



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

**POSIBILIDADES TÉCNICAS DEL USO DE DISPOSITIVOS
DE INFILTRACIÓN DE AGUA EN LAS CUENCAS DEL
SUROESTE DEL DISTRITO FEDERAL.**

T E S I S

Que para obtener el título de:

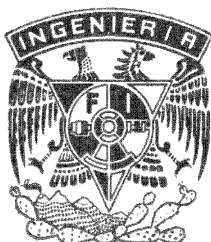
INGENIERO CIVIL

Presenta:

FELIPE AGUILAR FLORES

DIRECTOR DE TESIS

Dr. H. Leonardo Cisneros Iturbe



MÉXICO, D.F.

2007



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.

DEDICATORIA

A mis padres: Por todo el amor, cariño, sacrificio y apoyo que me han brindado día con día, lo que ha contribuido para formar la persona que soy, así como la dedicación, motivación y sobre todo los valores que solo ellos podrían enseñarme los cuales me han ayudado para cumplir con cada una de mis metas. **Gracias**

A mi esposa: Por ser la esposa, amiga y compañera ideal para mi, le doy gracias por su apoyo incondicional, su paciencia y sobre todo por ser la mujer que yo siempre quise para mi.

A mis hijos: Son la razón por la cual seguiré adelante.

A mis hermanas: Por su apoyo, cariño y comprensión que me han brindado toda su vida.

Al Dr. Leonardo Cisneros: Por los conocimientos transmitidos, por la oportunidad otorgada y las facilidades proporcionadas para la elaboración de la presente tesis.

Al Instituto de Ingeniería, UNAM: Por el apoyo recibido para la elaboración de mi tesis y sobre todo por permitirme seguir con mis estudios de Maestría y a los amigos que he conseguido durante mi estancia en este Instituto.

Y por ultimo a la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO que a través de su FACULTAD DE INGENIERÍA han forjado mi preparación académica.

ÍNDICE

	página
Introducción	1
CAPÍTULO 1	
1. Aspectos legales de los aprovechamientos de aguas pluviales y tratadas	3
1.1. Marco jurídico local y federal	3
1.2. Discusión	12
CAPÍTULO 2	
2. Estructuras de infiltración	14
2.1. Conceptos básicos	14
2.2. Descripción de estructuras y procedimientos: ejemplos de experiencias	18
2.3. Experiencias en México	28
CAPÍTULO 3	
3. Geohidrología del suroeste del Distrito Federal	32
3.1. Geología y tipos de suelo	32
3.2. Situación de acuíferos	35
3.3. Pluviometría	39
3.4. Balance hidrológico	44
CAPÍTULO 4	
4. Disponibilidad de agua en la zona de estudio	46
4.1. Aguas pluviales	46
4.1.1. Volúmenes mensuales	46
4.1.2. Afloramiento de aguas pluviales	49
4.1.3. Estructuras de drenaje y detención	50
4.2. Aguas residuales	57
4.2.1. Tratamiento y calidad del agua para infiltración	57
4.2.2. Disponibilidad	65

CAPÍTULO 5

5. Zonas de infiltración	70
5.1. Resumen de los criterios para definir las zonas de infiltración	70
5.2. Perspectivas	82
5.3. Planos	90

CONCLUSIONES

6. Conclusiones	93
Bibliografía	97

INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México se asienta la zona urbana más grande del país con aproximadamente 18 millones de habitantes (Jiménez, et al, 2004), en la cual se concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política del país. Ante esto, en los últimos años se ha acrecentado el problema de satisfacer la demanda de agua potable para la población de la ciudad, ya que actualmente se extrae de los mantos acuíferos el 70% del agua que se utiliza en la ciudad. Esto ha generado una sobreexplotación del acuífero y hundimientos del suelo en la ciudad.

La zona suroeste del Distrito Federal se ha caracterizado por tener los mayores registros de altura de precipitación, los cuales generan los escurrimientos que son favorecidos por el relieve topográfico que existe en el lugar y por la urbanización descontrolada que, al llegar a las partes bajas de la zona provocan encharcamientos e inundaciones. A consecuencia de esto, en décadas pasadas el Gobierno del Distrito Federal implementó la construcción de vasos reguladores (presas de detención) para controlar los escurrimientos y que éstos fueran descargados al sistema de drenaje de la Ciudad.

Ante estos volúmenes de agua que no son aprovechados y la problemática de la sobreexplotación de los mantos acuíferos de la ciudad, ha surgido la inquietud de elaborar este trabajo, en el que se pretende estudiar las posibilidades técnicas del uso de dispositivos de infiltración artificial para el agua pluvial que se precipita en la zona suroeste y con estos volúmenes de agua que se infiltren contribuir a recargar de los mantos acuíferos de la ciudad.

Por otra parte, dada la cantidad de aguas residuales que son extraídas de la cuenca del valle de México sin tratamiento, se estudia también la posibilidad de fomentar el reuso de esta agua a través de su infiltración al subsuelo.

Debido a lo anterior, en el uso de los dispositivos de infiltración se debe mencionar que éstos pueden utilizar adecuadamente dos tipos de agua: pluvial o residual tratada, por tal motivo en el capítulo 1, se hace referencia a los aspectos legales que existen al respecto en el Distrito Federal sobre el aprovechamiento de estos tipos de agua.

Existen diferentes modelos de dispositivos de infiltración; por lo que en el capítulo 2 se hace una descripción de cada uno de ellos, haciendo referencia a algunos ejemplos de experiencias que se han tenido en el Mundo y en la Ciudad de México.

En el capítulo 3 se hace la descripción del tipo de suelo y la situación actual del acuífero de la Ciudad de México. También en este capítulo, se hace la recopilación de los registros de lluvia ocurridos en el Distrito Federal entre los años de 1993 a 2005.

En el capítulo 4 se hace un promedio estadístico con los registros de lluvia con el fin de conocer los volúmenes mensuales de lluvia del Distrito Federal en los últimos años. También se hace un recuento de las estructuras de drenaje y detención de la zona suroeste de la Ciudad y por último se estudia la disponibilidad de agua pluvial y residual tratada con la que se puede llevar a cabo la infiltración.

Por último, en el capítulo 5 se definen los posibles sitios de infiltración y se hace la recopilación de planos que resumen los aspectos estudiados en este trabajo.

1 ASPECTOS LEGALES DE LOS APROVECHAMIENTOS DE AGUAS PLUVIALES Y TRATADAS

En este capítulo se hace referencia al marco legal que existe en la Ciudad de México sobre el aprovechamiento de aguas pluviales y tratadas por infiltrar, para garantizar que el agua que el agua del reuso potencialmente disponible en el Distrito Federal cumpla con las normas vigentes.

1.1 MARCO JURÍDICO LEGAL Y FEDERAL

Entre las instituciones encargadas de crear e implantar las normatividades locales y federales para el cuidado del agua en la ciudad destacan:

- Autoridades locales:
 - Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.
 - Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
 - Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial.

- Autoridades federales
 - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos naturales.
 - Comisión Nacional del Agua.

Dada la importancia que tiene el acuífero de la Ciudad de México, las obras para recargar agua de manera artificial deben ser apropiadamente diseñadas y operadas, con el adecuado control y monitoreo para evitar que se infiltren contaminantes hasta el acuífero que pudieran alterar su calidad fisicoquímica y microbiológica a corto, mediano y largo plazo.

Para vigilar lo anterior, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) junto con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) han propuesto el anteproyecto a la norma NOM-014-CNA-2003, la cual tiene por título "Requisitos para la recarga artificial de acuíferos" y tiene como objetivo establecer los requisitos que debe cumplir la calidad del agua, la operación y el monitoreo, utilizados en los sistemas de recarga artificial de acuíferos.

Por su parte, SEMARNAT y CONAGUA tienen su propia clasificación de recarga artificial:

- Recarga superficial: consiste en la recarga desde la superficie por infiltración en obras como: estanques o piletas de infiltración, inundación del terreno, cauces acondicionados, trincheras de infiltración.

- Recarga subsuperficial: consiste en la introducción del agua en la zona no saturada mediante pozos secos (trincheras) y estanques profundos.
- Recarga directa: consiste en la introducción directa del agua al acuífero por medio de pozos cuya sección abierta lo penetran parcial o totalmente.

Infiltración de agua tratada

Según el anteproyecto de la norma NOM-014-CNA-2003, el agua residual tratada que puede ser considerada como una fuente potencial para la recarga del acuífero deberá someterse a los tratamientos que sean necesarios para poder infiltrarla.

El anteproyecto de la normatividad requiere de cierta información para evaluar un sitio destinado a la recarga artificial de acuíferos, ésta información debe incluir lo siguiente:

1 Localización

Un mapa con la ubicación geográfica de la(s) obra(s) de recarga que se proyectan construir, así como de las captaciones subterráneas y de las fuentes de contaminación del agua subterránea (actuales o potenciales).

2 Fuente del Agua de Recarga

Ubicación y características de la fuente de agua residual que se pretende utilizar para el sistema de recarga artificial (SRA) en términos de su origen, régimen de descarga, tipo y nivel de tratamiento, volumen de agua disponible, uso o destino actual, características físico-químicas y microbiológicas del agua de recarga.

3 Hidrogeología de la Zona del Proyecto de Recarga Artificial

- a) Mapas de configuración y de profundidad de niveles piezométricos ubicados y que subyacen a la zona de estudio.
- b) Perfil estratigráfico, obtenido mediante perforaciones exploratorias y sondeos geofísicos.
- c) Características hidráulicas del acuífero que se pretende recargar: conductividad, permeabilidad, porosidad y coeficiente de almacenamiento.
- d) Características físicoquímicas y microbiológicas del agua subterránea nativa.
- e) Captaciones de agua subterránea: características constructivas, registros (geológico y geofísico), uso y calidad del agua extraída, nivel estático y dinámico.
- f) Determinación de la posible conexión hidráulica entre acuíferos;

- g) Fuentes de contaminación aledañas al área de recarga: tipo de fuente, ubicación, régimen de descarga, características físico-químicas del efluente.
- 4 No se permite la construcción de SRA en los casos siguientes:
- En terrenos donde las características físico-químicas del suelo o del agua subterránea, hayan sido degradadas a causa de un evento previo de contaminación, aun cuando se hayan aplicado medidas de saneamiento.
 - En terrenos en donde predominen rocas cársticas, fracturadas, o clásticos de grano grueso, este tipo de rocas no tienen la capacidad para eliminar o atenuar los contaminantes presentes en el agua de recarga.
- 5 Calidad del Agua de Recarga

El agua residual utilizada en la recarga debe cumplir los requisitos indicados en la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Calidad del agua residual para recarga artificial (NOM-014-CNA-2003)

Tipo de Contaminante	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directo
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos.	Remoción o inactivación total microorganismos entero patógenos.
Contaminantes Regulados por Norma	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994	Límites permisibles NOM-127-SSA1-1994.
Contaminantes no Regulados por Norma	DBO5 ≤ 30 mg/l, COT ≤ 16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

COT: Carbono orgánico total.

DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno al quinto día a una temperatura de 20 °C.

- 6 Cuando a distancias menores de un kilómetro del límite exterior del SRA existan captaciones que suministran agua para usos público-urbano o doméstico, se debe cumplir, además de los requisitos establecidos en la Tabla 1.1, los enumerados a continuación:
- Realizar un proyecto "piloto" de recarga *in situ*, cuya operación tenga la duración suficiente para determinar: la calidad del agua resultante de la mezcla del agua de recarga con el agua subterránea nativa.
 - Efectuar un análisis hidrogeoquímico, basado en un modelo numérico, de las probables reacciones físicoquímicas del agua de recarga con el agua subterránea nativa y con los materiales que conforman el acuífero y la zona no saturada.
 - El análisis debe concluir: si el agua de recarga es compatible con el agua subterránea nativa o si existen condiciones para generar alguna reacción físicoquímica que altere la calidad del agua nativa o las propiedades hidráulicas del acuífero.
 - Respetar las distancias mínimas y el tiempo de residencia que se especifican en la Tabla 1.2

Tabla 1.2 Requisitos relativos a la distancia mínima a las captaciones y al tiempo de residencia en el subsuelo del agua de recarga (NOM-014-CNA-2003)

Variable	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial / Subsuperficial	Directo
Distancia horizontal mínima entre el límite exterior del SRA y las captaciones para uso público-urbano o doméstico.	150 m	600 m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción.	6 meses	12 meses

- 7 Con base en los resultados del inciso 6.a, proyecto "piloto", de los análisis de los estudios y del modelo de simulación a que se refieren los incisos anteriores, se determina si es procedente autorizar la construcción del SRA y en su caso, se fija el volumen máximo de recarga considerando la extracción y las características constructivas de las captaciones de agua para usos doméstico y público-urbano.

- 8 Se podrá aplicar agua de recarga con una calidad menor a la establecida en la Tabla 1.1, sujeto al cumplimiento de las condiciones siguientes:
 - a) Que se construyan SRA únicamente de tipo superficial / subsuperficial.
 - b) Que a distancias menores de un km del límite exterior de las obras de recarga, no existan captaciones que suministren agua subterránea para usos público-urbano o doméstico, y existan captaciones que recuperen el agua de recarga para otros usos distintos a los mencionados.
 - c) Que se compruebe mediante estudios técnicos, que el suelo y el subsuelo tienen capacidad para remover o reducir la concentración de aquellos elementos del agua de recarga que excedan los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

- 9 Monitoreo.

Todo PRA debe incluir un programa de monitoreo que, en forma periódica, antes y durante la operación de las obras de recarga, registre:

 - i) la calidad del agua utilizada en la recarga,
 - ii) la calidad del agua derivada de la mezcla del agua de recarga y el agua subterránea nativa, y
 - iii) las variaciones de los niveles piezométricos.

- 10 En los SRA de tipo directo, se deben construir pozos de monitoreo ubicados a distancias equivalentes a 1/4, 1/2 y 3/4 de la distancia total entre el pozo de inyección y el punto de extracción más cercano.

- 11 En los SRA de tipo superficial/subsuperficial, se debe contar con un sistema de monitoreo de agua residual en las obras de recarga, y una red de pozos de monitoreo. Las características constructivas de los pozos de monitoreo y su ubicación se determinan, en cada caso, en función de las características del SRA y de las propiedades hidráulicas del subsuelo reportadas en el requisito 6 de este Anteproyecto. En todos los casos, la red de monitoreo debe contar con un mínimo de tres (3) pozos de monitoreo y garantizar:
 - a) El muestreo representativo del agua de recarga y del agua resultante del SRA;
 - b) El monitoreo periódico de las fluctuaciones piezométricas en el lugar de recarga y sus inmediaciones.

- 12 Cada pozo o estación de monitoreo debe contar con:
 - a) Número y clave de identificación del pozo en un área visible;
 - b) Ubicación geográfica (x, y, z) determinada con un geoposicionador.
 - c) Corte litológico de las formaciones atravesadas y registros geofísicos;
 - d) Croquis de terminación;
 - e) Relación de parámetros fisicoquímicos medidos en el pozo;
 - f) Frecuencia y protocolo de monitoreo;
 - g) En su caso, características y diagrama de instalación de los dispositivos automáticos de medición instalados en éste.

- 13 El agua de recarga debe ser muestreada con una frecuencia de cada quince días y el agua de los pozos de monitoreo mediante un promedio mensual.

- 14 Los análisis del agua se deben realizar en un laboratorio de prueba acreditado por una entidad de acreditación para los parámetros que se solicitan en el presente Anteproyecto de Norma.

- 15 La construcción y cierre de pozos a que se refiere este anteproyecto se llevarán a cabo de acuerdo con las normas NOM-003-CNA-1996 y NOM-004-CNA-1996, respectivamente.

- 16 Cuando los criterios de calidad del agua de recarga no cumplan con las especificaciones establecidas en el requisito 5, Tabla 1.2 según corresponda al tipo de obras, o el requisito 8.c, se debe suspender la operación del sistema hasta alcanzar los criterios de calidad establecidos.
 - a) Para aquellos parámetros no regulados por la NOM-127-SSA1-1994, se debe considerar la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Niveles máximos permisibles de contaminantes no regulados por norma, en aguas residuales destinadas a la recarga artificial de acuíferos. (NOM-014-CNA-2003)

Característica	Máximo nivel (mg/l)
Microbiológicos	
<i>Cryptosporidium</i>	Ausencia o no detectable
<i>Vibrio cholerae</i>	Ausencia o no detectable
<i>Giardia lamblia</i>	Ausencia o no detectable
Conteo de Bacterias Heterotróficas (HPC)	Ausencia o no detectable
<i>Legionella</i>	Ausencia o no detectable
Enterovirus	Ausencia o no detectable
Productos de desinfección	
Bromatos	0.01
Cloritos	1
Acidos haloacéticos (HAA5)	0.06
Desinfectantes	
Cloraminas (como Cl ₂)	Ausencia o no detectable
Bióxido de cloro (como ClO ₂)	Ausencia o no detectable
Contaminante químicos inorgánicos	
Antimonio	0.006
Asbesto (fibra >10 mm)	7 millones de fibras por litro
Berilio	0.004
Boro	0.3
Hierro	0.3
Plata	0.1
Selenio	0.05
Contaminante químicos orgánicos	
Archilamida	0.0005
Alacloro	0.02
Aldicarb	0.01
Atrazina	0.002
Benzo(a)pireno (PAHs)	0.0002
Bifenilos policlorados (PCBs)	0.0005
Carbofurano	0.005
Clorobenceno	0.1
Cloruro de vinil	0.002
Dalapon	0.2
Dibromoetileno	0.00005
1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	0.001
o-Diclorobenceno	0.6
p-Diclorobenceno	0.075
1,2-Dicloroetano	0.005
1,1-Dicloroetileno	0.007
cis-1,2-Dicloroetileno	0.07
Trans-1,2-Dicloroetileno	0.1
Diclorometano	0.005
1,2-Dichloropropano	0.005
Di(2-ethylhexyl) adipato	0.4
Di(2-ethylhexyl) ftalato	0.006

Continuación de la tabla 1.3

Dinoseb	0.007
Dioxina (2,3,7,8-TCDD)	0.00000003
Diquat	0.02
Endothall	0.1
Endrin	0.002
Epiclorohidrina	0.002
Epóxido de heptacloro	0.0002
Estireno	0.02
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Glifosato	0.7
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.001
Hexaclorobenceno	0.001
Hexaclorociclopentadieno	0.05
Metil-terbutil-éter	0.03
Metoxicloro	0.02
Oxamil (Vidato)	0.2
Pentaclorofenol	0.001
Picloram	0.5
Simazina	0.004
Tetracloroetileno	0.005
Tetracloruro de carbono	0.005
Toxafeno	0.003
2,4,5-TP (Silvex)	0.05
1,2,4-Triclorobenceno	0.07
1,1,1-Tricloroetano	0.2
1,1,2-Tricloroetano	0.005
Tricloroetileno	0.005

Lo anterior corresponde al anteproyecto de la norma federal NOM-014-CNA-2003. En el siguiente subcapítulo se hacen algunos comentarios respecto a éste anteproyecto. Además, mas adelante se discutirá la NADF-003-AGUA-2002, la cual es una norma local elaborada por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

Infiltración de agua pluvial

En lo que se refiere al tema de infiltración de agua pluvial se tienen los lineamientos técnicos generales para proyectos de recarga artificial con agua meteórica y superficial, aprobados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y son los siguientes:

- 1 Infiltrar exclusivamente aguas pluviales en áreas alejadas de focos actuales o potenciales de contaminación (basureros, gasolineras, desechos tóxicos, etc.) y fuera de áreas de acumulación de desechos sólidos o líquidos.

- 2 No provocar afectaciones en aprovechamientos hidráulicos subterráneos u obras civiles subterráneas de terceros, aledañas a los pozos de absorción.
- 3 Mantener una distancia mínima de 5 m, entre la profundidad total del pozo de absorción y el nivel freático local.
- 4 Construir instalaciones adicionales (tanque sedimentador, trampa de grasas y aceites, filtros de carbón activado y rejillas) para la eliminación de sólidos gruesos y sedimentos, con el fin de prevenir la rápida obstrucción o colmatación de los pozos y garantizar la introducción de agua libre de sólidos suspendidos, compuestos orgánicos y microorganismos patógenos (Figura 1.1).
- 5 En los casos de captación de aguas pluviales en zonas urbanas se debe evitar que el agua de las primeras lluvias se utilice para recarga. Lo anterior, con objeto de reducir en lo posible el arrastre de contaminantes y sedimentos hacia los pozos y con ello, prevenir su colmatación y la contaminación del acuífero.
- 6 Realizar una distribución espacial adecuada de los pozos de absorción, a fin de propiciar la dispersión del agua pluvial en el acuífero.
- 7 Cuantificar y evaluar el impacto de los posibles volúmenes derivados hacia la recarga, en el balance hidrológico de cada región.
8. Observar la respuesta de los niveles del acuífero a la recarga artificial, utilizando pozos aledaños o de monitoreo construidos con ese propósito.
9. Se deben clausurar los pozos de infiltración conforme a lo establecido en la NOM-004-CNA-1996.

Los lineamientos técnicos anteriores tienen un enfoque general y pueden ser adecuados en cada caso, considerando las características locales del acuífero y la magnitud del volumen de agua a inyectar.

La ejecución de las obras de recarga no le otorga a los usuarios que las realicen derechos sobre un volumen adicional de aguas subterráneas, equivalente al que logren introducir al subsuelo por medio de sus obras de recarga.

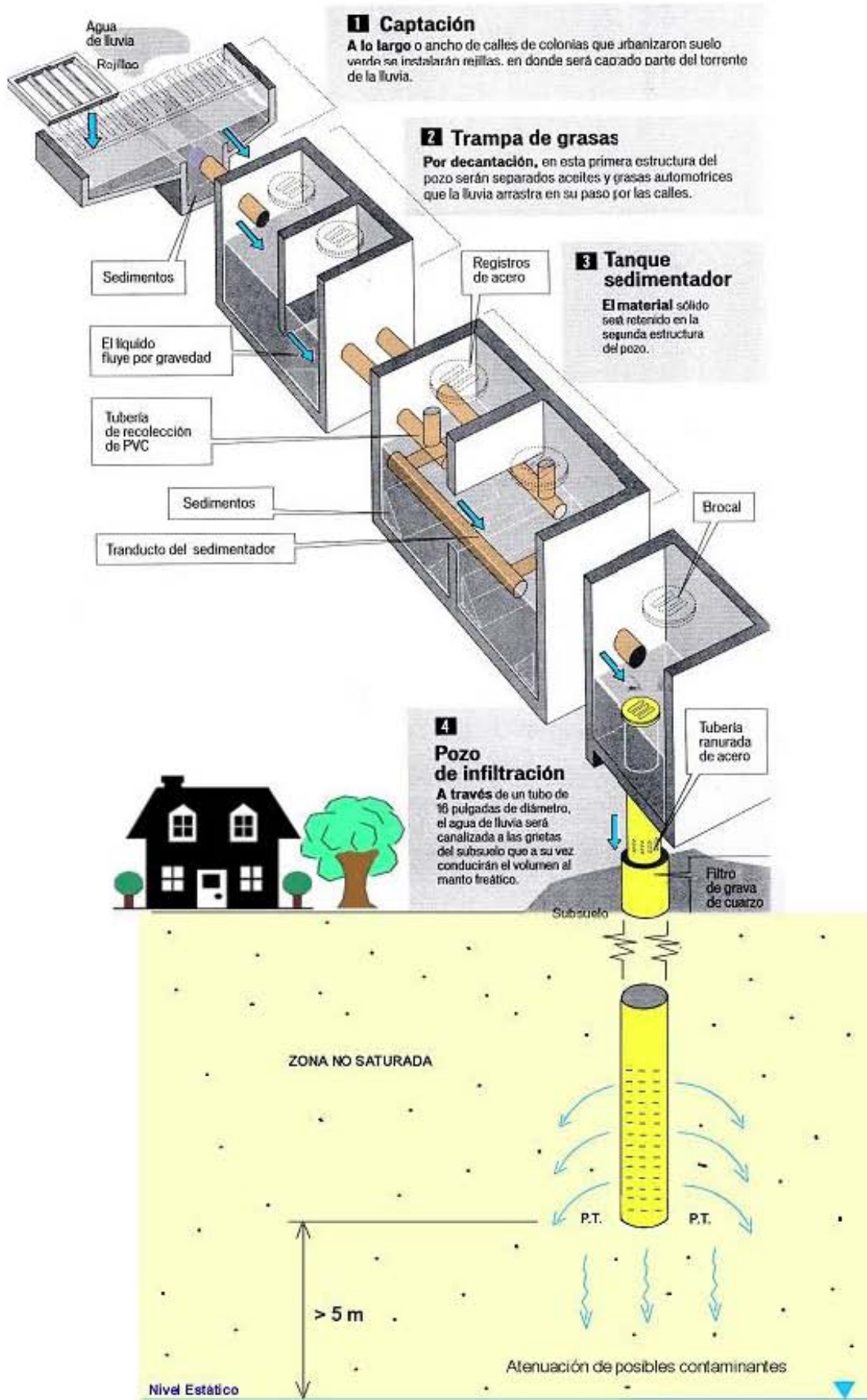


Fig. 1.1 Esquema general que debe cumplir un pozo de inyección de aguas pluviales. (Conagua, 2005)

1.2 DISCUSIÓN

Al estudiar el anteproyecto de la NOM-014-CNA-2003 se encontraron algunos aspectos para los que no se especifica de qué modo o en qué grado deben realizarse las pruebas que en ella se mencionan.

Esto se observa, por ejemplo, en lo que se refiere al anteproyecto. En la tabla 1.1 se menciona la calidad que debe cumplir el agua para su recarga artificial; en el sistema de recarga directa se señala la remoción o inactivación al 100% de microorganismos patógenos y en el sistema de recarga superficial/subsuperficial se menciona la remoción o inactivación de microorganismos patógenos, pero no se indica en qué grado se deben de remover este tipo de microorganismos.

En el inciso 6 de la norma se señala la operación de un proyecto piloto de recarga, pero no se menciona la duración del proyecto para alcanzar la mezcla del agua resultante del agua de recarga con el agua subterránea nativa. También en este punto se pide efectuar un análisis hidrogeoquímico basado en un modelo matemático para conocer las posibles reacciones de la mezcla del agua nativa con el agua de recarga, pero no se especifica cómo se debe hacer y qué debe contener este modelo.

Por último, en el inciso 13 se dice que se debe de realizar un promedio mensual a los pozos de monitoreo; el problema aquí es que no se dice con cuántas mediciones se debe conformar el promedio.

También en la norma se debe mencionar en que tipo de zonas ó en que tipo de medio urbano se puede construir ó instalar una estructura de recarga artificial. En la norma se pide construir pozos de monitoreo que deben estar a una cierta distancia del pozo de inyección de agua tratada y del punto de extracción de agua del subsuelo, lo que en un medio urbano puede encontrar muchas dificultades.

Ahora bien, si se llevara acabo la infiltración de aguas residuales tratadas se podrían mitigar los hundimientos regionales que se tienen en la Ciudad de México de al menos 10 centímetros por año (SACM, 2006), provocados por la extracción de agua de los acuíferos del subsuelo. Según Domínguez, et al. (2005), el acuífero se recarga anualmente de manera natural con 1,100'000,000 m³ de agua provenientes de las lluvias que ocurren en el Valle de México, y se extraen 1,600'000,000 m³ de agua del subsuelo, esto ocasiona un déficit de 480'000,000 m³ de agua del subsuelo, que además están provocando los hundimientos en la ciudad. Ante esto el SACM ha propuesto la realización de un programa de inyección artificial al acuífero con agua residual tratada.

Entre los proyectos del programa se encuentra el que se pretende hacer en el cerro de la Estrella (en el oriente del D. F.), ya que ahí se cuenta con la planta de tratamiento de aguas residuales más grande de la ciudad, con un gasto de

operación de 2 m³/s y de acuerdo con estudios realizados por geólogos del SACM en esa zona se puede llevar a cabo la recarga.

Para realizar el proyecto el SACM se apoya en la norma ambiental para el Distrito Federal "NADF-003-AGUA-2002", cuyo título es "Condiciones y requisitos para la recarga en el Distrito Federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México" la cual entró en vigencia en Marzo del 2004 al ser publicada en la Gaceta Oficial del Distrito Federal. Esta norma fue establecida por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMADF), por lo que no está basada en el anteproyecto de recarga artificial que realizó la CONAGUA, revisada en el subcapítulo anterior.

Como el SACM se está basando en una norma local y no federal, la CONAGUA que es una institución que depende de la SEMARNAT, y ésta a su vez depende del ejecutivo federal, decidieron frenar el proyecto del Sistema de Aguas, con la justificación de que el SACM está regulando un tema que es de competencia exclusiva de las autoridades federales.

Por este motivo el proyecto no se ha llevado a cabo; cabe resaltar que la calidad del agua residual tratada que está proponiendo esta norma para llevar a cabo la infiltración es semejante a la que se requiere y pide la Secretaría de Salud en la NOM-127-SSA1-1994 para potabilizar el agua para uso y consumo humano.

En lo que respecta al agua de lluvia, ésta también podría ser usada extensamente para infiltración artificial en la Cuenca del Valle de México pues se tiene una precipitación media anual equivalente a 219 m³/s. A consecuencia de esto se origina una evapotranspiración de 75% y un escurrimiento superficial de 15 m³/s (Domínguez, et al. 2005). La mayor parte del escurrimiento es captado por el sistema de drenaje combinado y por lo tanto no es aprovechado localmente ya que se mezcla con las aguas residuales para ser conducidas hacia el exterior del Valle de México y en un menor porcentaje hacia las plantas de tratamiento.

En vista de lo anterior sería recomendable hacer un estudio hidrológico y de drenaje en la Ciudad de México para aprovechar los escurrimientos superficiales y destinar una proporción mayor de esa agua para infiltrarla al subsuelo, ya que se tiene un volumen considerable de lluvia anual que no es aprovechado.

Otra manera de aprovechar el agua de lluvia sería con estructuras de almacenamiento (pozos secos, mas adelante se ve a detalle este tipo de estructura), que de acuerdo con la dimensión del tanque de almacenamiento, precipitación del lugar y área efectiva de recolección puede abastecer de agua a un hogar durante la época de lluvias (Gleason, 2005). Este tipo de estructuras están siendo utilizadas extensivamente en muchos otros países.

2 ESTRUCTURAS DE INFILTRACIÓN

Existe una gran variedad de estructuras hidráulicas cuyo objetivo es, por una parte, aprovechar las aguas pluviales o residuales tratadas y, por otra, mitigar los efectos nocivos de la crecida de los cauces en medios urbanos. En este capítulo se mencionan algunos dispositivos de infiltración y retención de agua pluvial que se han recogido de diversa literatura.

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Antes de comenzar a describir los principios generales de las estructuras de infiltración, se evocan algunas definiciones con el fin de tener un mayor entendimiento de lo que se comenta en la literatura de las estructuras de infiltración.

Porosidad

La porosidad de un material se define como la proporción volumétrica del mismo que está ocupada por aberturas ó poros. La porosidad es un índice que indica cuánta agua puede ser almacenada en el material saturado. La porosidad se expresa generalmente como un porcentaje del volumen bruto del material. Aunque la porosidad representa la cantidad de agua que puede almacenar un acuífero, no nos indica cuánta puede ceder.

Cuando un material saturado drena agua mediante la fuerza de gravedad, únicamente cede una parte del volumen total almacenado en él. La cantidad de agua que un volumen unitario del material deja escapar cuando se le drena por gravedad se denomina rendimiento específico. (SIAPA, 2006)

Aquella parte del agua que no se puede remover del material por gravedad, es retenida por capilaridad y atracción molecular. La cantidad de agua que un volumen unitario del material retiene cuando se somete a drenaje por gravedad, se denomina retención específica. Tanto el rendimiento específico como la retención específica se expresan como porcentajes. El rendimiento específico sumado a la retención específica, es igual a la porosidad. (Tabla 2.1)

Tabla 2.1 Promedios aproximados de porosidad en diferentes tipos de suelo. (SIAPA, 2006)

MATERIAL	POROSIDAD %	RENDIMIENTO ESPECIFICO %
ARCILLA	45	3
ARENA	35	25
GRAVA	25	22
GRAVA Y ARENA	20	16

Continuación de la tabla 2.1

ARENISCA	15	8
CALIZAS DENSAS	5	2
CUARZO Y GRANITO	1	0.5

Permeabilidad

Es la capacidad de un material de permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Desde el punto de vista de la ingeniería, se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad transitada de fluido es despreciable. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende también de la naturaleza y las condiciones del fluido (temperatura y presión). La penetrabilidad suele considerarse sinónimo de permeabilidad y para ser permeable, un material debe ser poroso, esto es, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido (tabla 2.1). No obstante, la porosidad en si misma no es suficiente: los poros deben estar interconectados de algún modo para que el fluido disponga de caminos a través del material.

En lo que se refiere a la construcción de obras de infiltración o absorción, en general se busca aprovechar los estratos más permeables del terreno para tener una mayor eficiencia. En esos casos deben conocer los siguientes aspectos:

- Estratigrafía (estudio de mecánica de suelos)
- Permeabilidad del suelo
- Área efectiva de infiltración
- Tipo de obra de infiltración propuesta

La permeabilidad esta representada por la letra ***k*** y sus dimensiones son (L/T).

Valores de la Permeabilidad (***k***)

Entre los valores de la permeabilidad se pueden encontrar valores teóricos y valores medidos. Los primeros son los valores que encontramos en bibliografías sobre el estudio de algunos tipos de suelos, los segundos corresponden a resultados de laboratorio ó bien a pruebas directas en el sitio del que se desea conocer la permeabilidad.

Si la medición de la permeabilidad se realiza en un laboratorio (método directo) se tendrán resultados confiables y muy cercanos a los reales que se tienen en el tipo de suelo que se esté estudiando, mientras que si se recurre a alguna referencia (método indirecto), los valores de la permeabilidad que obtengamos de ella serán indicativos, pero no un valor real del lugar. Es por eso que se sugiere siempre realizar el método directo.

Juárez & Rico (1969) proponen rangos de los valores del coeficiente de permeabilidad (Tabla 2.2). Sin embargo, para una mayor exactitud en los valores se deberán realizar pruebas de permeabilidad directamente en el lugar de estudio. Así valores grandes de k indican que el agua circula con relativa facilidad dentro del suelo, mientras que valores bajos de k indican que el agua fluye con dificultad dentro del suelo.

Métodos para determinar el coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de la permeabilidad es la velocidad con la que un flujo atraviesa un suelo. Los métodos para determinar el coeficiente de permeabilidad k en los suelos pueden ser de dos tipos: métodos directos y métodos indirectos.

Dentro de los métodos directos se cuentan los siguientes:

- Permeámetro de carga constante (Para gravas y arenas)
- Permeámetro de carga variable (Para arenas finas y limos)
- Pruebas de bombeo en el campo (Involucra una gran masa de suelo por lo que el coeficiente de permeabilidad es representativo de la zona en cuestión)

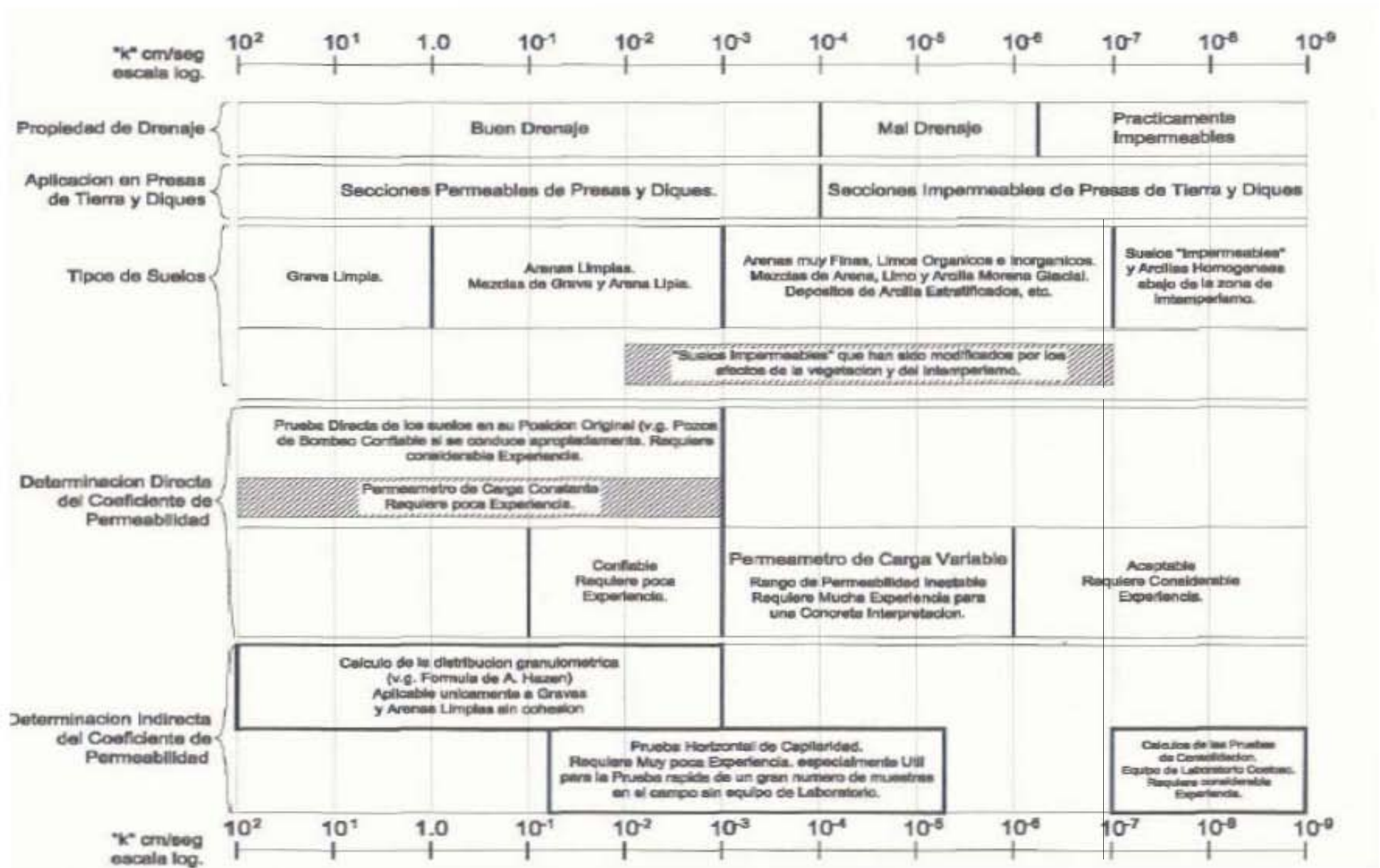
Entre los métodos indirectos se pueden mencionar los siguientes:

- Cálculo de k a partir de la curva granulométrica.
- Cálculo de k a partir de la prueba de consolidación.

Estos son los métodos que en general se usan para determinar el coeficiente de permeabilidad pero dependiendo de las condiciones y del tipo de suelo del sitio de interés será la aplicación de éstos métodos. Cabe señalar que hay otro tipo de pruebas para determinar el coeficiente de permeabilidad pero por la extensión del tema no fueron tomadas en este trabajo.

Lo anterior ha sido elaborado por la importancia que tiene en el tema de infiltración de agua, ya que dependiendo de los resultados de las pruebas realizadas se verá si el tipo de suelo es apropiado o no para la infiltración.

Tabla 2.2 Coeficientes de permeabilidad (Juárez & Rico, 1969)



Infiltración

La infiltración se define como el movimiento del agua a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. (Aparicio, 1988). Muchos factores influyen en la infiltración, entre las que destacan la condición de la superficie del suelo, su cubierta vegetal, sus propiedades (tales como la porosidad y la conductividad hidráulica), el contenido de humedad presente en el mismo, así como la duración de la lluvia y el drenaje en la cuenca.

La pendiente de la superficie constituye un factor importante para la infiltración, puesto que pendientes suaves retienen el agua por más tiempo favoreciendo la infiltración y viceversa. En cuanto a la precipitación, una lluvia de baja intensidad y larga duración favorece la infiltración, en cambio, las lluvias intensas saturan muy rápidamente la parte superficial del suelo, conduciéndose gran parte de éstas hacia escurrimientos superficiales.

2.2 DESCRIPCIÓN DE ESTRUCTURAS Y PROCEDIMIENTOS: EJEMPLOS DE EXPERIENCIAS

En este subcapítulo se hace referencia a los dispositivos de infiltración que han sido utilizados en el mundo, recabando información de los resultados obtenidos y del tipo de estructura utilizada.

Pozos secos

Los pozos secos son pequeños hoyos excavados en el suelo y rellenos con agregados que hacen la función de un filtro (Fig. 2.1). El objetivo de estos pozos es infiltrar el agua al manto acuífero.

Los pozos reciben el agua de lluvia que provienen de azoteas de casas habitacionales, edificios y centros comerciales. El uso de los pozos es aplicable en áreas menores a 1000 m² donde los sedimentos son bajos y contiene pocos contaminantes. Los pozos deben colocarse donde la tierra sea suficientemente permeable (tener una capacidad de infiltración entre 7.5 y 12.5 mm/h) para que se permita la absorción. Por lo regular tienen una profundidad de 0.6 a 3.0 m. (Osman & Houghtalen, 2003)

Este tipo de pozos no son recomendables para industrias ni estacionamientos si éstos no cuentan con un sistema de pre-tratamiento, ya que el agua podría conducir grasas, ácidos, hidrocarburos, que podrían llegar al manto acuífero y contaminarlo.

Algunos aspectos como cuál es la vida útil un pozo seco, con qué frecuencia se debe cambiar o limpiar el filtro, o dar un mantenimiento a este tipo de estructura deben ser analizados caso por caso ya que las condiciones entre diferentes estructuras de este tipo pueden ser variables.

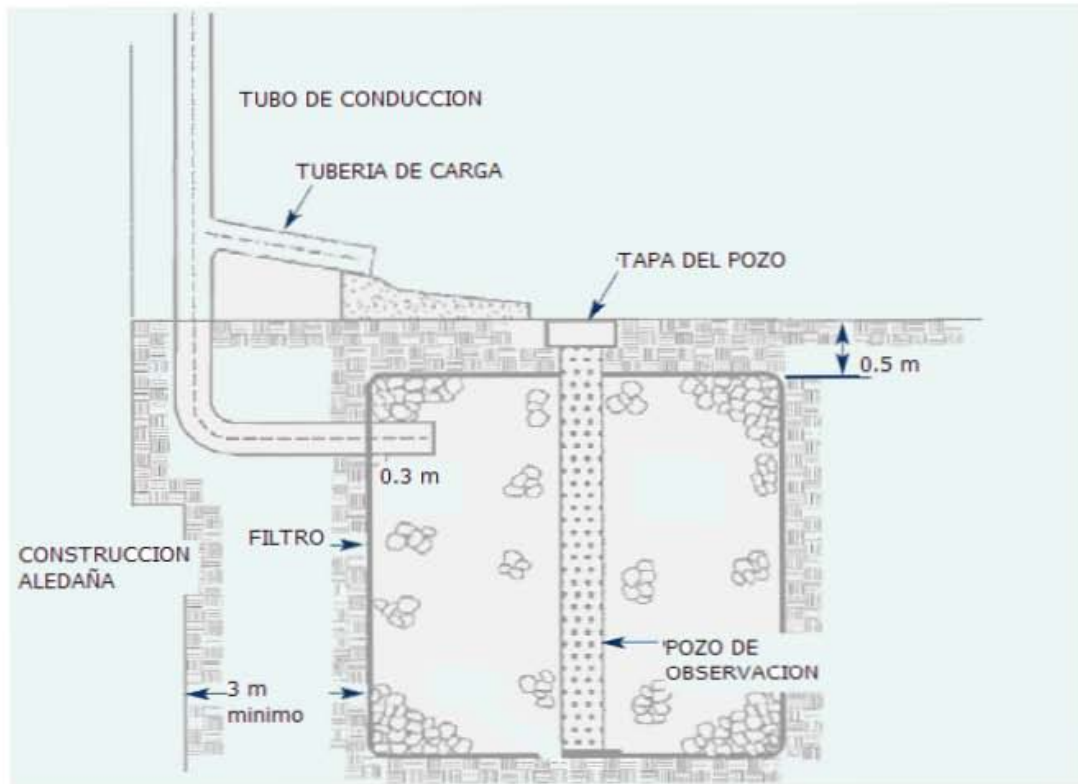


Fig. 2.1 Esquema general de un pozo seco. (Osman & Houghtalen, 2003)

Un ejemplo de este tipo de estructura es el que se realizó en la ciudad de Nueva Delhi (India) por Sharma (2001), el cual busca mitigar los efectos sobre la infiltración producidos por la continua urbanización. La fuente de abastecimiento de agua potable para la población del lugar proviene del río Yamuna, próximo al lugar, pero su capacidad de aportación fue rebasada por la demanda, por lo que se comenzó a extraer agua del manto acuífero para el suministro, lo que condujo a tener problemas de hundimientos.

Ante estos problemas se optó por recargar al manto acuífero con pozos secos; se hicieron análisis hidrológicos y se encontró que la ciudad tiene una precipitación media anual de 1000 mm. Para aprovechar esta lámina de lluvia, el gobierno trabajo conjuntamente con cada propietario de casa y establecimiento para definir dónde se podían colocar los pozos. Un esquema tipo de esta estructura se presenta en la Figura. 2.2

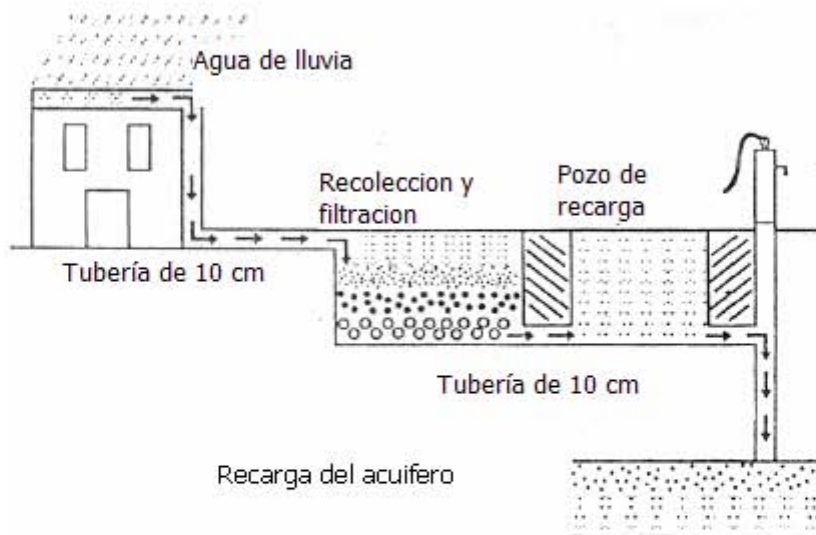


Fig. 2.2 Esquema general del proyecto. (Sharma, 2004)

Se obtuvieron así los siguientes resultados: el pozo tiene una capacidad de almacenamiento de 90 m^3 , éste volumen podría abastecer a 6 personas durante 150 días a una tasa de 100 litros / día / persona. En el proyecto se propuso un periodo de prueba de tres meses de junio a agosto del 2001 y se observó que a partir de septiembre hubo un incremento en el acuífero local. Aunque no se menciona en el estudio el costo de cada uno de los pozos, ni el incremento en el acuífero local y sobre todo cuantos fueron instalados, se dice que la estructura propuesta fue de gran aportación, que ayudó a resolver los problemas de abastecimiento de agua, así como a la recarga del manto acuífero.

Trincheras de infiltración

Una trinchera de infiltración es una estructura que sirve para infiltrar agua pluvial recibida en áreas pequeñas (media hectárea como máximo). Para construir la trinchera se excava un hueco en la tierra y se rellena con un agregado permeable que cumple con la función de un filtro. Las trincheras suelen tener una profundidad de 0.5 a 3.0 m. y en la superficie de la trinchera se colocan piedras, arenas o césped para favorecer la entrada del agua (Osman & Houghtalen, 2003). Las trincheras no cuentan con elementos para descargar flujos excedentes, por lo que si se tiene un escurrimiento muy grande ésta se satura y el agua tiende a escurrir por la superficie o a inundarla (Fig. 2.3). El material agregado usado en estas trincheras suele ser de 3.5 a 8 cm de diámetro con 30-40% porosidad. El peligro que se corre con la construcción de este tipo de estructuras es que el manto acuífero se podría contaminar si no se asegura que el agua por infiltrar esté libre de contaminantes. Este sistema puede contar con una tubería de drenaje (opcional) cuya función es dejar escurrir el agua que no puede filtrar en caso de que se sature la trinchera, conduciendo el agua a un sistema de alcantarillado.

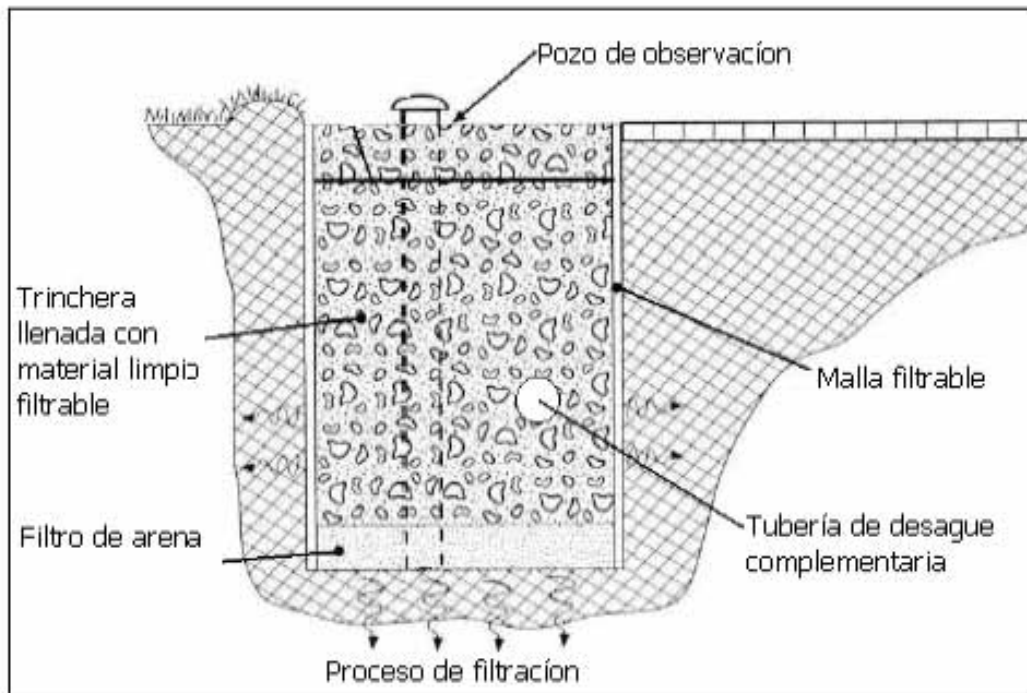


Fig. 2.3 Estructura básica de una trinchera de infiltración. (Osman & Houghtalen, 2003)

Otro ejemplo de las alternativas para captar aguas pluviales se ha propuesto en la ciudad brasileña de Porto Alegre, basado en dos trincheras de infiltración adaptadas al suelo del sitio, y que forma parte de un estudio experimental desarrollado en IPH-UFRGS (Caramori, 2004).

La primera trinchera, se construyó como un solo módulo de 10 m de longitud, 0.8 m de ancho y 1 m de profundidad. Funciona para un área de 600 m², que capta el agua de una calle de piedras pavimentadas y espacios con superficies de terreno natural. La trinchera está rellena con arena gruesa con una porosidad del 47%, envuelta por un geotextil. La segunda trinchera, se construyó en tres módulos separados, conectado por válvulas de fondo. Cada módulo tiene 3 m de longitud, 0.8 m de ancho y 1 m de profundidad y funciona para una área de 450 m². (Fig. 2.4)



Fig. 2.4 Muestra la trinchera 1 de lado izquierdo y la trinchera 2 de lado derecho. (Caramori, 2004)

Durante el tiempo de prueba (33 meses), ambas trincheras demostraron ser eficaces al controlar 100% del volumen del escurrimiento, incluso para eventos con periodo de retorno más altos para los que fueron diseñados. Concluyen que la vida útil de la trinchera se puede alargar dando un mantenimiento periódico a las estructuras. Los resultados experimentales muestran que las trincheras de infiltración pueden contribuir significativamente a controlar el escurrimiento urbano y habiendo probado ambas trincheras, resultó que la trinchera 1 es más eficiente por tratarse de una sola excavación, lo cual reduce su costo de construcción.

Las trincheras también pueden ser empleadas para otros usos. Entre los proyectos de este tipo, se puede mencionar al que se implementó en Djenné, Mali (África), reportado por Alderlieste (2004). Este autor reporta la construcción de una red de suministro de agua potable para satisfacer las necesidades de la población en ese lugar. Sin embargo, después de instalar la red de agua potable no se construyó un sistema para desalojar las aguas residuales municipales, entonces se produjeron descargas por medio de una tubería hacia la calle, produciendo grandes problemas de salud entre la población. (Fig. 2.5)

Se desarrollo entonces un proyecto de trincheras de infiltración. Se instalaron cien estructuras de infiltración, las trincheras se construyeron de material local y buscando respetar la arquitectura del lugar. Cada estructura de infiltración tiene cuatro componentes principales como se muestra en la figura 2.6.

La tubería de PVC conduce las descargas domiciliarias hacia el depósito de sólidos donde se interceptan, para luego conducir el agua hacia la trinchera de infiltración, la cual debe tener al menos 0.5 m de tierra por encima de ella, y dimensiones de 0.5 m de ancho y 1.5 m de profundidad. La longitud de la trinchera esta en función del consumo habitacional del agua según la siguiente ecuación:

$$L = \frac{NQ}{2DI}$$

Donde:

L= Longitud de la trinchera (m).

N= Número de usuarios (adimensional).

Q= Gasto de abastecimiento (lt/día).

D= profundidad de la trinchera (m)

I= Capacidad de infiltración del suelo (lt/m²*día).



Fig. 2.5 Calle contaminada en Djenné debido a las descargas de las tuberías por donde eran desalojadas las aguas negras. (Alderlieste, 2004)

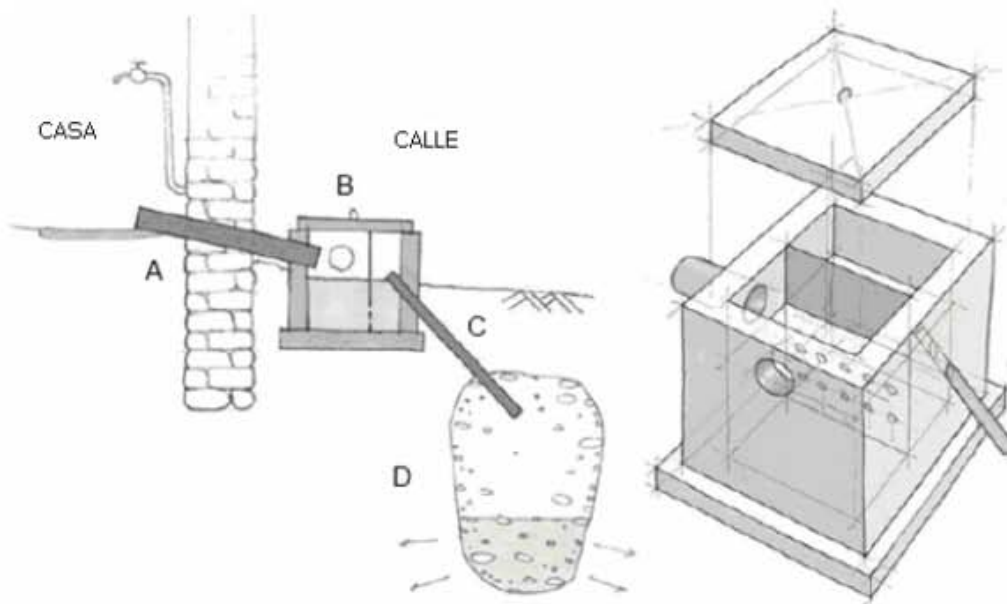


Fig. 2.6 Representación esquemática del sistema de infiltración. A. Un tubo de PVC (110 mm de diámetro), B: depósito de sólidos, C: tubería flexible (40 mm de diámetro), D: trinchera de infiltración. (Alderlieste, 2004)

La trinchera cuenta con arena gruesa (diámetro de 25 mm) que hace la función de filtro. Después de un año de funcionamiento, las calles en Djenné con sistemas de infiltración estaban secas y limpias (fig. 2.7), aunque hubo problemas con el manejo en el depósito de sólidos porque los usuarios no retiraban los desechos (en especial grandes cantidades de plástico), por lo que el gobierno de esa ciudad optó por aplicar una multa a quien no hiciera un mantenimiento periódico a su depósito de sólidos.



Fig. 2.7 Calle de Djenné un año después de la aplicación del sistema de infiltración. (Alderlieste, 2004)

Pozos de infiltración

Los pozos de infiltración permiten captar el agua de los escurrimientos provocados por las lluvias en lugares donde no hay áreas permeables para inducir la infiltración natural; la única ventaja relativa de infiltrarla así radica en que el costo por recarga del acuífero es menor que el que se tiene con los vasos de almacenamiento a cielo abierto (que se describen más adelante). Los pozos de infiltración han dado excelentes resultados para recargar acuíferos además de ser una solución viable a los problemas de inundaciones. (Fig. 2.8)

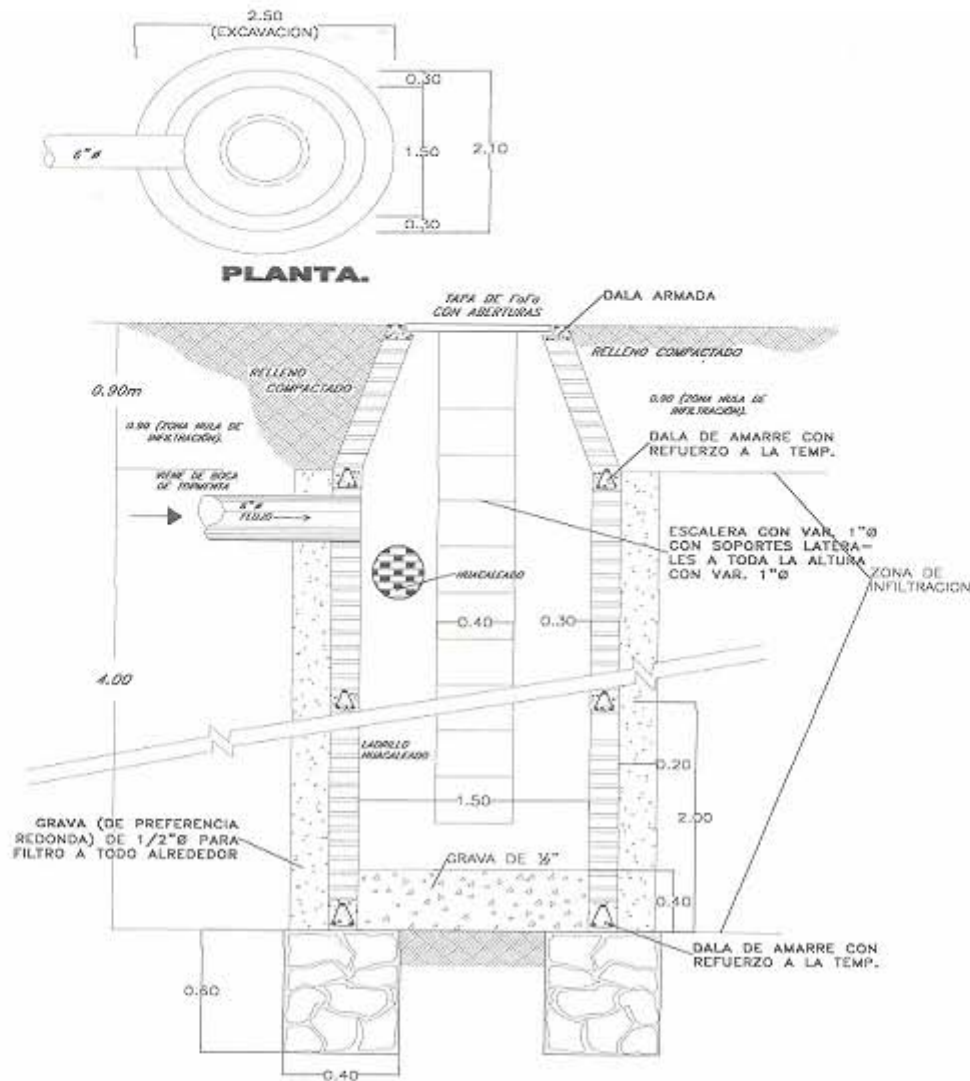


Fig. 2.8 Esquema general de un pozo de infiltración. (SIAPA, 2006)

El pozo cuenta con una bóveda donde se almacena y se filtra el agua, la cual permite también la entrada al personal técnico a dar mantenimiento. Las paredes de la bóveda están construidas con ladrillos que permiten hacer una pared de malla, lo que favorece el paso del agua a otra pared de grava que hace la función de filtro. Al infiltrar el agua se tiene que tener cuidado con los contaminantes que ésta lleva (grasas, hidrocarburos, sustancias corrosivas, etc.), porque si no recibe un tratamiento se contaminaría al manto acuífero (SIAPA).

Tanques de detención

Estos tanques están diseñados para evitar inundaciones y/o almacenar el agua que se capta con la presencia de grandes escurrimientos. Operan de modo similar a una cubeta de detención, ya que almacenan el agua en un tanque subterráneo y la descargan por medio de un dispositivo (orificio, válvula, etc.) para controlar el gasto de salida. Estos tanques se construyen en lugares como estacionamientos, aceras, jardines adyacentes a los edificios, etc. (Fig. 2.9)

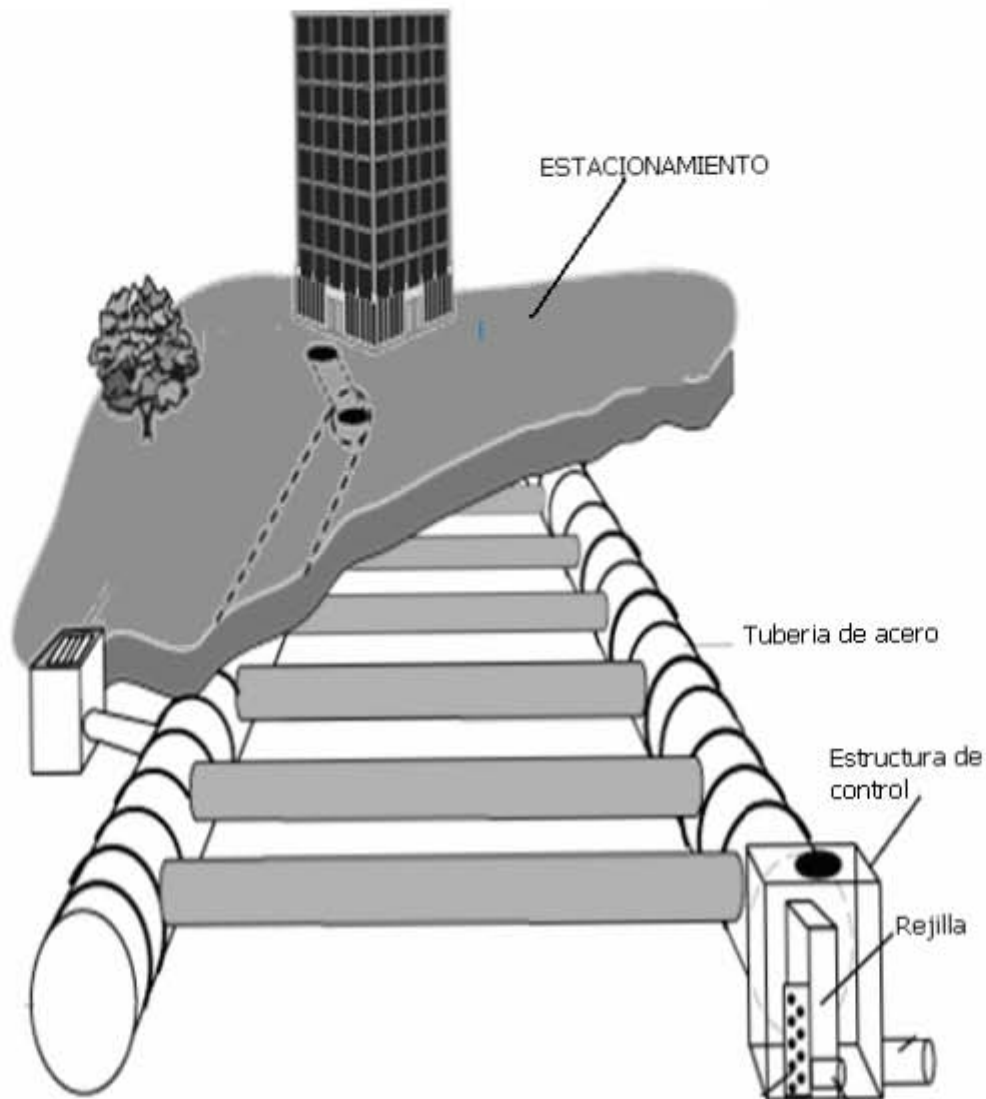


Fig. 2.9 Ejemplo de un sistema de tanque de detención subterráneo.
(Center for Watershed Protection, 2000.)

Los tanques de detención son en su mayoría subterráneos, construidos con concreto reforzado y tuberías de metal o plástico y con diámetros grandes para descargar después a la red de alcantarillado. El tanque suele diseñarse para servir a un área máxima de 10 ha. El diseño de este tipo de estructuras implica la construcción de un acceso para personal de mantenimiento.

Como se observa en la figura 2.10, se tiene un tanque de almacenamiento con una tubería que permite salir el agua cuando se tienen escurrimientos que sobrepasan al gasto de diseño; el tanque también cuenta con una rejilla que no permite el paso de sólidos (basura, plástico, llantas, etc.), además de escaleras por las que se acceda a la estructura para darle mantenimiento.

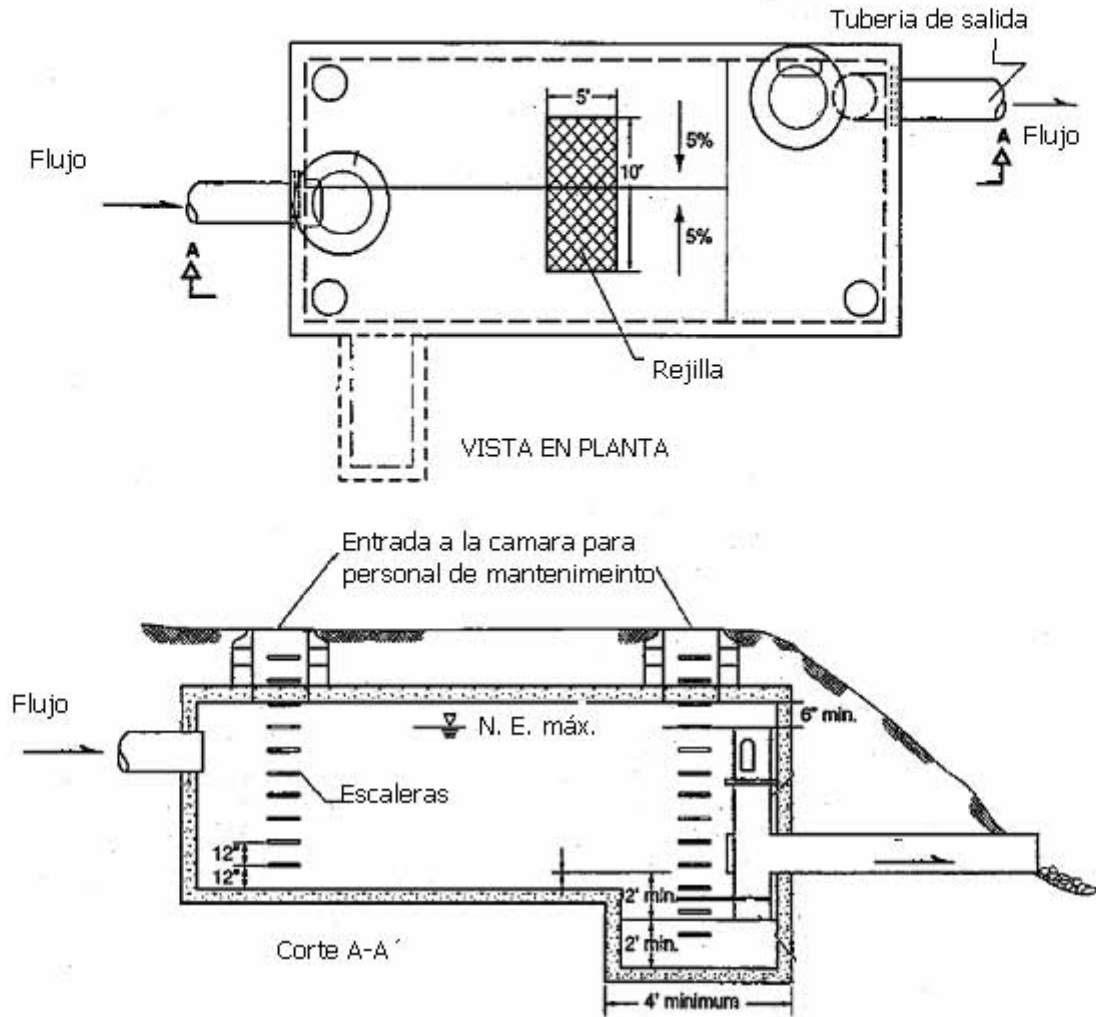


Fig. 2.10 Bóveda del tanque de almacenamiento (United States Environmental Protection Agency, 2002)

Cubetas de detención

Aunque se pueden usar diferentes estructuras de retraso de flujo las más comunes son las cubetas de detención (estanques o presas), las cuales son estructuras que se construyen sobre el cauce de flujos de agua superficiales ya existentes (arroyos, ríos, etc.). Estas estructuras son construidas por lo general de concreto reforzado o de mampostería, generalmente con materiales impermeables (Fig. 2.11). El objetivo principal de las cubetas de retención es almacenar temporalmente el agua de los escurrimientos para poder evitar inundaciones aguas abajo de estas estructuras. Este tipo de estructuras deben contar con una obra de excedencias que permita salir el agua que rebase la capacidad de retención de la obra. En la Ciudad de México, por ejemplo, se cuenta con este tipo de estructuras, las cuales se sitúan en las cuencas del poniente del Distrito Federal. En ese particular, su función consiste en disminuir los gastos máximos de los escurrimientos que fluyen hacia el sistema de alcantarillado. (Schueler, 1987)

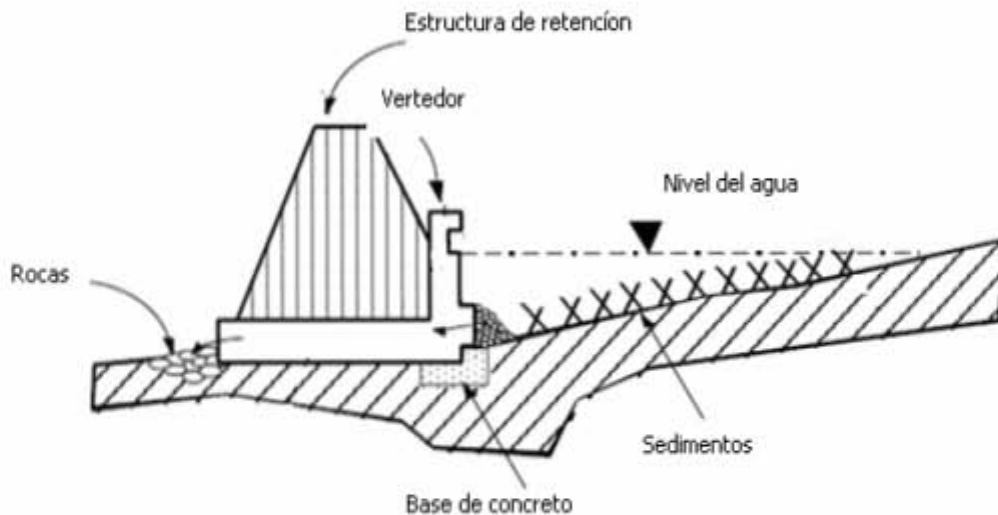


Fig. 2.11 Estructura típica de una cubeta de detención. (United States Environmental Protection Agency, 2002)

Otras experiencias de este tipo son las que reporta Tassin, B. y que se ubican en la región de París, en Francia. En ese lugar se diseñaron cubetas de retención para controlar los escurrimientos, estancar el agua y manejar su gasto de salida hacia el sistema de alcantarillado. En esa región hay alrededor de 100 cubetas de retención. Además de la función hidráulica que cumplen estas estructuras, su diseño contribuyó a enriquecer la arquitectura y el paisaje urbano de la región.

2.3 EXPERIENCIAS EN MÉXICO

En el subcapítulo anterior se mencionaron algunos ejemplos de experiencias de infiltración de agua pluvial que se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo. A continuación veremos lo que se está haciendo al respecto en la zona metropolitana de la Ciudad de México

En el poblado La Candelaria Tlapala, Chalco, Edo. de México, mediante la instalación de un sistema de infiltración de agua pluvial, una empresa constructora de fraccionamientos habitacionales inyecta agua pluvial a los mantos acuíferos del valle de México a través de pozos de infiltración que se instalaron en las unidades habitacionales construidas, con lo que se pretende evitar inundaciones, hundimientos y la sobreexplotación de las fuentes de abastecimiento de agua potable. Con este sistema, el agua de lluvia ya no escurre hacia la red de alcantarillado, ahora el líquido es captado e inyectado al manto acuífero.

En la unidad habitacional la empresa edificó más de 3 mil 400 casas de interés social, también incluyó en el proyecto la colocación de siete pozos de infiltración de aguas pluviales, con un drenaje independiente al del sistema

sanitario. En las 35 hectáreas que ocupa el fraccionamiento fueron colocadas alcantarillas para captar el agua de lluvia y trasladarla después a los tanques de sedimentación, por lo que se evita que el agua se vaya hacia el sistema de drenaje.

El agua pluvial captada en los tanques (los cuales contienen tres cámaras para la filtración del agua almacenada), debe primero pasar por las cámaras de sedimentación, después pasar el sistema de filtros donde se quedan las partículas más pequeñas y otros contaminantes, para posteriormente ser introducidas al subsuelo. El agua de lluvia que es infiltrada al acuífero después de algún tiempo se extrae por medio de un pozo de extracción y se somete al proceso de depuración y cloración, para que pueda utilizarse en el consumo humano.

De acuerdo con personal de ese grupo inmobiliario, se diseñó un sistema de alcantarillado pluvial para captar el agua y conducirla hacia los siete tanques de sedimentación. Los siete tanques, denominados "Tormenta", fueron construidos bajo la superficie de la unidad habitacional; tienen una capacidad de almacenamiento conjunta de 800 m³ de agua. La infiltración al manto acuífero es de 2851.2 m³/día en la temporada de lluvias.

En la figura 2.12 se muestra la construcción del drenaje pluvial de esta unidad habitacional, el agua es conducida por canales cerrados hacia los tanques de almacenamiento.



Fig. 2.12 Construcción del drenaje pluvial. (Sadasi, 2006)

Otro ejemplo de captación de agua pluvial fue el que llevó a cabo la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) en 1998. Este trabajo de captación se llevó a cabo en los techos de algunas casas-habitación en la Delegación Tlalpan. De este proyecto no fue posible conseguir ningún tipo de información escrita, pero sí de manera verbal de quienes intervinieron en el proyecto. En ese contexto, considerando que en el Distrito Federal se tiene una precipitación anual aproximada de 700 mm, y una eficiencia de captación de 0.7 se tendrían anualmente 0.5 metros de altura de lluvia que podría ser captada para su uso o infiltrada hacia los mantos acuíferos.

Si el área de captación fuera de 100 m², se captarían 50 m³ al año ó 137 litros al día, aunque en la Ciudad de México la mayoría de las casas tienen en promedio techos de 45 m² y 5 habitantes, lo que resultaría en un gasto de 27 l/hab/día. Si se acepta que la dotación de agua en el Distrito Federal

es de 150 l/hab/día, la aportación de agua de lluvia contribuiría apenas en un 20 % de este suministro. Se debe tener en cuenta además que el sistema de captación para uso potable debe contar con un tanque de almacenamiento, un desarenador, un sistema de distribución, un programa de coloración, etc. En los casos en los que se pretenda instalar este tipo de sistemas habría que analizar el tiempo en que la inversión hecha podría amortizarse para definir la conveniencia de su adopción.

Otro ejemplo es un edificio ubicado sobre la avenida División del Norte, el cual aprovecha el agua de lluvia para el servicio sanitario de los departamentos durante la temporada de lluvias. El condominio posee una cisterna de captación de agua pluvial; esta cisterna al estar conectada por medio de un sistema de tuberías hacia cada uno de los departamentos del edificio abastece de agua pluvial al sistema sanitario. La cisterna tiene una capacidad de almacenamiento de 38 m³. También, el condominio tiene destinados 80 de los 260 m² de su superficie a la filtración del agua pluvial mediante la aplicación de un mosaico especial que hace permeable el suelo.

Otra experiencia que se tiene en el Distrito Federal, es la que se llevó a cabo en el año 2005, con la instalación de 80 pozos de absorción ubicados en la Delegaciones Tlalpan y Xochimilco (Plano 2), este trabajo fue realizado por el SACM con el proyecto "Localización y proyecto ejecutivo de las estructuras para la captación y conducción de agua pluvial a pozos de infiltración"

Los objetivos de este proyecto son:

- Recargar los mantos acuíferos de la zona sur del D. F., para reducir la sobreexplotación del Acuífero del Valle de México
- Manejo, control e infiltración de escurrimientos pluviales que ocasionan encharcamientos en vialidades principales y en las zonas deprimidas naturales.

El SACM realizó recorridos de campo para la localización de los sitios que permitieran la instalación de los pozos, los factores para tomar en cuenta un sitio, fueron:

- Depresiones en el terreno
- Reporte de encharcamientos de los habitantes
- Rastros de fuertes corrientes a lo largo de calles y avenidas
- Puntos de convergencia de distintos escurrimientos

El proyecto ejecutivo de cada pozo contempló la construcción de una estructura de captación a base de rejillas tipo Irving, la cual capta los escurrimientos pluviales de la zona, ésta estructura se conecta a su vez a un sedimentador que tiene una rejilla de control de sólidos y charolas para el secado de los materiales que se retienen en la rejilla de control. El proyecto también cuenta con una estructura desarenadora a la cual se le puede dar

mantenimiento por medio de dos registros de acceso. La estructura de sedimentación se conecta al pozo de absorción por medio de una tubería de polietileno de alta densidad de 40 cm de diámetro y con una profundidad de 10 a 20 metros. El gasto de diseño de cada pozo es de 100 l/s y con costo promedio de \$500,000.00.

Aunque el SACM aun no tiene definida la capacidad de infiltración de los pozos de absorción, los pozos ayudaron en gran medida a evitar los encharcamientos o acumulaciones de agua que se tenían en la zona. Este sistema no tiene implementado un programa de mantenimiento permanente de los pozos (revisión de estructuras, limpieza regular, mediciones, etc.), lo que sin duda afecta la capacidad de infiltración de cada uno de ellos.

Otro ejemplo, que es todavía un proyecto piloto es el que se tiene en la Delegación Iztapalapa, en donde las autoridades locales tienen identificada la zona en donde se utilizarán aguas negras para su tratamiento e inyección al acuífero; la cual corresponde a la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cerro de la Estrella.

En una entrevista realizada por el periódico "El Universal", el director ejecutivo de Planeación y Construcción del SACM, explica: "Tenemos el propósito de experimentar la recarga artificial del acuífero con agua proveniente del drenaje. Hemos identificado el punto del tratamiento, que es el Cerro de la Estrella, y sólo esperamos la autorización del gobierno federal para llevarlo a cabo".

El proyecto diseñado por ingenieros del SACM prevé la utilización de 250 litros por segundo de aguas negras provenientes del Río Churubusco y se procesaría en la PTAR del Cerro de la Estrella.

Además el proyecto contempla la construcción de una planta potabilizadora de agua para el líquido proveniente de los pozos de extracción en esa zona, la cual sería aladaña a la actual planta de tratamiento.

En la planta de tratamiento del Cerro de la Estrella se realizaría la remoción del nitrógeno de las aguas residuales y en la nueva planta con procesos avanzados se removería el resto de los contaminantes. El tratamiento del agua involucraría la utilización de membranas de ósmosis, que aseguraría que a través de ellas sólo pudieran pasar las moléculas del tamaño del agua, sin ningún tipo de contaminante.

3 GEOHIDROLOGÍA DEL SUROESTE DEL DISTRITO FEDERAL

La cuenca donde se encuentra el Distrito Federal, es una cuenca endorreica de carácter lacustre producto de lagos que existieron al final de la época glacial, donde la corteza terrestre ha sufrido grandes esfuerzos y un intenso fracturamiento. Al cerrarse la cuenca en el cenozoico cuaternario con la producción de la cadena montañosa de origen volcánico al sur de la cuenca, las aguas pluviales quedaron encajonadas, formando un conjunto de lagos someros. Los cuales son, hacia el centro el Lago de México, al este el de Texcoco, al sur los de Xochimilco y Chalco (que formaban uno solo) y al norte el de Zumpango. El fondo de la Cuenca es una planicie lacustre de 1,431 km², a una altitud de entre 2230 y 2240 msnm. El parteaguas de la cuenca se extiende sobre la zona montañosa circundante, la que frecuentemente rebasa los 3000 msnm. (CONAGUA, 2002).

Según la clasificación de la CONAGUA el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México pertenece a la región Hidrológica No. 26 Alto Pánuco. El acuífero abarca de manera total a las zonas hidrológicas: I. Xochimilco, II. Churubusco, III. Ciudad de México, y de manera parcial a la región hidrológica VII. Texcoco.

La zona de interés de este trabajo es la que abarca la zona II y parte de la zona III, Churubusco y Ciudad de México, respectivamente. Por este motivo, se hace un recuento de las principales corrientes (ríos) que se tienen en esta zona respectivamente.

La zona II comprende principalmente las cuencas de los ríos Eslava, Magdalena, Barrancas San Jerónimo, Anzaldo, Barranca Coyotes, Barranca Texcalatlaco, Barranca Tetelpa, Barranca de Guadalupe, Barranca del Muerto, San Buenaventura, Tarango y Mixcoac. El régimen de la mayoría de estas corrientes es intermitente, sobre todo en su parte alta, ya que aguas abajo las descargas de aguas residuales las han convertido en corrientes perennes.

De la zona III se tomará en cuenta la parte correspondiente al suroeste del Distrito Federal, por lo que sólo se considerarán las cuencas de los ríos Becerra, Tacubaya, Tecamachalco, San Joaquín, Tornillo, Hondo, Sordo, Barranca los Cuartos, Totolica. Las corrientes de estos ríos son intermitentes, salvo los ríos Tacubaya, San Joaquín y Hondo los cuales tienen escurrimientos perennes. (CONAGUA, 2002).

3.1 GEOLOGÍA Y TIPOS DE SUELO

Entre las formaciones geológicas que existen en el Distrito Federal, la roca ígnea extrusiva cubre más de las tres quintas partes de su superficie. Estos afloramientos corresponden a dos periodos diferentes de la Era del Cenozoico

(hace 63 millones de años aproximadamente). El primero de ellos (Periodo Terciario) se caracteriza por los afloramientos de rocas ígneas extrusivas, sus principales unidades litológicas se localizan al oeste y este del Distrito Federal. El segundo corresponde al Periodo Cuaternario, con afloramientos rocosos ígneos extrusivos, ubicados el primero, de la parte central hacia el sur y el segundo en la zona norte (Fig. 3.1). (INEGI, 2006).

El tipo de suelo que se ubica en la zona suroeste del D. F. es el del periodo terciario, que se compone de roca ígnea extrusiva ó también llamada roca volcánica. Este tipo de suelo es clasificado como un suelo semipermeable por el SACM.



Fig. 3.1 Tipos de rocas que se encuentran el Distrito Federal. (INEGI, 2006)

Características hidrogeológicas de las rocas

El comportamiento hidrogeológico y las características hidráulicas de las rocas dependen de su litología, textura, estructura y fracturamiento. Con base en estos parámetros, las rocas del Valle de México se clasifican en tres unidades hidrogeológicas y se clasifican de acuerdo con su grado de permeabilidad, compactación, granulometría y cementación. (SACM, 2005)

Unidades Permeables

Se agrupan en esta unidad a los productos volcánicos del Cuaternario, los cuales están constituidos por materiales piroclásticos en toda la variedad de tamaños, que se encuentran poco consolidados. Se intercalan con rocas basálticas con elevada permeabilidad secundaria debida al intenso fracturamiento y textura vesicular. Forman el cuerpo principal de la sierra del Chichinautzin y Sta. Catarina, que se encuentran en la porción sur y suroccidental del Valle de México. Pertenecen a esta unidad los rellenos aluviales, los cuales, por estar compuestos de materiales granulares poco consolidados y manifiestan alta permeabilidad.

Unidades Semipermeables

En éstas se incluyen a las rocas de composición predominantemente de andesítica, con permeabilidad secundaria por fracturamiento, que conforman los cuerpos principales de las sierras de las Cruces y Nevada, las cuales se localizan respectivamente al poniente y oriente del Valle de México, así como también las rocas andesíticas que constituyen la sierra de Guadalupe que se ubica al norte. Comprende también los extensos abanicos volcánicos que se formaron en los flancos de las sierras (Formación Tarango), compuestos por flujos piroclásticos de composición intermedia a ácida, capas de pómez, depósitos fluviales, lahares y paleosuelos.

Unidades Impermeables

Se engloban en esta unidad a los materiales lacustres que se localizan en el centro de la cuenca, los cuales están constituidos por materiales predominantemente arcillosos medianamente consolidados.

La finalidad de clasificar los suelos en permeables, semipermeables e impermeables es para localizar las zonas del Distrito Federal en las que sea factible colocar dispositivos de infiltración artificial. La zona del suroeste del D. F. se localiza en una zona semipermeable. Es conveniente conocer el uso de suelo que se tiene en ésta zona (área urbana y áreas verdes), con el fin de encontrar los sitios más factibles para colocar los dispositivos de infiltración.

3.2 SITUACIÓN DE ACUÍFEROS

A pesar de que los términos que se usarán en este capítulo son conocidos por quienes han tratado este tema, resulta pertinente recordar algunas definiciones técnicas que ayudarán en la interpretación de lo escrito en este apartado.

Acuífero: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de él con facilidad. Ejemplos: Arenas, gravas. Granito u otra roca con fracturas importantes

Acuicludo: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que no permite que el agua circule a través de él. Ejemplos: Limos y arcillas

Acuitardo: Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de él con dificultad. Ejemplos: Arenas arcillosas, areniscas, rocas compactas con fracturaciones moderadas.

Acuifugo: Formación geológica que no contiene agua y que no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplos: Granito o esquisto inalterado o no fracturado.

Acuífero confinado: El agua se encuentra a presión, de modo que si extraemos agua de él ningún poro se vacía, solo disminuye la presión del agua. Estos acuíferos están contenidos entre dos capas de suelo impermeables. (Figura 3.2)

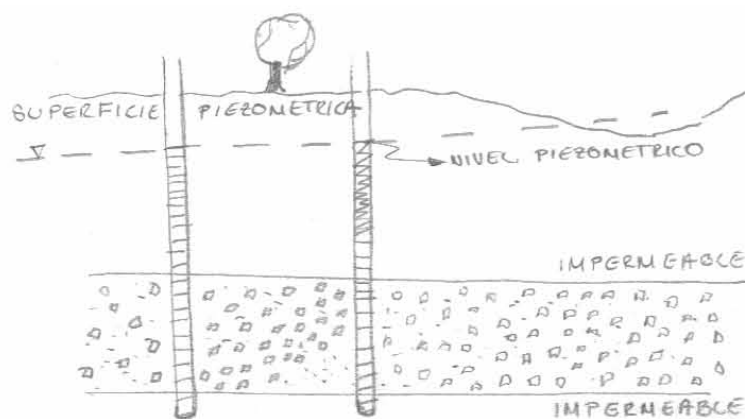


Fig. 3.2 Esquema conceptual de la piezometría en un acuífero confinado

Acuífero semiconfinado: Son acuíferos a presión pero que algunas de las capas confinantes son semipermeables o acuitardos. (Figura 3.3)

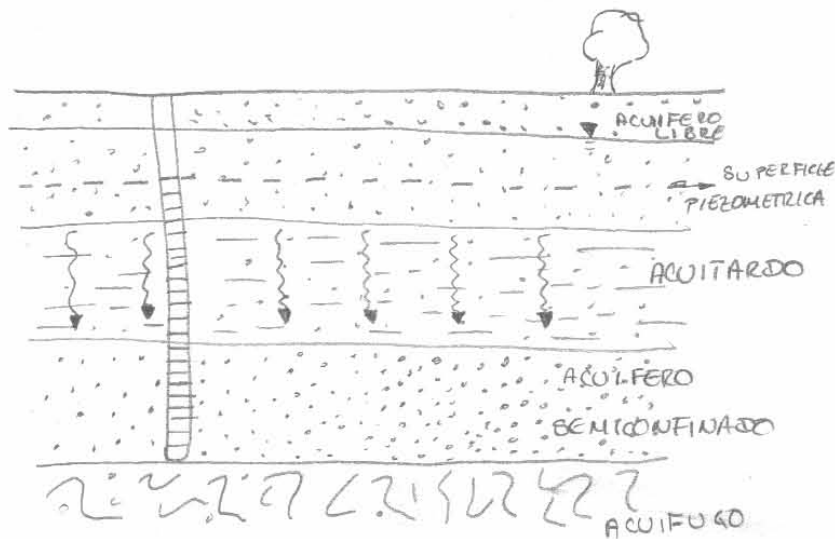


Fig. 3.3 Esquema conceptual de la piezometría en un acuífero semiconfinado

Tipo de acuífero de la Ciudad de México

Debido a que el acuífero de la Ciudad de México presenta material arcilloso de manera irregular que le sirve como confinante o semiconfinante el acuífero se clasifica como un acuífero semiconfinado. En términos generales, dicho acuífero reposa sobre una capa impermeable constituida por rocas volcánicas y calizas.

El acuífero es sumamente complejo ya que está formado por tres grandes cuerpos: el primero de ellos se ubica en la parte superior donde se tienen capas arcillosas de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su espesor y su constitución, y que puede ser considerado como un acuitardo pues actúa como semiconfinante en el centro de la cuenca. Bajo esta capa se encuentra el acuífero que actualmente está en explotación, de material granular más grueso que el del acuitardo, formado por piroclastos y conglomerados de origen volcánico y con espesor variable generalmente mayor que 200 m. Estas capas subyacen sobre la última capa, formada por rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a los 2000 msnm en el centro disminuyendo hacia los márgenes de la Cuenca.

Es importante conocer los niveles de agua subterránea de un acuífero (profundidad, elevación y evolución de los niveles estáticos), para evaluar la situación en la que se encuentra éste.

A continuación se hace una breve descripción de la situación del acuífero de la Ciudad de México.

Profundidad del nivel estático

La profundidad del nivel estático (N. E.) es la distancia a la que se encuentra el nivel del agua subterránea desde la superficie al hacer una excavación en un sitio determinado. La profundidad del N. E. varía entre 8.90 y 187 m en la Ciudad de México; es controlada por la configuración topográfica y por la extracción de los pozos. Los registros de mayor profundidad se encuentran ubicados en la porción occidental y sur de la cuenca, en las estribaciones de la sierra de las Cruces y Chichinautzin, decrece hacia el centro de la cuenca. La mayor profundidad (187.86 m) se asoció a un pozo que se localiza en la Delegación Álvaro Obregón; la menor profundidad (8.90 m) se midió en otro pozo que se ubica en la zona cercana al Reclusorio Norte, en la Delegación Gustavo A. Madero.

Los pozos en la porción poniente de las delegaciones Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón y sur de Xochimilco, manifiestan niveles estáticos mayores a 70 metros, en tanto que en el resto de la cuenca, los niveles varían entre 30 y 70 metros. (SACM, 2005)

Elevación del nivel estático

Es la cota en la que se encuentra el N. E., teniendo como referencia el nivel del mar, por lo que sus unidades en México se expresan en metros sobre el nivel del mar (msnm).

La configuración de la elevación del N. E. muestra que la carga hidráulica varía de 2315 a 2170 msnm en la porción norte del acuífero, correspondiente a áreas del municipio de Tlalnepantla (Estado de México) y a las delegaciones Azcapotzalco, Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc (Distrito Federal). El flujo subterráneo se genera en las partes altas (Sierra de las Cruces), donde se tiene una dirección principal de poniente a oriente y alimenta a la zona aledaña a la refinería de Azcapotzalco. El gradiente del flujo es de aproximadamente 0.02 y se mantiene más o menos uniforme en la porción occidental del valle. Decrece a 0.007 en la zona aledaña a la refinería de Azcapotzalco en donde se aprecia un cono de abatimiento que intercepta flujo de la parte oriental.

Se manifiesta un parteaguas subterráneo dinámico con carga hidráulica de 2200 msnm que une a los pozos cercanos al eje Eduardo Molina y al Peñón de los Baños, entre las delegaciones Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza. Este parteaguas podría corresponder al límite entre los acuíferos de la Ciudad de México al poniente y el de Texcoco al oriente. A partir de esta zona se aprecia aporte hacia el poniente (área de la refinería de Azcapotzalco), y hacia el oriente, en la parte que ocupa el proyecto Lago de Texcoco.

En lo que se refiere a la porción media del Acuífero (zona de Álvaro Obregón, Contreras, Benito Juárez y Coyoacán). La configuración de la elevación del N. E. indica que la carga hidráulica varía de 2355 a 2170 msnm. Al igual que en el caso anterior, el flujo subterráneo se genera en la sierra de las Cruces, tiene una dirección principal de poniente a oriente y alimenta a las partes bajas de la cuenca. El gradiente del flujo varía de aproximadamente 0.022 a 0.028 en las

estribaciones de la sierra de las Cruces. Decrece a 0.0025 en la zona que se localiza al poniente del cerro de la Estrella, en donde se delinea un cono de abatimiento que intercepta flujo subterráneo de la parte oriental, proveniente de la sierra Sta. Catarina.

En la parte sur de la cuenca (zona de Xochimilco y Tláhuac) la configuración de la elevación del N. E. muestra que la carga hidráulica varía de 2225 a 2170 msnm y que el flujo subterráneo se genera en la sierra de Chichinautzin, con dirección principal de sur a norte y cambia al noroeste a medida que se acerca al cerro de la Estrella. El gradiente del flujo varía de 0.014 a 0.025 en las estribaciones del Chichinautzin y decrece significativamente a 0.0025 en el área aledaña al cono de abatimiento que se localiza al poniente del cerro de la Estrella.

Se observa un parteaguas subterráneo que coincide con el superficial en la zona de Tláhuac, el cual delimita los acuíferos Ciudad de México al poniente y Chalco-Amecameca al oriente, de acuerdo con el mapa de la configuración de la elevación del nivel estático, el límite podría corresponder a una línea que une al volcán Teuhtli (San Juan Ixtayopan), con la parte central de la sierra Sta. Catarina.

La porción norte del acuífero recibe recarga proveniente de la sierra de Guadalupe, la carga hidráulica varía de 2245 msnm en las estribaciones de la sierra a 2180 msnm en las partes bajas. La dirección del flujo es al SW para la parte de Azcapotzalco y al sur para la zona de Gustavo A. Madero.

La sierra Santa Catarina se manifiesta como área adyacente de recarga para los acuíferos Ciudad de México al poniente, Chalco-Amecameca al sureste y Texcoco al norte noreste.

Con respecto al límite con el acuífero de Cuautitlán-Tizayuca-Pachuca que se encuentra al norte, se determina con una línea que une a la parte noreste de la sierra de las Cruces con la zona de Tlalnepantla, y sierra de Guadalupe; esta zona queda comprendida en una curva con carga hidráulica de 2200 msnm, a partir de la cual, se desciende hacia el norte a 2160 y al sur a 2175 msnm. (SACM, 2005)

Evolución del nivel estático

En la evolución del nivel estático se encuentran los cambios que presenta en un determinado tiempo el N. E., estos cambios permiten determinar si un acuífero ha sido abatido o ha presentado una recuperación del N. E.

En la zona centro poniente del acuífero se observa un abatimiento predominante que varía de cero a 2 metros en dos años, el cual se puede considerar de 1 m en promedio por año. Se aprecian áreas pequeñas

determinadas por datos de algunos pozos, en los que el abatimiento en el periodo varía de 3.25 a 5.50 metros debido posiblemente a la concentración de pozos en esas partes.

En la zona centro norte se observa recuperación del acuífero con valores que varían de 0.03 a 3.60 metros, con predominio de los menores a 1 m, lo anterior puede deberse a que muchos pozos que pertenecían a industrias y baños públicos han dejado de operar.

En la zona sur se advierten recuperaciones del nivel estático con valores que varían de 2 a 4 metros, lo anterior podría deberse a que en ella muchos pozos se encuentran fuera de operación. (SACM, 2005)

En lo que se refiere a las profundidades del N. E. se observa que partes de las delegaciones Magdalena Contreras y Avaro Obregón se tiene una profundidad del nivel estático que varía de los 70 a 80 metros de profundidad y va decreciendo hacia el centro de la ciudad. Esto se concluye al ver las curvas de profundidad del N. E.

También se tiene que en la zona suroeste (delegaciones Magdalena Contreras, Cuajimalpa y Álvaro Obregón) se tiene una mayor elevación del N. E. y que esta disminuye hacia la zona centro y sur de la Ciudad, se observa también que el flujo subterráneo que se origina en estas delegaciones llega a las delegaciones Benito Juárez y Coyoacán.

Si se infiltra agua de manera artificial en esta zona se tendría que garantizar que el agua no brote de manera natural hacia el oriente, porque en una experiencia que se tuvo en el año 2005 en zonas de la Delegación Tlalpan, se observó que el agua pluvial inyectada afloró de manera natural cuerdas adelante. Debido a que no se tuvo un control de este programa, el único beneficio que aportó fue la disminución de los encharcamientos que se tenían en el lugar.

3.3 PLUVIOMETRÍA

En esta sección se hace referencia a la recopilación de datos pluviográficos que han sido registrados en la red de estaciones del Distrito Federal y de la Zona Metropolitana.

Como se sabe, el componente central del pluviómetro es un recipiente que acumula agua, hasta que es vaciada y medida, ya sea en forma manual o automática. El tipo de pluviómetro que se utiliza en las estaciones pluviográficas tiene un sistema de registro que incluye dos pequeños recipientes que alternan sus posiciones para recibir el agua que se recibe de la zona de captación. La capacidad de llenado de cada recipiente equivale a una cierta cantidad de precipitación. Cuando uno de los recipientes se llena, el sistema se vuelca por

gravedad, vaciándose el recipiente lleno y quedando el otro en posición de llenado. Mediante un contacto eléctrico se registra la frecuencia de volcamientos, lo cual es proporcional a la intensidad de la precipitación. En la Fig. 3.4 se muestra un ejemplo de un pluviógrafo de balancín.



Fig. 3.4 Pluviógrafo de balancín. (Atmósfera, 2006)

Promedio estadístico de lluvias

Para conocer la precipitación anual en el valle de México, se recopiló la información diaria de las 78 estaciones pluviográficas ubicadas en el Distrito Federal y Zona Metropolitana entre 1993 y 2005 (Fig. 3.5). La información recopilada se usó para obtener la altura de precipitación promedio en el valle. Estas estaciones son administradas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México. En la tabla 3.1, se presentan las 78 estaciones y su ubicación en coordenadas UTM en metros.

Las lluvias diarias se usaron para obtener la precipitación mensual en cada estación para cada año con información. En seguida se calcularon los promedios mensuales para el periodo de registro, y por último se obtuvo para cada mes el promedio aritmético de los valores correspondientes a las 78 estaciones. El resultado de este cálculo se muestra en la tabla 3.2

Tabla 3.1 Coordenadas UTM de las 78 estaciones pluviográficas

ubicadas en el D. F. y Valle de México. (Cisneros, 2006)

Estaciones pluviográficas administradas por el SACM					
No. Estación	X (m)	Y (m)	No. Estación	X (m)	Y (m)
1	484734	2162357	40	489627	2136066
2	483693	2157820	41	490119	2128169
3	487313	2155048	42	496949	2129588
4	490543	2154466	43	497118	2121540
5	489600	2151595	44	480623	2165128
6	479971	2157274	45	477579	2157388
7	480806	2154718	46	495681	2166561
8	482626	2152769	47	488630	2157898
9	476038	2149181	48	473233	2148423
10	482083	2149483	49	464872	2143319
11	486071	2148578	50	485652	2152929
12	485935	2145472	51	491368	2149666
13	492732	2147422	52	489899	2146051
14	495019	2149762	53	497822	2139018
15	477078	2144802	54	468647	2145854
16	472138	2140942	55	469880	2141099
17	476795	2138219	56	467361	2135513
18	480972	2139317	57	471200	2137390
19	482383	2145025	58	500201	2140247
20	486584	2141295	59	503007	2124185
21	471518	2142222	60	472182	2134594
22	467342	2137760	61	490511	2121915
23	462919	2133556	62	487182	2164141
24	474874	2135343	63	503040	2116570
25	472197	2132804	64	512041	2154600
26	470553	2126285	65	471946	2158669
27	484810	2137665	66	473682	2170936
28	489518	2142786	67	513305	2132349
29	496097	2142840	68	508678	2164886
30	491884	2138136	69	513501	2122029
31	502614	2138384	70	515899	2143402
32	497228	2134225	71	494229	2171910
33	498648	2132125	72	480234	2186589
34	479493	2133199	73	478783	2147773
35	486698	2132554	74	482894	2142726
36	482129	2129934	75	484026	2134087
37	477857	2125094	76	492759	2142613
38	486278	2123338	77	477663	2140777
39	481955	2116023	78	479645	2126786

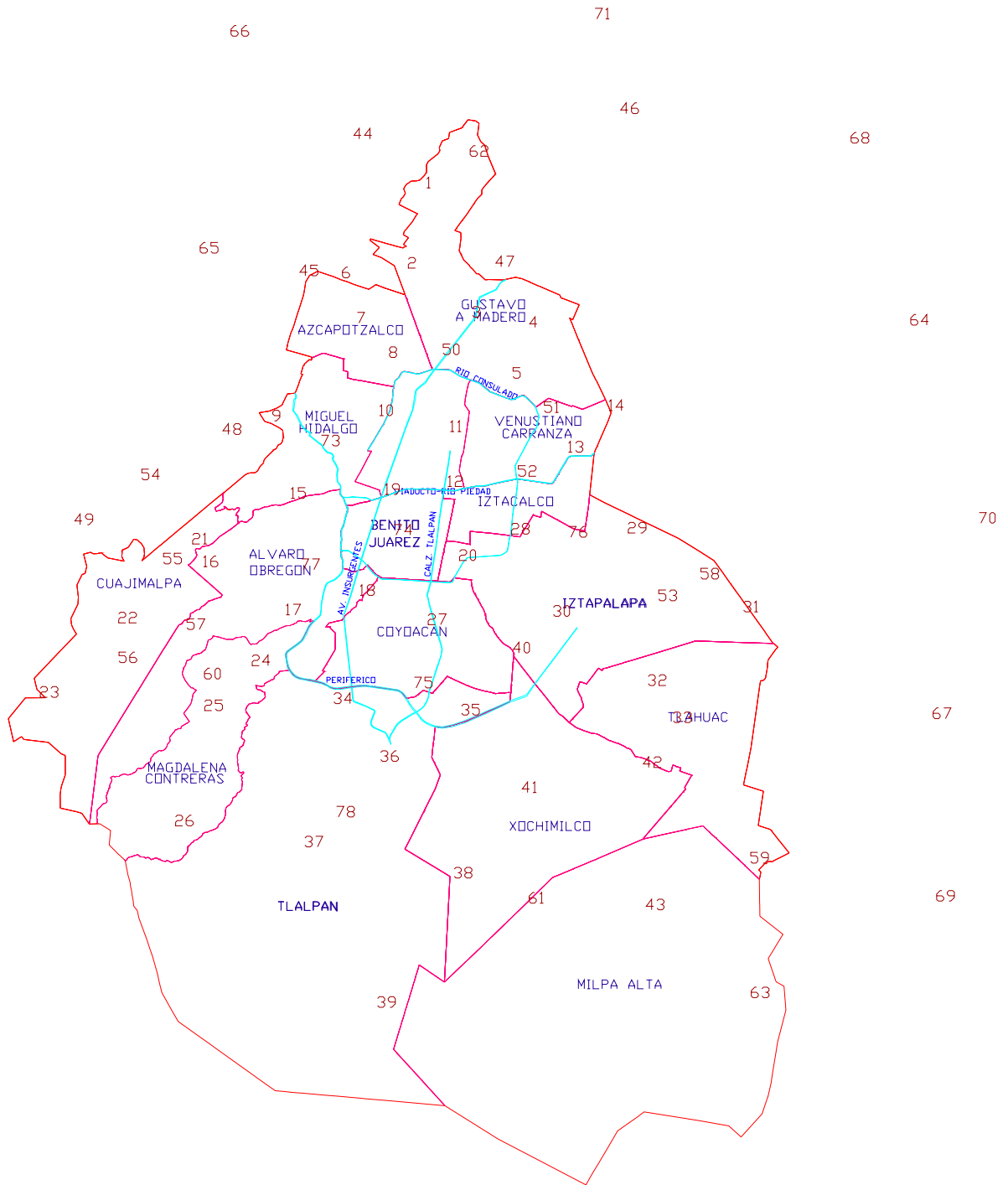
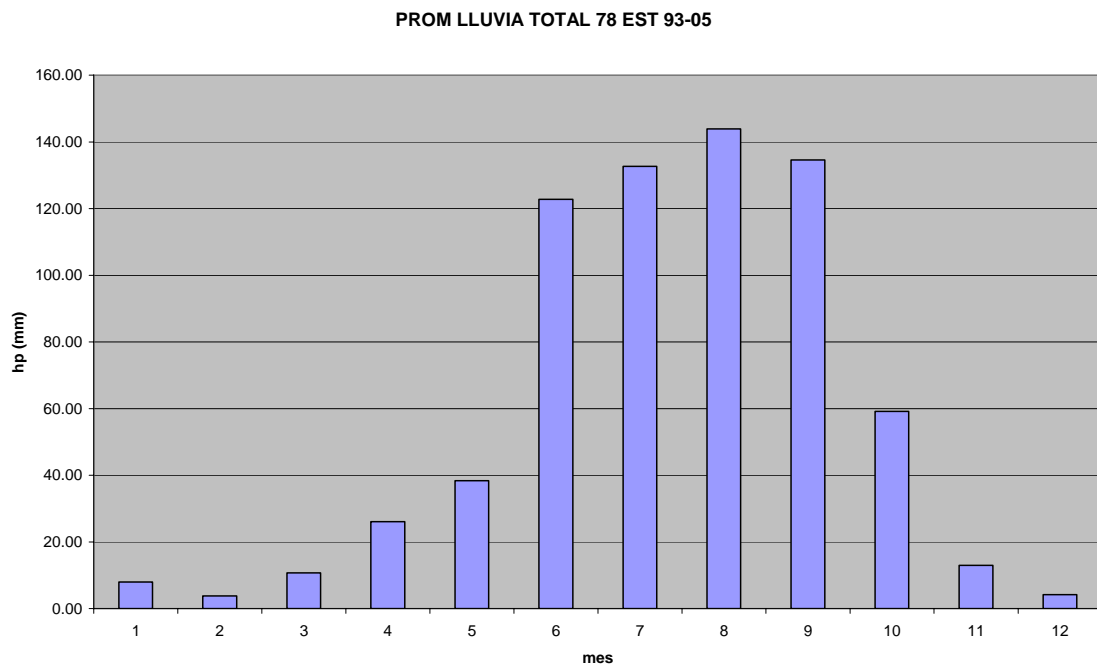


Fig. 3.5 Ubicación de las estaciones pluviográficas en el Distrito Federal.

Tabla 3.2 Precipitación mensual promedio (hp) de las 78 estaciones.

MES	hp (mm)
Enero	8
Febrero	4
Marzo	11
Abril	26
Mayo	38
Junio	123
Julio	133
Agosto	144
Septiembre	135
Octubre	59
Noviembre	13
Diciembre	4
Total anual promedio	697

Como se muestra en la tabla, los registros mensuales indican que la temporada de lluvias se sitúa entre los meses de mayo y octubre, con un promedio anual de lluvia de 697 mm. Este valor coincide con valores obtenidos por Domínguez, et al. (2005). En la Figura 3.6 se muestra un diagrama de barras donde se observa la distribución mensual de precipitación de la tabla 3.1.



Grafica 3.6. Precipitación mensual promedio de las 78 estaciones

A partir de estas alturas de precipitación se estimarán los volúmenes de agua que se precipitan en el Distrito Federal para evaluar qué volumen de ella puede ser aprovechable e infiltrable.

3.4 BALANCE HIDROLÓGICO

El balance hidrológico es un modelo matemático que se realiza para conocer las entradas, salidas y contenido de agua en una unidad hidrológica, como por ejemplo: una cuenca, embalses, lagos, etc. Para llevar a cabo la realización de un balance hidrológico se necesita conocer los registros de precipitación, escurrimiento, evapotranspiración e infiltración de la unidad que se quiera estudiar.

Para la realización de este trabajo solo se contó con los registros de lluvia de las estaciones pluviograficas del D. F., por tal motivo, se recopiló el balance hidrológico efectuado por Domínguez, et al. (2005).

Según Domínguez, et al. (2005), la ciudad de México emplea $72.5 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua, de los cuales 72% se extrae del subsuelo del Valle de México, 18% proviene del sistema Cutzamala, 8% del Lerma y 2% de manantiales y escurrimientos superficiales propios del valle. De esta cantidad, $10 \text{ m}^3/\text{s}$ se usan directamente en riego. Los $62.5 \text{ m}^3/\text{s}$ restantes se distribuyen a través de la red y equivalen a proporcionar 300 L/hab/d a 18 millones de habitantes. A esta cantidad hay que restarle lo que se pierde por fugas ($23 \text{ m}^3/\text{s}$) y el consumo en comercios, industrias y servicios municipales ($9 \text{ m}^3/\text{s}$) de lo que resulta una dotación real de 146 L/hab/d, que al compararlo con el recomendado por la Organización Mundial de la Salud, que va de 150 a 170 L/hab/d parece ser razonable (OMS, 1995).

El balance hidrológico (Tabla 3.3), muestra una lluvia promedio anual de 720 mm que equivaldrían a $220 \text{ m}^3/\text{s}$; la mayoría de la precipitación regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración. El escurrimiento superficial representa un porcentaje muy pequeño, del lo cual solamente una sexta parte es aprovechable debido a que la mayoría se produce en el área urbana, ya que se mezcla y drena junto con las aguas negras.

Tabla 3.3 Balance Hidrológico. (Domínguez, et al. 2005)

BALANCE HIDROLÓGICO		
	%	(m^3/s)
Lluvia anual 720 mm	100	219
Recarga	17	37
Escurrecimiento superficial	6	15
Escurrecimiento superficial aprovechable	2	3
Evapotranspiración	75	164

Por lo tanto hay un volumen anual de agua pluvial el cual no es aprovechado, 473'040,000 m³ de escurrimiento superficial (15 m³/s), aunque se entiende que este volumen se precipita en toda la ciudad, un porcentaje de aportación considerable corresponde a la zona suroeste del D. F. Ante esto, se debe estudiar la posibilidad de instalar dispositivos de infiltración en las zonas de la Ciudad que cumplan con las características para llevarla a cabo. (Permeabilidad, capacidad de infiltración, medio urbano adecuado).

4 DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA ZONA DE ESTUDIO

En este capítulo se pretende ampliar el conocimiento de la disponibilidad de agua pluvial en la zona de estudio. También se hará un recuento de las plantas de tratamiento de aguas residuales ubicadas en el Distrito Federal para conocer el volumen de agua tratada potencialmente disponible.

4.1 AGUAS PLUVIALES

Las aguas pluviales son las producidas por la precipitación, en cualquiera de sus formas: agua, granizo o nieve.

Las precipitaciones pueden clasificarse según su origen:

- Precipitación Frontal: Ocurre cuando 2 masas de aire de distintas presiones chocan una con la otra, (una masa de aire fría con otra de aire caliente)
- Precipitación Convectiva: Se produce generalmente en regiones cálidas y húmedas, cuando masas de aire caliente, al ascender en altura, se enfrían, generándose de esta manera la precipitación.
- Precipitación Orográfica: Es cuando una masa de aire húmedo circula hacia una masa montañosa, se eleva hasta llegar a la cima de la montaña. Al ascender se enfría y el agua que contiene se condensa por lo que se producen las precipitaciones.

4.1.1 VOLÚMENES MENSUALES

Como se mencionó anteriormente, la Ciudad de México cuenta con una red de 78 estaciones pluviográficas. Para la zona de estudio de este trabajo interesan en particular las estaciones 6, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 34, 36, 37, 45, 48, 54, 55, 56, 57, 60, 77 y 78, con las que se cubre el área suroeste de la Ciudad. La red de estaciones se muestra en la figura 4.1.

Como el suroeste de la Ciudad es la zona de interés se realizó un cálculo semejante al que se hizo con las 78 estaciones pluviográficas para poder obtener los volúmenes mensuales y conocer la disponibilidad de agua precipitada en esta zona. Se ha observado que en esta zona se tienen precipitaciones importantes, por lo que hay una disponibilidad de agua mayor que en otras zonas de la Ciudad; además, en esta zona se encuentran aún suelos naturales exentos de contaminación urbana, propicios para la infiltración.

En la tabla 4.1, se muestra el promedio de las lluvias para las estaciones seleccionadas, ubicadas en el suroeste del D. F. En esta tabla vemos que en los meses de junio a septiembre es cuando más llueve y al hacer una comparación entre las tablas 3.1 y 4.1, se observa que el total del promedio anual es mayor

en la zona de estudio, lo cual se debe a que en la zona de estudio existe un relieve topográfico que favorece la ocurrencia de la precipitación.

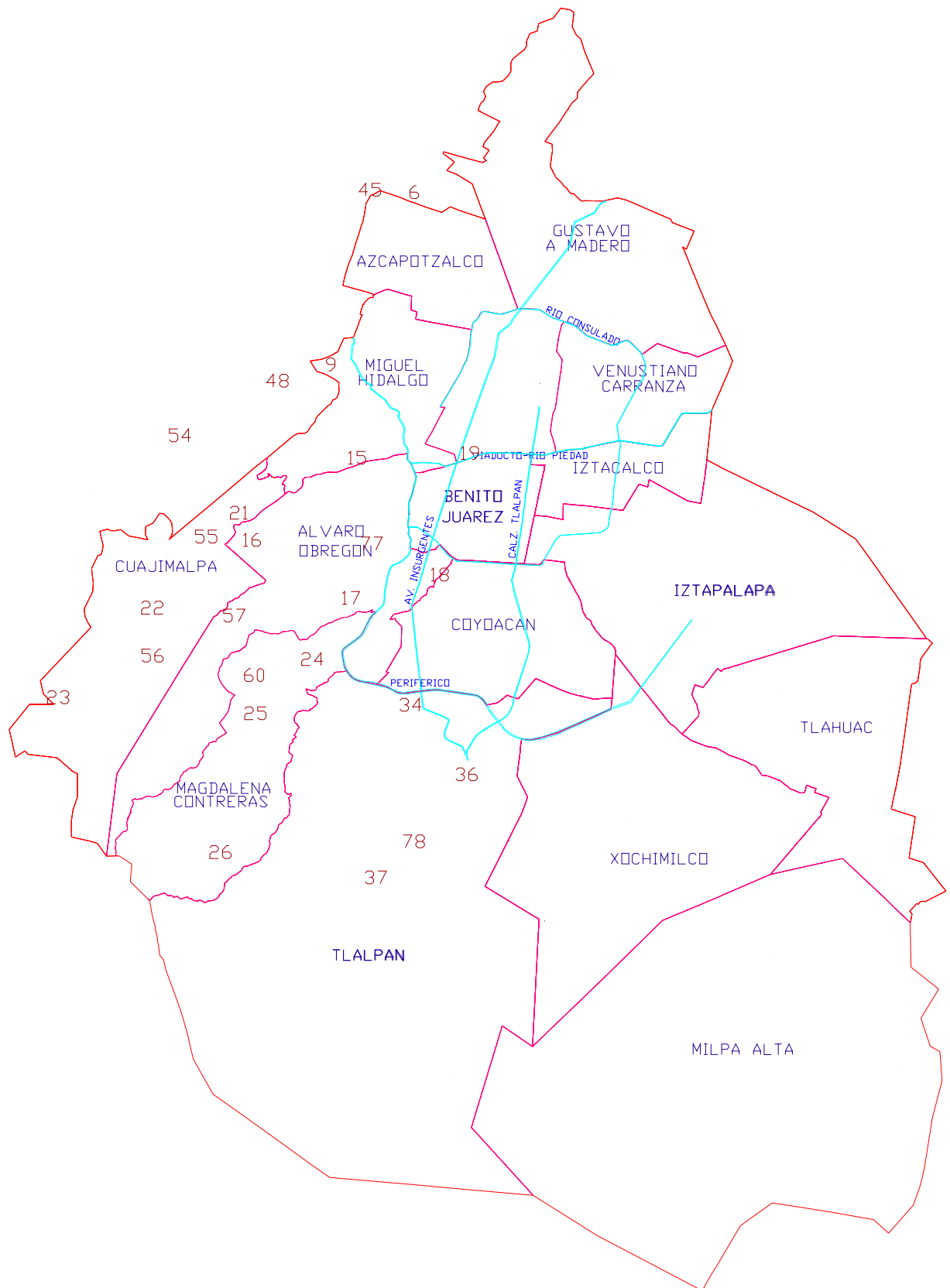


Fig. 4.1 Estaciones pluviográficas en la zona de estudio del D. F.

Tabla 4.1 Precipitación mensual promedio (hp) de las estaciones seleccionadas.

Mes	hp (mm)
Enero	9
Febrero	4
Marzo	12
Abril	30
Mayo	48
Junio	161
Julio	171
Agosto	191
Septiembre	179
Octubre	75
Noviembre	14
Diciembre	4
Promedio anual	898

Para evaluar el volumen de precipitación anual se tomaron los valores de precipitación mensual y se multiplicaron por el área de la zona de estudio. A manera de revisión, esta misma operación se realizó con los resultados de la interpolación de precipitaciones con ayuda de un modelo de interpolación comercial. El modelo permite también calcular el volumen entre dos superficies (en nuestro caso, el de la precipitación y el de un umbral de precipitación mínimo).

En la tabla 4.2 se generan los volúmenes de precipitación por mes y se muestra el volumen total anual resultante. El procedimiento empírico seguido es el siguiente: se obtuvo un volumen de precipitación (columna dos) entre la superficie interpolada de lluvia mensual y el plano definido por un umbral determinado (columna 3); para el volumen de agua precipitada debajo del umbral (columna 5) se multiplicó ese umbral (de precipitación) por el área que define su isoyeta (columna 4). El umbral usado en cada mes corresponde a una isoyeta diferente, elegida visualmente del plano de precipitación interpolada; con esta selección se busca considerar exclusivamente la precipitación que cubre la zona de estudio.

Tabla 4.2 Obtención de volúmenes de lluvia.

MES	VOLUMEN SURFER (m ³)	Z (mm)	ÁREA (m ²)	Z (m)	VOLUMEN AJUSTE (m ³)	VOLUMEN TOTAL (m ³)
Enero	13436517	3	3207821920	0.003	9623466	23059983
Febrero	7199687	3	2752267068	0.003	8256801	15456488
Marzo	16745220	8	2928799249	0.008	23430394	40175614
Abril	17353803	20	2803570360	0.02	56071407	73425210
Mayo	37882581	30	2639434349	0.03	79183030	117065611
Junio	174479614	60	3213850209	0.06	192831013	367310626
Julio	145296512	70	3047690779	0.07	213338355	358634866
Agosto	142481193	90	2996648679	0.09	269698381	412179575

Continuación de la tabla 4.2

Septiembre	194106158	60	3297703506	0.06	197862210	391968368
Octubre	100203985	30	3485429095	0.03	104562873	204766858
Noviembre	18738442	5	3284603021	0.005	16423015	35161457
Diciembre	5366405	2.5	3132412224	0.0025	7831031	13197435
Volumen anual	873290117					2,052,402,093

Como puede observarse en la tabla anterior, el volumen anual de precipitación que se tiene en la Ciudad de México es de 2'050'000,000 m³ de agua de lluvia. Según Domínguez, et al. (2005), solo el 2 % de ella es aprovechable (41'000,000 m³), el cual podría potencialmente almacenarse en el suelo a través de técnicas de infiltración.

Ahora bien, si se toman los valores correspondientes de precipitación a los meses de junio a septiembre de la tabla 4.1 y se hace la suma de éstos, el resultado es una precipitación de 702 mm en cuatro meses. Si esta precipitación se multiplica por el área aproximada de la zona suroeste (570'400,000 m²), se obtiene un volumen de agua de 400'400,000 m³. Se debe tomar en cuenta la mayor parte de la precipitación regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración 75 % y en escurrimiento superficial se tiene un 6%.

4.1.2 AFLORAMIENTO DE AGUAS PLUVIALES

Se recopiló información de un estudio realizado por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM, 1998), para conocer las causas en la disminución de la capacidad de absorción de los pozos instalados en la zona de pedregales. El estudio permitió detectar que el agua infiltrada afloró en algunos lugares próximos a la ubicación de los pozos de infiltración. Los sitios de afloramiento están ubicados de poniente a oriente entre Calzada de Tlalpan e Insurgentes Sur y de norte a sur entre Av. De las torres y Periférico Sur.

En el plano 1 se muestran 12 sitios que están marcados como afloramientos de agua pluvial. El agua que brota de los afloramientos es la captada por los pozos de absorción en esa zona y que no está alcanzando estratos inferiores al ser infiltrada hacia el subsuelo. Los afloramientos pueden ser provocados por la colmatación de los pozos de absorción, lo cual disminuye la capacidad de infiltración en la zona; también es posible que el agua ya no sea infiltrada porque llega a una capa de suelo impermeable (arcilla).

El agua pluvial que sale de los afloramientos es conducida hacia la red de alcantarillado, por lo que es un volumen de agua que no es aprovechado. Esta situación motivaría a que se realice un estudio geohidrológico para conocer las soluciones que puedan tomarse al respecto.

En el plano 1 se pueden observar los pozos absorción y sitios de afloramiento ubicados en la zona de pedregales.

4.1.3 ESTRUCTURAS DE DRENAJE Y DETENCIÓN

La superficie urbanizada del Distrito Federal se ha extendido hacia el poniente hasta cubrir algunas zonas de la Sierra de las Cruces, donde la zona urbana abarca desde sus lomeríos hasta el centro del Valle de México; en consecuencia, el sistema de drenaje no sólo recibe las aguas de las precipitaciones dentro de su superficie, sino también las que provienen de las montañas cercanas, originando los escurrimientos en los ríos que atraviesan la Ciudad, de los cuales destacan los ríos: Churubusco, Magdalena, San Ángel, Tequilasco, Barranca del Muerto, Mixcoac, Piedad, Becerra, Tacubaya, Consulado, Dolores, Barrilazo, Tecamachalco y San Joaquín.

Todos estos cauces se alimentan de las lluvias que caen en la zona montañosa del poniente de la Ciudad de México, generándose grandes volúmenes de agua que deben ser regulados por las presas del poniente y descargarse al sistema de drenaje y control de inundaciones de la ciudad, principalmente hacia el Interceptor del Poniente.

Estructuras de detención

En la zona del sureste y poniente del Distrito Federal se cuenta con presas de detención (figura 4.2), que cumplen con la función de detener el agua de lluvia, pero solo sirven para almacenar el agua por unas cuantas horas, dado que se deben vaciar para estar disponibles hasta la llegada de la siguiente lluvia.

En la tabla 4.4 se muestra el nombre de cada una de las presas ubicadas en el plano antes mencionado, así como también la capacidad útil y de sobre almacenamiento de las presas, reportadas por Franco *et al.*, (1992).

Tabla 4.4 Presas ubicadas en el suroeste de la Ciudad de México. (Franco, et al. 1992)

REFERENCIA	PRESA	CAPACIDAD ÚTIL (m ³)	CAPACIDAD SOBRE ALMACENAMIENTO (m ³)	X (m)	Y (m)
PR-1	La colorada	127320	134450	471084	2155952
PR-2	El colorado	156200	175400	470952	2155446
PR-3	Las julianas	201400	201400	469157	2152352
PR-4	Los arcos	27000	27000	472800	2152499
PR-5	Totólica	1445320	1445320	470240	2150903
PR-6	Los cuartos	292410	322100	473045	2150995
PR-7	El sordo	485350	594975	472837	2148937
PR-8	Hondo	3560	8000	472000	2147641

Continuación de la tabla 4.4

PR-9	El periodista	91400	121000	476799	2150074
PR-10	El tornillo	35000	---	475815	2149717
PR-11	El capulín	22540	27160	472876	2146901
PR-12	San Joaquín	359000	359000	476207	2148811
PR-13	Tecamachalco	---	---	476524	2147946
PR-14	Barrilazo	76000	82840	476937	2146976
PR-15	Dolores	230500	240000	478015	2146556
PR-16	Tacubaya	286700	286700	477591	2144301
PR-17	Ruiz Cortinez	22180	22180	478451	2144476
PR-18	Becerra "A"	9310	10764	477877	2142975
PR-19	Becerra "B"	5200	5530	478328	2142763
PR-20	Becerra "C"	40940	55640	476835	2143075
PR-21	Mixcoac	610000	610000	475435	2140871
PR-22	Tarango	246460	258420	478923	2140969
PR-23	Pilares	20190	37000	478535	2139912
PR-24	Tequilasco	47250	48460	475974	2138756
PR-25	La mina	37350	37350	477584	2139001
PR-26	Las flores	21920	22480	478015	2138790
PR-27	Texcalatlaco	25830	25830	476067	2136984
PR-28	Coyotes	---	---	476244	2136981
PR-29	Anzaldo	153100	174420	476939	2136078

Las presas con referencia PR-10, PR-13 y PR-28 no cuentan con datos de capacidad de diseño y sobre almacenamiento.

En seguida se hace una breve descripción de las condiciones en que se encuentran los vasos de almacenamiento de estas presas. Cabe mencionar que las descripciones fueron tomadas de Franco, et al. (1992), por lo que no es un estudio reciente, por lo tanto las condiciones en que se encuentran en la actualidad quizás sean diferentes. Cabe comentar que algunas de las presas se encuentran comunicadas con sus vecinas a través de túneles de interconexión, los cuales sirven para que los volúmenes por detener en cada río puedan ser distribuidos entre varias estructuras e incrementar con ello la capacidad de almacenamiento general del sistema de presas.

La presa "La Colorada" esta localizada en la cuenca del río San Mateo, afluente del río Chico de los Remedios. El vaso de almacenamiento se encuentra azolvado y con gran cantidad de basura, lo que se traduce en pérdida de capacidad y regulación. En el año de 1980 recibió el último desazolve.

La presa "El Colorado" esta localizada en la cuenca del río El Colorado, afluente del río San Mateo. El vaso de almacenamiento se encuentra, muy azolvado (mas de 1.50 m de espesor) y no presenta problemas de invasión urbana dentro del vaso de almacenamiento.

La presa "Las Julianas" localizada en la cuenca del río Chico de los Remedios. El vaso ha perdido casi toda su capacidad original debido a la invasión de un panteón, por lo que ha perdido toda capacidad de regulación.

La presa "Los Arcos" localizada en la cuenca del río Chico de los Remedios. El vaso se encuentra limpio de basura, pero presenta una capa regular de azolve.

La presa "Totolica" localizada en la cuenca del río Totolica. El vaso se encuentra azolvado y limpio de basura.

La presa "Los Cuartos" localizada en la cuenca del río Los cuartos. El vaso se encuentra casi totalmente azolvado, el agua llega a la obra de toma a través de un canal abierto en el azolve.

La presa "El sordo" localizada en la cuenca del río El Sordo. El vaso se encuentra muy azolvado y sucio. Existe un túnel de interconexión que viene de la presa Hondo, pero actualmente se encuentra azolvado.

La presa "Hondo" localizada en la cuenca del río Hondo. El vaso está totalmente azolvado en la margen de la derecha, y en la izquierda el agua pasa libre sin ningún control. El túnel de interconexión se encuentra sobre la margen izquierda de la cortina y va hacia la presa el Sordo. Actualmente está completamente azolvado y cuenta con dos compuertas de control, que también están azolvadas.

Las presas "El Periodista" y "Tornillo" localizadas en los límites del D. F. y Edo. de México. Los vasos se encuentran limpios, ya que son empleados para prácticas del campo militar.

La presa "El Capulín" localizada en la cuenca del río San Joaquín. El vaso se encuentra azolvado y con presencia de basura.

La presa "San Joaquín" localizada en la subcuenca del río San Joaquín. El vaso se encuentra parcialmente azolvado y con presencia de basura. Existe un túnel de interconexión que viene de la presa Tacamachalco y otro sobre la margen izquierda que consiste en dos orificios rectangulares de descarga controlada que van hacia el entubamiento del Tornillo.

La presa "Tecamachalco" localizada en la cuenca del río Tecamachalco. El vaso de esta presa descarga al túnel de interconexión que viene de la presa Tacubaya.

La presa "Barrilaco" localizada en la cuenca del río Barrilaco. El vaso se encuentra casi cubierto por la vegetación.

La presa "Dolores" localizada en la cuenca del río Dolores. El vaso se encuentra limpio de basura, pero cubierto en su mayoría por extensa vegetación. No se encuentra interconectada.

La presa "Tacubaya" localizada en la cuenca del río Tacubaya. El vaso se encuentra regularmente azolvado y con basura. Esta interconectada hacia la presa Tecamachalco.

La presa "Ruíz Cortines" localizada en la subcuenca del río Tacubaya. El vaso esta poco azolvado, pero con gran cantidad de vegetación.

Las presas "Becerra A" y "Becerra B", localizadas en la subcuenca del río Becerra. Los vasos son pequeños y se encuentran completamente rodeados por casas, son utilizados por los vecinos como basureros, por lo que la cantidad de basura que llega a ellas, provoca que se tengan que estar limpiando continuamente las obras de toma.

La presa "Becerra C" localizada en la cuenca del río Becerra. El vaso esta muy sucio y azolvado, lo que implica que tenga que ser desazolvado cada año. Existe un túnel que llega al vaso proveniente de la presa Mixcoac, y sobre la margen izquierda se encuentra una torre hexagonal, de mampostería que es el inicio del túnel de interconexión hacia la presa Tacubaya.

La presa "Mixcoac" localizada en la cuenca del río Mixcoac. El vaso recibe gran cantidad de azolve, por lo que su mantenimiento es periódico. La capacidad de almacenamiento de esta presa se ha visto disminuida por los problemas de asentamientos urbanos en el cauce y vaso de la presa. La presa esta interconectada hacia la presa Becerra C.

La presa "Tarango" localizada en la cuenca de los ríos Puerta Grande y Puente Colorado. El vaso se encuentra regularmente azolvado, pero libre de basura, tampoco existe invasión por casas habitación.

La presa "Pilares" localizada en la cuenca del río Pilares. El vaso se encuentra ligeramente azolvado y con mucha vegetación. Existe una casa habitación un metro más debajo de la cresta del vertedor.

La presa "Tequilasco" localizada en la cuenca del río Tequilasco. El vaso se encuentra con azolves y basura.

La presa "La Mina" localizada en la subcuenca del río Tequilasco. El vaso de la Mina se encuentra libre de azolves y basura.

La presa "Las Flores" localizada en la cuenca del río Las Flores. El vaso se encuentra azolvado, pero libre de invasiones dentro del cauce.

La presa "Texcalatlaco" localizada en la cuenca del río Texcalatlaco. El vaso se encuentra muy azolvado. Existe un túnel de interconexión hacia la presa Coyotes.

La presa "Coyotes", localizada en la cuenca del río Coyotes. No se tiene acceso al vaso, ni al sitio de la presa por encontrarse en una zona con propiedades, que no permiten el acceso, pero se aprecia que esta poco azolvado.

La presa "Anzaldo" localizada en la cuenca de los ríos Magdalena y Eslava. El vaso es de grana capacidad, y debido al mantenimiento periódico, se encuentra libre de azolve y basura durante casi todo el año.

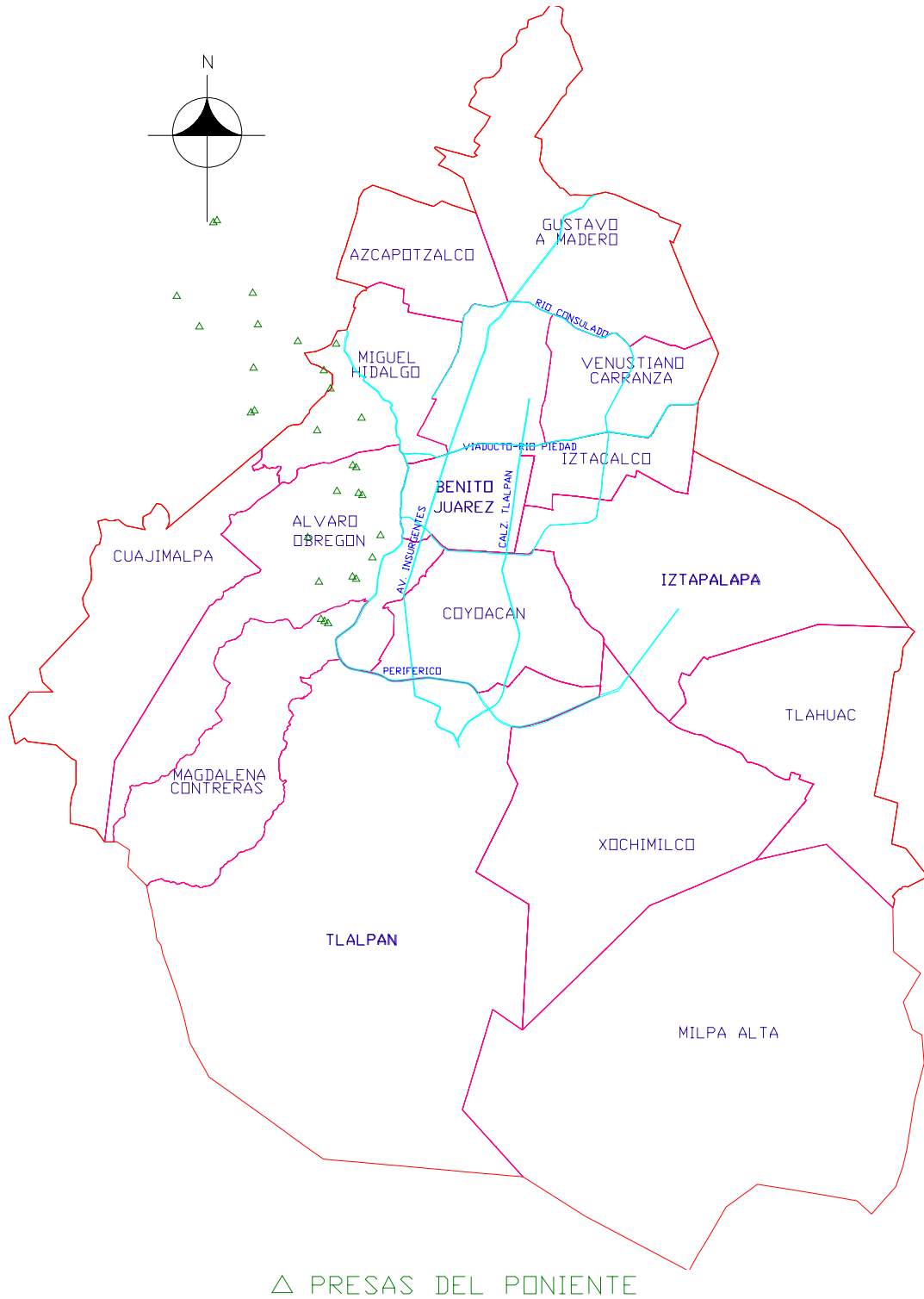


Fig. 4.2 Ubicación de las presas de detención en el poniente del Distrito Federal.

La capacidad total de sobre almacenamiento de estas presas es de 5'333,419 m³, pero como se ha visto en la descripción de cada una de ellas, esta capacidad ha ido disminuyendo año tras año por diferentes motivos (invasión urbana, acumulación de basura, transporte de sedimentos y el crecimiento de vegetación en los vasos), por lo que es difícil conocer el volumen de almacenamiento con el que están trabajando actualmente.

Por tal motivo, durante la temporada de lluvias que tienen lugar en la zona poniente del D. F. (que históricamente es la parte de la ciudad en donde se registran las mayores alturas de precipitación) se producen con frecuencia grandes encharcamientos y se tiene el riesgo de inundaciones importantes, porque estas presas han perdido capacidad de regular los volúmenes de los escurrimientos que llegan a ellas. Por lo anterior es conveniente revisar la capacidad y la operación del conjunto de estructuras que sirven para mitigar las inundaciones que se tienen en la zona y proponer la construcción de otras que tomen en cuenta las condiciones actuales de esta zona. Para la realización de estas acciones en este trabajo se presenta un plano (que se verá mas adelante) en el que se sugieren las zonas de infiltración en el suroeste del Distrito Federal.

Estructuras de drenaje

Actualmente en la Ciudad de México se cuenta con el Sistema de Drenaje Profundo el cual tiene como objetivo conducir las aguas del drenaje combinado de la ciudad que se presentan durante el periodo de lluvias y evitar la ocurrencia de inundaciones que causen daños directos a la vida de la población o sus bienes, así como daños indirectos por la afectación al desarrollo normal de las actividades humanas. En la figura 4.3 se muestra un esquema del sistema de drenaje de la Ciudad de México, dentro del cual se observa el drenaje profundo.

Los cauces naturales solamente se conservan en las zonas montañosas que rodean al valle de México. Los ríos que cruzan la zona urbana han sido entubados para evitar el contacto de la población con los mismos.

Los ríos del poniente del Distrito Federal conducen sus escurrimientos hacia las presas del poniente que los intercepta, descargando gastos regulados en el Interceptor Poniente para después ser conducidos por los túneles de los ríos Churubusco, Piedad, Consulado y San Joaquín. El Interceptor Poniente conduce las avenidas hacia el norte y las descarga al río Hondo, aguas arriba del Vaso del Cristo, donde pueden ser reguladas nuevamente y descargadas al Emisor del Poniente, hacia el norte, o en el río de Los Remedios, hacia el oriente.

En los últimos años, el Sistema de Drenaje Profundo ha ampliado su cobertura hacia el sur y el este, con objeto de auxiliar al río Churubusco y absorber las

avenidas generadas por el crecimiento acelerado de las delegaciones Iztapalapa y Tláhuac, situadas al sur-oriental del Distrito Federal.

Finalmente, el otro gran conducto para drenar las avenidas fuera del valle de México, es el Gran Canal del Desagüe. Éste recibe directamente las descargas de toda la zona urbana situada al oriente del Interceptor del Poniente y al norte del río Churubusco, con el agravante de que, por el hundimiento de la ciudad, dichas descargas tienen que efectuarse mediante bombeos. Más adelante recibe las aguas del Dren General del Valle, que conduce los escurrimientos del río Churubusco, ya regulados en los lagos de Texcoco.

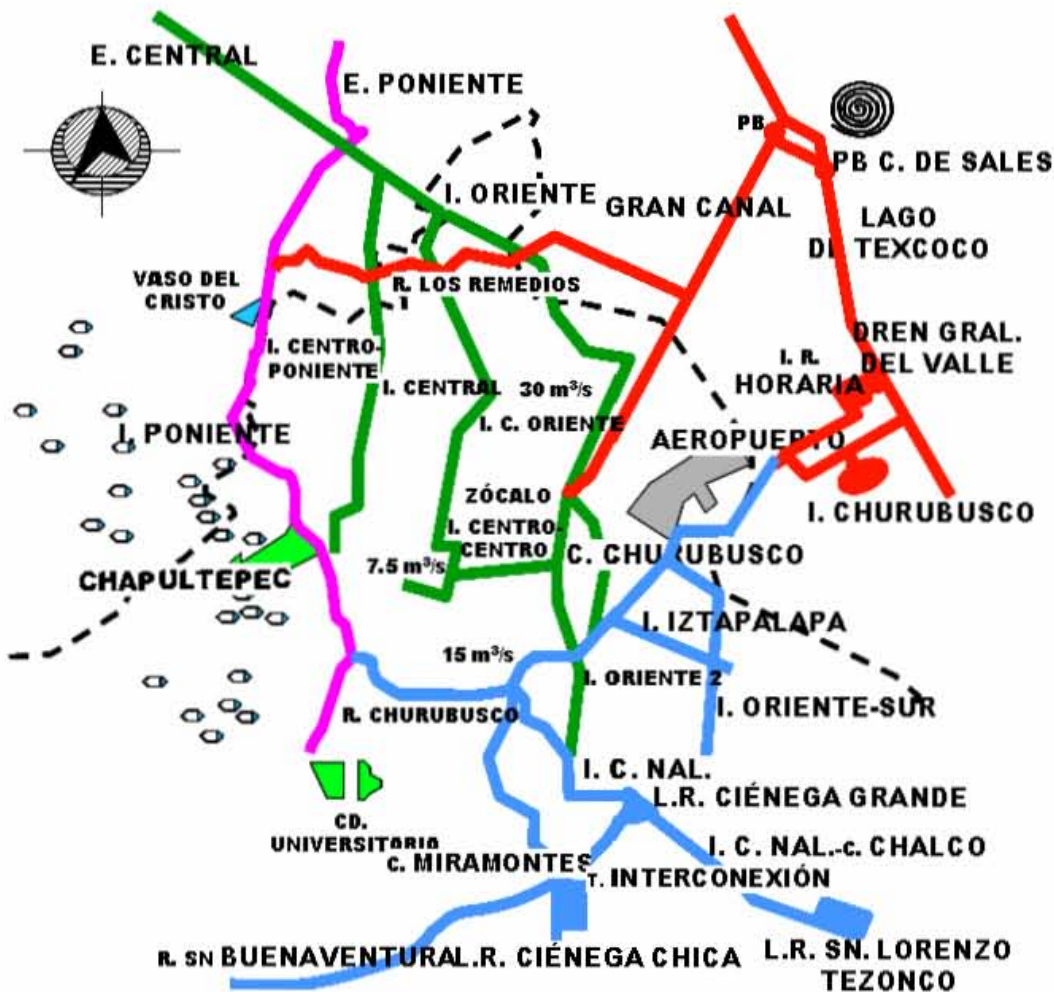


Figura 4.3 Red de drenaje de la Ciudad de México. Donde: C. Canal, E. Emisor, I. Interceptor, I. C. Interceptor Central, I. P. Interceptor Poniente, L. R. Laguna de Regulación, P. B. Planta de bombeo, R. Río, T. Túnel (Cisneros, 2007)

Aunque la construcción del Drenaje Profundo permitió reducir considerablemente las áreas de aportación al Gran Canal, los problemas de hundimiento han ocasionado que éste pierda pendiente, al grado de que en los primeros 20 km ya es prácticamente nula o en contrapendiente y en los próximos años esta situación se irá acentuando (Domínguez, 2000).

El sistema de drenaje profundo desaloja las aguas residuales y pluviales durante la época de lluvias, la capacidad de dicho sistema se ha estimado en la Ciudad de México en 220 m³/s de agua (SACM, 2005).

4.2 AGUAS RESIDUALES

“Las aguas residuales son aquellas aguas que han sido utilizadas o degradadas por una población, provenientes tanto de los hogares como de efluentes comerciales o industriales” (Lara, 1991). El agua residual debería ser entonces conducida por el drenaje hacia las plantas de tratamiento para evitar la contaminación de ríos y depósitos de agua naturales, lo que no siempre ocurre.

4.2.1 TRATAMIENTO Y CALIDAD DEL AGUA PARA INFILTRACIÓN

El tratamiento de aguas residuales inicia con la separación física inicial de sólidos de la corriente de aguas municipales, seguido por la conversión de materia biológica disuelta en una masa biológica sólida usando bacterias. Una vez que la masa biológica es separada o removida, el agua tratada puede experimentar una desinfección adicional mediante procesos físicos o químicos.

Los procesos de tratamiento (físicos o químicos) son:

Tratamiento primario (asentamiento de sólidos)

Tratamiento secundario (tratamiento biológico de sólidos flotantes y asentados)

Tratamiento terciario (pasos adicionales como lagunas, micro filtración o desinfección)

Tratamiento primario: El tratamiento primario es para reducir aceites, grasas, arenas y sólidos gruesos. El afluente del agua residual se filtra para remover todos los objetos grandes que son depositados en el sistema de alcantarillado.

Muchas plantas tienen una etapa de sedimentación donde el agua residual se pasa a través de grandes tanques circulares o rectangulares. Estos tanques son llamados clarificadores primarios o tanques de sedimentación primarios. Los tanques son lo suficientemente grandes que los sólidos fecales pueden sedimentarse y el material flotante como la grasa y plásticos pueden levantarse hacia la superficie y quitarse. El objetivo principal de la etapa primaria es producir generalmente un líquido homogéneo capaz de ser tratado biológicamente y originar un sedimento que pueda ser tratado separadamente. Los tanques primarios se equipan generalmente con raspadores que mecánicamente conducen éste lodo recogido hacia una tolva en la base del tanque donde, mediante una bomba, puede llevarse hacia otras etapas del tratamiento.

Tratamiento secundario: El objetivo de éste es degradar el contenido biológico de las aguas residuales que se derivan de las descargas al drenaje (comida, jabones, detergentes, papeles, etc.), usando procesos biológicos aeróbicos. Para que sea efectivo el proceso biótico, se requiere oxígeno y organismos biológicos como bacterias y protozoarios que consuman contaminantes orgánicos solubles biodegradables (por ejemplo: azúcares, grasas, moléculas de carbón orgánico, etc.)

Los sistemas de tratamiento secundario son clasificados como película fija o crecimiento suspendido. En los sistemas fijos de película (como los filtros de roca), la biomasa crece en el medio y el agua residual pasa a través de él. En el sistema de crecimiento suspendido (como lodos activados) la biomasa está combinada con las aguas residuales.

Tratamiento terciario: El tratamiento terciario proporciona una etapa final para aumentar la calidad del efluente al estándar requerido antes de que éste sea descargado al ambiente receptor (mar, río, lago, campo, etc.) Más de un proceso del tratamiento terciario puede ser usado en una planta de tratamiento.

Lo anterior es un esquema general de lo que se hace en una planta de tratamiento de aguas residuales, para obtener agua tratada reutilizable en riego, lavado de autos o simplemente descargarla a los ambientes receptores (mar, lagos, etc.)

Como se ha mencionado antes, el Gobierno de la Ciudad de México ha estudiado la posibilidad de infiltrar agua tratada a los mantos acuíferos, por lo que la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal estableció la norma ambiental para el Distrito Federal NADF-003-AGUA-2002, que establece las condiciones y requisitos para la recarga por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México. Esta norma se publicó en la gaceta oficial del Distrito Federal el 26 de marzo de 2004.

La norma está fundamentada para cumplir con las siguientes características:

- Los valores permisibles de calidad del agua utilizada para la recarga artificial del acuífero.
- Un programa de actividades para el control y vigilancia de la calidad del agua utilizada antes y después de la recarga artificial del acuífero.
- Los procedimientos administrativos a los que deberán estar sujetos los procesos de construcción y operación de los sistemas de recarga, para su autorización.

A continuación se hace referencia a algunos aspectos importante de la NADF-003-AGUA-2002.

Calidad del agua tratada para infiltración

La calidad del agua a emplear para la recarga artificial del acuífero deberá cumplir con los límites máximos establecidos por los parámetros que a continuación se enlistan:

1. Límites máximos permisibles de características microbiológicas:

Tabla 4.5. (NADF-003-AGUA-2002)

Característica	Límite máximo permisible
E. coli o coliformes fecales u organismos Termotolerantes	Ausente
Enterovirus	Ausente
Estreptococos fecales	Ausente
Giardia lamblia	Ausente

2. Límites máximos permisibles de características físicas:

Tabla 4.6. (NADF-003-AGUA-2002)

Característica	Límite máximo permisible
Color	15 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Conductividad eléctrica	No ser mayor en 15% al agua del acuífero
Turbiedad	5 UTN

3. Límites máximos permisibles de características químicas:

Tabla 4.7. (NADF-003-AGUA-2002).

Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique la unidad.

Característica	Límite máximo permisible
Aluminio	0,2
Arsénico	0,025
Bario	0,7
Benceno	0,01
Boro	0,3
Cadmio	0,003
Carbono orgánico total	1,0
Cianuros	0,07
Cloro libre residual	0,0
Cloruros (como Cl)	250,00
Cloruro de vinilo	0,005
Cobre	2,00
Cromo total	0,05
1,1-Dicloro etileno	0,030
Dureza total (como CaCO ₃)	500,00
Estireno	0,02
Etilbenceno	0,3
Fenoles o compuestos fenólicos	0,3
Fluoruros	1,5
Fósforo (como PO ₄ ³⁻)	1,0
Hidrocarburos poliaromáticos HPA	0,000 2
Hierro	0,3
Manganeso	0,15
Mercurio	0,001
Metil terbutil éter	0,03
Nitratos (como N)	10,00
Nitritos (como N)	1,0
Nitrógeno amoniacal (como N)	0,5
Percloroetileno o tetracloroetileno	0,040
PH	6,5 – 8,5
Plaguicidas clorados (µg/L):	
1,2-dibromo-3-cloropropano	1
2,4 D	30,00
Alacloro	20
Aldicarb	10
Aldrin y dieldrin	0,03
Atrazina	2

Continuación de la tabla 4.7

Carbofurano	5
Clordano	0,2
DDT	1,00
Gama-HCH (lindano)	2,00
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0,03
Hexaclorobenceno	1,00
Metoxicloro	20,00
Plomo	0,01
SAAM	0,5
Sodio	200,00
Sólidos disueltos totales	1 000,00
Sólidos suspendidos totales	5,00
Sulfatos (como SO ₄ ²⁻)	400,00
Tolueno	0,7
Tribalometanos totales	0,20
Tricloroetileno	0,070
1,1,1-Tricloroetano	2,0
Xilenos (tres isómeros)	0,5
Zinc	5,00

En caso de que la fuente de agua tratada a emplear para la recarga artificial del acuífero no cumpla con la calidad requerida por estas tablas, ésta deberá ser sometida a los tratamientos que sean necesarios, para alcanzar los valores establecidos por la norma NADF-003-AGUA-2002

Muestreo de la calidad del agua tratada para infiltración

Según la norma, el responsable del proyecto de recarga artificial, deberá diseñar y construir una red o sistema de monitoreo de la calidad del agua, consistente de una red radial de multipiezómetros y pozos de monitoreo de la calidad del agua del acuífero, situados a: $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la distancia entre el sitio de recarga y las obras de captación más cercanas. Las profundidades se definirán en razón del gradiente hidráulico y de la profundidad a la que se realice la recarga y de la dirección del flujo subterráneo, para el sistema de recarga definitivo. (NADF-003-AGUA-2002)

Para efectuar el muestreo y análisis de la calidad del agua se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Muestreo del agua tratada para el proyecto piloto, tanto para el agua de recarga como la extraída de los pozos de observación:

Tabla 4.8. (NADF-003-AGUA-2002)

Frecuencia	Parámetros	Tipo de Muestra
Diario	In-situ: pH, potencial redox (V), temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, cloro residual En laboratorio: dureza total, turbiedad, coliformes fecales.	Simple
Tres veces por semana en días alternados	pH, potencial redox (V), temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, dureza total, sólidos suspendidos totales, turbiedad, hierro, manganeso, coliformes fecales, carbono orgánico total (COT), nitrógeno amoniacal, sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Compuesta de 24 h
Dos veces por semana en días diferentes al punto anterior	Todos los parámetros indicados en la calidad del agua.	Compuesta de 24 h

2. Muestreo del agua tratada para el proyecto definitivo, tanto para el agua de recarga como la extraída de pozos de observación:

Tabla 4.9. (NADF-003-AGUA-2002)

Frecuencia	Parámetros	Tipo de muestra
Diario	In-situ: pH, potencial redox (V), temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, cloro residual En laboratorio: dureza total, turbiedad, coliformes fecales.	Simple
Quincenal	pH, potencial redox (V), temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, dureza total, sólidos suspendidos totales, turbiedad, hierro, manganeso, coliformes fecales, carbono orgánico total (COT), nitrógeno amoniacal, sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Compuesta de 24 h
Trimestral	Todos los parámetros indicados en la calidad del agua, capítulo anterior.	Compuesta de 24 h

El tipo de muestra simple y compuesta se obtienen como se describen a continuación:

Muestra simple: La que se tome en el punto de descarga, de manera continúa, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo.

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMSi = VMC \times (Qi / Qt)$$

Donde:

- VMSi =volumen de cada una de las muestras simples "i", litros.
- VMC =volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.
- Qi =caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, litros por segundo.
- Qt =la suma de los caudales de todas las muestras simples, litros por segundo

Muestra compuesta: La que resulta de mezclar el número de muestras simples, según lo indicado en la tabla 4.6. Para conformar la muestra compuesta el volumen de cada una de las muestras simples deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma.

Tabla 4.10 (NOM-001-ECOL-1996)

Frecuencia de muestreo			
Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
		Mínimo	Máximo
Menor que 4	mínimo 2	-	-
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

Ubicación del proyecto de infiltración de agua residual

Los proyectos de recarga artificial no podrán realizarse en sitios que tengan o hayan tenido:

- a) Tanques de combustibles enterrados.
- b) Basureros
- c) Sistemas sépticos domésticos
- d) Panteones o cementerios
- e) Áreas de aplicación de plaguicidas
- f) Cualquier otro determinado en la resolución de Impacto Ambiental.

Requisitos para la construcción y operación del proyecto

El encargado de los dispositivos de infiltración, deberá entregar a la autoridad competente y a la Secretaría del Medio Ambiente, lo siguiente:

- a) El origen y la disponibilidad del agua de recarga
- b) Mapa topográfico donde se ubique la obra, así como también incluir la localización geográfica de la misma.
- c) Características hidrogeológicas del sitio de recarga.
- d) Mapas de elevación y de profundidad del nivel freático, de distribución del espesor, de la porosidad, coeficiente de almacenamiento y de la conductividad hidráulica de las rocas que conforman el acuífero a recargar.
- e) Un mínimo de cuatro perfiles estratigráficos detallados radiales

respecto al sitio de recarga en dirección del gradiente hidráulico, en un radio mínimo de 2 km o a la captación mas cercana, obtenido mediante perforaciones exploratorias con recuperación de núcleo continuó, profundidades mínimas de exploración de 200 m, incluyendo zona saturada y no saturada.

- f) Distribución, espesor y continuidad de las capas permeables e impermeables en el subsuelo.
- g) Estimación de los coeficientes de dispersión en un radio máximo de 2 km.
- h) Características fisicoquímicas y microbiológicas que se establecieron en el tema de calidad del agua.
- i) Determinación de la posible conexión hidráulica entre acuíferos.
- j) Fuente activas o potenciales de contaminación al subsuelo en un radio de 1 km a las obras de recarga.
- k) Un proyecto piloto que reproduzca a escala experimental las obras y la operación del sistema de recarga.

Proyecto en marcha

Además de lo solicitado en el punto anterior, el encargado, deberá realizar y presentar a la autoridad competente y a la Secretaría del Medio Ambiente, un proyecto piloto en el sitio de interés, que reproduzca a escala experimental las obras y la operación del sistema de recarga propuesto en donde se debe cumplir con los requisitos marcados en la tabla 4.8.

La operación del proyecto piloto tendrá una duración suficiente hasta alcanzar un equilibrio hidráulico y químico, analizando en el sistema de recarga, apoyado en modelos de análisis hidrogeoquímicos, los siguientes aspectos:

- La evolución de la calidad del agua de recarga.
- La interacción del agua con el subsuelo y el método de recarga.
- Las variaciones en la tasa de infiltración y en la elevación del niveles piezométricos.

Para evaluar la efectividad del proyecto piloto, se deberá presentar a la autoridad competente y a la Secretaría del Medio Ambiente un informe final en términos de la factibilidad técnica y su impacto en la calidad del agua subterránea nativa, al medio ambiente o en aprovechamientos hidráulicos subterráneos, sustentado en los resultados obtenidos.

Una vez aprobado el proyecto piloto, el encargado del sistema de recarga deberá presentar el proyecto con la siguiente información:

- Diseño de obras de método de recarga.
- Programa de operación y mantenimiento de las obras.
- Propuesta de diseño de red de piezómetros de monitoreo.
- Análisis de las reacciones hidrogeoquímicas esperadas entre el agua de recarga y el agua del acuífero y entre el agua de recarga y la zona saturada y no saturada.
- Caudal estimado de agua a recargar
- Evaluación del impacto de las obras y operación de los sistemas de recarga en:
 - 1) La calidad del agua subterránea nativa a nivel local, regional.
 - 2) Fuentes de abastecimiento subterráneas.
 - 3) Aprovechamientos hidráulicos subterráneos de terceros.
 - 4) Obras civiles de tipo subterráneo.
 - 5) Extensión del área del acuífero a modificar, modelo tridimensional de espesor y profundidad de flujo y propiedades hidráulicas.
 - 6) Evaluación de los valores de dispersión y transporte en el medio geológico sujeto a la recarga.

Estos proyectos de recarga artificial del acuífero deberán estar situados en lugares que no afecten estructuras subterráneas como las instalaciones del Sistema de Transporte Colectivo Metro, entre otros.

Deberá demostrarse que el agua de recarga permanecerá en el acuífero receptor un periodo mínimo de 1 año, previo a su extracción para cualquier uso subsecuente.

También se deberá presentar a la Secretaria del Medio Ambiente un informe semestral con los resultados de los análisis de la calidad del agua de recarga y del acuífero, incluyendo lo siguiente:

- El análisis de la calidad del agua de recarga.
- El análisis de la calidad del agua del acuífero en las inmediaciones del sitio de recarga propuesto.

- El volumen de agua de recarga, así como la tasa de recarga.
- Velocidad y dirección del flujo subterráneo.
- La frecuencia y el tipo de mantenimiento proporcionado al sistema de recarga artificial.

Cierre y clausura del sistema de recarga

Los pozos de recarga y de observación que se hayan construido para el sistema de recarga, deberán ser clausurados cuando haya terminado su vida útil de acuerdo a la norma NOM-004-CNA-1996.

Estos son los requerimientos que estableció la Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal y como se menciono anteriormente esta norma no está en vigencia, por entrar en contrariedad con la Secretaria del Medio Ambiente.

Cabe señalar que los requisitos que establece ésta norma son similares a los que establece la Secretaria de Salud para potabilizar el agua para uso y consumo humano en la NOM-127-SSA1-1994.

4.2.2 DISPONIBILIDAD

En esta sección se hace un recuento de las plantas de tratamiento de agua residual (PTAR) que existen en el Distrito Federal para conocer la disponibilidad de agua tratada en la ciudad. Las PTAR son administradas por el SACM. Aunque se debe de tener en cuenta que la mayoría de esta agua ya está concesionada a distritos de riego en el Estado de México y Tula. Se necesita un tratamiento mucho mayor y costoso que el que tienen las plantas actuales

Plantas de tratamiento de aguas residuales que se ubican en la zona norte del Distrito Federal.

El Rosario Av. De las Culturas y Eje 5 Norte, U. H. El Rosario, Delegación Azcapotzalco.

Iztacalco Av. Girasol s/n, Esq. Cazahuate, U. H. Picos Iztacalco, Delegación Iztacalco.

Tlatelolco Calle Lerdo s/n, en el interior de la U. H. Nonoalco Tlatelolco, Delegación Cuauhtémoc.

Acueducto de Guadalupe Boulevard del Temoluco esq. Con calle Piélago, Col. Acueducto de Guadalupe, Delegación Gustavo A. Madero.

San Juan de Aragón Av. Ángel Albino Corso s/n, Esq. 503, Col, Cerro Prieto,

Delegación Gustavo A. Madero.

Ciudad Deportiva Esq. Viaducto Río Piedad con Río Churubusco, int. De la Ciudad Deportiva, "Magdalena Mixhuca", Delegación Iztacalco.

Bosque de las Lomas Calzada Ahuehuetes Norte s/n, Col. Bosques de las Lomas, Delegación Miguel Hidalgo.

Chapultepec Esq. De lateral del Periférico con Ferrocarril de Cuernavaca, Col. Lomas de Chapultepec, Delegación Miguel Hidalgo.

Campo Militar No. 1 Int. Campo Militar No. 1, en el extremo poniente del mismo (Av. Del Conscripto Esq. Con Periférico), Delegación Miguel Hidalgo.

Plantas de tratamiento de aguas residuales que se ubican en la zona sur del Distrito Federal.

San Nicolás Tetelco Calle 20 de Noviembre, Pueblo San Nicolás Tetelco, Delegación Tláhuac.

Cerro de la Estrella Av. San Lorenzo núm. 312, Col. San Nicolás Tolentino, Delegación Iztapalapa.

San Luís Tlaxialtemalco Av. 5 de mayo frente a los Viveros de San Luís Tlaxialtemalco, Delegación Xochimilco.

Coyoacán Calle Escuela Naval Militar No. 66, Colonia Paseos de Taxqueña, Delegación Coyoacán.

La Lupita (San Juan Ixtayopan) Canal la Lupita y calle Juárez, Pueblo San Juan Ixtayopan.

Abasolo Carretera México-Ajusco, Col. Pueblo de Abasolo, Delegación Tlalpan.

H. Colegio Militar Autopista México Cuernavaca, Col. H. Colegio Militar, Delegación Tlalpan.

Parres Carretera Federal a Cuernavaca, Col. Pueblo de Parres, Delegación Tlalpan.

Pemex-Picacho Adolfo Ruíz Cortinez, Col. U.H. Pemex Picacho, Delegación Tlalpan.

Xicalco (San Miguel) Carretera Federal a Cuernavaca, Col. San Miguel Xicalco, Delegación Tlalpan.

Reclusorio Sur Reclusorio Sur, Delegación Xochimilco.

Rastro Milpa Alta Pueblo de Milpa Alta, Delegación Milpa Alta.

Ciudad Universitaria Circuito Escolar y J. Moreno, Col. Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán.

Topilejo Pueblo de Topilejo, Delegación Tlalpan.

Santa Fe Calle Encinal, Col. Jalalpa Tepito. Delegación Álvaro Obregón.

San Pedro Atocpan Km. 17.5 de la Carretera a Oaxtepec, Pueblo San Pedro Atocpan, Delegación Milpa Alta.

San Andrés Mixquic Calle Lázaro Cárdenas, Pueblo de San Andrés Mixquic, Delegación Tláhuac.

San Lorenzo Avenida Leandro Valle, Col. Villa Centroamericana y del Caribe, Delegación Tláhuac.

A continuación se muestran las tablas 4.11 y 4.12; en la tabla 4.11 se enumeran las plantas de tratamiento ubicadas en el Distrito Federal junto con sus coordenadas "X" y "Y" en metros; y en la tabla 4.12 se muestra su proceso de tratamiento, capacidad instalada, capacidad de operación y el uso para el cual están destinadas las aguas residuales.

Tabla 4.11.Coordenadas UTM de plantas de tratamiento en el D. F. (SACM, 2006)

REFERENCIA	PTAR	X (m)	Y (m)
PTAR-1	El Rosario	478060	2156998
PTAR-2	Iztacalco	488969	2143198
PTAR-3	Tlatelolco	484939	2150815
PTAR-4	Acueducto de Guadalupe	483843	2158870
PTAR-5	San Juan de Aragón	489806	2151036
PTAR-6	Cd. Deportiva	491042	2145166
PTAR-7	Bosques de las Lomas	473080	2144088
PTAR-8	Chapultepec	479528	2146728
PTAR-9	Campo Militar	476029	2149282
PTAR-10	San Nicolás Tetelco	502909	2124241
PTAR-11	Cerro de la Estrella	491896	2138116
PTAR-12	San Luis Tlaxialtemalco	497128	2129146
PTAR-13	Coyoacan	487501	2139074
PTAR-14	La Lupita	500420	2128290
PTAR-15	Abasolo	479016	2125547
PTAR-16	H. Colegio Militar	484825	2128191
PTAR-17	Parres	481037	2126138
PTAR-18	Pemex-Picacho	476918	2133826

Continuación de la tabla 4.11

PTAR-19	Xicalco	483235	2126858
PTAR-20	Reclusorio Sur	486439	2126429
PTAR-21	Rastro Milpa Alta	497114	2122423
PTAR-22	Cd. Universitaria	481209	2137440
PTAR-23	Topilejo	484862	2122330
PTAR-24	Santa Fe	475194	2142034
PTAR-25	San Pedro Atocpan	495213	2123366
PTAR-26	San Andrés Mixquic	503399	2125639
PTAR-27	San Lorenzo	493449	2131559

Tabla 4.12 Plantas de tratamiento, proceso, capacidad instalada y gasto de operación (INEGI, 2002)

REFERENCIA	P. T. A. R.	PROCESO	CAPACIDAD INSTALADA (l/s)	GASTO DE OPERACIÓN (l/s)	CUERPO RECEPTOR O REUSO
PTAR-1	El Rosario	Lodos activados	25.0	21.0	Áreas verdes
PTAR-2	Iztacalco	Lodos activados	13.0	10.0	Áreas verdes
PTAR-3	Tlatelolco	Lodos activados	22.0	18.0	Áreas verdes
PTAR-4	Acueducto de Guadalupe	Lodos activados	85.0	69.0	Áreas verdes /Industrial
PTAR-5	San Juan de Aragón	Lodos activados	500.0	200.0	Áreas verdes
PTAR-6	Cd. Deportiva	Lodos activados	230.0	169.0	Áreas verdes /Industrial
PTAR-7	Bosques de las Lomas	Lodos activados	55.0	18.0	Áreas verdes
PTAR-8	Chapultepec	Lodos activados	160.0	66.0	Áreas verdes
PTAR-9	Campo Militar	Lodos activados	30.0	30.0	Áreas verdes
PTAR-10	San Nicolás Tetelco	Lodos activados	30.0	15.0	Áreas verdes
PTAR-11	Cerro de la Estrella	Lodos activados	4000.0	2000.0	Áreas verdes /Industrial
PTAR-12	San Luís Tlaxialtemalco	Lodos activados	150.0	100.0	Agrícola / áreas verdes
PTAR-13	Coyoacan	Lodos activados	400.0	250.0	Áreas verdes /Industrial
PTAR-14	La Lupita	Lodos activados	15.0	13.0	Áreas verdes
PTAR-15	Abasolo	Lodos activados	15.0	7.0	Barranca
PTAR-16	H. Colegio Militar	Lodos activados	18.0	18.0	Áreas verdes
PTAR-17	Parres	Lodos activados	7.5	1.0	Áreas verdes
PTAR-18	Pemex-Picacho	Lodos activados	13.0	10.0	Áreas verdes
PTAR-19	Xicalco	Lodos activados	7.5	3.0	Áreas verdes
PTAR-20	Reclusorio Sur	Lodos activados	26.0	18.0	Áreas verdes
PTAR-21	Rastro Milpa Alta	Rafa	30.0	25.0	Riego agrícola
PTAR-22	Cd. Universitaria	Lodos activados	60.0	50.0	Áreas verdes
PTAR-23	Topilejo	Primario avanzado	15.0	3.0	Barranca
PTAR-24	Santa Fe	Lodos activados	560.0	280.0	
PTAR-25	San Pedro Atocpan	Lodos activados	60.0	35.0	Riego agrícola
PTAR-26	San Andrés Mixquic	Primario avanzado	30.0	30.0	Riego agrícola
PTAR-27	San Lorenzo	Lodos activados	225.0	85.0	Riego agrícola

Si se calcula la suma de los gastos de operación de las plantas de tratamiento, se obtienen en el Distrito Federal 3544 l/s de agua residual, de donde anualmente se tendrían 110 376 000 m³ de agua residual tratada.

Aunque gran parte de este volumen ya esta siendo utilizado para los servicios vistos en la tabla (riego agrícola, áreas verdes e industrias) resulta importante implementar un programa de mantenimiento que permita a las PTAR alcanzar su capacidad instalada ya que la mayor parte de ellas opera al 50% de su capacidad.

Otra medida que se debe de tomar en cuenta, es la construcción de más plantas de tratamiento, porque al comparar el efluente de aguas residuales que se genera en la Ciudad que se estima en 40 m³/s y el gasto de agua tratada es de 3.5 m³/s, se obtiene que solo el 9% de agua residual es tratada, y la parte restante se está enviando a los cuerpos receptores sin tratar (Valle de Mezquital, Lago de Texcoco, ríos y mares).

Como se vio anteriormente, algunos elementos del drenaje del D. F. que trabajan por medio de gravedad han sufrido la perdida de pendiente a consecuencia de los hundimientos de la ciudad, por lo que ha sido necesaria la instalación de estaciones de bombeo para ayudar a desalojar las aguas residuales.

Estos hundimientos se atribuyen a la sobreexplotación del acuífero, la cual se estima en 15 m³/s (Jiménez, 2004), por lo que resulta importante señalar el proyecto que quiere realizar el SACM para recargar el acuífero de la Ciudad en la PTAR "Cerro de la Estrella" en donde actualmente se trata más del 50% de las aguas residuales que son tratadas en la ciudad. Por lo que elaboró la norma descrita anteriormente en este capítulo y que ha sido invalidada por la SEMARNAT por regular un asunto de competencia federal.

Otra forma de contribuir a la recarga del acuífero es aprovechar el agua de lluvia por medio de dispositivos de infiltración los cuales serían instalados en la zona suroeste de la Ciudad, ya que ahí se tiene los mayores registros de precipitación y se cuenta con un suelo semipermeable.

5 ZONAS DE INFILTRACIÓN

A lo largo de este trabajo se han estudiado algunos conceptos y temas que tienen que ver con la infiltración de agua al subsuelo (ya sea pluvial o residual tratada). Entre estos temas destacan el aspecto legal que existe sobre la infiltración de estas aguas, la Geohidrología (tipos de suelo y situación del acuífero), disponibilidad del agua pluvial y residual tratada, también diferentes experiencias sobre estructuras de infiltración que existen en el mundo y en nuestro país, todo esto enfocado a la Ciudad de México.

Con base en lo anterior, en este capítulo se presentan los criterios con los cuales fue posible definir las posibles zonas de infiltración para agua pluvial y residual tratada en el Distrito Federal. Los criterios se basan principalmente en las normas que regulan este tipo de técnicas con respecto a estas aguas y en la distribución espacial que guardan las instalaciones que limitan estas prácticas.

5.1 RESUMEN DE LOS CRITERIOS PARA DEFINIR LAS ZONAS DE INFILTRACIÓN

Agua pluvial

En lo que se refiere a la infiltración de agua pluvial, en la Ciudad de México se cuenta actualmente con muy pocos dispositivos de infiltración en funcionamiento. Estas estructuras están operando en las delegaciones Tlalpan y Xochimilco y se ubican primordialmente en calles. Estos dispositivos son pozos de absorción y trincheras de infiltración que fueron construidos y administrados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM). La característica principal de estos dispositivos es que tienen una profundidad menor a los 20 metros, pues en caso de rebasar esa distancia se trataría de estructuras para inyección de agua pluvial y deberían estar bajo la supervisión de las autoridades federales (CONAGUA).

Para poder definir las posibles zonas de infiltración de agua pluvial se deben tomar en cuenta los aspectos legales que se discutieron en el capítulo 1, en donde se mencionan los lineamientos técnicos generales que estipula la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Dentro de los lineamientos se encuentra que la principal restricción para elegir un sitio factible para la colocación de un dispositivo de infiltración es que éste debe estar alejado de sitios de contaminación como son: depósitos de basura o de desechos tóxicos, gasolineras, etc., ya que desechos sólidos y líquidos al entrar en contacto con el agua pluvial infiltrada podrían contaminar el acuífero. En los lineamientos no se especifica qué distancia debe haber entre los dispositivos de infiltración y los sitios de contaminación, por lo tanto, se propusieron radios de circunferencia de 500 m, 1000 m y 2000 m para definir la zona de influencia de

cada uno de los sitios mencionados. Estos radios se construyeron para delimitar la zona de infiltración, lo que se puede observar en las figuras 5.6, 5.7, 5.8.

Como se ha visto en el desarrollo de este trabajo, se estudia la posibilidad de infiltrar agua pluvial en el suroeste del Distrito Federal porque ésta es una zona que reúne ciertas características que pueden aprovecharse para infiltrar el agua. En esta zona se registran las mayores alturas de precipitación de la ciudad, (capítulo 4) las cuales generan grandes volúmenes de agua durante la temporada de lluvias y que son el origen de grandes inundaciones y encharcamientos de esta zona. Además, en la zona suroeste la composición geológica del suelo indica que se tiene ahí un suelo semipermeable, el cual es favorable a estas prácticas según el SACM (Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el Valle de México.).

Tomando en cuenta estos aspectos se construyó la tabla 5.1, en donde se muestra cada uno de los sitios probables de contaminación.

Tabla 5.1 Sitios considerados potencialmente generadores de contaminación del acuífero según los lineamientos de la SEMARNAT, ubicados en la zona de estudio. En la tabla, MH es Miguel Hidalgo, AO es Álvaro Obregón, TL es Tlalpan y G es Gasolinera

ESTACIONES DE TRANSFERENCIA PARA BASURA	COORDENADAS UTM	
	X (m)	Y (m)
EST-TRANS-MH	476973	2148180
EST-TRANS-AO	479299	2143167
EST-TRANS-TL	476253	2130010
GASOLINERAS		
G-1	471623	2145467
G-2	476553	2140706
G-3	480191	2143739
G-4	479355	2144205
G-5	479077	2137915
G-6	469022	2139039
G-7	480169	2143709
G-8	482948	2132747
G-9	480294	2139022
G-10	478364	2141908
G-11	479368	2145258
G-12	477855	2135890
G-13	479198	2140136
G-14	480249	2140621
G-15	476064	2149112
G-16	475659	2141186
G-17	482462	2131162
G-18	474684	2132010
G-19	478939	2143603
G-20	478737	2137580

Continuación de la tabla 5.1

G-21	478805	2143816
G-22	478461	2143817
G-23	477760	2144473
G-24	479155	2144175
G-25	482149	2145026
G-26	480365	2142791
G-27	481136	2141547
G-28	482224	2145239
G-29	480365	2142791
G-30	480304	2142316
G-31	478747	2139000
G-32	480025	2138958
G-33	480485	2139644
G-34	481881	2138832
G-35	482841	2139397
G-36	483593	2138668
G-37	471783	2137834
G-38	480473	2136930
G-39	481721	2115666

Se debe mencionar que las estaciones de transferencia de basura son establecimientos para el manejo y compactación de la basura. En el Distrito Federal se cuenta con un total de 13 estaciones de este tipo, y en la zona suroeste solo están ubicadas las tres estaciones mencionadas en la tabla.

En lo que se refiere a las gasolineras que se ubican en el suroeste del Distrito Federal, solo fue posible encontrar la ubicación de las gasolineras mostradas en la tabla anterior. Según los resultados de la búsqueda que se efectuó en este trabajo, no existe una dependencia u organismo que tenga disponible al público un registro completo de las gasolineras que se encuentran instaladas en el Distrito Federal. Para ubicar las gasolineras inicialmente se buscó información en las páginas Internet de PEMEX y de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO), además de hacer consultas en algunas estaciones de servicio; se consultó también la página Internet de la Sección Amarilla de donde se obtuvo la mayor información. Para completar esta búsqueda sería importante realizar recorridos de campo en los sitios donde se pretenda colocar un dispositivo de infiltración y encontrar el lugar más propicio para este tipo de estructuras.

En la figura 5.1 se muestra la porción suroeste del Distrito Federal donde se observa la distribución de los sitios de contaminación referidos en la tabla 5.1.

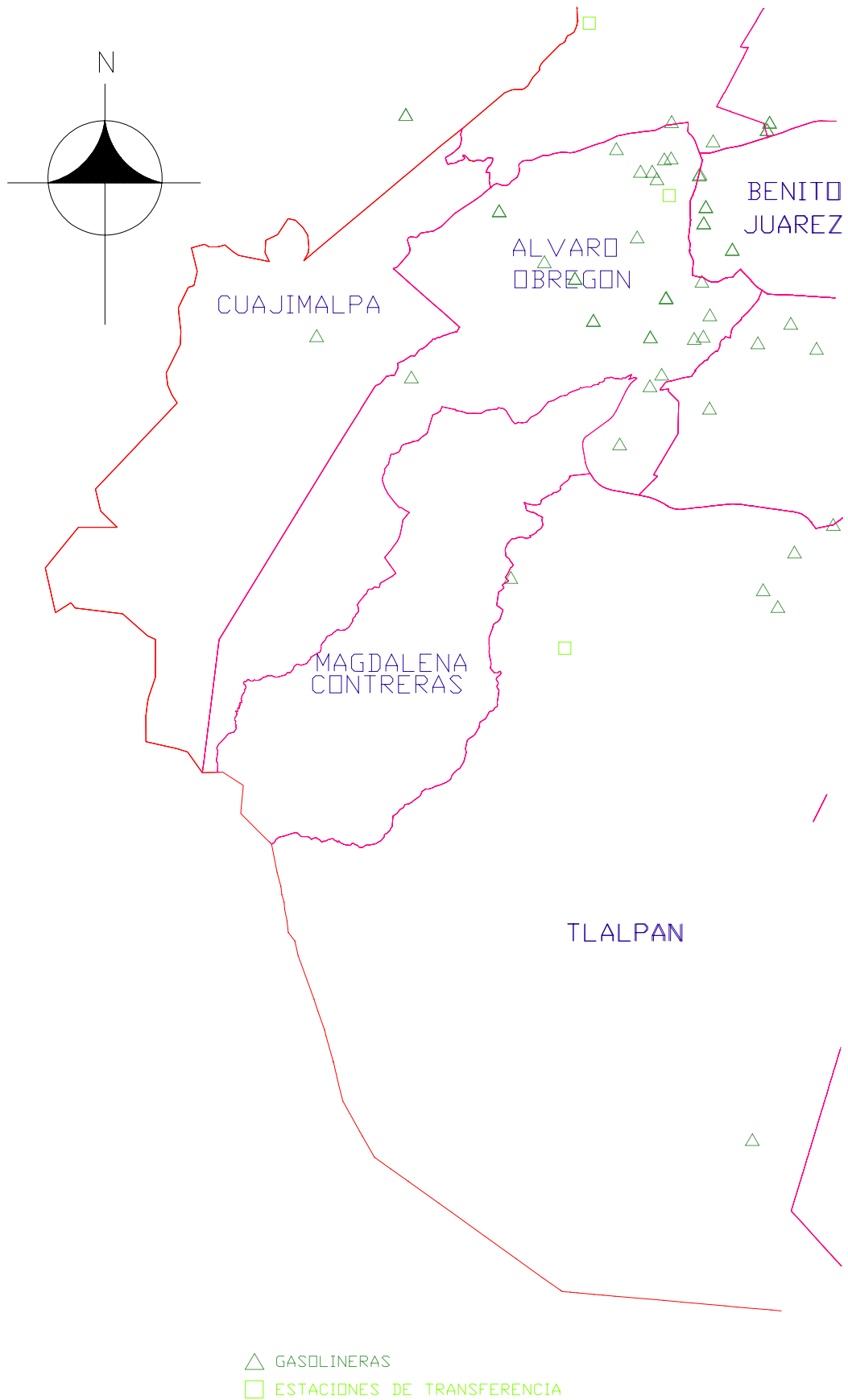


Figura 5.1 Ubicación de los posibles sitios de contaminación de los acuíferos en la zona de estudio.

Como se observa en la figura 5.1 la zona de estudio está delimitada por cuatro delegaciones principalmente: Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras y Tlalpan. Dentro de estas delegaciones se encuentran zonas urbanas y áreas verdes por lo que, en caso de optar por estructuras de infiltración, sería importante realizar recorridos por la zona para localizar el lugar más factible, además de considerar que se debe tener una distribución espacial adecuada entre los dispositivos de infiltración, a fin de propiciar la dispersión del agua pluvial en el acuífero. Aunque lo anterior se menciona en los lineamientos técnicos de la CONAGUA, en éstos no se especifica una distancia mínima entre cada dispositivo de infiltración por lo que sería conveniente tomar una distancia de 500 metros, esta distancia es una propuesta de este trabajo.

Otros criterios importantes que se deben considerar para seleccionar un sitio donde colocar un dispositivo de infiltración son:

- No provocar afectaciones en aprovechamientos hidráulicos subterráneos u obras civiles subterráneas de terceros, aledañas al dispositivo de infiltración.
- Tener en cuenta que debe existir una distancia vertical mínima de 5 m, entre la profundidad total del dispositivo de infiltración y el nivel freático local.

Como se mencionó en el capítulo 1 de este trabajo, el dispositivo de infiltración debe contar con tanque sedimentador, trampa de grasas y aceites, filtros de carbón activado y rejillas para la eliminación de sólidos gruesos y sedimentos, con el fin de prevenir la rápida obstrucción o colmatación de los dispositivos y garantizar la introducción de agua libre de sólidos suspendidos, compuestos orgánicos y microorganismos patógenos.

Agua residual tratada

Para delimitar la zona de infiltración de agua residual tratada en el Distrito Federal se debe tomar en cuenta la norma "NADF-003-AGUA-2002" y el anteproyecto de la norma "NOM-014-CNA-2003", revisadas en el capítulo 1 de este trabajo.

Para seleccionar las plantas de tratamiento con cuyo producto es posible llevar a cabo la infiltración de agua residual tratada se encontraron algunas restricciones. Según el anteproyecto "NOM-014-CNA-200" no deben existir estructuras que suministren agua para uso público-urbano o doméstico en una distancia mínima de 1 km. Lo anterior también se observa en la norma "NADF-003-AGUA-2002" en la cual se pide estimar los coeficientes de dispersión del agua infiltrada en un radio mínimo de 2 km; también se requiere un mínimo de

cuatro perfiles estratigráficos radiales respecto al sitio de recarga en dirección del gradiente hidráulico en un radio mínimo de 2 km, esto para evitar que el agua infiltrada sea extraída en un tiempo muy corto. Ambas normatividades coinciden en pedir que la residencia del agua infiltrada en el acuífero sea de un periodo mínimo de un año.

Tomando en cuenta las normas anteriores, para efectos de este estudio se decidió mantener una distancia de 2 km entre las estructuras que suministran agua para consumo humano (pozos de extracción) y las plantas de tratamiento y sus posibles estructuras de infiltración.

Por otra parte, tampoco se pueden establecer dispositivos de infiltración en lugares que tengan o hayan tenido:

- Tanques de combustibles enterrados que presenten o hayan presentado fugas
- Basureros
- Sistemas sépticos domésticos
- Panteones o cementerios
- Áreas de aplicación de plaguicidas

Como la restricción principal para seleccionar una planta de tratamiento de la cual se vaya a infiltrar el agua residual tratada es que no debe haber un pozo de extracción de agua para aprovechamiento humano en una distancia de 2 km, se construyó la figura 5.2, en donde se observa las plantas de tratamiento y pozos de extracción en el Distrito Federal. Como se observa en esa figura, los pozos de extracción se encuentran ubicados en la parte central del Distrito Federal. Las plantas de tratamiento están distribuidas en todo el D. F. y la mayor parte de éstas se encuentran a una distancia menor a 2 km respecto de al menos un pozo de extracción, con excepción de las plantas 7, 15, 17, 19, 24 y 26 en las cuales se dibujó un círculo con un radio de 2 km para comprobar que no existen pozos de extracción a su alrededor.

En la tabla 5.2 se proporciona una relación de las plantas de tratamiento que son factibles para la infiltración de agua residual tratada junto con sus procesos de tratamiento y gastos de operación.

En cuanto a las estaciones de transferencia, existen 13 de ellas en 12 delegaciones políticas: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A Madero, Iztapalapa (2), Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco. Estas estaciones se encuentran ubicadas en la figura 5.3.

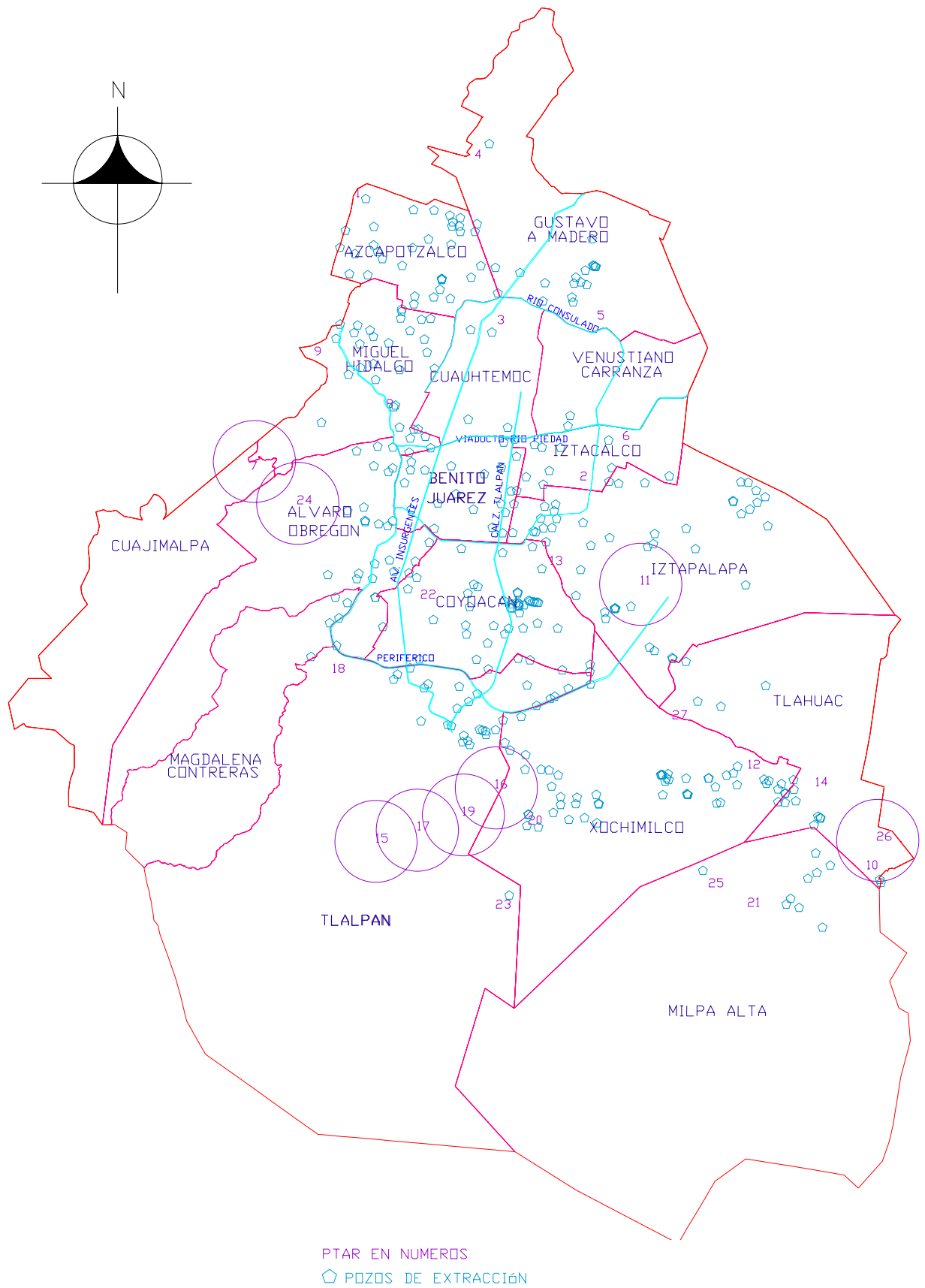


Fig. 5.2 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales y pozos de extracción en el Distrito Federal.

Tabla 5.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales factibles para la infiltración.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	PROCESO DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD INSTALADA (l/s)	GASTO DE OPERACIÓN (l/s)	USO PARA EL AGUA TRATADA
Bosques de las Lomas (PTAR-7)	Lodos activados	55	18	Áreas verdes
Abasolo (PTAR-15)	Lodos activados	15	7	Barranca
Parres (PTAR-17)	Lodos activados	7.5	1	Áreas verdes
Xicalco (PTAR-19)	Lodos activados	7.5	3	Barranca
Santa Fe (PTAR-24)	Lodos activados	560	280	-
San Andrés Mixquic (PTAR-26)	Primario avanzado	30	30	Riego agrícola

Como se observa en la figura 5.3 no se tiene ninguna estación de transferencia cercana a las plantas de tratamiento que son factibles para llevar a cabo la infiltración dentro del marco de este estudio.

En lo que se refiere a los panteones que existen en el D. F., fue posible ubicarlos por medio de la página Internet de la Guía-Roji, mismos que se presentan en la figura 5.4.

En la figura 5.4 se observa que en las proximidades de las PTAR 15 y 17 existen panteones a una distancia de aproximadamente 250 metros y, para los efectos de este estudio, no se considera que esto sea un problema para llevar a cabo la infiltración con el agua tratada de estas plantas de tratamiento, ya que en las normas correspondientes solo se estipula que no se pueden instalar los dispositivos de infiltración en lugares que tengan o hayan tenido este tipo de establecimientos. En las otras PTAR factibles para la infiltración no existe este problema.

Como se reporta en el subcapítulo anterior no fue posible contar con un registro completo de todas las gasolineras ubicadas en el Distrito Federal y solo fue posible localizar las mostradas en la figura 5.5.

Al observar las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se deduce que las plantas de tratamiento factibles para llevar a cabo la infiltración no tienen problemas relacionados con la colocación de dispositivos de infiltración pues no se encuentran próximos a los sitios de contaminación mencionados en las normas correspondientes.

Lo que se debe analizar ahora en relación con estas PTAR es la calidad alcanzada en los tratamientos y el gasto de agua residual que se podría infiltrar a partir de cada una de ellas.

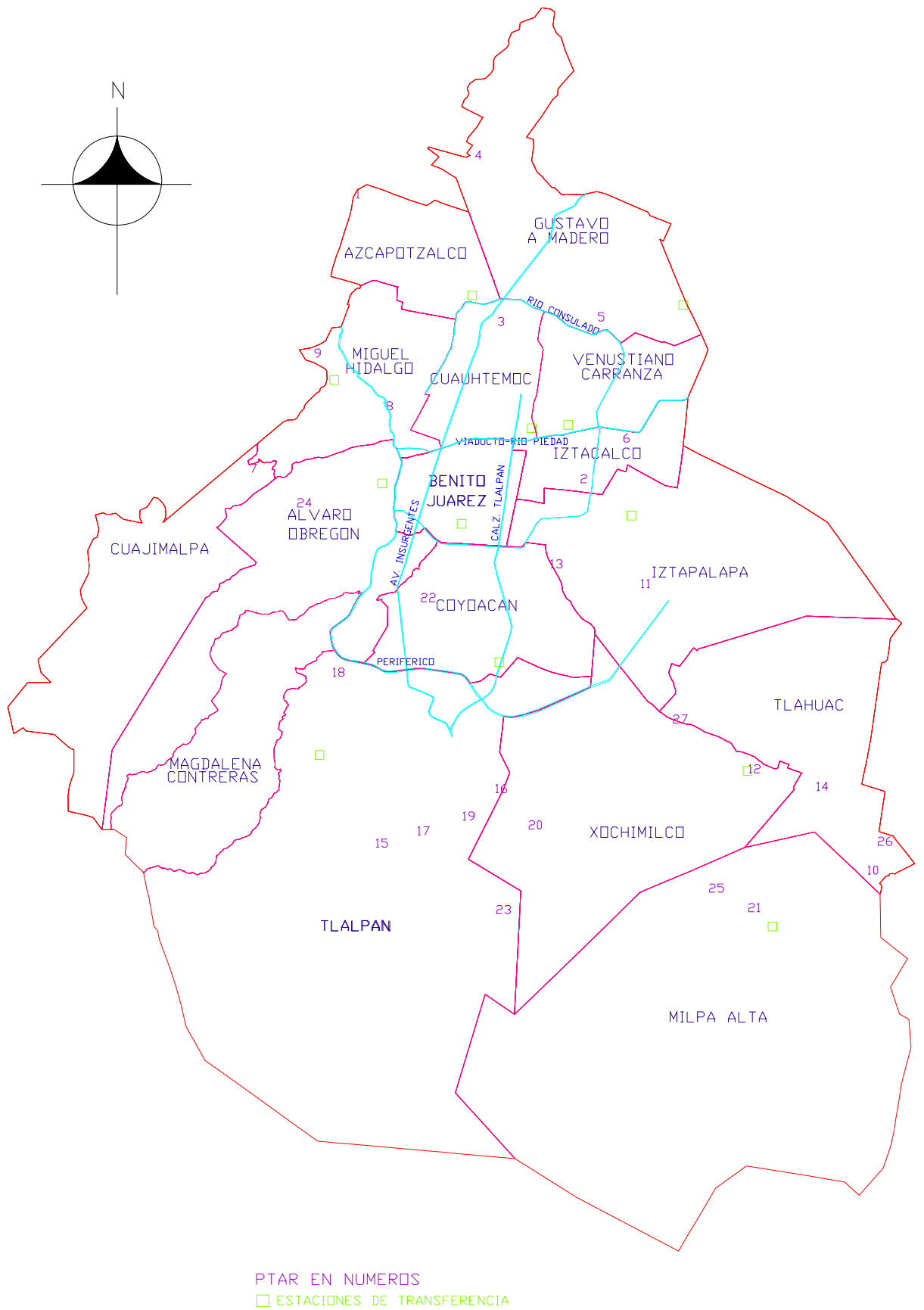


Fig. 5.3 Ubicación de las estaciones de transferencia y PTAR en el Distrito Federal

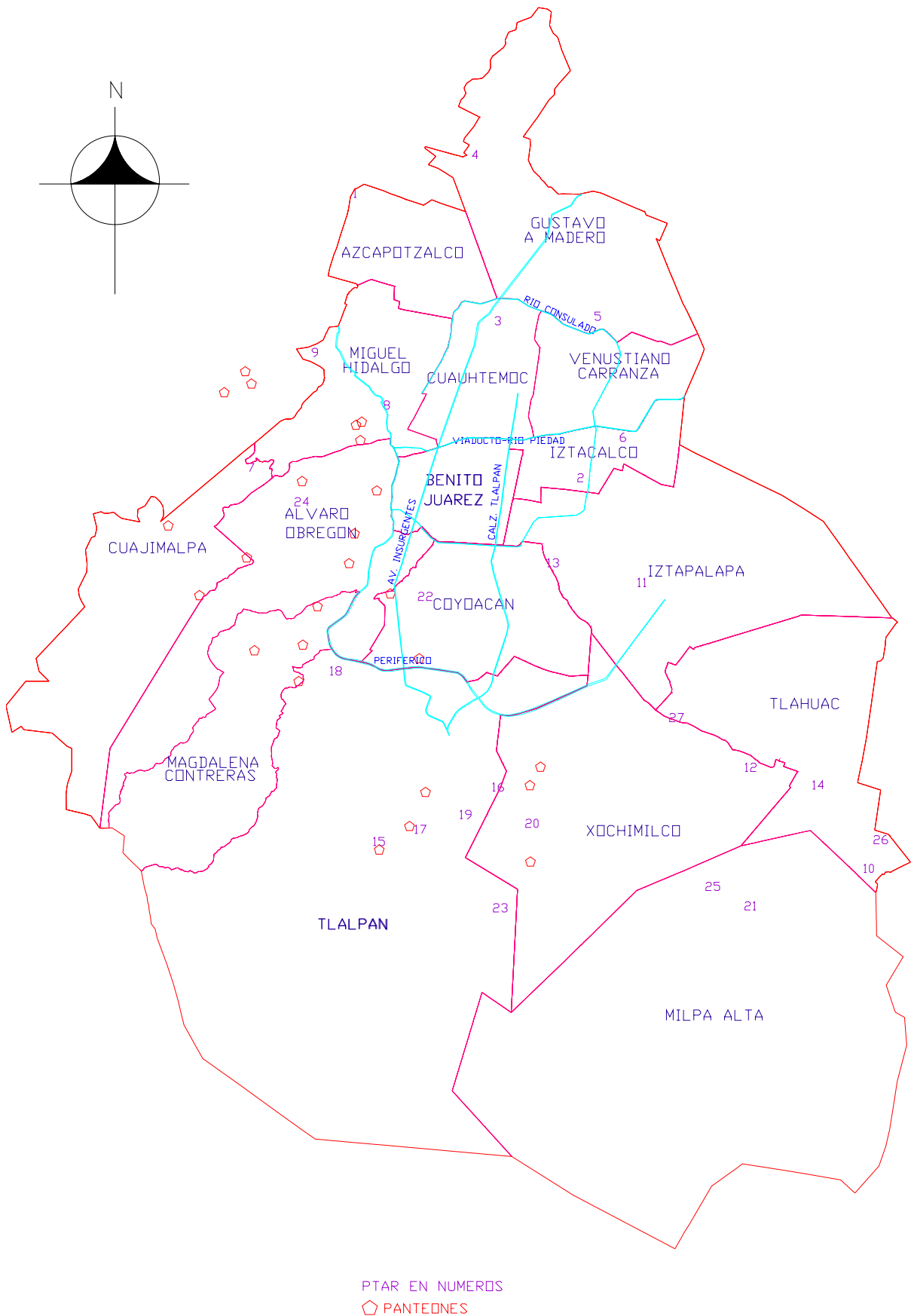


Fig. 5.4 Ubicación de los panteones y PTAR en el Distrito Federal

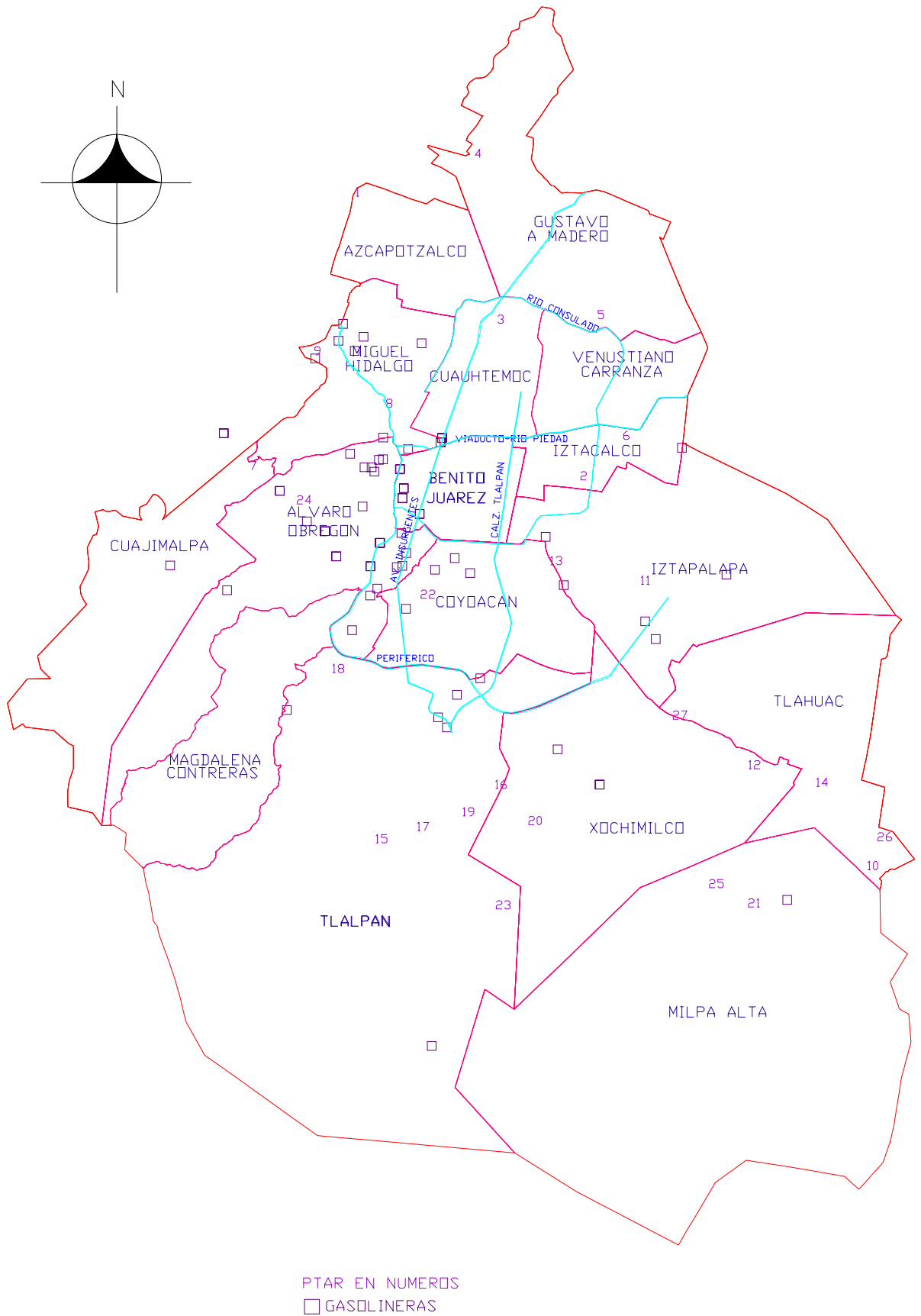


Fig. 5.5 Ubicación de gasolineras y PTAR en el Distrito Federa

Como se observa en la tabla 5.2, el proceso de tratamiento que se lleva a cabo en las plantas seleccionadas es de lodos activados, excepto la PTAR 26, la cual sólo tiene un proceso de tratamiento primario, por lo tanto, el agua tratada de estas plantas no cumple con los requisitos que estipulan las normas correspondientes para ser infiltrada.

El agua tratada en un proceso de lodos activados es utilizada para riego si previamente se somete a cloración para desinfectarla. La cloración es parte del tratamiento avanzado que se emplea para lograr un agua más pura, incluso potable, si se desea. Los objetivos del tratamiento avanzado son eliminar la carga orgánica remanente de un tratamiento secundario, desinfectarla para eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olores indeseables, y remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales (Grupo Emesa, 2007).

Tomando en cuenta lo anterior y considerando el gasto de operación de cada una de las plantas seleccionadas se encuentra que sólo en dos plantas de tratamiento sería posible llevar a cabo la infiltración. Las plantas de tratamiento 7 y 24 son las que presentan mejores condiciones por tener un gasto de operación considerable; en cambio en las plantas 15, 17 y 19 se tienen gastos de operación menores a los 7 l/s que ya están asignados al riego de áreas verdes.

En cuanto al reuso de las aguas residuales tratadas de las plantas 7 y 24, se observa en la tabla 5.2 que el gasto tratado en la planta 7 es usado para el riego de áreas verdes y que la planta 24 ha estado fuera de operación últimamente.

Por lo tanto lo tanto la única planta en la que sería factible colocar un dispositivo de infiltración es la planta 7 "Bosques de las lomas" pues tiene un gasto de operación de 18 l/s y una capacidad instalada de 55 l/s, la cual puede ser aprovechada si se realiza un programa de mantenimiento que permita igualar el gasto de operación al de la capacidad instalada. Si se realizara también un programa de mantenimiento para poner en funcionamiento la PTAR-24 (Santa Fe), en ésta se tendría un gasto de agua residual tratada considerable para la infiltración.

5.2 PERSPECTIVAS

El desarrollo de este trabajo ha sido enfocado a estudiar las posibilidades técnicas del uso de dispositivos de infiltración para agua pluvial y residual tratada en el Distrito Federal; por ello se han abordado diferentes aspectos entre los que destacan los que tienen que ver con el marco jurídico de la infiltración de estas aguas.

En lo que se refiere al agua pluvial, se tomaron en cuenta los aspectos legales que existen al respecto, en particular los Lineamientos Técnicos Generales para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos con Agua Meteorica y Escurrimiento Superficial estipulados por la SEMARNAT. Como en ellos se menciona que los dispositivos de infiltración deben estar alejados de focos de contaminación (gasolineras y depósitos de basura), pero sin especificar qué distancia tiene que existir entre cada una de estas estructuras, para la elaboración de este estudio se decidió probar el uso de distancias de 500, 1000 y 2000 metros hacia cada uno de estos puntos de contaminación.

Por otra parte, con base en esos lineamientos, en la Geología (tipos de suelo) y la disponibilidad del agua pluvial (volúmenes mensuales) se decidió que para la elaboración de este estudio se tomaría a la zona suroeste del Distrito Federal como factible para llevar a cabo este tipo de infiltración.

Como se mencionó en el capítulo 4 de este trabajo el agua pluvial potencialmente disponible que se tiene en el suroeste del Distrito Federal es aproximadamente de 400'407,279 m³ por año. Si se particulariza lo dicho por Domínguez, et al. (2005) a esa zona, en el sentido de aceptar que solo el 17 % de éste volumen es infiltrado de manera natural y artificial, sería conveniente implantar un mayor número de dispositivos de infiltración con los que se lograría aprovechar más de esta agua. Esto contribuiría a recargar los mantos acuíferos de donde se extrae una gran cantidad de agua para consumo humano.

En las figuras 5.6, 5.7 y 5.8 es posible observar la zona de infiltración, la cual corresponde a las áreas que se encuentran afuera de todas las circunferencias mostradas en cada figura, y que equivalen a las zonas de influencia de las posibles fuentes de contaminación a los acuíferos. Incluye además las zonas permeables semipermeables e impermeables ubicadas en esta zona. Naturalmente que conforme se aumenta el radio de influencia de los sitios de contaminación decrece la zona de infiltración. En lo que se refiere a las estaciones de transferencia, en esta zona solo existen tres; en cuanto a las gasolineras, en el capítulo anterior se mencionó que no se contó con un registro completo de ellas, por lo que sería conveniente realizar recorridos de campo en los sitios donde se pretenda colocar un dispositivo de infiltración para localizar el lugar más adecuado.

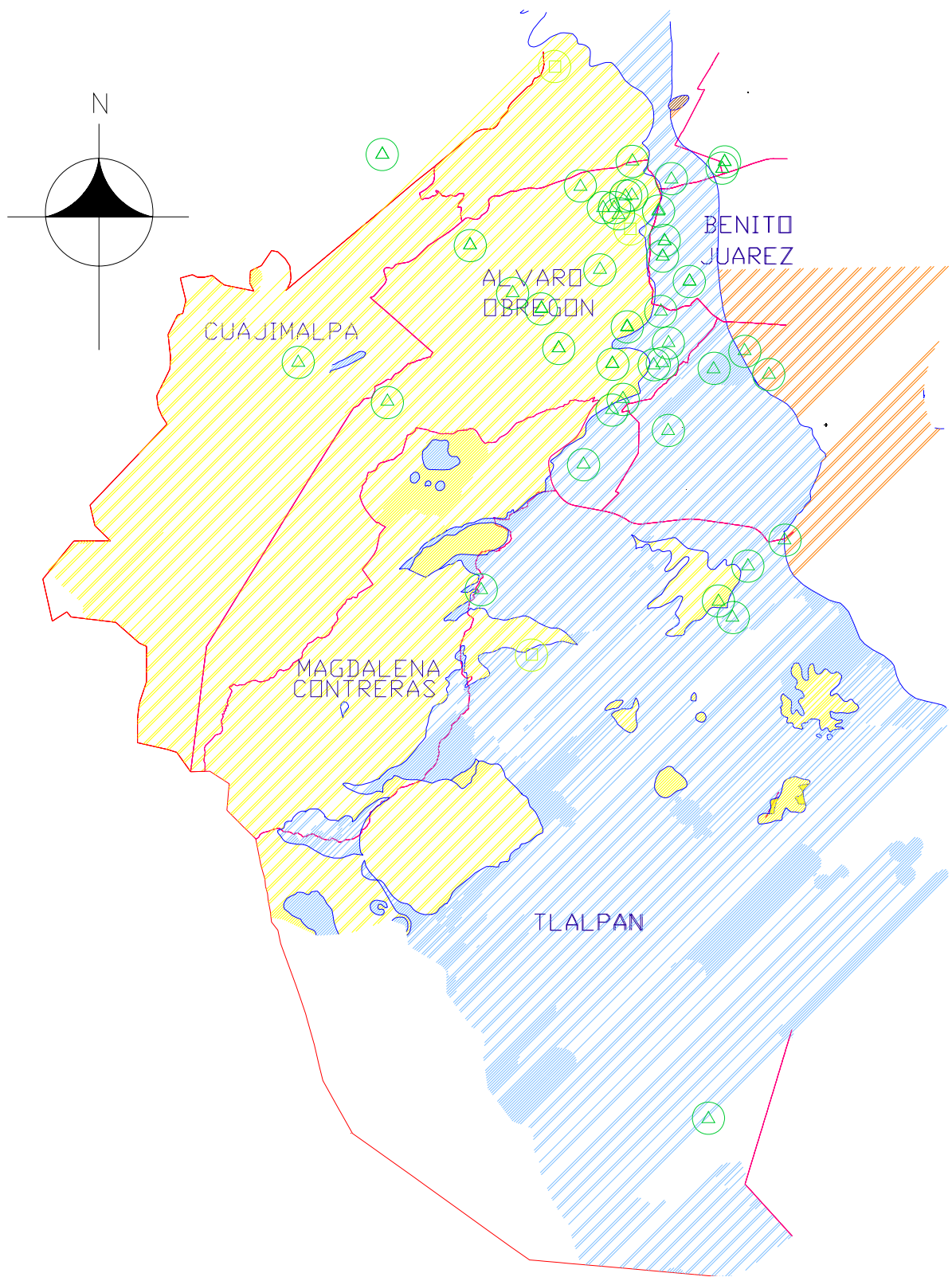


Fig. 5.6 Sitios generadores de posible contaminación con un radio de 500 metros

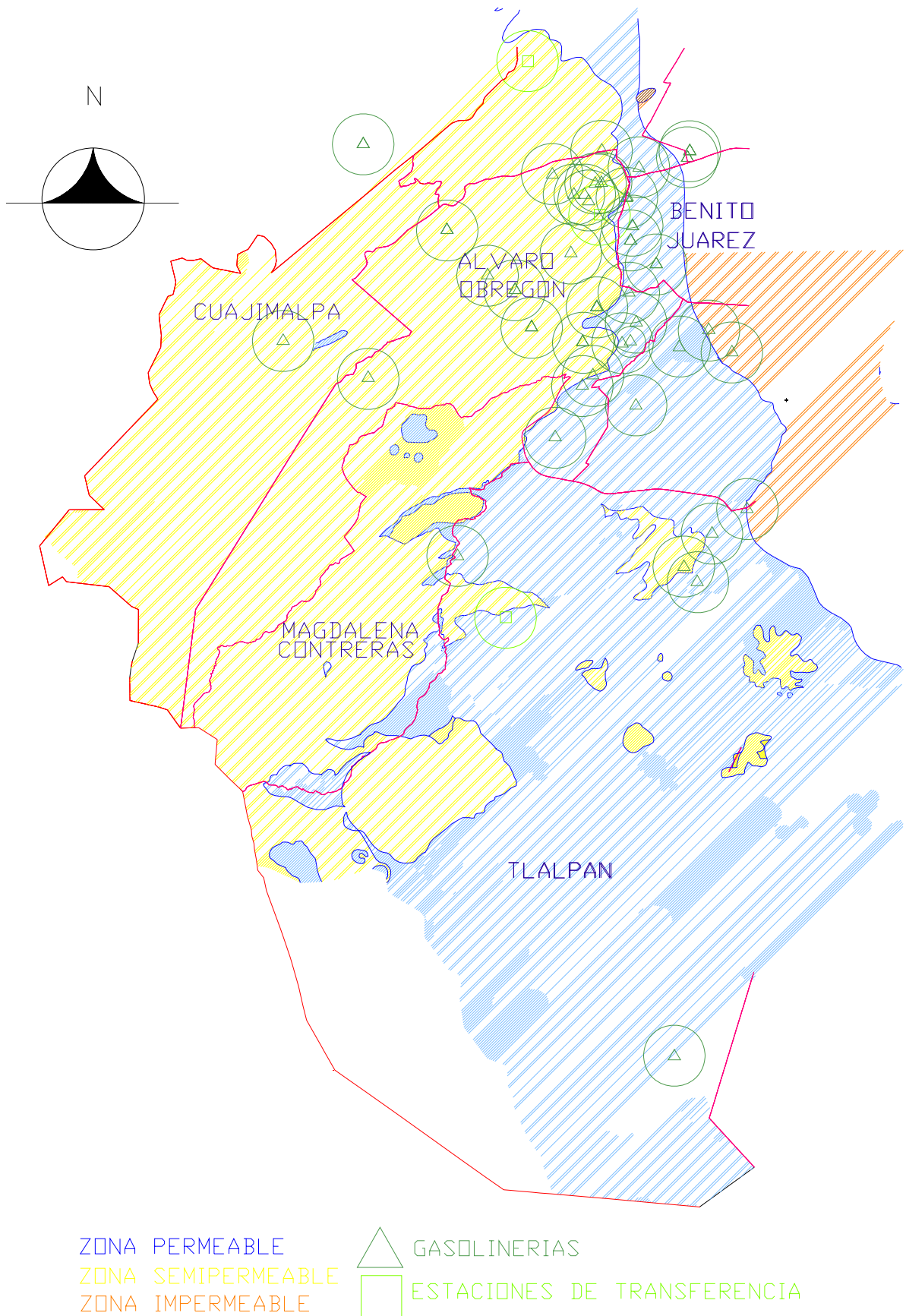


Fig. 5.7 Sitios generadores de posible contaminación con un radio de 1000 metros

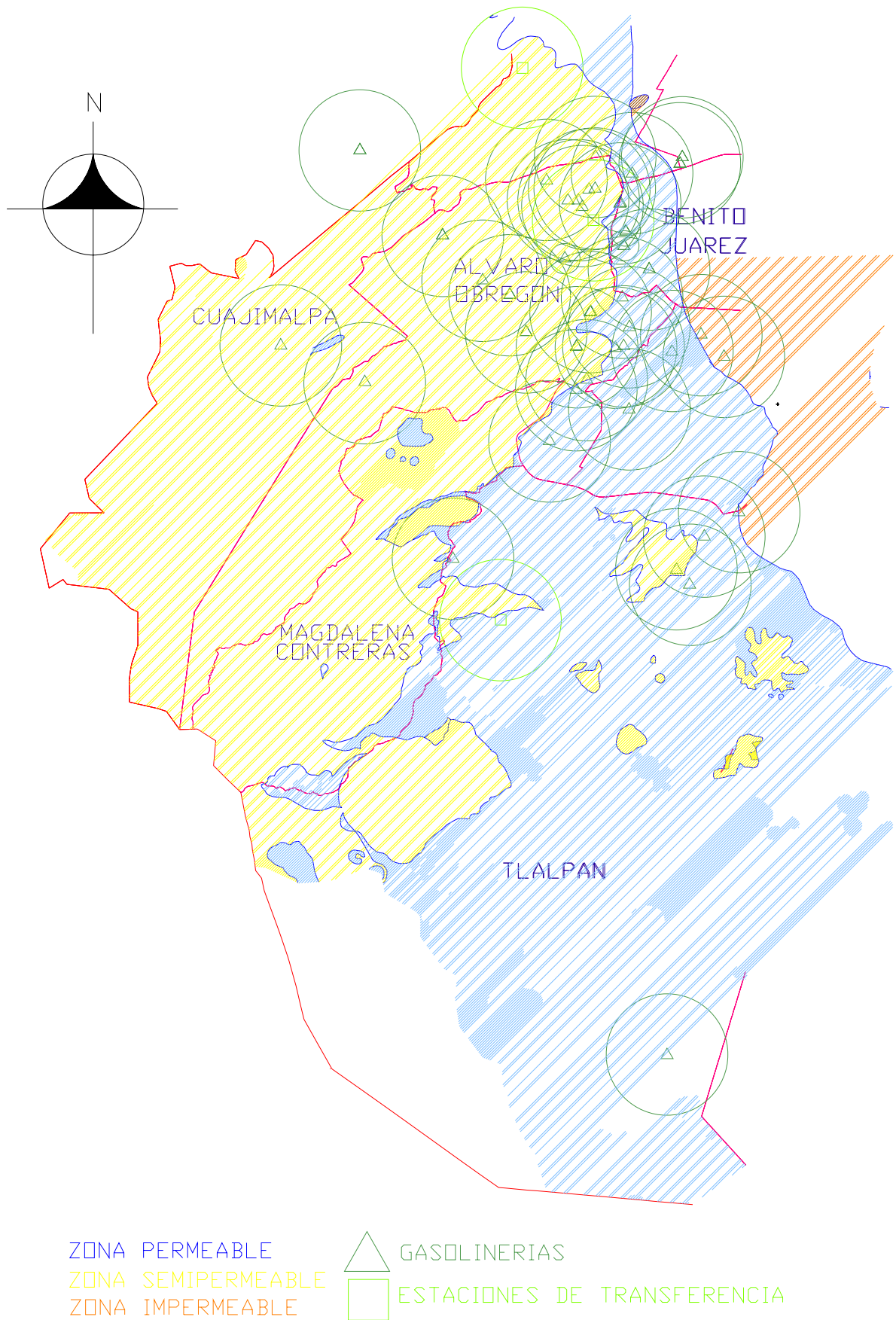


Fig. 5.8 Sitios generadores de posible contaminación con un radio de 2000 metros

Las figuras anteriores muestran las zonas en las que podría llevarse a cabo la infiltración artificial con agua pluvial. Un gran porcentaje de esta zona es natural (áreas verdes), encontrándose localidades pequeñas intercaladas entre ellas, por lo que en esta zona se podrían colocar dispositivos de infiltración, favoreciendo así a la recarga natural que ya se tiene en la zona.

En este trabajo se eligió la distancia de 500 metros como la mínima que tiene que existir entre un dispositivo de infiltración de agua pluvial y un sitio de contaminación. Con esta distancia se tendría una mayor zona de infiltración, aunque se debe tener cuidado con los focos de contaminación, en particular con las gasolineras no inventariadas.

En lo que se refiere a los aspectos geohidrológicos, el acuífero del Valle de México está constituido por rocas volcánicas fracturadas cubiertas por depósitos lacustres y aluviales. Por esta razón, el acuífero es confinado en algunas áreas y semiconfinado en otras. La hidroestratigrafía del Valle de México de la superficie hacia el interior del suelo se describe a continuación (Marín et al., 2002):

- Depósitos lacustres cuaternarios con un espesor de 0 a 400 m. Estas unidades son impermeables y esporádicamente muestran fracturas. Los sedimentos superficiales muestran alternancias con capas de arcillas (5-30 m de espesor) y depósitos volcánicos, localmente conocidos como capas duras, constituyen el acuitardo.
- Material volcánico y piroclástico cuaternario con un espesor de 0-2000 m. Estas rocas constituyen el acuífero principal de la parte sureste del valle.
- Depósitos aluviales cuaternarios con espesores que varían de menos de 1 a 10 m. Estos depósitos se encuentran preferentemente en los flancos de las montañas.

Ahora bien, el tipo de suelo que existe en la zona suroeste del Distrito Federal se encuentra conformado por roca ígnea extrusiva ó también llamada roca volcánica. Debido a su fracturamiento, este tipo de suelo es clasificado como un suelo semipermeable, según el SACM.

El área cubierta por la capa semipermeable se puede observar en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8, en donde se describen las unidades permeables, semipermeables e impermeables que se pueden ubicar en el suroeste del Distrito Federal.

Como se describió en el capítulo 3 de este trabajo, el acuífero de la Ciudad de México se encuentra sobreexplotado y esto se ve reflejado en el abatimiento del nivel estático, lo cual se ha advertido desde el primer cuarto del siglo XX.

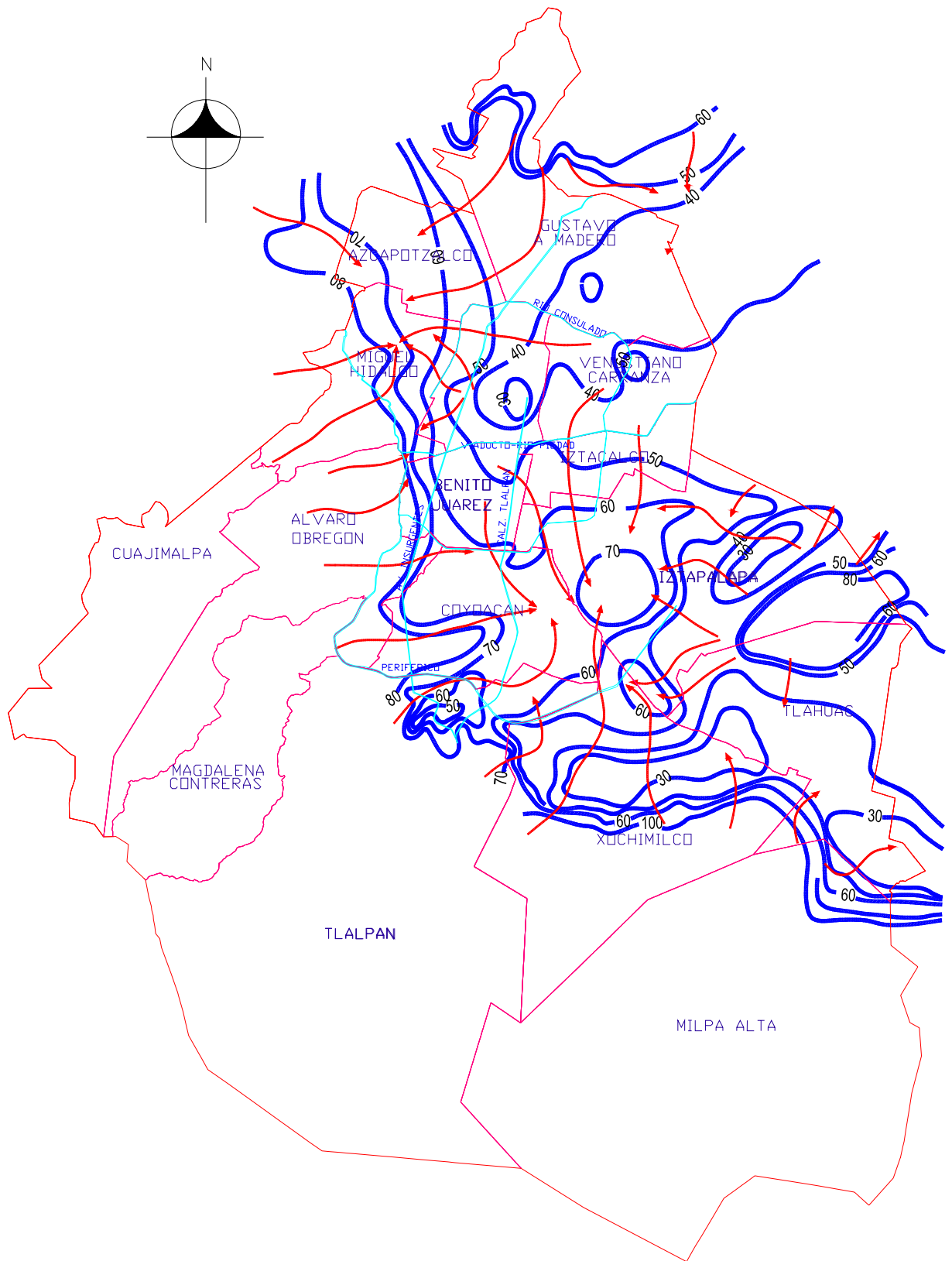
En caso de que se llevara a cabo la infiltración artificial de agua pluvial hacia el acuífero de la Ciudad de México, se tendría que garantizar que el agua infiltrada pueda ser conducida hacia el acuífero por medio del flujo subterráneo, lo cual se puede observar esquemáticamente en la figura 5.9. También se observa en esta figura la configuración de la profundidad del nivel estático en el año 2005. Estas configuraciones fueron recopiladas del proyecto "Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el Valle de México", elaborado por el SACM. Parte de estos pozos se observan en la figura 5.2, de los cuales se pudo obtener información de la situación actual del acuífero de la Ciudad de México.

Como se observa en la figura 5.9 en la zona suroeste no se cuenta con información de flujo ni de profundidad de nivel estático debido a que no existen pozos de extracción en la zona. Se puede observar que en los límites de las delegaciones Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan con las delegaciones Coyoacán y Benito Juárez el flujo subterráneo es hacia el centro de la ciudad, lo que se debe a que el agua transita por gravedad de partes elevadas como las de la zona poniente hacia las partes bajas de la ciudad (el centro), según lo dictan las cargas hidráulicas de los diferentes niveles estáticos del acuífero.

El SACM ha llevado a cabo prácticas de infiltración de agua pluvial, pero solo a nivel superficial, las cuales reciben el nombre de "Disposición de agua". En ellas solo se puede infiltrar a una profundidad menor a los 15 metros ya que, como se ha dicho, si este ejercicio se lleva a cabo a mayor profundidad se trataría de inyección de agua pluvial y estaría bajo la jurisdicción de la CONAGUA.

En la elaboración de este trabajo se encontró que existen diversos proyectos en otros países que se encargan del aprovechamiento de agua pluvial, con el fin de optimizar las fuentes de aprovechamiento para consumo humano. En diversos foros especializados se ha discutido sobre las diferentes técnicas y dispositivos sobre el aprovechamiento del agua pluvial, que para el valle de México es considerada actualmente como la tercera fuente de abasto para el ser humano, después de la que se extrae del acuífero y de la que se importa de otras cuencas.

Durante el desarrollo del trabajo se recurrió a instituciones gubernamentales dedicadas al agua para hacer una recopilación de la información sobre proyectos o temas que tengan ver con la infiltración de agua pluvial y que esta recopilación se pudiera ver reflejada en este trabajo. Desafortunadamente no se encontró un proyecto en el cual se puedan observar las zonas donde sea factible colocar un dispositivo de infiltración en el Distrito Federal.



PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO EN EL AÑO 2005 EN METROS
 RED DE FLUJO

Fig. 5.9 Profundidad del nivel estático y red de flujo en el año 2005 de la Ciudad de México.

En este trabajo se elaboraron algunos planos en los que se han definido zonas donde es posible llevar a cabo la infiltración de agua pluvial en el Distrito Federal, en particular en la zona suroeste. Para ello se tomaron en cuenta varios aspectos como la Geología, la Hidrología y los posibles sitios de contaminación, que según las condiciones legales y con base en la experiencia adquirida en la elaboración del trabajo, son los criterios más importantes para poder establecer un dispositivo de infiltración en el Distrito Federal. En lo que se refiere a los sitios superficiales de posible contaminación hacia el acuífero, hace falta elaborar un padrón exhaustivo de las gasolineras que existen en la ciudad, ya que se buscó la ubicación de éstas por vía telefónica y por Internet ante la Profeco y en Sección Amarilla y se estima que no se pudo encontrar la totalidad de las gasolineras existentes en la Ciudad.

Para la elaboración de estos planos sólo se aprovechó la geología superficial del suroeste del Distrito Federal, ya que no se contó con información precisa de los estratos del subsuelo en esta parte de la Ciudad. Este aspecto es importante y debe ser tomado en cuenta cuando se pretenda llevar a cabo un proyecto de infiltración artificial.

En lo que se refiere a las aguas residuales y atendiendo a las consideraciones técnicas y legales mencionadas en capítulos anteriores, solo existe una planta en la que sería factible colocar un dispositivo de infiltración, que es la planta 7, Bosques de las lomas. Si en esta planta se lleva el gasto de operación hasta el gasto de su capacidad instalada (de 18 a 55 l/s) se podría alcanzar un volumen anual tratado de 1'734,480 m³ de agua residual. El tratamiento en esta planta se lleva a cabo por medio de lodos activados y la calidad del agua producida es mejor que la que se obtiene en otras plantas; por lo que este tipo de agua necesitaría un proceso de tratamiento mínimo, porque no está lejos de cumplir con los requerimientos de la calidad de agua residual para que pueda ser infiltrada y cumplir con las normas correspondientes.

Por otra parte y según lo mencionado, el gobierno local pretendía realizar el proyecto de recarga de agua residual tomando agua de la planta Cerro de la Estrella; en este estudio se realizó una revisión de las distancias mínimas que debe haber entre una estructura de infiltración de agua residual y un pozo de extracción de agua para consumo humano, la cual debe ser de 2 km. Se encontró que existe por lo menos un pozo de extracción en una distancia inferior a un kilómetro, por lo que su realización entraría en contradicción con lo estipulado en la "NADF-003-AGUA-2002", estipulada por el gobierno local a través de la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

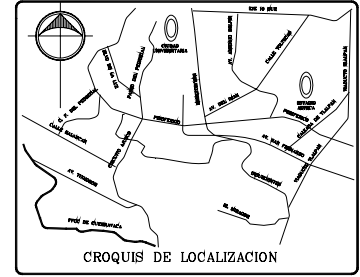
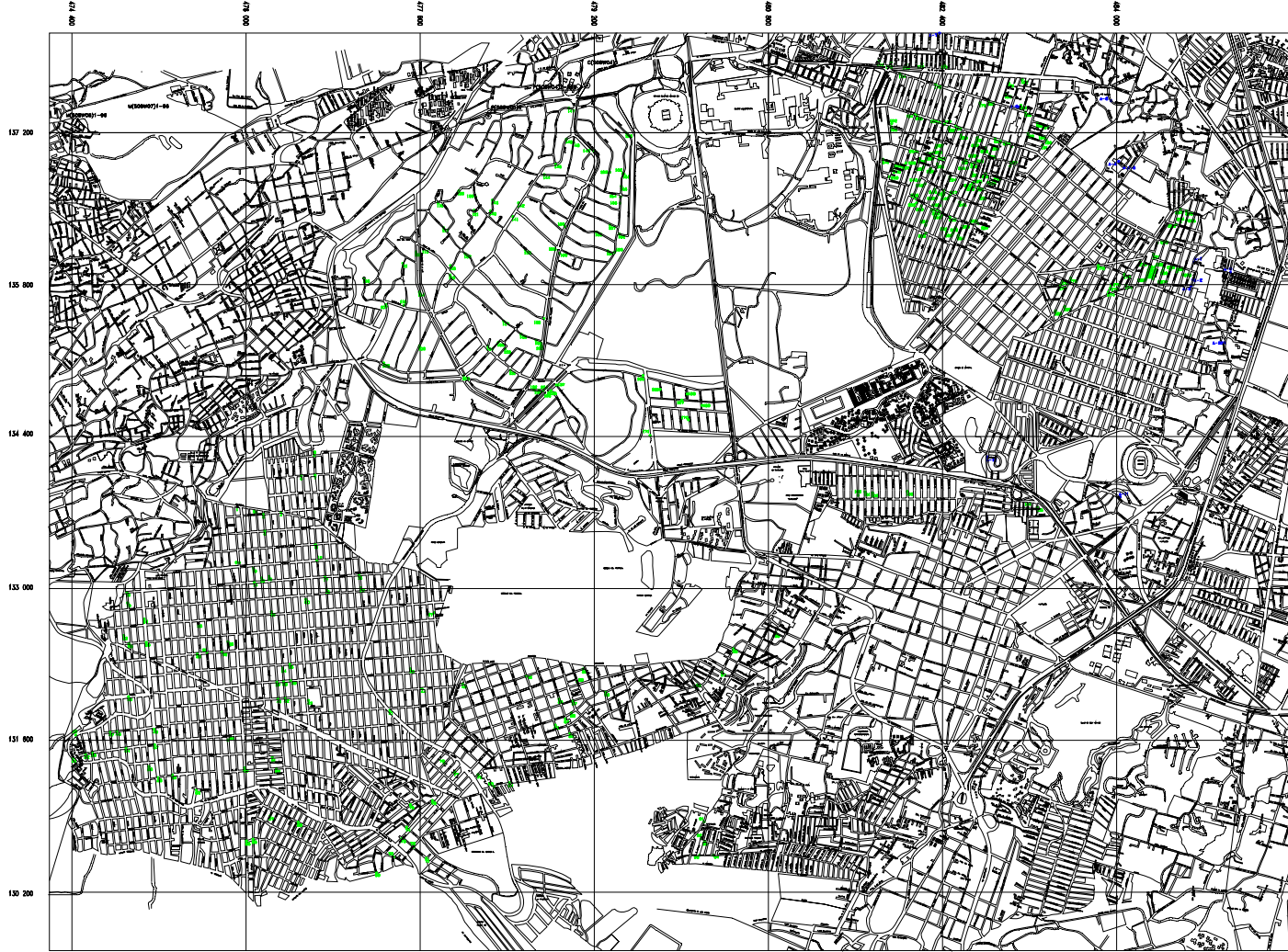
5.3 PLANOS

A continuación se presenta la recopilación de los dos planos que se han mencionado en los capítulos de este trabajo. Dentro de estos capítulos se da una información mas detallada del contenido de cada uno de estos planos.

Los planos del 1 a 2 son una recopilación de un proyecto elaborado por el SACM con el nombre "Localización y proyecto ejecutivo de las estructuras para la captación y conducción de agua pluvial a pozos de infiltración."

El plano 1 muestra la distribución de pozos de absorción colocados por el SACM en la zona sur del Distrito federal (zona de pedregales). En este plano se observan los afloramientos del agua pluvial que se han originado a partir de los pozos de absorción colocados en sitios con mayor elevación topográfica.

En el plano 2 se observan los pozos de absorción prioritarios para la recarga del acuífero en la zona sur del Distrito Federal. Estos pozos pertenecen a un proyecto del SACM con los cuales se pretende recargar al acuífero de la Ciudad de México.



SIMBOLOGIA

NOMBRE Y NUMERO DE AFLUENTE	● A-E
NOMBRE Y NUMERO DE POZO DE ABSORCION	● Pa-02
NOMBRE DE CALLE	— TUBIN
LINEA DE PARAMETRO	—

NOTAS

- 1.- EL SISTEMA DE COORDENADAS ESTA APOYADO EN LA INFORMACION CARTOGRAFICA DEL SIGLA REFERIDA A LA INFORMACION PLANIMETRICA DEL AÑO DE 1980.
- 2.- LA ALTIMETRIA ESTA APOYADA A LOS BANOS DE NIVEL DE LA SOCIEDAD UBICADOS EN LA ZONA DEL LEVANTAMIENTO.
- 3.- LA NIVELACION DIFERENCIAL PARA DAR COTA A LOS PUNTOS DE REFERENCIA ALTIMETRICA PUE DE PRECISION.

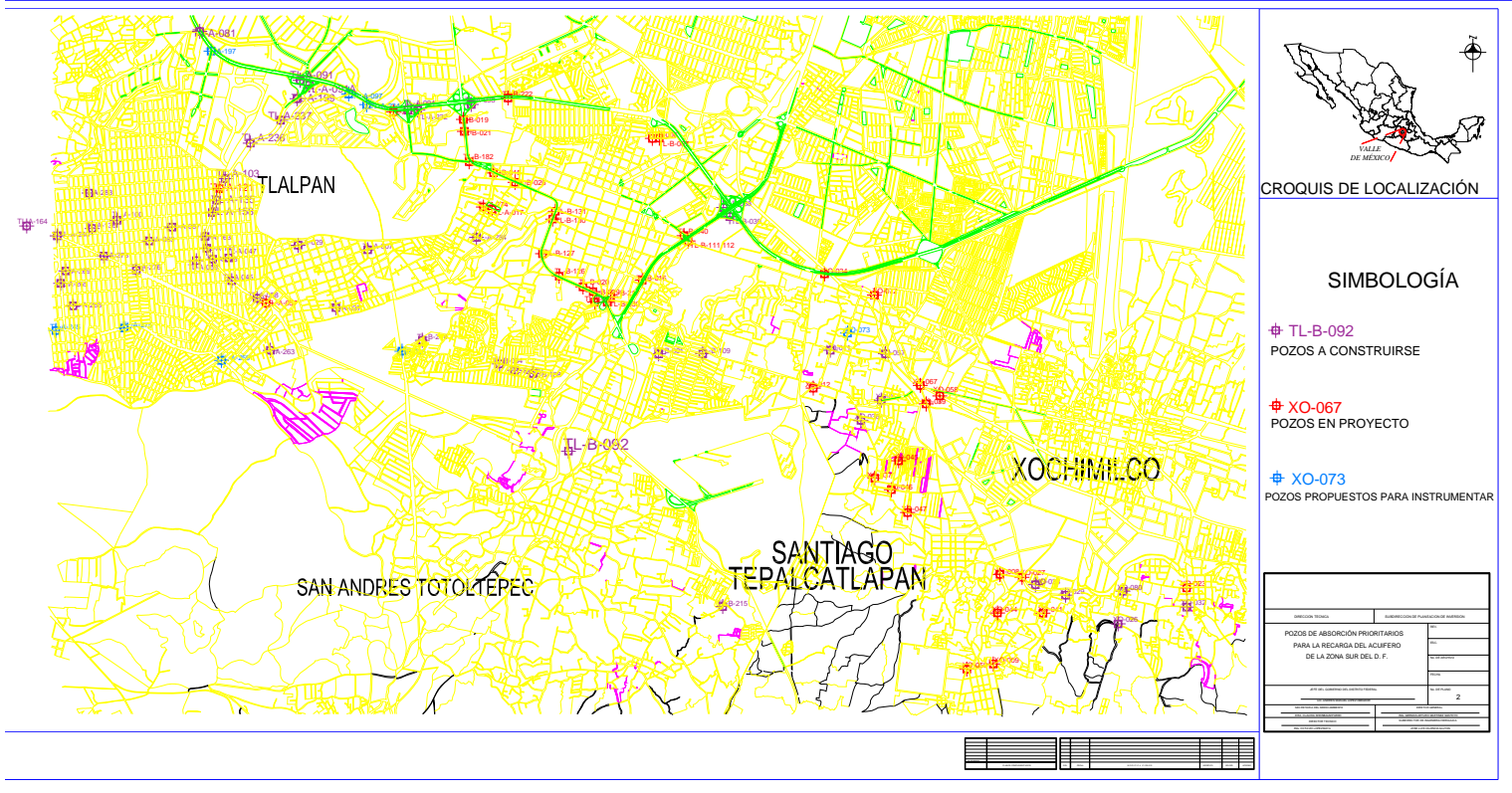


GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL	
SECRETARIA DE OBRAS Y SERVICIOS	
DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION Y OPERACION HIDRAULICA	
DIRECCION TECNICA	SUBDIRECCION DE PROGRAMACION
LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO PARA EL DIAGNOSTICO DE POZOS DE ABSORCION DE AGUAS PLUVIALES UBICADOS EN LA ZONA DE PEDREGALES EN EL D.F.	
PLANO CON UBICACION DE APROBAMIENTOS Y POZOS DE ABSORCION	
DELEGACIONES TLALPAM, COYOACAN Y ALVARO OBREGON	
JEFE DE GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL	
DISEÑADOR GENERAL EJECUTIVO	
DISEÑADOR GENERAL	DISEÑADOR GENERAL
DR. CESAR ESTEBAN ESPINOSA	DR. ANTONIO DOVALI RAMOS
DISEÑADOR GENERAL	DISEÑADOR GENERAL DE PROGRAMACION
DR. RAMON DOMINGUEZ MORA	DR. JUAN CARLOS GUERRA Y PAZOS

<p>MEDICIONES DE PRECISION EN INGENIERIA, SA DE CV</p> <p>RESPONSABLE PROFESIONAL</p> <p>DR. JUAN CARLOS GUERRA Y PAZOS</p> <p>DR. ANTONIO DOVALI RAMOS</p> <p>DR. CESAR ESTEBAN ESPINOSA</p> <p>DR. RAMON DOMINGUEZ MORA</p> <p>DR. JUAN CARLOS GUERRA Y PAZOS</p> <p>DR. ANTONIO DOVALI RAMOS</p> <p>DR. CESAR ESTEBAN ESPINOSA</p> <p>DR. RAMON DOMINGUEZ MORA</p> <p>No. DE CONTRATO: 9-104-1-1-1080</p>	<p>D G C O H</p> <p>Jefe de la Oficina Ejecutiva de Planeacion</p> <p>DR. ANTONIO DOVALI RAMOS</p> <p>Jefe de Oficina</p> <p>DR. ANTONIO DOVALI RAMOS</p>
	<p>No. DE ARCHIVO</p> <p style="text-align: center;">TITULO</p> <p>PLANOS COMPLEMENTARIOS</p>

No. DE ARCHIVO	TITULO
	PLANOS COMPLEMENTARIOS

REV.	FECHA	MODIFICACIONES	MODIFICADO	REVISOR	APROBADO



6 CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue estudiar las posibilidades técnicas del uso de dispositivos de infiltración de agua en las cuencas del suroeste de Distrito Federal. La infiltración artificial se pudo llevar a cabo con dos tipos de agua: pluvial y residual tratada. La recarga artificial es un proceso que puede contribuir a disminuir los hundimientos diferenciales que se tienen en la Ciudad de México, principalmente en la zona centro, los cuales se atribuyen a la sobreexplotación del acuífero de la Ciudad. Estas técnicas pueden también contribuir a la disminución del número de sitios con encharcamiento y atenuar las inundaciones.

En ambos casos se estudió el marco jurídico que existe al respecto y éste se tomo en cuenta para elaborar los planos donde es posible localizar las zonas del Distrito Federal donde se pueden colocar los dispositivos de infiltración. Además de los aspectos legales involucrados, se tomaron en cuenta también otros factores, entre los que destacan el volumen de agua que puede aprovecharse, los posibles sitios de contaminación y los lineamientos técnicos elaborados por la CONAGUA.

Como se mencionó anteriormente la profundidad del nivel estático del acuífero de la Ciudad de México varía entre 9 y 187 metros, esta variación se asocia a la topografía que existe en la ciudad y a la extracción de los pozos. Los sitios con mayor profundidad del nivel estático se encuentran asociados a la parte sur de la cuenca y esta profundidad va disminuyendo conforme se acerca al centro de la ciudad, que tiene registros con 30 a 40 metros de profundidad en promedio. Tomando en cuenta esto y el flujo subterráneo que se genera en las partes altas (Sierra de la Cruces), donde se tiene una dirección del flujo de poniente a oriente y por otra parte la que se genera en la parte sur de la cuenca (zona de Xochimilco y Tláhuac) en donde este flujo tiene la dirección de sur a norte, se podría admitir que el agua pluvial que se logre infiltrar en toda esta zona (suroeste) debería transitar hacia la zona del centro de la Ciudad. Lo anterior ayudaría en gran parte a una recuperación del acuífero de la ciudad, que en el último siglo ha presentado una evolución negativa de su carga hidráulica.

Tomando en cuenta lo anterior se elaboraron planos en los que se localizan las zonas de infiltración y los sitios de contaminación. A partir de los sitios de contaminación se dibujaron radios de 500, 1000 y 2000 metros. Estas longitudes fueron propuestas en este trabajo, ya que en los lineamientos correspondientes para infiltrar agua pluvial se pide que los dispositivos de infiltración deban estar alejados de los sitios de contaminación, pero no se especifica qué distancia tiene que haber entre ellos. La zona de infiltración quedó definida por las zonas que se encuentran al exterior de estos radios.

Para la elaboración de los planos se tomó en cuenta la Geología superficial, la Hidrología y los posibles sitios de contaminación. No se contó con información de la Geología del subsuelo (estratos del suelo en la zona suroeste), por lo que

sería recomendable hacer un estudio geológico en esta zona para saber qué se puede esperar con el agua que se infiltre en la zona.

En lo que se refiere al agua residual tratada y como se vio en el capítulo 1 de este trabajo, la pretensión de llevar a cabo proyectos de recarga con agua residual producida en plantas de tratamiento se enfrenta a dificultades legales y técnicas que impiden su concreción. En particular, el gobierno local estudió la posibilidad de infiltrar el agua producida por una planta de tratamiento (planta Cerro de la Estrella), pero se encontró con impedimentos legales para realizar esta práctica, en particular con limitaciones respecto de la distancia mínima que deben guardar estas estructuras con pozos de extracción de agua.

Considerando esos criterios, en este trabajo se estudio qué plantas de tratamiento del Distrito Federal cumplen con los requisitos que pide la norma "NADF-003-AGUA-2002" para infiltrar aguas residuales. Se tomaron en cuenta las distancias mínimas entre los dos tipos de pozos: de extracción e infiltración; los probables sitios de contaminación (gasolineras, panteones y depósitos de basura), así como el tipo de proceso de tratamiento que se lleva a cabo en la planta, tomando como el mejor proceso de tratamiento al de lodos activados (si a este proceso se le agregara un proceso de coloración se obtendría un agua similar a la de un tratamiento terciario).

De este análisis se encontró que solo existe una planta en la cual sería posible llevar a cabo la infiltración de agua residual, que es en la planta "Bosque de las Lomas". Esta planta cuenta con un proceso de tratamiento de lodos activados y su reuso del agua residual es actualmente para el riego de aguas verdes.

Según los datos de producción de esa planta, en ella se podría generar agua para infiltración que podría llegar anualmente a un volumen aproximado de 1'734,480 m³. Si este ejercicio se pudiera extender a otras plantas de tratamiento, éstas serían una fuente de recarga importante para el acuífero de la ciudad.

Se debe de mencionar que, de acuerdo a lo establecido en la norma "NADF-003-AGUA-2002", la calidad del agua residual tratada propuesta para llevar a cabo la infiltración es semejante a la que solicita la Secretaría de Salud para potabilizar agua para consumo humano.

Al hacer una comparación entre el anteproyecto de la norma "NOM-014-CNA-2003" elaborada por la SEMARNAT y la norma elaborada por el Gobierno local, no se encuentran mayores diferencias: En el anteproyecto de la SEMARNAT existen algunos aspectos que parecen ambiguos respecto a las distancias que tiene que haber entre un pozo de infiltración de agua residual y los probables sitios de contaminación. Referente a la calidad del agua que se necesita para que el agua se pueda infiltrar, ésta es similar en ambos proyectos.

Sería deseable que los gobiernos federal y local llegaran a un acuerdo para establecer una sola norma reconocida por ambos que permita infiltrar agua residual hacia el acuífero de la Ciudad de México.

En lo que se refiere al agua pluvial, en este trabajo se ha calculado que en la zona suroeste se tendría un volumen disponible aproximado de 400'400,000 m³ y tomando en cuenta lo dicho por Domínguez, et al. (2005), solo el 2% de ella sería aprovechable, por lo que obtendríamos 8'008,000 m³ para poder infiltrarla por medio de las técnicas de infiltración, este volumen de agua se precipita durante los meses de junio a septiembre.

Este es un volumen importante que ayudaría a recargar los mantos acuíferos de la Ciudad y reduciría en gran medida los hundimientos que se tienen en ésta, como se menciona en Jiménez, et al. (2005). Estos hundimientos, que llegan a ser de hasta 30 cm/año en algunas zonas, provocan múltiples problemas a las redes subterráneas de servicios en la ciudad, entre los que se encuentra que las redes de agua potable y drenaje, que sufren fallas frecuentes.

En lo que se refiere a la elección que se tenga que hacer respecto del tipo de estructura de infiltración, se deberá tener en cuenta que ésta sea técnicamente apropiada desde el punto de vista de la calidad y cantidad de agua por infiltrar, y cuyo mantenimiento sea sencillo, ya que los principales problemas de los dispositivos de infiltración es que se azolvan o se tapan, reduciendo su capacidad.

En general, todo dispositivo de infiltración debe contar con tanque sedimentador, trampa de grasas y aceites, filtros de carbón activado y rejillas para la eliminación de sólidos gruesos y sedimentos, con el fin de prevenir la rápida obstrucción o colmatación de los dispositivos y garantizar la introducción de agua libre de sólidos suspendidos, compuestos orgánicos y microorganismos patógenos.

Para este tipo de prácticas se deben establecer acciones en diferentes escalas dentro de la Ciudad. En primer término se deben impulsar las acciones de aprovechamiento del agua de lluvia en las casas habitación y edificios que permitan captarla, limpiarla y almacenarla. Estas medidas permiten un ahorro en el consumo y ayudan a disminuir las inundaciones, todo lo cual debería medirse y evaluarse objetivamente. En una escala mayor, se tienen en particular dos aspectos: el primero sería en planeación de nuevos desarrollos, y el segundo en la planeación de obras hidráulicas de aprovechamiento de agua pluvial. En el primero, es importante que al planear los nuevos desarrollos habitacionales se establezcan las pautas para que las alternativas de aprovechamiento de agua pluvial sean tomadas en cuenta y se lleven a cabo de manera específica, cualquiera que sea el caso. En segundo término, es importante considerar la construcción de dispositivos de infiltración que permitan captar el agua de lluvia y conducirla a tanques de almacenamiento para que se utilicen posteriormente. Por otra parte, la construcción de pozos de infiltración en los lugares adecuados facilitará la recarga de los mantos acuíferos. Existe una gran variedad de

alternativas que se pueden implementar para lograr el aprovechamiento del agua de lluvia.

Por último, el déficit actual de agua en la Ciudad de México es de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, el caudal de sobreexplotación se estima en $15 \text{ m}^3/\text{s}$, y si a ello se suma el que será necesario para el año 2010 (se requerirán otros $5 \text{ m}^3/\text{s}$) para abastecer a la población de la ciudad, en total se necesitarían $25 \text{ m}^3/\text{s}$, (Jiménez, et al., 2005). Por lo ello es que la recarga artificial hacia los mantos acuíferos y la captación de agua pluvial deben ser el tipo de proyectos a considerar para la Ciudad de México, por que con ellos se aportaría un volumen importante de agua en los mantos acuíferos y la captación de agua pluvial suministraría agua que sustituya al agua potable para los servicios de limpieza, riego y sistemas sanitarios en las construcciones que adopten la captación pluvial.

BIBLIOGRAFÍA

Alderlieste, M., Langeveld, J., "Resultados de un proyecto piloto para la infiltración local de aguas residuales domesticas en Djenné, Malí" Conferencia Novatech 2004, Lyon-Francia.

Aparicio, F., "Fundamentos de hidrología de superficie", Ed. Limusa. 1988

Camp, D., McKee, I., "California Best Management Practices", Alameda, CA. 1993.

Caramori, V., Goldenfum, J. "Critical analysis of data from two infiltration trenches under subtropical climate conditions". Conferencia Novatech 2004, Lyon-Francia.

Center for Watershed Protection, (CWP) "The Vermont Stormwater Management Handbook Technical Support Document". Public Review Draft 2000

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero zona metropolitana de la Ciudad de México. CONAGUA, 2002

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Lineamientos técnicos generales para proyectos de recarga artificial de acuíferos con agua meteórica y escurrimiento superficial. CONAGUA, 2005

Deméneghi, A. "Apuntes de Comportamiento de Suelos", Facultad de Ingeniería, UNAM. 1989

Domínguez, R., Jiménez, B., Carrizosa, E., Cisneros, H., "Estudio para el diagnostico de la situación de abastecimiento de agua y control de inundaciones en el Valle de México", Instituto de Ingeniería, UNAM. Diciembre 2006.

Enciclopedia Multimedia Encarta. DVD-ROM. Microsoft Inc. Versión 2006

Franco, V., Gutiérrez, A., Peña, T., Sánchez, L., "Diagnostico de las presas del poniente. Instituto de Ingeniería", Instituto de Ingeniería. UNAM. Febrero, 1992.

Gleason, J., "Manual de aprovechamiento de agua pluviales en centros urbanos"

GKY and Associates. "Evaluation and Management of Highway Runoff Water Quality", Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington, DC. 1996

INEGI, www.inegi.gob.mx 2006

Juárez, B., Rico, R., "Mecánica de Suelos", Tomo I. 1969 Ed. Limusa

Lara, J. "Alcantarillado", Facultad de Ingeniería, 1991

Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el Valle de México, SACM, 2005.

Meteorología Interactiva en Chile, www.atmosfera.cl

Osman, A., Houghtalen R., "Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality". Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2003

Periódico "El Universal", www.eluniversal.com.mx, Octubre, 2006

Periódico "La Jornada", www.lajornada.unam.mx, Octubre, 2006

"Requisitos para la recarga artificial de acuíferos", Anteproyecto de la normatividad NOM-014-CNA-2003. SEMARNAT Y CONAGUA. 2006

Revista digital universitaria. 2006 www.revista.unam.mx,

Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal "Condiciones y requisitos para la recarga por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México", NADF-003-AGUA-2002, Gaceta oficial del Distrito Federal, 26 de Marzo de 2004.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales." NOM-001-ECOL-1996, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 1996

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. "Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general." NOM-004-CNA-1996, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 12 de junio de 1998.

Schueler, R., "Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs", Department of Environmental Programs, Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

Sharma, K., "Roof - Top rainwater harvesting - India's feasible option for the millenium" Conferencia Novatech 2004, Lyon-Francia.

Sistema de Aguas de la Ciudad de México, "Diagnóstico de los pozos de absorción de aguas pluviales ubicados en la zona de pedregales en el D. F." SACM, 1998. www.sacm.df.gob.mx

Sistema de Aguas de la Ciudad de México, "Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el Valle de México" SACM, 2006. www.sacm.df.gob.mx

Sistema Intermunicipal para los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado. "Infiltración pluvial" (SIAPA). www.siapa.gob.mx 2006

Tassin B., Mouchel, M., "A posteriori analysis of the design and the maintenance of retention ponds in the Ile-de-France region." Conferencia Novatech 2004, Lyon-Francia.

United States Environmental Protection Agency (EPA). National Menu of Best Management Practices for Stormwater Phase II. 2002