•MATE. (2006) Caracterización de Sistemas de Agua Subterránea. Recuperado de: http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/903930-1112347717990/21210588/GWMATEBN02_sp.pdf

- Bustamante Álvarez, Tomás. (2009). El agua: abundancia o escasez: dilemas para el desarrollo de Guerrero. México, D.F.: Plaza y Valdés, 2009: Dirección general de Bibliotecas.
- Connecting Waterpeople. (2015). La disponibilidad y el acceso al agua de buena calidad en el mundo en un mapa. 05/10/2018, de iagua Sitio web: <https://www.iagua.es/blogs/facts-and-figures/disponibilidad-y-acceso-agua-buena-calidad-mundo-mapa>
- Guerrero Legarreta, Manuel. (2006). El agua. México, D.F.: Fondo de Cultura Económica, 2006: Fondo de Cultura Económica.
- Sandra Pérez. (2015). Los 21 tipos de agua que existen en el Planeta Tierra. 25/08/2018, de caracterurbano Sitio web: <https://caracterurbano.com/planeta-tierra/tipos-de-agua>
- Anónimo. (2005). El Agua: y el futuro del mundo. Santiago, Chile: Aún Creemos en los Sueños, c2005: Aun Creemos en los sueños.
- Prieto Bolívar, Carlos Jaime. (2004). El Agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación. Bogotá: Ecoe Ediciones: Ecoe Ediciones.
- Úrsula Pamela García. (2018). El agua en México. 20/09/2018, de meteored.mx Sitio web: <https://www.meteored.mx/noticias/divulgacion/el-agua-en-mexico.html>
- Blanca Jiménez Cisneros, María Luisa Torregrosa y Armentia, Luis Aboytes Aguilar. (2010). El Agua en México: cauces y encauces. México: Academia Mexicana de Ciencias: Comisión Nacional del Agua: Academia Mexicana de Ciencias.
- Sainz, Jaime; Becerra, Mariana. (2004). Los conflictos por el agua en México. 02/11/2018, de Gaceta Ecológica Sitio web: <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906705.pdf>
- Hilda R. Guerrero García Rojas, Antonio Yúñez-Naude y Josué Medellín-Azuara. (2008). El Agua en México: consecuencias de las políticas de intervención en el sector. México: Fondo de Cultura Económica: Fondo de Cultura Económica.

- Conagua. (2006). El Agua en México. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Programación: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Programación.
- Agua.org.mx. (2017). ¿QUÉ ES EL AGUA? 26/09/2018, de Fondo para la Comunicación y la educación Ambiental Sitio web: <https://agua.org.mx/que-es/>
- Jiménez Cisneros, Blanca E. (2006). El agua en México. UNAM: UNAM.
- Thermoelectric Handbook, Ed. Rowe DM. Chemical Rubber Company, Boca Raton (Florida) 1995.
- Swimtonic Technology. (2018). La importancia del agua para la vida. 20/09/2018, de swimtonic Sitio web: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/102/html/sec_5.html
- Título: Agua. Sitio: Importancia.org. Fecha: 29/05/2011. Autor: Cecilia Bembibre. URL: <https://www.importancia.org/agua.php>
- Conagua. (2015). Agua subterránea en México. 26/10/2018, de Para todo México Sitio web: <https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/hidrografia-de-mexico/acuiferos-de-mexico.html>
- SEMARNAP, Comisión Nacional del Agua. (2000). El Agua en México: retos y avances. México: SEMARNAP, Comisión Nacional del Agua.
- Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). (2018). Situación de los Recursos Hídricos. 15/02/2019, de gob.mx Sitio web: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica/Secretaría General de Obras/DDF. (1999). Hidrología subterránea en el valle de México. CDMX: SEGOB.

- Ing. Juan Manuel Lesser Illades. (2005). EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. 10/02/2019, de V CONGRESO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS HERMOSILLO, SONORA Sitio web: <http://www.lesser.com.mx/files/05-03-Agua-Subterranea-Cd-Mexico-Sep-2005.pdf>
- Para todo México. (2019). Acuíferos de México: Aguas Subterráneas en México - Mapa. 06/02/2019, de Para todo México Sitio web: <https://www.paratodomexico.com/geografia-de-mexico/hidrografia-de-mexico/acuiferos-de-mexico.html>
- M. Vicenta Esteller & Carlos Díaz-Delgado. (2012). CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO PROFUNDO DEL VALLE DE TOLUCA, EDO DE MÉXICO. MÉXICO. 20/02/2019, de Facultad de Ingeniería, UNAM
- Juan Manuel Lesser Illades, Felipe Sánchez Díaz, David González Posadas. (1992). Aspectos geohidrológicos de la Ciudad de México. SEGOB
- F. Glez. Consultores y Asociados SA de CV. (2018). Sistema de abastecimiento de agua y recarga al acuífero. 05/021/2019, de GRUPO AEROPORTUARIO DE LA CIUDAD DE MÉXICO Sitio web: <https://lopezobrador.org.mx/wp-content/uploads/2018/08/Sistema-de-abastecimiento-de-agua-y-recarga-al-acu%C3%ADfero-GACM.pdf>
- Jon Sukia Irastortza . (2009). Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia. 06/02/2019, de UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA Sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8847/00.pdf>
- Gobierno Federal de México. (2012). El reto Hídrico en México. Marsella, Francia: Foro mundial del agua de Marsella.
- Raúl Cuéllar Chávez. (2015). Aportaciones del río Nazas a la recarga de los acuíferos. 17/02/2019, de El Siglo de Torreón Sitio web: <https://agua.org.mx/aportaciones-del-rio-nazas-a-la-recarga-de-los-acuiferos/>
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. 07/02/2019, de Diario Oficial de la Federación Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/102942/DR_0901.pdf
- IGME. (2004). Tipos de acuíferos. 16/02/2019, de IGME Sitio web: http://www.igme.es/actividadesIGME/lineas/HidroyCA/publica/libros1_HR/libro104/pdf/lib104/cd88_004.pdf

- Agrónomo Global. (2016). SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO EN ACUÍFEROS DE AGUA DE LLUVIA Y DESHIELO. 16/02/2019, de Agrónomo Global Sitio web: <https://agronomoglobal.blogspot.com/2016/12/recarga-de-acuiferos.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017. CDMX: INEGI.
- Lorena Torres Bernardino. (2017). LA GESTIÓN DEL AGUA POTABLE EN LA CIUDAD DE MÉXICO. LOS RETOS HÍDRICOS DE LA CDMX: GOBERNANZA Y SUSTENTABILIDAD. México. D.F.: Instituto Nacional de Administración Pública, A.C.
- Carlos A. López. (2015). El agua en el Distrito Federal: déficit ambiental, déficit político. 17/02/2019, de nexos Sitio web: <https://labrujula.nexos.com.mx/?p=385>
- Diario Oficial de la Federación. (2016). ACUERDO POR EL QUE SE DA A CONOCER EL RESULTADO DE LOS ESTUDIOS TÉCNICOS DE LAS AGUAS NACIONALES SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO ZONA METROPOLITANA DE LA CD. DE MÉXICO, CLAVE 0901, EN LA CIUDAD DE MÉXICO, REGIÓN HIDROLÓGICO-ADMINISTRATIVA AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO. 17/02/2019, de Diario Oficial de la Federación Sitio web: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5453759&fecha=26/09/2016
- Virginia Cervantes Gutiérrez. (2009). El agua en la ciudad de México. Facultad de Ciencias, UNAM: Departamento de Ecología y Recursos Naturales, UNAM.
- MICHAEL KIMMELMAN. (2017). Ciudad de México, al borde de una crisis por el agua. 07/02/2019, de The New York Times Sitio web: <https://www.nytimes.com/es/interactive/ciudad-de-mexico-al-borde-de-una-crisis-por-el-agua/>
- CONAGUA. (2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en acuífero de Texcoco (1507). Estado de México. 07/02/2019, de Diario Oficial de la Federación Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/273113/DR_1507_TEXCOCO_E_DOM_X.pdf
- CONAGUA. (2018). Acuíferos en México. 10/02/2019, de CONAGUA Sitio web: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos>
- INEGI. (2001). Síntesis de información geográfica del estado de México. Edo. de México: INEGI.

- Uriel Naum. (2017). 2030: el año de la catástrofe del agua en México. 20/02/2019, de Forbes Sitio web: <https://www.forbes.com.mx/2030-ano-la-catastrofe-del-agua-mexico/>
- Redacción EFEverde. (2018). Expertos alertan sobreexplotación de 103 acuíferos en México. 18/02/2019, de EFEverde Sitio web: <https://www.efeverde.com/noticias/expertos-alertan-sobreexplotacion-103-acuiferos-mexico/>
- Dioreleytte Valis. (2017). La protección de acuíferos en México. 18/02/2019, de Conacyt Prensa Sitio web: <http://www.cienciamx.com/index.php/ciencia/ambiente/16057-proteccion-acuiferos-mexico>
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México, 2018.. México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2015). Atlas del Agua en México, 2015.. México: CONAGUA.
- Comisión Nacional del Agua. (2017). NUMERAGUA. México: CONAGUA.
- Laura Romero. (2015). MAPA DEL ACUÍFERO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. 01/03/2019, de Gaceta digital. UNAM Sitio web: <http://www.gaceta.unam.mx/20151203/mapa-del-acuifero-de-la-ciudad-de-mexico/>
- Fernando J. González Villarreal, Angélica Mendoza Mata y Jorge Alberto Arriaga Medina. (2017). RECARGA ARTIFICIAL DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE MÉXICO. Facultad de Ingeniería, UNAM: Instituto de Ingeniería, UNAM.
- CONAGUA. (2011). Disponibilidad de agua subterránea en México. 25/04/2019, de UNAM Sitio web: http://www.agua.unam.mx/assets/acuiferos/pdfs/presentaciones/felipearrequin_conferencia.pdf
- AQUAPOZOS GP. (2018). AQUAPOZOS GP. 25/02/2019, de AQUAPOZOS GP Sitio web: <http://aquapozosgp.com/fb/nuestros-servicios/>
- El Sol de México. (03/01/2019). Sismos intensos causan hundimientos de hasta 25 centímetros. 25/04/2019, de El Sol de México Sitio web: <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/valle-de-mexico/sismos-intensos-causan-hundimientos-hasta-25-centimetros-valle-de-mexico-19-s-2874789.html>
- Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. (Febrero, 2014). Lineamientos Técnicos para Factibilidades, SIAPA. México: <http://www.siapa.gob.mx>.

- Ingeniería Real. (2015). Tipos de pozos para extraer agua subterránea. 20/03/2019, de ingenieriareal.com Sitio web: <https://ingenieriareal.com/tipos-de-pozos-para-extraer-agua-subterranea/>
- THE NATIONAL ACADEMIES PRESS. (1995). Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability. Danvers Massachusetts: SCIENCES ENGINEERING MEDICINE.
- Por Manuel Durán. (Octubre, 2018). Pozos, la otra fuente de abasto de agua de la CDMX. 21/03/2019, de El Heraldo de México Sitio web: <https://heraldodemexico.com.mx/cdmx/pozos-la-otra-fuente-de-abasto-de-agua-de-la-cdmx/>
- SACMEX. (2017). H2O Gestión del agua. CDMX: SACMEX.
- Escuela Móvil de Agua y Saneamiento. (2015). LOS DIVERSOS TIPOS DE POZOS Y PERFORACIONES. GENERALIDADES. 22/03/2019, de WikiWater Sitio web: <https://wikiwater.fr/e28-los-diversos-tipos-de-pozos-y>
- Boletín UNAM-DGCS-212. (2017). SOBREEXPLOTACIÓN DE MANTOS ACUÍFEROS EN LA CDMX, CAUSA DE FRACTURA DE TUBERÍAS Y FUGAS DE AGUA. 22/03/2019, de Dirección General de Comunicación Social Sitio web: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_212.html
- Pamela Ventura. (2017). Sobreexplotación del acuífero potencializó daños del 19s en la CDMX. 10/04/2019, de ElBigData Sitio web: <https://elbigdata.mx/investigaciones/sobreexplotacion-del-acuifero-potencializo-danos-del-19s-en-la-cdmx/>
- José Luis Luege. (2019). Evitar la Sobreexplotación del Acuífero. 12/04/2019, de El Universal Sitio web: <https://www.eluniversal.com.mx/columna/jose-luis-luege-tamargo/metropoli/evitar-la-sobreexplotacion-del-acuifero>
- Sandra Hernandez. (2018). Sobreexplotación de mantos acuíferos debe parar: UAM. 06/05/2019, de El Universal Sitio web: <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/sobreexplotacion-de-mantos-acuiferos-debe-parar-uam>
- CONAGUA. (2006). Sistema Cutzamala. México, IV Foro Mundial del Agua: AGR, Color, S.A. de C.V.
- www.seragro.cl. (Mayo, 2016). Como hacer pozos profundos. Consideraciones técnicas y legales. 05/05/2019, de www.seragro.cl Sitio web:

<https://www.portalfruticola.com/noticias/2016/05/05/como-hacer-pozos-profundos-consideraciones-tecnicas-y-legales/>

- Luis Jerónimo. (2015). Elementos de Perforación. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- SACMEX. (2014). Crisis de los sistemas de agua potable en México. H2O Gestión del Agua, 03, 80.
- DIEGO FORERO BARRIOS. (2016). SACMEX. (2014). Crisis de los sistemas de agua potable en México. H2O Gestión del Agua, 03, 80. 16/04/2019, de El Heraldo Sitio web: <https://www.elheraldo.co/local/pozos-profundos-de-agua-una-alternativa-para-mitigar-la-sequia-250174>
- LeroyMerlin. (2010). ¿Cuáles son las 9 ventajas del agua subterránea en pozos?. 18/04/2019, de LeroyMerlin Sitio web: <https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Bricopedia-Fontaner%C3%ADa/Cu%C3%A1les-son-las-9-ventajas-del-agua-subterr%C3%A1nea-en-pozos/ta-p/103391>
- Raúl Campillo Urbano. (2016). Aguas Subterráneas Ventajas y Problemas. 15/05/2019, de Aguamarket Sitio web: <https://www.aquamarket.com/tema-interes.asp?id=317&tema=Aguas+Subterráneas+Ventajas+y+Problemas>
- El Reforma. (2018). Pozos ultraprofundos en CDMX son un gran riesgo ambiental. 08/05/2019, de debate Sitio web: <https://www.debate.com.mx/mexico/cdmx-pozo-ultraprofundo-agua-riesgo-ambiental--20180507-0026.html>
- Pérez-Cruz, G. A., 1988, Estudio sísmológico de reflexión del subsuelo de la ciudad de México, México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de maestría, 83 pp.
- Metropoli. (2018). Pese a advertencias, CDMX va por quinto pozo ultraprofundo. 12/05/2019, de La Silla Roja Sitio web: <https://lasillarota.com/extraccion-de-agua-cdmx-va-por-quinto-pozo-ultraprofundo-pese-advertencias-expertos-ambientales/220960>
- Mariano D'angelo. (2016). Riesgos de consumir agua de pozo. 11/05/2019, de General Water Company Argentina Sitio web: <https://gwc.com.ar/agua/riesgos-agua-pozo/>
- Grupo Roma. (2008). CONSTRUCCION DE POZO PROFUNDO PARA ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN EL PREDIO DE LA UNIDAD

HABITACIONAL, COSTA AZUL EN EL MUNICIPIO DE COATZACOALCOS, VER.
Veracruz: R.M. DE CUATZACUALCOS, S.A. DE C.V.

- Perforación de pozo profundo, equipamiento, electrificación y construcción de línea de conducción. (2009). Perforación de pozo profundo, equipamiento, electrificación y construcción de línea de conducción de agua potable para la localidad de Colimilla (La Culebra), Mpio. de Manzanillo, Colima. Manzanillo, Col: Gobierno del estado de Colima.
- Ingeniero Agrónomo M.Sc. y Oscar Reckmann . (2000). "Pozos Profundos". Santiago, Chile: Gobierno de Chile.
- SACMEX. (2018). Diagnóstico, logros y desafíos, SACMEX 2018. CDMX: Helios Comunicación, S.A. de C.V.
- Eric Morales-Casique* , Oscar A. Escolero y José L. Arce. (2015). Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS, 31, 64-75.
- SACMEX. (2016). Pozos SACMEX. 20/04/2019, de GC Sitio web: http://132.248.14.102/layers/CapaBase:iii_1_2_pozos_sacmex
- Rocío González Alvarado. (2012). La mitad de los pozos de agua que hay son clandestinos: ALDF. 05/05/2019, de La Jornada Sitio web: <https://www.jornada.com.mx/2012/05/26/capital/031n1cap>
- Staff ActualMX. (2017). EL NUEVO POZO DE LA CDMX QUE EXTRAE AGUA 2 MIL METROS BAJO TIERRA. 30/04/2019, de ActualMX.com Sitio web: <http://www.actualmx.com/pozo-santa-catarina-3a/>
- Enrico Garibaldi. (2017). Ponen en marcha Pozo Santa Catarina 3A que extraerá agua. 29/04/2019, de Agencia Ángel Metropolitano Sitio web: <https://angelmetropolitano.com.mx/2017/10/29/ponen-en-marcha-pozo-santa-catarina-3a-que-extraera-agua/>
- FANNY MIRANDA. (2014). Pemex perforará 2 pozos en DF para extraer agua. 19/04/2019, de Milenio Sitio web: <https://www.milenio.com/estados/pemex-perforara-2-pozos-df-extraer-agua>
- Eric Morales Casique y Óscar Escolero Fuentes. (2013). NECESARIOS, MÁS ESTUDIOS Y PERFORACIONES PARA ANALIZAR RESULTADOS DEL POZO PROFUNDO DE IZTAPALAPA. Ciudad Universitaria: Boletín UNAM-DGCS-067.

- Reforma. (2019). Detienen perforación de pozos profundos en CDMX. 07/04/2019, de NTRZACATECAS.COM Sitio web: <http://ntrzacatecas.com/2019/01/09/detienen-perforacion-de-pozos-profundos-en-cdmx/>
- SACMEX. (2017). Ciclo urbano del agua en México. H2O Gestión del Agua, 13, 80.
- SACMEX. (2014). El pozo profundo de la Ciudad de México. H2O Gestión del Agua, 01, 80.
- SACMEX. (2016). Estrategias para la sustentabilidad del acuífero del Valle de México. H2O Gestión del Agua, 10, 80.
- BLOG VENTAGENERADORES. (2016). Guía completa para comprar un Generador Eléctrico: Tipos, Potencia, Cómo y Dónde elegir el apropiado.. 05/06/2019, de VENTAGENERADORES.NET Sitio web: <http://www.ventageneradores.net/blog/guia-completa-para-comprar-un-generador-electrico-tipos-potencia-como-y-donde-elegir-el-apropiado/>
- Ramsés Pech. (2018). CFE y costos de generación. 16/06/2019, de Oil & Gas Magazine Sitio web: <https://oilandgasmagazine.com.mx/2018/08/cfe-y-costos-de-generacion/>
- Francisco Moctezuma. (23/05/2017). CREAN SISTEMA PARA GENERAR ELECTRICIDAD. Gaseta UNAM, 4861, 8. 23/06/2109, De Gaseta UNAM Base de datos.
- Publicación de las Naciones Unidas. (2016). objetivos de desarrollo sustentable. En Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago: CEPAL.
- Fernando Pérez Monteagudo. (2003). Criterios para una explotación sustentable del agua subterránea Aspectos cualitativos y estrategias para el manejo de acuíferos. Ingeniería Hidráulica en México, XVIII, 5-20.
- Guillermo Llopis y Rodrigo Angulo. (2010). Guía de la Energía Geotérmica. 08/06/2019, de Fundación de la energía de la comunidad de Madrid Sitio web: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-geotermica.pdf>
- José L. Lezama Campos y otros. (Agosto 2016). Interpretación del registro geofísico del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y su correlación litológica en la cuenca de México. Revista mexicana de ciencias geológicas, 33, 208.

- Alberto Vásquez-Serrano, Rebeca Camacho-Rangel , José Luis Arce-Saldaña y Eric Morales-Casique. (Enero 2019). Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores. REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS, 36, 53.
- Boletín UNAM-DGCS-067. (2013). NECESARIOS, MÁS ESTUDIOS Y PERFORACIONES PARA ANALIZAR RESULTADOS DEL POZO PROFUNDO DE IZTAPALAPA. 20/06/2019, de UNAM Sitio web: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2013_067.html
- Miguel Ángel Mancera Espinosa. (2017). Programa de Pozos Profundos. 21/06/2019, de Gobierno de la Ciudad de México Sitio web: <http://comunicacion.cdmx.gob.mx/noticias/nota/programa-de-pozos-profundos>
- Staff. (2018). Pozo mega profundo en el Cerro de la Estrella, anuncian. 08/06/2019, de Pagina Ciudadana Sitio web: <https://www.paginaciudadana.com/pozo-mega-profundo-en-el-cerro-de-la-estrella-anuncian/>
- Alejandro Ramos S.. (2017). Crece búsqueda de agua a dos km de profundidad. 09/06/2017, de Agua.org.mx Sitio web: <https://agua.org.mx/crece-busqueda-agua-a-dos-km-profundidad/>
- Ivan Sosa. (2015). Hallan vapor y no agua en 2 pozos profundos. 21/06/2019, de Reforma Sitio web: <https://www.reforma.com/aplicacioneslibre/articulo/default.aspx?id=1005398&md5=5e0678931adddb46c46945e20535b044&ta=0dfdbac11765226904c16cb9ad1b2efe>
- Presidencia de la República. (2017). CdMx: Inaugura el Presidente Enrique Peña Nieto el Sistema de Pozos Profundos que dotará de más agua potable a la Ciudad de México . 22/06/2019, de Presidencia de la República Sitio web: <https://www.gob.mx/presidencia>
- José Luis Arce y otros. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67, 123-142.

- Guillermo Ríos Munive. (2018). Conagua y Pemex construirán pozo profundo en Iztapalapa. 21/06/2019, de Expediente Ultra Sitio web: José Luis Arce y otros. (2015). Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67, 123-142.
- Alejandro Ramos S.. (2017). Crece búsqueda de agua a dos km de profundidad. 17/06/2019, de Agua.org.mx Sitio web: <https://agua.org.mx/crece-busqueda-agua-a-dos-km-profundidad/>
- Iván Sosa. (2017). Silencias Pozo de Vapor. Reforma, 1-3.
- Nación321. (2005). ¿Sabías que hay 5 volcanes en la Ciudad de México?. 05/06/2019, de Nación321 Sitio web: <https://www.nacion321.com/trends/sabias-que-hay-5-volcanes-en-la-ciudad-de-mexico>
- Alberto Nájar. (2015). La cápsula del tiempo que esconde un volcán en Ciudad de México. 04/06/2019, de BBC, Mundo Sitio web: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150401_mexico_capsula_tiempo_volcan_cultura_an
- Luis Enrique Ortiz y otros. (2006). Características geológicas y potencial metalogenético de los principales complejos ultramáficos-máficos de México. BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA, CONMEMORATIVO DEL CENTENARIO, 161-181.
- Alberto Vásquez y otros. (2019). Análisis de fracturas geológicas en el pozo Agrícola Oriental 2C, Ciudad de México y su relación con fallas mayores. REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS , 36, 38-53.
- José Luis Macías. (2015). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 57, 379-424.
- Eric Morales-Casique, Oscar A. Escolero, José L. Arce. (2015). Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 67, 203-2014.

- Édgar Santoyo y Rosa María Barragán-Reyes. (2010). ENERGÍA GEOTÉRMICA. 27/06/2019, de ciencia Sitio web: https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- Luis E. González y otros. (2015). Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica. Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, ISSN: 2007-9753, 1-31.
- SERGIO MEANA. (2014). Energía geotérmica, una de las apuestas fuertes del futuro. 27/06/2019, de El Financiero Sitio web: <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/energia-geotermica-una-de-las-apuestas-fuertes-del-futuro>
- NOTIMEX. (2013). Mejoró la calidad del agua en el pozo hallado en Iztapalapa: Sacmex. 27/06/2019, de Excelsior Sitio web: <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2013/02/12/883948>
- NTRZACATECAS.COM. (2019). Detienen perforación de pozos profundos en CDMX. 05/07/2019, de Reforma Sitio web: <http://ntrzacatecas.com/2019/01/09/detienen-perforacion-de-pozos-profundos-en-cdmx/>
- Arturo Solís. (2015). El volcán que puede detener el colapso de la Ciudad de México. 05/07/2019, de Forbes Sitio web: <https://www.forbes.com.mx/el-volcan-que-puede-detener-el-colapso-de-la-ciudad-de-mexico/>
- Proyecto FSE . (2015). ¿Por qué en el DF no hay plantas de energía geotérmica?. 05/07/2019, de Proyecto FSE Sitio web: <https://www.proyctofse.mx/2015/10/05/por-que-en-el-df-no-hay-plantas-de-energia-geotermica/>
- Yureli Cacho Carranza. (2018). Estado de la Energía Geotérmica en México. Petroquimex. La revista de la industria Energética, 96, 1-7.
- Fabiola Torres. (2013). Tubos termoeléctricos generan electricidad a partir de agua caliente. 20/07/2019, de NuevaMujer Sitio web: <https://www.nuevamujer.com/lifestyle/2013/01/10/tubos-termoelectricos-generan-electricidad-a-partir-de-agua-caliente.html>

- Comisión europea. (2017). HE EXERGY DRIVE™ – AN ENGINE THAT RUNS ON HOT WATER. 02/07/2019, de CORDIS Sitio web: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/197157/brief/es>
- Fabian Schmidt. (2012). Electricidad a partir de calor. 02/07/2019, de Made for minds Sitio web: <https://www.dw.com/es/electricidad-a-partir-de-calor/a-16105681>
- Santiago. (2012). Tubos Termoeléctricos Que Producen Energía Limpia A Partir De Agua Caliente. 20/07/2019, de D FORCE SOLAR Sitio web: <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/tubos-termoelectricos-que-producen-energia-limpia-a-partir-de-agua-caliente/>
- Rosa María Bolaños. (2015). Generan electricidad por medio de gas metano. 18/07/2019, de Prensa Libre Sitio web: <https://www.prensalibre.com/economia/generan-energia-con-metano/>