



SEP

SES

TecNM

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA**

**“APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN  
EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**ELIZABEH BERNAL PÉREZ**

**No. CONTROL: 0728M0028**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ**

**CO-DIRECTORA:**

**DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN**

**METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2020**

*Verónica Martínez Miranda*



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Metepec, Edo. de México., 10/septiembre /2020  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN  
DEPI-3200-385/2020

C. ELIZABETH BERNAL PÉREZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
P R E S E N T E

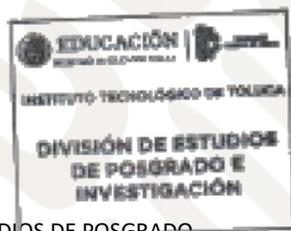
De acuerdo con el Reglamento de Titulación del Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica dependiente de la Subsecretaría de Educación Superior de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado **“APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA”**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación concede autorización para que proceda a la impresión del mismo

Sin más por el momento, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E

“Educación, integridad y ciencia”

JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN



JLGR/IMAB





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Metepec, Edo. de México., 03/Septiembre/2020  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
E INVESTIGACIÓN  
DEPI-3200-371/2020

DR. JOSÉ LUIS GARCÍA RIVAS  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental presenta la **C. ELIZABETH BERNAL PÉREZ** con número de control **0728M0028** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DR. ISAÍAS DE LA ROSA GÓMEZ  
DIRECTOR DE TESIS

DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN  
CO-DIRECTORA DE TESIS



DRA. VERÓNICA MARTÍNEZ MIRANDA  
REVISORA DE TESIS

DR. FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ  
REVISOR DE TESIS



## DEDICATORIA

*A Dios por permitirme concluir este sueño que hoy es realidad.*

*A mi familia por ser fuente de inspiración, de apoyo, entrega y amor.*

*A mi hijo Santiago, por acompañarme cada uno de los días a la realización de este sueño y ser mi gran maestro.*

*A mi mamá Car por apoyarme al cuidado de mi hijo, escucharme y motivarme a seguir adelante.*

*A mi papá Manuel por confiar en mí siempre, por sus consejos y su gran apoyo.*

*A mis hermanos Jazmín y Manuel por darme ánimo, por su amor, complicidad, y apoyo.*

*A mi abuelita Mariquita y mi abuelita Tere que están en el cielo; pero que, con su gran amor, su escucha y gran apoyo cuando estaban en vida, me impulsaron a perseguir mis sueños hasta alcanzarlos...*

*A mis amigos Monse, Clarita, Kari, Dianita, Marthita e Ismael por su gran apoyo para lograr este sueño y por compartir experiencias inolvidables y maravillosas, durante mis estudios...*

*Gracias por acompañarme en este viaje hacia mi sueño y gracias por ser parte de mi vida, con amor a todos ustedes.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Conacyt por otorgar el recurso económico para que esta investigación se lleve a cabo, y se logrará el aprovechamiento de agua de lluvia en el ITT de manera sustentable.

Al Dr. Isaías de la Rosa Gómez por su amable liderazgo y por impulsarme a seguir adelante y a nunca desistir a pesar de los obstáculos, a amar y a cuidar esta tierra, nuestro único hogar, gracias Dr. por todas sus grandes enseñanzas y ser un ejemplo de vida.

A la Dra. Carmen Carreño de León, por su atención en los detalles, por guiarme para que la tesis fuera práctica y compartir su conocimiento a mi formación.

A la Dra. Verónica Martínez Miranda, por compartir su conocimiento y experiencia en la investigación y asesorarme para que la tesis fuera clara.

Al Dr. Francisco Javier Illescas Martínez, por su asesoramiento y observaciones durante la investigación.

Gracias infinitas a todos ustedes por transformar esta tesis en su mejor versión.

## RESUMEN

Actualmente vivimos una crisis de agua que impacta en el recurso hídrico disponible en el planeta lo cual conlleva a realizar búsquedas alternativas para el aprovechamiento de agua de lluvia; en las Instituciones de Educación se necesita agua para los servicios básicos de la comunidad estudiantil. La población del Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) consume 3085.4 m<sup>3</sup> de agua potable por mes. El objetivo de la investigación fue la captación de agua de lluvia en el ITT para su aprovechamiento en servicios y en alimentación al acuífero, disminuyendo así el consumo de agua potable y recargando los mantos freáticos. Se captó agua de lluvia aprovechando el techo de cinco instalaciones a través de un sistema de manifold donde el agua es infiltrada en el subsuelo. Se recolectaron muestras de agua de lluvia sin contacto con superficie, así como en techo de concreto, lámina galvanizada y policarbonato. Se evaluó la calidad física, química y microbiológica en función del pH, sólidos disueltos totales, de cloruros, nitratos, nitritos, así como Coliformes Totales. Se determinó la capacidad de un sedimentador y de un tanque de almacenamiento para conocer el agua requerida en el ITT durante cuatro meses de estiaje. Se realizó el diseño de pozos de absorción para alimentar al acuífero a través de la captación de agua de lluvia de escorrentía en áreas asfálticas. Se encontró contaminación bacteriana significativa en agua de lluvia, así como variación en el pH. Se implementó el sistema de captación de agua de lluvia para el riego de las canchas de fútbol. Se realizó la inyección al acuífero del agua de lluvia captada en cinco techos del ITT.

## ABSTRAC

We are currently experiencing a water crisis that impacts on the available water resource on the planet, which leads to alternative searches for the use of rainwater; in the Educational Institutions water is needed for the basic services of the student community. The population of the Technological Institute of Toluca (ITT) consumes 3,085.4 m<sup>3</sup> of drinking water per month. The objective of the research was the capture of rainwater in the ITT for its use in services and in feeding the aquifer, thus reducing the consumption of drinking water and recharging the groundwater table. Rainwater was captured taking advantage of the roof of five facilities through a manifold system where the water is infiltrated into the subsoil. Rainwater samples were collected without contact with the surface, as well as on a concrete roof, galvanized sheet and polycarbonate. The physical, chemical and microbiological quality was evaluated based on the pH, total dissolved solids, chlorides, nitrates, nitrites, as well as Total Coliforms. The capacity of a settler and a storage tank to know the water required in the ITT during four months of low water was determined. The design of absorption wells was carried out to feed the aquifer through the capture of rainwater from runoff in asphalt areas. Significant bacterial contamination was found in rainwater, as well as variation in pH. The rainwater harvesting system was implemented to irrigate the soccer fields. The rainwater captured in five roofs of the ITT was injected into the aquifer.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
RESUMEN .....	iii
ABSTRAC .....	iv
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
1 FUNDAMENTOS .....	4
1.1 Recursos hídricos renovables .....	4
1.2 Distribución del agua dulce .....	4
1.3 Usos del agua en México .....	5
1.4 Agua en el Estado de México .....	7
1.5 Agua en Metepec .....	9
1.5.1 Hidrología .....	9
1.5.2 Clima .....	9
1.5.3 Edafología .....	10
1.6 Agua de lluvia .....	10
1.6.1 Características del agua de lluvia .....	10
1.6.2 Purificación del agua de lluvia .....	11
1.7 Normatividad .....	18
1.8 Alimentación al acuífero .....	19
1.8.1 Obras de superficie .....	20
1.8.2 Obras de profundidad .....	22
1.8.3 Sistemas de recolección de escurrimiento superficial .....	31
1.8.4 Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra .....	31
1.8.5 Zanja de infiltración, surcos y tinas ciegas .....	32
1.9 Determinación de la demanda de agua .....	32
1.9.1 Demanda de agua para consumo humano .....	33
1.9.2 Cálculo de precipitación pluvial neta .....	33
1.10 Captación de agua de lluvia en techos .....	35

1.10.1	Determinación del área de captación de agua de lluvia.....	36
1.10.2	Cálculo del área de captación .....	37
1.11	Estructuras de almacenamiento de agua .....	39
1.11.1	Forma y ubicación .....	40
1.11.2	Tamaño .....	40
1.11.3	Materiales de construcción .....	41
1.11.4	Beneficios de la recolección de agua de lluvia .....	43
1.12	Pluviometría.....	43
1.13	Contaminación química por metales pesados .....	45
1.14	Calidad del agua de lluvia .....	47
1.14.1	Parámetros físicos.....	48
1.14.2	Parámetros químicos.....	51
1.14.3	Parámetros microbiológicos .....	55
2	MÉTODO.....	59
2.1	Captación de agua de lluvia.....	60
2.1.1	Uso secundario.....	60
2.1.2	Alimentación al acuífero .....	64
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	66
3.1	Captación de agua de lluvia en el ITT .....	66
3.1.1	Uso secundario.....	67
3.1.2	Alimentación al acuífero .....	85
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
5	FUENTES CONSULTADAS .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.1	Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México, 2017(CONAGUA,.2018).....	5
1.2	Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos, (CONAGUA, 2017).....	7
1.3	Usos del agua en la entidad federativa, 2017 (hm <sup>3</sup> /año).(CONAGUA, 2017).....	8
1.4	Desarenador para agua de lluvia, (Jalife et al., 2018).....	13
1.5	Sección transversal de una trampa de sólidos.....	15
1.6	Filtro Speedy o filtro tamiz de 100μ, (Anaya, 2017).....	16
1.7	Materiales para el relleno de pozos (SAGARPA, 2020).....	23
1.8	Esquema de funcionamiento de un infiltrómetro de doble anillo (SAGARPA, 2020).....	27
1.9	Factor de seguridad (SAGARPA, 2020).....	30
1.10	Barreras al flujo superficial para provocar la infiltración del agua, (Anaya, 2017).....	31
1.11	Zanja de infiltración. Tecnologías y prácticas para pequeños productores agrarios (Anaya, 2017).....	32
1.12	Ejemplos de captación de agua de lluvia de techos en diferentes situaciones. a) Cosecha de lluvia de un solo faldón del techo acoplado a cisterna en mampostería, en Brasil. b) Cosecha de lluvia de dos faldones, acoplado a cisterna en mampostería, en Brasil. c) Cosecha de lluvia en techo tipo cuatro faldones, acoplado a tanques de PVC, en El Salvador (FAO, 2013).....	36
1.13	Conducción de excedentes de la captación de techos para estructuras más simples y baratas, para aprovechar mejor la estructura de captación, (FAO, 2004).....	42
1.14	Concentración media de cationes en el agua de lluvia en 2015 (Zdeb et al., 2020).....	46

1.15	Concentración media de cationes en el agua de lluvia en 2016 (Zdeb et al., 2020).....	47
1.16	Variación del pH en el tiempo (Rahman et al., 2014).....	49
1.17	Valores de pH del agua de lluvia, (Zdeb et al., 2020).....	50
1.18	Variación de solidos Disueltos Totales en el tiempo. (Rahman et al., 2014).....	51
1.19	Datos estadísticos del contenido de nitritos en el agua de lluvia analizada (Zdeb et al.,2020).....	54
1.20	Datos estadísticos del contenido de nitratos en el agua de lluvia analizada (Zdeb et al.,2020).....	55
1.21	Variación de Coliformes totales en el tiempo (Rahman et al., 2014).....	57
1.22	Presencia de coliformes totales en los muestreos de agua atmosférica condensada en la Ciudad de México en muestras de 100 mL (Bautista et.al, 2013).....	58
2.1	Diagrama de flujo de captación de agua de lluvia.....	59
2.2	Manifold con tubo de 4” de diámetro y 31 orificios por tubo.....	64
3.1	(a) Agua de lluvia colectada del Edificio B; (b) Agua de lluvia colectada del edificio de Mecatrónica; (c) Agua de lluvia a cielo abierto.....	66
3.2	Bolsa estéril para la recolección de agua de lluvia.....	67
3.3	Precipitación pluvial promedio mensual histórica en el Estado de México.....	68
3.4	Área del Edificio de TICS.....	71
3.5	Área del Edificio K.....	71
3.6	Área de las gradas de la cancha de fútbol.....	72
3.7	Área de la biblioteca.....	72
3.8	Área del Hangar.....	73
3.9	Cisterna para agua de lluvia del edificio de Mecatrónica.....	75
3.10	a) Agua de lluvia del edificio de Mecatronica b) agua de lluvia del edificio B, c) agua de lluvia a cielo abierto.....	78

3.11	Cajas Petri con Coliformes Totales. (a) y (b) muestras de lluvia de escurrimiento; (c) y (d) muestras de lluvia a cielo abierto.....	84
3.12	(a) Manifold con 31 orificios; (b) Acondicionamiento con grava; (c) Manifold insertado en trampa de solidos; (d) Recubrimiento con grava.....	89
3.13	Instalación de Manifold: (a) Edificio K; (b) TICS; (c) Hangar.....	90
3.14	Alimentación al subsuelo: (a) Techo de las gradas de las canchas de futbol; (b) Biblioteca.....	91
3.15	Calendario de limpieza de los filtros de alimentación en los edificios de captación de agua de lluvia.....	92
3.16	Zona donde se diseñarán los pozos de absorción.....	93
3.17	Área de captación para pozos de absorción.....	94
3.18	Prueba de infiltración de doble anillo.....	95
3.19	Dimensiones y composición del pozo de absorción.....	100
3.20	Instalación de los pozo de absorción.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1.1	Agrupación de usos de la clasificación del REPDA.....	6
1.2	Agua renovable en el Estado de México.....	8
1.3	Ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia.....	11
1.4	Clasificación de partículas según la “Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo” (ISSS).....	12
1.5	Tipo y textura de suelo según su tasa de infiltración.....	27
1.6	Coeficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación.....	34
1.7	Volumen de agua de lluvia en relación con el área de captación.....	38
1.8	Lluvia mensual en mm periodo 2003-2019.....	44
1.9	Valores de Al y Fe obtenidos por Ospina y Ramírez en 2014.....	46
1.10	Cloruros en agua de lluvia.....	52
1.11	Nitratos y nitritos en agua de lluvia.....	53
1.12	Clasificación de los Coliformes Totales en las fuentes de agua.....	56
1.13	Coliformes Totales en agua de lluvia.....	57
2.1	Parámetros analizados en el agua de lluvia.....	63
3.1	Precipitación media mensual del Estado de México.....	68
3.2	Área total de edificios del ITT.....	70
3.3	Área efectiva de captación de edificios.....	71
3.4	Caracterización de agua de pozo en el ITT.....	76
3.5	pH en agua de lluvia.....	77
3.6	SDT en agua de lluvia.....	79
3.7	Contenido de cationes en agua de lluvia.....	80
3.8	Cloruros en agua de lluvia.....	81
3.9	Contenido de nitratos y nitritos en agua de lluvia.....	82
3.10	Coliformes Totales en agua de lluvia.....	83
3.11	Resumen de cálculos de Bernoulli.....	87

3.12	Prueba de infiltración de doble anillo.....	96
------	---	----

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la producción vegetal y animal. Los seres vivos están más adaptados a sobrevivir con escasez de alimentos que con falta de agua (FAO, 2013).

La importancia de captar, almacenar y utilizar el agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano es de gran relevancia para la mayoría de las poblaciones, sobre todo aquellas que no tienen acceso a este vital líquido.

Es importante conocer que una forma de aprovechar el agua de lluvia para la población y para alimentar al acuífero es mediante un Sistema de Captación del Agua de Lluvia (SCALL), su funcionamiento, los criterios de diseño más sobresalientes, las características de los materiales de construcción, la forma de construir estos sistemas, su operación y mantenimiento (Gavito, 2007).

Por otro lado en el Valle de Toluca, se tiene un buen potencial de aguas subterráneas el cual ha sido mermado por el envío de grandes volúmenes para la Ciudad de México mediante la batería de pozos profundos del sistema Lerma. Las extracciones han rebasado la potencialidad de los acuíferos, que se reflejan en un abatimiento de los niveles piezométricos y formación de grietas y hundimientos en el terreno del valle de Toluca (CONAGUA 2015).

La importancia del manejo y administración de las aguas subterráneas es evidente, más aún en aquellas regiones donde es significativa su presencia como fuente de abastecimiento (CONAGUA, 2015).

La captación del agua de lluvia se realizó en cinco instalaciones de la Institución, utilizando los techos, los cuales fueron acondicionados para su funcionalidad. Se alimentó al acuífero y áreas verdes con agua de lluvia mediante la distribución

superficial proveniente de la escorrentía de áreas asfálticas de la zona de canchas de fútbol y de los estacionamientos.

Se propuso el diseño de pozos de absorción, para la captación de agua de lluvia de escorrentías sobrantes de la parte de áreas asfálticas y de estacionamientos. Se determinó la capacidad de un sedimentador, así como la capacidad de un tanque de almacenamiento de acuerdo al volumen requerido para la demanda de agua de la población del Instituto Tecnológica de Toluca durante cuatro meses de estiaje.

El objetivo del presente trabajo es captar agua de lluvia en el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) para su aprovechamiento en servicios y en alimentación al acuífero.

Este documento contiene cuatro apartados: Fundamentos, metodología, resultados y discusión, así como conclusiones y recomendaciones.

En los fundamentos se abordan temas como: los recursos hídricos renovables, distribución de agua dulce, usos del agua en México, agua en el Estado de México, agua en Metepec, agua de lluvia, normatividad, alimentación al acuífero, determinación de la demanda de agua, captación de agua de lluvia en techos, estructuras de almacenamiento de agua, pluviometría, contaminación química por metales y calidad del agua de lluvia.

La metodología comprende la captación de agua de lluvia, para uso secundario, dentro de este tema se aborda la determinación de la demanda de agua en el ITT el cálculo de las áreas de captación, determinación de la capacidad del sedimentador y del tanque de almacenamiento, la caracterización de agua de lluvia; el tema de alimentación al acuífero comprende obras de superficie e inyección en

el subsuelo; así como obras de superficie que corresponden a áreas verdes y pozos de absorción.

En los Resultados, se presentan los cálculos para la determinación de la demanda de agua en el (ITT), la precipitación pluvial neta, el cálculo de áreas de captación, la capacidad del sedimentador, así como del tanque de almacenamiento, la caracterización de agua de pozo y de lluvia, la inyección al subsuelo, y una propuesta de diseño de pozos de absorción, finalmente, se presentan las conclusiones.

# 1 FUNDAMENTOS

## 1.1 Recursos hídricos renovables

El agua renovable per cápita de un país resulta de la operación de dividir sus recursos renovables entre el número de habitantes. De 200 países en el mundo, México ocupa el lugar número 94 en recurso hídrico renovable per cápita.

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 billones de hm<sup>3</sup>, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 billones de hm<sup>3</sup>, es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en glaciares, nieve y hielo (CONAGUA, 2018).

## 1.2 Distribución del agua dulce

Anualmente México recibe aproximadamente 1'449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,585 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable (CONAGUA, 2018).

En la Figura 1.1 se presentan los componentes del ciclo hidrológico en México.

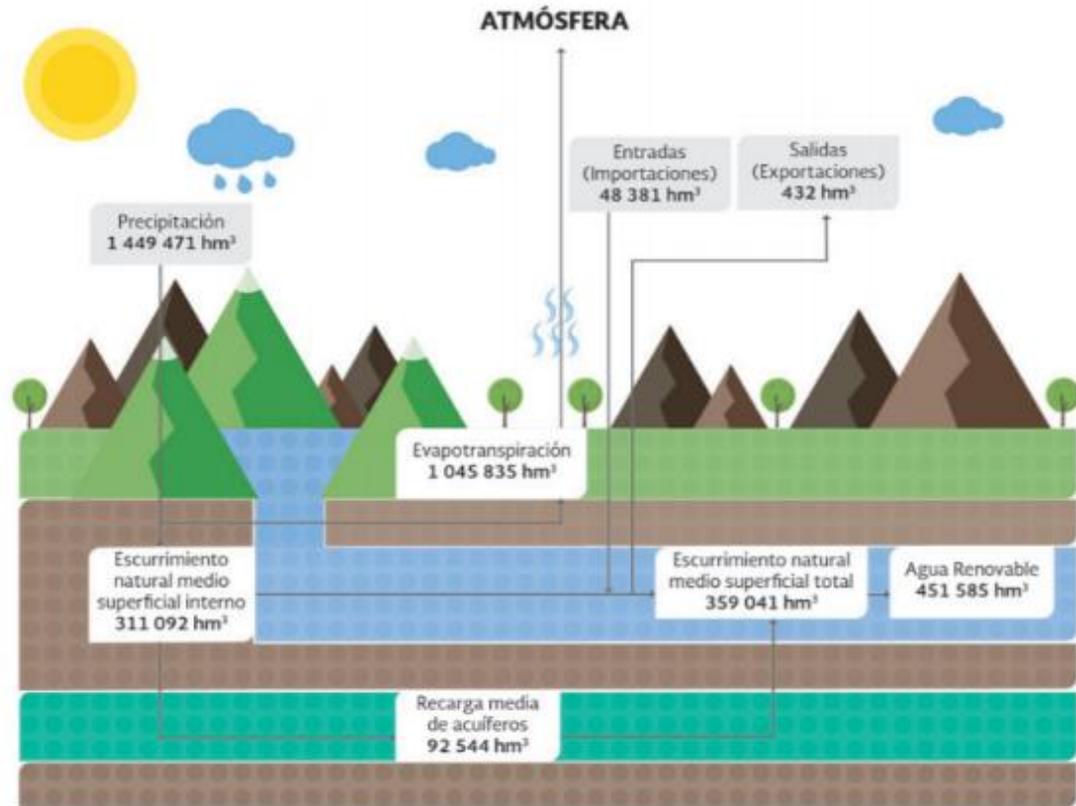


Figura 1.1. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México. Fuente: (CONAGUA, 2018).

### 1.3 Usos del agua en México

En el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), se registran los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios de aguas nacionales. Se empleará el término uso agrupado, con la categorización mostrada en la Tabla 1 y Figura 1.2, que distingue también si el uso es consuntivo (Diferencia entre volumen extraído y el descargado al llevar a cabo una actividad) o no consuntivo (La actividad no modifica el volumen). Los datos de volumen concesionado del año 2017 son los correspondientes al 31 de diciembre de 2017. La regionalización de los volúmenes se realiza conforme a la ubicación del aprovechamiento inscrito en el REPGA y no al lugar de adscripción de los títulos respectivos (CONAGUA, 2018).

Tabla 1.1. Agrupación de usos de la clasificación del REPDA.

Clave	Rubro de clasificación del REPDA	Vol. Concesionado (hm <sup>3</sup> )	
A	Agrícola (inscrito+ pendiente)	59621	
B	Agroindustrial	3.81	
C	Doméstico	38	
D	Acuacultura	1159	
E	Servicios	1600	
F1	Industrial	2663	
F2	Termoeléctricas	4147	
G	Pecuario	218	
H	Público urbano	12591	
I	Múltiples	5800	
K	Comercio	0.08	
L	Otros	0.59	
<b>Subtotal consuntivo</b>		<b>87842</b>	
J	Hidroeléctricas	183066	
N	Conservación ecológica	9.46	
<b>Subtotal no consuntivo</b>		<b>183076</b>	
<b>Total</b>		<b>270917</b>	
Usos agrupados consuntivos	Definición	Vol. Concesionado (hm <sup>3</sup> )	%
Agrícola	A+D+G+I+L	66799	76.0
Abastecimiento público	C+H	12628	14.4
Industrial integrado	B+E+F1+K	4267	4.9
Electricidad excluyendo hidroelectricidad	F2	4147	4.7
<b>Subtotal consuntivo</b>		<b>87842</b>	<b>100</b>
<b>Uso agrupado no consuntivo</b>			
Hidroeléctricas	J	183066	
Conservación Ecológica	N	9.46	
<b>Subtotal no consuntivo</b>		<b>183075</b>	
<b>Total</b>		<b>270917</b>	

Fuente: (CONAGUA, 2018).

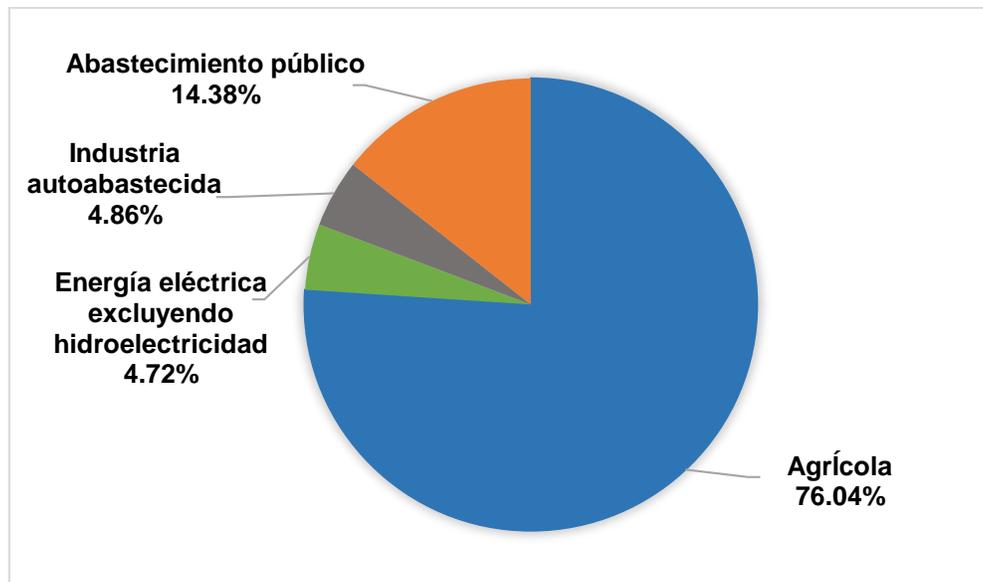


Figura 1.2. Distribución de volúmenes concesionados por usos agrupados consuntivos. Fuente: (CONAGUA, 2018).

#### 1.4 Agua en el Estado de México

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), como órgano administrativo, normativo, técnico y consultivo encargado de la gestión del agua en México, desempeña sus funciones a través de 13 organismos de cuenca, cuyo ámbito de competencia son las RHA (Regiones Hidrológico-Administrativas), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, consideradas unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos.

Los datos relevantes por entidad federativa para el Estado de México se presentan en la Figura 1.3 y Tabla 1.2

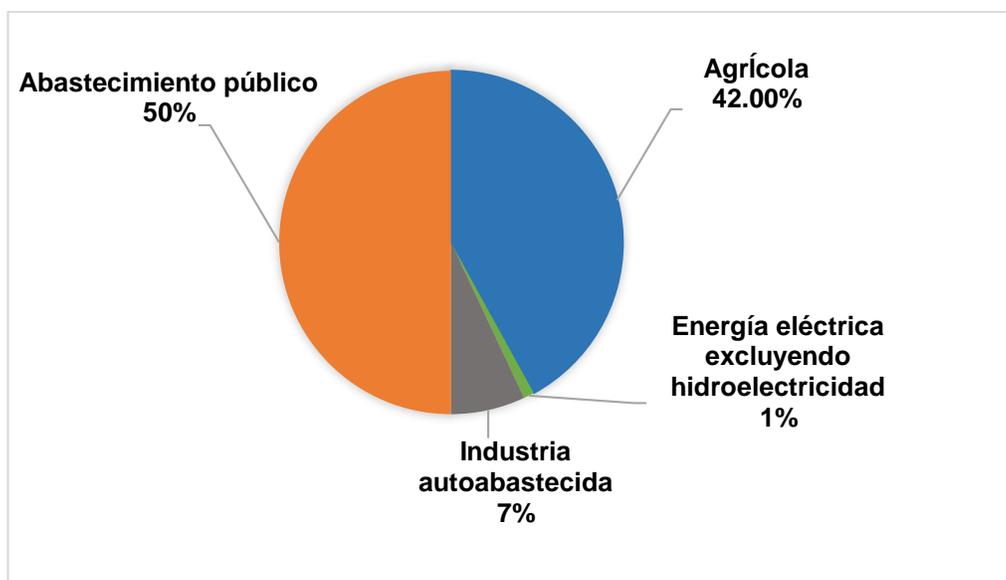


Figura 1.3. Usos del agua en la entidad federativa, 2017 (hm³/año).

Fuente: (CONAGUA, 2018).

Tabla 1.2. Agua renovable en el Estado de México.

Agua renovable			
Parámetro	Unidades	Año	Cantidad
Precipitación normal anual	mm	1981-2010	900
Escorrentamiento medio superficial	hm³/año	2017	3137
Número de acuíferos	9	-	
Recarga media de acuíferos	hm³/año	2017	1649
Agua renovable	hm³/año	2017	4786
Agua renovable per cápita	m³/hab./año	2017	276
Agua renovable per cápita	m³/hab./año	2030	237
<b>Consuntivos</b>	<b>Subterránea</b>	<b>Total</b>	<b>Superficial</b>
Agrícola	354	1160	806
Abastecimiento público	1034	1375	341.64
Industria autoabastecida	160	198	38
Electricidad excluyendo hidroelectricidad	7	31	23.65
<b>Total</b>	<b>1555</b>	<b>2764</b>	<b>1209</b>
<b>No consuntivos</b>	<b>Subterránea</b>	<b>Total</b>	<b>Superficial</b>
Hidroeléctricas (Volumen concesionado)		2113	
Conservación ecológica		0	

Fuente: (CONAGUA, 2018).

## **1.5 Agua en Metepec**

### **1.5.1 Hidrología**

No existen corrientes superficiales de importancia, pues las que hay son arroyos utilizados como drenes naturales. Sin embargo, hay corrientes subterráneas con importantes veneros, mantos acuíferos y freáticos que se utilizan para la extracción del agua y su posterior potabilización y distribución (Órgano Oficial de Gobierno Municipal de Metepec, Estado de México, 2016).

Al sur del municipio, desde San Bartolome Tlaltelulco hasta San Lucas Tunco, se localiza una corriente de agua intermitente de nombre El arenal, que continua hasta San Mateo Atenco y que es utilizada como canal de desagüe en época de lluvia.

El municipio cuenta con siete títulos de concesión de aguas nacionales que amparan la extracción del recurso para su distribución a través de 35 pozos profundos administrados por el Organismo Público Descentralizado para la Prestación de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Metepec (OPDAPAS), por lo que no depende de fuerzas externas para el abasto de agua potable (Órgano Oficial de Gobierno Municipal de Metepec, Estado de México, 2016).

### **1.5.2 Clima**

El clima predominante en Metepec es templado subhúmedo. La temperatura media fluctúa entre los 10 y 14 °C, mientras que en el invierno se registran temperaturas de 2 a 3° C bajo cero. Se registran, aproximadamente, entre ocho y diez heladas, y de dos a cuatro días de granizadas al año. La máxima precipitación pluvial que se registra es en el mes de julio, con una variación de entre 150 y 180 mm (Órgano Oficial de Gobierno Municipal de Metepec, Estado de México, 2016).

### **1.5.3 Edafología**

La edafología del municipio de Metepec se compone de tres tipos de suelo: feozem (0.0005 km<sup>2</sup>), litosol (0.000001 km<sup>2</sup>) e histosol (0.00002 km<sup>2</sup>). Sus características se consideran propicias para desarrollar actividades urbanas o rurales, ya que son ricos en nutrientes y materia orgánica, además de ser suelos propicios para ciertos tipos de vegetación.

Las características edafológicas del municipio son: Gruesa, menos de 18% de arcilla y más de 65% de arena; Media, menos de 35% de arcilla y menos de 65% de arena, y fina, más de 35% de arcilla (Órgano Oficial de Gobierno Municipal de Metepec, Estado de México, 2016).

## **1.6 Agua de lluvia**

La fuente principal de agua para las funciones vitales y el funcionamiento de los ecosistemas con su biodiversidad es el ciclo del agua que comprende una evaporación de los mantos superficiales, formación de nubes, condensación y precipitación.

El agua de lluvia puede reemplazar al agua potable en algunos usos domésticos e industriales, pudiendo reducir el 40% del consumo de agua potable (Pérez, 2012).

### **1.6.1 Características del agua de lluvia**

En comparación con las aguas superficiales y subterráneas, el agua de lluvia es extremadamente limpia, por lo que los tratamientos de desinfección que se aplican son los más simples. Por su baja concentración de sales de calcio y magnesio, se le considera agua blanda. También contiene gases (oxígeno y nitrógeno) y algunos microorganismos.

En algunos casos, el agua pluvial puede reemplazar perfectamente al agua potable en usos domésticos como la limpieza de la casa, la descarga de la cisterna del inodoro y el riego en general. Otras ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia se muestran en la Tabla 1.3 (Anaya, 2017).

Tabla 1.3. Ventajas y desventajas de la captación de agua de lluvia.

Ventajas	Desventajas
Alta calidad física y química	Alto costo inicial que puede impedir su implementación por parte de las familias con bajos recursos económicos.
Sistema independiente	
Ideal para comunidades dispersas	
Empleo de mano de obra y comunidades locales	La cantidad de agua captada depende de la precipitación pluvial del lugar y del área de captación.
No requiere energía adicional para la operación del sistema y la recolección del agua de lluvia	
Fácil de mantener	

Fuente: (Anaya, 2017).

### 1.6.2 Purificación del agua de lluvia

El líquido proveniente del cielo es el origen de las aguas superficiales y subterráneas, por lo que, técnicamente es puro. Pero dado que escurre a través de las superficies, suele arrastrar contaminantes que pueden ser tóxicos. Estos deben ser eliminados mediante procesos de desinfección y potabilización, y así asegurar su calidad para el consumo.

El diseño de un sistema de purificación de agua de lluvia para consumo humano conlleva un riguroso esbozo de cada uno de sus componentes. En un principio para evitar que el líquido se contamine, todo techo o superficie de captación ha de estar perfectamente limpio de materiales del medio ambiente-hojas, arena, hollín,

residuos de construcción o de actividades humanas. Incluso tomando medidas para evitar la presencia de partículas contaminantes, el recurso pluvial debe pasar por distintos procesos de tratamiento primario, secundario y terciario. Por lo general, la sedimentación, filtración y desinfección consiguen garantizar la calidad física, química y bacteriológica del agua destinada a cualquier tipo de consumo (Anaya, 2017).

### a) Sedimentadores

Para entender mejor el funcionamiento de los sedimentadores es importante conocer la estructura física del suelo pues depende de la dimensión de las partículas de que está compuesto. Además, las partículas también difieren basándose en su forma y masa por unidad de volumen (Hanna Instruments, 2020). Tabla 1.4

Tabla 1.4. Clasificación de partículas según la “Sociedad Internacional de Ciencia del Suelo” (ISSS).

Diámetro de las partículas (mm)	Clasificación
>2	Textura pedregosa
2-0.2	Arena gruesa
0.2-0.02	Arena fina
0.02-0.002	Sedimentos
<0.002	Arcilla

Fuente: (Hanna Instruments, 2020).

El objetivo de los sedimentadores es retirar sólidos que pueden sedimentar antes del almacenamiento. Este tratamiento ayuda a hacer más eficiente el filtrado y reducir el mantenimiento general de los tratamientos posteriores, Figura 1.4 (García, 2012).

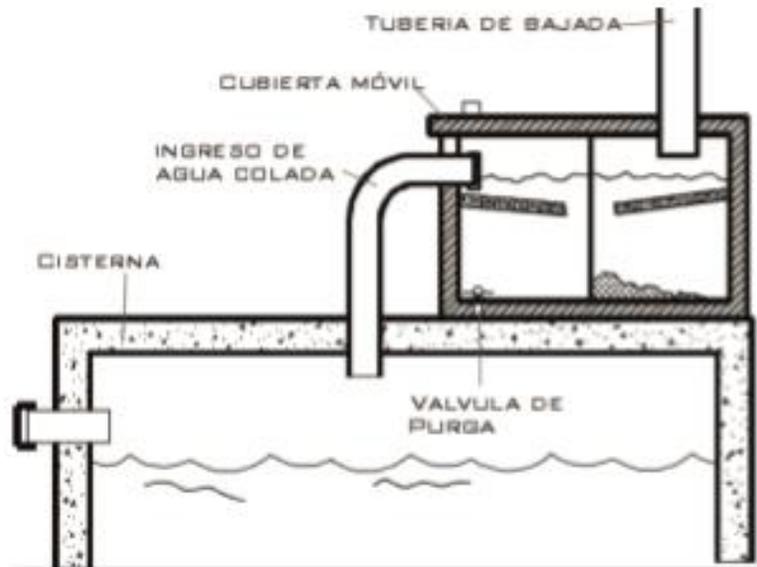


Figura 1.4. Desarenador para agua de lluvia. Fuente: (Jalife *et al.*, 2018).

### Diseño de sedimentador

Las variables de diseño de la trampa son el área efectiva de captación del agua de lluvia y la máxima lluvia registrada en un día se determina de acuerdo a la ecuación (1) (Anaya, 2017).

$$V_{sedimentador} = A_{ec} * l_d \dots \dots \dots ec. (1)$$

Donde:

$V_{sedimentador}$  = Volumen del sedimentador (m<sup>3</sup>)

$A_{ec}$  = Área efectiva de captación de agua de lluvia (m<sup>2</sup>)

$l_d$  = Es el día con máxima lluvia registrada (m)

El Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI-CP) recomienda utilizar de 50 a 100 mm/h (0.05-0.1m/h)

Cuando las partículas no logran ser retenidas por las mallas de las canaletas y se manejan áreas mayores a  $1,000 \text{ m}^2$  se deben considerar procedimientos y criterios para dimensionar un sedimentador en función de las partículas suspendidas en el agua.

Si el material en suspensión se asienta rápidamente, formándose una interface sólido-líquido, se considera que el líquido contiene material silíceo de tamaño reducido, pero de masa específica elevada, que es la que produce ese fenómeno.

La materia inorgánica con tamaño mayor a  $0.02 \text{ mm}$  por lo general puede ser removida por sedimentación natural, sin el uso de coagulantes químicos.

Los tanques de sedimentación pueden ser de forma rectangular, cuadrada o circular, para las tareas de operación y mantenimiento se recomienda el uso de tanques rectangulares de flujo horizontal, operados en forma continua.

El tiempo de retención debe ser suficiente para permitir que los sólidos en suspensión se asienten (partículas de mayor densidad que el agua) o floten (partículas de menor densidad que el agua).

Es conveniente determinar en cada caso la velocidad de sedimentación utilizando una columna de sedimentación (Anaya, 2010).

A continuación, se muestra el funcionamiento de una trampa de sólidos. Figura 1.5

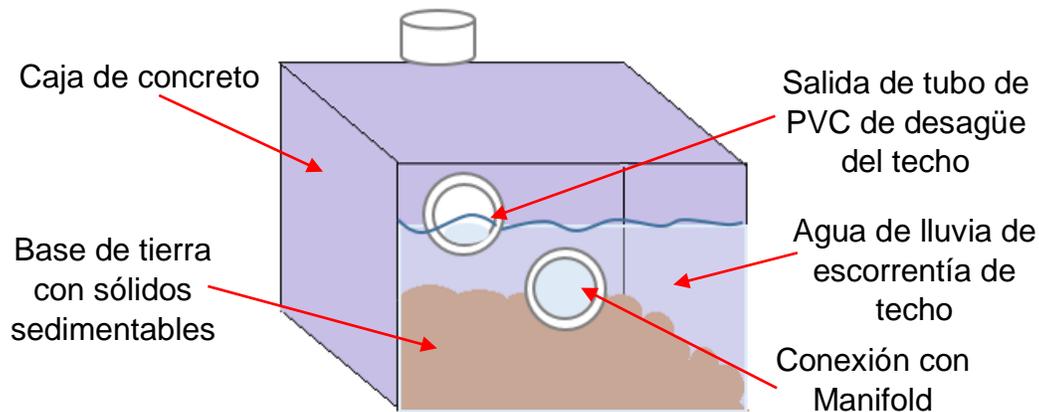


Figura 1.5. Sección transversal de una trampa de sólidos. Fuente: (Propia)

## b) Filtración

Es un proceso que consiste básicamente en separar un sólido del líquido, haciéndolo pasar a través de un medio poroso (medio filtrante), es decir un filtro, que permite el paso del líquido a través de él y a su vez impide el paso de los sólidos, reteniéndolos (Peraza, 2011; Reséndiz, 2012).

Este método es bastante útil para operaciones diarias, ya que además de ofrecer la protección del sistema por 24 h, presenta las siguientes ventajas:

- Tamaño compacto de 25x10 cm (Figura 1.5)
- Elimina sólidos, sedimentos, tierra, lodo y arcilla
- Cuenta con tejido filtrante de acero inoxidable
- Su suministro de agua es ininterrumpido
- Su limpieza es automática o manual por flujo reversible
- No desperdicia agua por los retrolavados
- Tiene canal de aspiración patentado con escobillas de limpieza
- El visor de la maya de filtración permite ver el grado de suciedad
- Es de larga vida útil, económico, sin gastos de mantenimiento ni cambio de cartuchos

- Tiene protección profiláctica de gérmenes mediante un tamiz con recubrimiento de plata (Anaya, 2017).

### **Filtro tamiz o Speedy**

Tiene protección profiláctica con recubrimiento de Ag y poros de  $100\mu$ , para eliminar lodos, tierra, sólidos, sedimentos y arcilla, Figura 1.6.



Figura 1.6. Filtro Speedy o filtro tamiz de  $100\mu$ . Fuente: (Anaya, 2017).

### **Filtro Kinetic Degradation Fluxion (KDF)**

Fabricado de gránulos de Cu-Zn. Reduce los contaminantes del agua por REDOX. Elimina metales pesados, refina los sólidos suspendidos hasta  $15\mu$  dejando el agua parcialmente libre de sólidos suspendidos. Actúa como germicida en REDOX, crea un campo eléctrico adverso a los microorganismos y forma radicales  $\text{OH}^\cdot$  y peróxido de hidrógeno.

### **Filtro de carbón activado (GAC)**

Elimina color, olor y sabor en agua, remueve fenoles, pesticidas y plaguicidas.

## **Filtros suavizadores**

O ablandadores de agua, dimensionados para eliminar  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{MgCO}_3$  se regenera mediante una resina de intercambio iónico.

## **Microfiltros pulidores**

Retiene impurezas pequeñas: de  $20\mu$ ,  $10\mu$  y hasta  $5\mu$ , fabricados con polipropileno, obteniendo agua de excelente calidad (Anaya, 2010).

### **c) Desinfección**

A continuación, se describen los procedimientos empleados para el tratamiento de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. Las plantas tratadoras pueden emplear todos los métodos referidos o algunos de ellos, dependiendo de los requerimientos de calidad del recurso a obtener y los recursos económicos de la organización en particular (Anaya, 2017).

## **Cloración**

Es prioritario clorar el agua almacenada en tanques de plástico con hipoclorito de sodio al 13%, hipoclorito de calcio al 70% o algún otro derivado de cloro. Basta una concentración de 1 ppm de  $\text{Cl}_2$  en el agua para eliminar microorganismos como bacterias, hongos, virus, esporas y algas. Si el recurso contiene demasiados sólidos, es mejor restarlos antes de comenzar porque interfieren con la cloración.

El cloro también favorece la precipitación de hierro y magnesio presentes en el agua a concentraciones mayores a lo estipulado en las normas nacionales mexicanas e internacionales. Algunos proveedores con plantas más refinadas omiten este método debido a que, al finalizar la desinfección, llevan a cabo la desinfección con rayos UV y la ozonificación (Anaya, 2017).

## **Luz ultravioleta (UV)**

La radiación ultravioleta funciona como un germicida, ya que anula la vida de las bacterias, gérmenes, virus, algas y esporas presentes en el agua. Los microorganismos no pueden propagarse mediante esta luz, ya que destruye el ADN y estos mueren al contacto, con lo que se obtiene un producto libre de gérmenes vivos.

Sin embargo, la desinfección con luz UV es ineficaz si en el agua hay turbiedad y sólidos suspendidos totales. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes con niveles de sólidos suspendidos totales (SST) mayores a 30mg/L. Así mismo, la luz UV no deja un residual que evite que los microorganismos puedan repararse de los efectos destructivos y vuelvan a desarrollarse (Anaya, 2017).

## **Ozonificación**

El ozono elimina los microorganismos en unos cuantos segundos por un proceso denominado destrucción de celda. La ruptura molecular de la membrana celular dispersa el citoplasma celular en el agua y lo destruye. El ozono elimina por oxidación todos los elementos nocivos para la salud como son virus, bacterias y hongos, además de oxidar metales, los cuales pueden ser filtrados y eliminados del agua (Anaya, 2017).

### **1.7 Normatividad**

Desde 1958, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado periódicamente estándares internacionales del agua potable, que luego se llamaron guías para la calidad del agua potable. Estas guías internacionales buscan mejorar la calidad del agua potable y la salud humana al ser usadas como base para la

regulación de los estándares de agua potable en los países alrededor de todo el mundo.

Los estándares de agua potable son regulaciones establecidas por la legislación interna de cada país para controlar el nivel de contaminantes en el agua de consumo humano de cada nación. Los estándares nacionales de calidad de agua potable se concentran en el establecimiento de límites para regular los contaminantes que representan un alto riesgo para la salud pública, y al mismo tiempo, en su factibilidad según los recursos económicos y ambientales disponibles por cada país. Para fijar los estándares adecuados para el área potable, la OMS debe realizar una investigación y análisis posterior que le permitan verificar si estos cumplen su misión principal de proteger la salud pública.

Los estándares están divididos en grupos de contaminantes como los microbiológicos, físicos y organolépticos, químicos, hidrocarburos aromáticos, plaguicidas y compuestos radioactivos (Anaya, 2017).

Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2020 es aplicable en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Dentro de sus reglas generales establece la exención del pago del derecho por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas salobres; información para acreditar el tipo de actividad que generó la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación; así como reglas se establece la metodología para determinar el volumen de uso eficiente de aguas nacionales.

## **1.8 Alimentación al acuífero**

La recolección de agua de lluvia sería una de las soluciones más concebibles y viables para liberar la presión sobre la capa freática, ya que el sistema utiliza agua de lluvia natural sin afectar las fuentes de agua subterránea. El objetivo principal de

la recarga es aumentar el almacenamiento del agua subterránea para los momentos de necesidad. La recarga de un acuífero se encuentra condicionada por diversos factores de carácter geológico, climático, de ocupación del terreno, morfológico, topográfico, de calidad del agua disponible o conseguible, temporales en cuanto al momento que se dispone de agua, del precio del agua, administrativos, legales, etc. Tal es la cantidad de factores que influyen y en grado tan diverso que el paso de una modalidad de recarga a otra se puede considerar continuo, lo que se quiere decir con esto es que establecer el límite entre una modalidad de recarga y otra puede resultar muy difícil.

En regiones semiáridas, los sistemas de cultivo utilizan entre el 15% y el 30% del agua de lluvia; la mayor parte del agua se evapora (30-50%) y el resto deriva en escorrentía superficial (10-25%) y en agua de recarga subterránea (10-30%) (Gale, 2005). Según Custodio (1986) los métodos de recarga se pueden dividir en dos grandes grupos: Obras de superficie y obras en profundidad (FAO, 2013).

### **1.8.1 Obras de superficie**

La característica principal (en lo que a filtración se refiere) de las obras de recarga en superficie es la creación de una lámina libre. Es en esta zona dónde se produce la altura de agua necesaria para que el agua se infiltre.

#### **a) Balsas o lagunas**

Obras generalmente alargadas, aunque no siempre. Poco profundas y de gran superficie, con o sin fondo artificial de grava o arena. La infiltración se realiza predominantemente por el fondo. Pueden estar tanto dentro como fuera de los cauces de ríos. A veces no hay salida de agua, infiltrándose todo lo que llega. Normalmente se disponen dos balsas; en la primera se produce la sedimentación de las partículas en suspensión, de manera que se reduzca la colmatación en la segunda.

## **b) Canales, zanjas y surcos**

Suelen construirse siguiendo la topografía del terreno, en general con agua circulante hasta que se infiltra totalmente o hasta que sale la porción residual no recargada. Suelen ser poco profundos, la infiltración se produce por el fondo y también por los lados, con importancia variable dependiendo de la anchura.

A veces pueden ser zanjas que contienen un tubo perforado que conduce el agua y un relleno de grava. Son recomendables en terreno inclinado.

## **c) Fosas**

En estas obras la superficie lateral es importante en relación con la del fondo, de manera que domina la infiltración por los flancos, ejemplo zanjas trinchera o tinas ciegas.

## **d) Áreas de extensión de agua**

El agua se puede extender bien por inundación directa o en forma de riego con elevadas dotaciones superficiales. En ocasiones, en zonas áridas van unidas a obras extensas de recolección de aguas de escorrentía, a veces con cuencas de muchas decenas de km<sup>2</sup> o a sistemas de control de la erosión de torrentes. A veces se aprovecha el lecho de un río, opción especialmente aconsejable en zonas de alta capacidad de transporte de sedimentos asociado a avenidas esporádicas.

## **e) Actuaciones sobre lechos de ríos**

Se realizan para aumentar o mantener la capacidad de infiltración, extendiendo la superficie mojada, aumentando la rugosidad del lecho (mediante gaviones o maquinaria disminuyendo la pendiente), en general dejando suficiente velocidad al agua para que arrastre la materia en suspensión hacia aguas abajo (FAO, 2013).

## **1.8.2 Obras de profundidad**

Consideradas como aquellas obras cuyo objetivo es la recarga de agua de lluvia al acuífero, a través de la captación de escorrentías y de techos.

### **a) Pozos de absorción**

Es un sistema vertical de infiltración al subsuelo de las aguas provenientes de escurrimientos superficiales, a través de sus paredes y piso permeables. Dicho sistema proporciona al agua un tratamiento físico y biológico a través de la infiltración en un medio poroso (NOM-006-CNA, 1997).

Consisten en excavaciones generalmente cilíndricas de profundidad variable, que pueden estar rellenas o no de material, que se construyen para infiltrar el agua de lluvia directamente al suelo en espacios reducidos.

El funcionamiento hidráulico de estas obras consta de varias etapas. Inicia con la entrada del agua proveniente de una tormenta al pozo de absorción, que se puede efectuar a través de la superficie o desde una red de conductos. El agua una vez que entra al pozo, queda almacenada temporalmente para después infiltrarse paulatinamente.

Entre los principales objetivos buscados con la instalación de pozos de absorción

- Captar el flujo superficial proveniente de la precipitación pluvial.
- Infiltrar los escurrimientos superficiales directamente al suelo.
- Reducir el volumen escurrido.
- Permitir usos alternativos del agua infiltrada.
- Recargar los acuíferos.
- Mejorar la calidad del efluente (SAGARPA, 2020)

Estos pozos (también llamados de difusión) se caracterizan por no llegar al nivel de saturación.

La principal bondad de los pozos de absorción es la integración a condiciones restringidas, ya que son estructuras poco visibles, no tienen restricciones topográficas para su instalación y solo ocupan una pequeña parte del terreno, economizando su uso. Sin embargo, es recomendable su instalación sólo en lugares donde no es posible ubicar otros sistemas de infiltración, ya que tienen una capacidad de almacenamiento reducida en comparación con otras obras.

Una de sus principales desventajas es la colmatación, al retener las partículas finas presentes en el agua, para lo cual se requiere de mantenimiento durante la vida útil de la obra.

Para el relleno de pozos de absorción se utilizan piedras partidas, cantos rodados o gravas de granulometría uniforme y porosidad superior al 30 %.

El relleno se realiza, hasta 3/4 de su calado, con piedra de tamaño regular (0.2 m como mínimo) y se cubre, hasta una profundidad de 60 cm, con grava (1½") de diámetro, en el estrato subsecuente, Figura 1.7 (SAGARPA, 2020)



Figura 1.7. Materiales para el relleno de pozos. Fuente: (SAGARPA, 2020).

Es recomendable realizar un análisis cualitativo de las propiedades indicativas de la capacidad absorbente del suelo, como lo son textura, estructura, color, espesor de los estratos permeables y capacidad de infiltración. Las pruebas de infiltración permiten obtener un valor estimado de la capacidad de absorción de un determinado sitio (NOM-006CNA, 1997).

El estudio de factibilidad en pozos de absorción determina, en base a las características del suelo y del agua subterránea, la conveniencia de infiltrar el agua de lluvias hacia el suelo. Este estudio analiza las condiciones que hacen apto el sitio para la instalación de un pozo de absorción, tales como permeabilidad del suelo, riesgo de contaminación, capacidad de infiltración, profundidad del nivel freático y zonas que serán drenadas.

La factibilidad de un pozo por riesgo de contaminación, requiere conocer la naturaleza de las aguas, su potencialidad para contaminar el agua subterránea y uso del acuífero.

Para la localización de pozos de absorción, se procurarán áreas cubiertas con pasto u otro material vegetal, es decir, que casi no aporten materiales finos dado que es difícil establecer la vida útil un pozo de absorción. Por ello, es conveniente disponer de un sitio de reemplazo en caso de falla o término de la vida útil del sitio original (NOM-006-CNA, 1997).

Para la instalación de pozos de absorción, se consideran no aptos los sitios con una permeabilidad menor a 0.001 cm/s, o con una tasa de infiltración inferior a 20 mm/h o si existe algún estrato impermeable bajo el fondo del pozo, a menos de un metro de profundidad como lo establece el Ministerio de vivienda y urbanismo en 1996 (MINVU, 1996).

La elección del tipo de materiales utilizados y la capacidad de absorción del suelo son las principales características que se consideran en el diseño (SAGARPA, 2020).

## **Factibilidad**

Determina en base a los antecedentes disponibles sobre las características del suelo y del agua subterránea, si se puede infiltrar o no las aguas lluvias superficiales hacia el suelo y si es conveniente o no utilizar un pozo de infiltración.

Para decidir la factibilidad de un pozo es conveniente que el proyectista reúna los siguientes antecedentes:

Plano de ubicación de la obra, en el cual se indiquen la comuna, calle y número si corresponde o su relación a calles cercanas. Delimitación de las superficies que drenarán hacia el pozo, ubicación del mismo y sector al cual rebasarán los excesos en caso de producirse.

Certificado de la Dirección General de Aguas, o de su oficina en Región, que indique la profundidad más alta de la napa de agua subterránea en el lugar y la autorización a infiltrar aguas lluvias.

Certificado emitido por un laboratorio autorizado con los resultados de ensayos de infiltración en terreno, según el método del cilindro excavado.

Si el agua a infiltrar no proviene directamente desde los techos, sino que de otras áreas ya desarrolladas, en urbanizaciones consolidadas, se recomienda efectuar un análisis de calidad de una muestra de agua por parte de un laboratorio autorizado en el que se verifique que cumple con la Norma de Calidad del Agua para Diferentes Usos, en relación a usos recreacionales.

La autorización para el uso del suelo con estos fines deberá requerirse del propietario respectivo cuando éste no sea el ejecutor de la obra. El permiso deberá gestionarse según el caso ante el particular o la entidad pública fiscal o municipal correspondiente.

### **Capacidad de infiltración**

Es el volumen de agua capaz de infiltrarse en forma natural por unidad de superficie y unidad de tiempo (NOM-006-CNA, 1997). Esta relación depende de las condiciones de la superficie del suelo, de la cubierta vegetal, de las propiedades del suelo (porosidad y permeabilidad y del contenido de humedad presente).

Una estimación de la tasa de infiltración del terreno se puede inferir en base a la metodología del doble cilindro. Para su estimación, es necesario clavar en el suelo un par de cilindros metálicos concéntricos de 10 a 15 cm. Cuanto mayor sean los cilindros mejor serán los resultados obtenidos. Los cilindros se llenan de agua hasta un nivel adecuado (10-15 cm), teniendo cuidado de no alterar el material que hay en el fondo. Mediante una regla graduada, se mide en el cilindro interior el descenso del agua con el tiempo. El cilindro exterior evita que la medida realizada en el cilindro interior se vea afectada por la expansión lateral del bulbo de mojado, Figura 1.8.

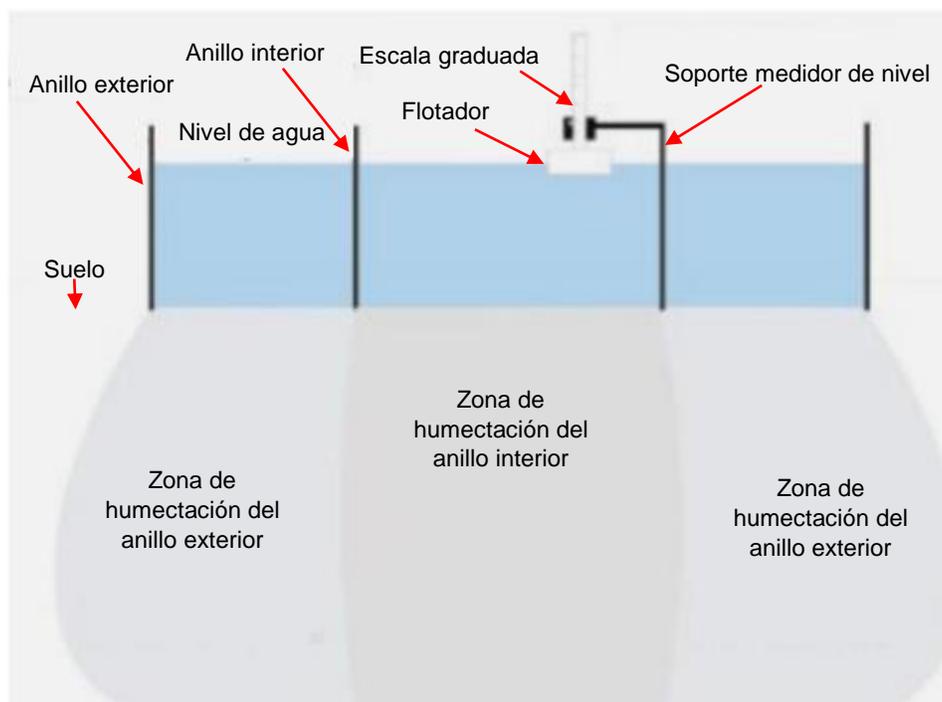


Figura 1.8. Esquema de funcionamiento de un infiltrómetro de doble anillo.

Fuente: (SAGARPA, 2020).

A continuación, se presenta el tipo y textura de suelo según su tasa de infiltración, Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Tipo y textura de suelo según su tasa de infiltración.

Tipo de suelo	Textura de suelo	Tasa de infiltración min/cm
Permeable	Arena gruesa	<0.4
	Arena media-gruesa	0.4 a 2
Semipermeable	Arena fina-margosa	2 a 6
	Marga arenosa-marga	6 a 12
	Marga-marga porosa	12 a 24
De poco permeable a impermeable	Marga arcillosa	24 a 48
	Terreno impermeable	>48

Fuente: (Lozano, 2018).

## Profundidad del pozo

Es en función del espacio disponible, los métodos constructivos, la profundidad de la capa freática, la naturaleza del suelo y las formaciones geológicas transversales, procurando que exista una distancia mínima de 1 m entre la base del pozo y la altura máxima estacional de la capa. Las profundidades habituales para este tipo de obra están entre 2 y 6 metros (MINVU, 1996).

## Volumen afluente

El volumen de agua de lluvia que podría infiltrarse ( $m^3$ ), para una lluvia de diseño con período de retorno y considerando una intensidad determinada ( $It$ ) y un tiempo ( $t$ ) se determina de acuerdo a la ecuación (2) (MINVU, 1996).

$$V_{afl} = 0.00125 * C * It * A * t \dots \dots \dots ec. (2)$$

Donde:

$V_{afl}$  = Volumen del afluente ( $m^3$ )

$C$  = Coeficiente de escurrimiento superficial

$It$  = Intensidad de la lluvia ( $mm/h$ ).

$A$  = Área total de captación ( $m^2$ ).

$t$  = Intervalo de la duración de lluvia ( $h$ ).

## Caudal de infiltración

Para un pozo de infiltración se estima el caudal de infiltración  $Q_i$  para un pozo de profundidad  $h$  de acuerdo a la ecuación (3) (MINVU, 1996).

$$Q_i = 0.001 * C_s * f * S \dots \dots \dots ec. (3)$$

Donde:

$Q_i$  = Caudal infiltrado ( $m^3/h$ )

$C_s$  = Factor de seguridad

$f$  = Tasa de infiltración (mm/h)

$S$  = Superficie interior del pozo en la cual se produce infiltración (m<sup>2</sup>)

### **Volumen infiltrado**

Para un pozo de absorción, de profundidad  $h$ , el volumen infiltrado  $V_i$  se estima de acuerdo a la ecuación (4) (MINVU, 1996).

$$V_i = 0.001 * C_s * I_t * A_i * t \dots \dots \dots ec. (4)$$

Donde:

$V_i$  = Volumen infiltrado (m<sup>3</sup>)

$A_i$  = Superficie interior del pozo en la cual se produce infiltración (m<sup>2</sup>)

$I_t$  = Infiltración básica o conductividad hidráulica saturada (mm/h)

$t$  = Intervalo de la duración de la lluvia (h)

$C_s$  = Factor de seguridad

En cualquier caso el valor de  $V_i$  puede disminuir por colmatación, para lo cual, Azzout *et. al.*, (1994), recomiendan considerar un factor de seguridad variable, que depende de la naturaleza de las aguas, la existencia de dispositivos de tratamiento de las aguas y el mantenimiento previsto. El factor de seguridad  $C_s$ , se puede estimar siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 1.9.

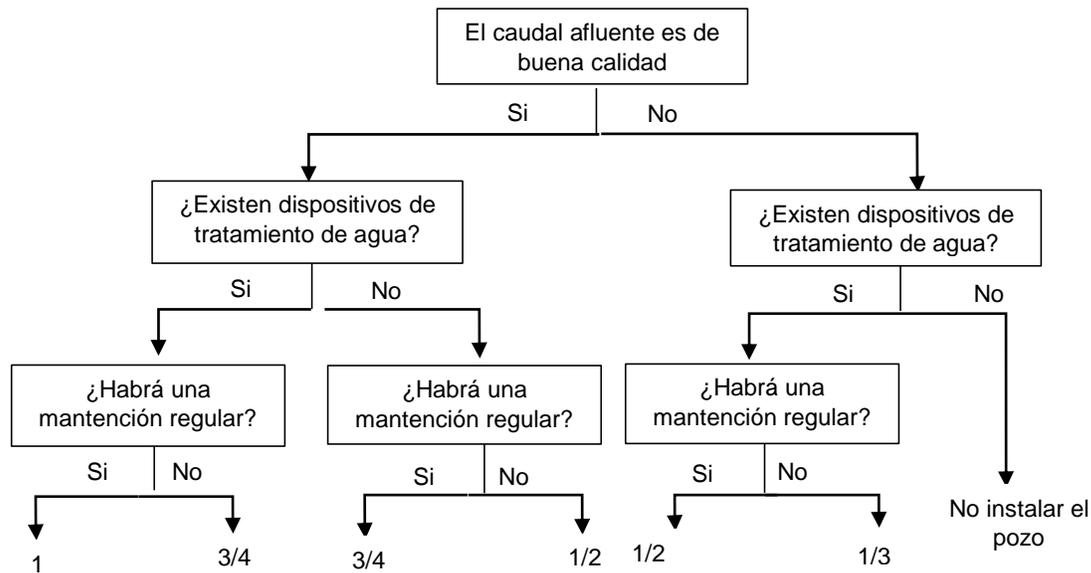


Figura 1.9. Factor de seguridad. Fuente: (SAGARPA, 2020).

### Volumen de almacenamiento

El volumen de almacenamiento  $V_{pozo}$  corresponde al volumen efectivo del pozo considerando la porosidad ( $\rho$ ) del material de relleno. Si el pozo se llena con material de porosidad  $\rho$ , el volumen de almacenamiento total del pozo se establece de acuerdo a la ecuación (5) y (6) tal como lo establece el Ministerio de vivienda y urbanismo en 1996.

$$V_{alm} = V_{afl} - 0.5 * Q_i * t \dots \dots \dots ec. (5)$$

$$V_{pozo} = V_{alm} / \rho \dots \dots \dots ec. (6)$$

Donde:

$V_{alm}$  = Volumen de almacenamiento ( $m^3$ )

$V_{afl}$  = Volumen del afluente ( $m^3$ )

$Q_i$  = Caudal infiltrado ( $m^3/h$ )

$t$  = Intervalo de la duración de lluvia (h).

$\rho$  = Porosidad

$V_{pozo}$  = Volumen del pozo ( $m^3$ )

### **1.8.3 Sistemas de recolección de escurrimiento superficial**

Incluyen una gran variedad de técnicas que tienen el objetivo de obstruir el escurrimiento superficial de las cuencas para concentrar el agua destinada a la infiltración y almacenamiento en acuíferos, logrando con esto también reducir significativamente el escurrimiento superficial y la evaporación del agua. Dentro de estas técnicas se encuentran las barreras que sobresalen de la superficie del terreno y las zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas.

En muchos casos, el propósito de los sistemas de recolección del escurrimiento superficial es aumentar la producción agrícola mediante la recarga de aguas subterráneas y como beneficio adicional, reducir la erosión del suelo.

### **1.8.4 Barreras que sobresalen de la superficie de la tierra**

Estas barreras actúan como obstáculo para el flujo superficial de agua en laderas. Reducen la velocidad del agua, provocan su infiltración al subsuelo o acuífero y aumentan la humedad del suelo ver Figura 1.10. Las barreras más utilizadas son los muros de contención y las crestas, que son pequeñas paredes, de piedra o tierra construidas generalmente a lo largo de las curvas de nivel. Generalmente, las barreras se utilizan en regiones áridas donde el escurrimiento es esporádico pero intenso, generando un alto escurrimiento superficial.



Figura 1.10. Barreras al flujo superficial para provocar la infiltración del agua.

Fuente: (Anaya, 2017).

### 1.8.5 Zanja de infiltración, surcos y tinas ciegas

Después de los periodos de alta precipitación, el escurrimiento en las laderas puede ser retenido en estas estructuras. Estas depresiones hechas por el hombre recolectan el agua del escurrimiento y la infiltran a través del fondo y las paredes, recargando el agua subterránea y/o aumentando la humedad del suelo Figura 1.11. Las zanjas de infiltración, surcos y tinas ciegas son adaptables.



Figura 1.11. Zanja de infiltración. Tecnologías y prácticas para pequeños productores agrarios. Fuente: (Anaya, 2017).

### 1.9 Determinación de la demanda de agua

La demanda es la cantidad de agua que necesita una persona, un animal o un cultivo desde el punto de vista biológico diariamente, además considera la cantidad total de agua requerida para satisfacer la necesidad establecida en el proyecto a ejecutar.

La expresión matemática para calcular la demanda de agua se determina mediante la ecuación (7) y (8) tal como lo establece Anaya en el 2017:

$$D_j = \frac{Nu \times Dot \times Nd_j}{1000} \dots \dots \dots ec. 7$$

$$D_{anual} = \sum_{j=1}^{12} D_j \dots \dots \dots ec. 8$$

Donde:

$D_j$ =Demanda de agua en el mes ( $m^3 \text{ mes}^{-1} \text{ poblacion}^{-1}$ )

$Nu$ =Número de beneficiarios del sistema

$Dot$ =Dotación ( $L \text{ persona}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ )

$Nd_j$ =Número de días del mes  $j$

$D_{\text{anual}}$ =Demanda de agua para la población

$j$ =Numero del mes (1, 2,3...12)

### **1.9.1 Demanda de agua para consumo humano**

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) la demanda se puede clasificar de acuerdo a su requerimiento mínimo: agua mínima para asegurar la hidratación y preparación.

### **1.9.2 Cálculo de precipitación pluvial neta**

A partir de la información disponible de precipitación pluvial ( $P$ ) mensual histórica se determina la precipitación pluvial neta ( $PN$ ), que se define como la cantidad de agua de lluvia que queda a disposición del sistema ( $SCALL$ ) una vez descontadas las pérdidas por factores como salpicado de las gotas de lluvia, velocidad del viento, evaporación, fricción, tamaño de la gota; considerados en un coeficiente de captación que se ha planteado del 85% (0.85) de acuerdo con la experiencia desarrollada en el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI-CP). La eficacia de la captación del agua de lluvia depende del coeficiente de escurrimiento de los materiales del área de captación, que varía de 0.1 a 0.9 Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Coeficientes de escurrimiento (Ce) de los diferentes materiales en el área de captación.

Área de Captación	Ce
Cubiertas superficiales, concreto	0.6-0.8
Pavimento	0.5-0.6
Geomembrana de PVC	0.85-0.90
Azotea	0.8-0.9
Azulejos teja	
Hojas de metal acanaladas	0.7-0.9
Captación en tierra	0.0-0.3
Suelo con pendientes menores al 10%	

Fuente: (Anaya, 2017).

A continuación, se presenta la fórmula para estimar la precipitación neta mediante la ecuación (9) y (10) tal como lo establece Anaya en el 2017:

$$PN = P * \eta_{captacion} \dots \dots \dots ec. 9$$

Donde:

PN=Precipitación pluvial neta (mm)

P=Precipitación pluvial promedio mensual histórica (mm)

$$\eta_{captacion} = Ce * 0.85 \dots \dots \dots ec. 10$$

Donde:

$\eta_{captacion}$ =Eficiencia de la captación de agua de lluvia

Ce=Coeficientes de escurrimiento

0.85 es el factor que considera pérdidas por factores como salpicado, velocidad del viento, evaporación, fricción, tamaño de la gota.

Cuando las precipitaciones medias mensuales sean menores de 25-30 mm y de baja intensidad ( $\text{mm h}^{-1}$ ), se recomienda no considerarlas, sobre todo si se presentan durante las épocas secas, ya que la cantidad y calidad del agua de lluvia no será de consideración para su almacenamiento.

### **1.10 Captación de agua de lluvia en techos**

El área de captación es la superficie destinada a la recolección del agua de lluvia (CEPIS/OPS, 2003). Generalmente es el techo (Dillaha y Zolan, 1985; Abdulla y Al-Shareef, 2009) y por lo tal, está limitada al área de éste (Sehgal, 2008). El área efectiva del techo y sus materiales influyen en la eficiencia de la recolección y la calidad del agua, por lo que se prefieren materiales lisos, limpios e impermeables (Abdulla y Al-Shareef, 2009). Materiales recomendados: concreto, tejas de barro, ladrillo, acero galvanizado, fibra de vidrio, policarbonato y acrílico (Arias, 1979; Dillaha y Zolan, 1985).

Para la captación de agua de lluvia es obligatorio tener presente que las zonas urbanas se caracterizan por poseer un alto nivel de contaminación del aire. La composición de la mezcla gaseosa suele ser nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (0.7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles como kriptón y argón (1%). En algunos casos pueden aparecer también azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los cuales al reaccionar con el vapor de agua formaran  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HNO}_3$ , el origen de la lluvia acida. Además, las superficies por las que escurre la lluvia, como las calles o techos, pueden tener niveles altos de químicos, hidrocarburos y otros contaminantes (Anaya, 2017).

La captación de agua de lluvia proveniente de techos de viviendas, establos, galpones, invernaderos y otras construcciones que existen en una finca debe destinarse prioritariamente al consumo humano y utilización doméstica, por sus

buenas características de calidad, normalmente mejor que el agua captada en otras estructuras (FAO, 2013).

Los techos, por su condición impermeable, producen un volumen de escorrentía cercano al volumen de lluvia. El hecho de que estén en posición elevada e inclinada facilita la captación y almacenamiento del agua. Canaletas colocadas en la parte inferior del plano inclinado recogen la escorrentía del techo y, por una tubería, la conducen hacia la estructura de almacenamiento, generalmente estanques o cisternas, de donde el agua es retirada para su utilización (FAO, 2013). Figura 1.12.



Figura 1.12. Ejemplos de captación de agua de lluvia de techos en diferentes situaciones. a) Cosecha de lluvia de un solo faldón del techo acoplado a cisterna en mampostería, en Brasil. b) Cosecha de lluvia de dos faldones, acoplado a cisterna en mampostería, en Brasil. c) Cosecha de lluvia en techo tipo cuatro faldones, acoplado a tanques de PVC, en El Salvador. Fuente: (FAO, 2013).

### 1.10.1 Determinación del área de captación de agua de lluvia

El área de captación, además de ser el lugar para coleccionar la mayor cantidad de agua, es el principal punto de contaminación. Existen diversas superficies para captar agua, una con mucho potencial es el techo (García, 2012).

El área de captación es la superficie sobre la cual cae la lluvia. Para este fin se utilizan los techos de casas habitación, escuela, bodegas, invernaderos y laderas

revestidas o tratadas con materiales que la impermeabilizan. Es importante que los materiales con que están construidas estas superficies no desprendan olores, colores ni sustancias que puedan contaminar el agua pluvial o alterar la eficacia de los sistemas de tratamiento. Es importante mencionar que solo se debe considerar la proyección horizontal del área de captación y se expresa en m<sup>2</sup> (Anaya, 2017).

### 1.10.2 Cálculo del área de captación

Por cada milímetro de agua de lluvia que cae sobre 1 m<sup>2</sup>, se obtendrá 1 L de agua. No obstante, existen coeficientes de ponderación que modifican el enunciado anterior debido a las pérdidas en las superficies de captación causadas por el rebote del agua al caer, como la absorción, evaporación del agua y la pendiente de las superficies.

La ecuación para calcular el área de captación se determina mediante la ecuación (11) tal como lo establece Anaya en el 2017:

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{\sum_{j=1}^n PN} \dots \dots \dots ec. 11$$

Donde:

$A_{ec}$ =Área efectiva de captación (m<sup>2</sup>)

$D_{anual}$ =Demanda anual (m<sup>3</sup>)

$PN$ =Precipitación Neta (m)

$j.. n$ =Meses cuya precipitación media es  $\geq 25$  mm

Cuando ya se dispone de la superficie fija que será destinada para la captación de agua de lluvia, lo primero será calcular el volumen de agua que puede ser captado, así definir la capacidad para cubrir la demanda.

Para determinar la demanda anual de agua se aplica la ecuación (12) como lo establece Anaya en el 2017:

$$D_{anual} = Aec \left( \sum_{j=1}^n PN \right) \dots \dots \dots ec. 12$$

En la Tabla 1.7 se muestra un análisis del volumen de agua de lluvia captado en litros, en relación con el área de captación y precipitación pluvial promedio.

Tabla 1.7. Volumen de agua de lluvia en relación con el área de captación.

Área de captación (m <sup>2</sup> )	Precipitación pluvial (mm)					
	1	10	100	1000	2000	3000
	Volumen captado en litros					
1	1	10	100	1000	2000	3000
10	10	100	1,000	10,000	20,000	30,000
100	100	1,000	10,000	100,000	200,000	300,000
300	300	3,000	30,000	300,000	600,000	900,000
500	500	5,000	50,000	500,000	1,000,000	1,500,000
700	700	7,000	70,000	700,000	1,400,000	2,100,000
900	900	9,000	90,000	900,000	1,800,000	2,700,000
1000	1,000	10,000	100,000	1,000,000	2,000,000	3,000,000
2000	2,000	20,000	200,000	2,000,000	4,000,000	6,000,000
3000	3,000	30,000	300,000	3,000,000	6,000,000	9,000,000
4000	4,000	40,000	400,000	4,000,000	8,000,000	12,000,000
5000	5,000	50,000	500,000	5,000,000	10,000,000	15,000,000
6000	6,000	60,000	600,000	6,000,000	12,000,000	18,000,000
7000	7,000	70,000	700,000	7,000,000	14,000,000	21,000,000
8000	8,000	80,000	800,000	8,000,000	16,000,000	24,000,000
9000	9,000	90,000	900,000	9,000,000	18,000,000	27,000,000
10000	10,000	100,000	1,000,000	10,000,000	20,000,000	30,000,000

Fuente: (Anaya, 2017).

## 1.11 Estructuras de almacenamiento de agua

El almacenamiento de agua de lluvia consiste en depositarla dentro de cisternas, estanques, reservorios y jagüeyes para abastecer una demanda calculada durante los meses de sequía y los de no sequía (Anaya, 2017).

El tanque de almacenamiento es el componente más costoso del sistema de captación de agua de lluvia (Brown *et al.*, 2005).

Para asegurar el abastecimiento, el criterio de diseño del volumen de la cisterna se obtiene al considerar la demanda de agua mensual que necesita una población durante la sequía más dos meses (coeficiente de seguridad), de acuerdo con el CIDECALLI. La pendiente de los taludes depende de las características de cohesión de los suelos y los ángulos de reposo del mismo. Para determinar el volumen de la cisterna se aplica la ecuación (13) como lo establece Anaya en el 2017:

$$V_{cisterna} = D_j \times M_{sequia+2} \dots \dots \dots ec. 13$$

Donde:

$V_{cisterna}$ : Volumen mínimo de la cisterna ( $m^3$ )

$D_j$  = Demanda mensual ( $m^3 \text{ mes}^{-1}$ )

$M_{sequia+2}$  = Meses con sequía más 2

Como medidas sanitarias el área de suministro debe mantenerse protegida de contaminantes, y la toma o boquilla solo debe ser manipulada para su limpieza, mantenimiento o muestreo.

Las cisternas o tanques de almacenamiento deben permanecer tapados para que su interior se mantenga libre de contaminantes; sus paredes internas han de ser revestidas en su totalidad de material impermeable, no tóxico, liso, fácil de lavar y desinfectar. En caso de existir uniones, estas deben ser de un material resistente a

la oxidación y la corrosión, que también sea fácil de asear. Si los contenedores del producto terminado cuentan con respiradero, este debe tener su propio filtro que impida la polución. De igual manera, las cisternas han de disponer de una tapa que permita el acceso de una persona a su interior, un sistema de vaciado y un dispositivo de cierre hermético. Se recomienda que los materiales en contacto directo con el agua sean de compuestos inertes y resistentes a la corrosión (Anaya, 2017).

En las cisternas o tanques cerrados no es recomendable para el consumo sin un previo tratamiento. También como ventaja de las instalaciones subterráneas, se puede decir que éstas tienen la ventaja de conservar el agua fresca a una temperatura casi constante y por ello las pérdidas por evaporación pueden ser despreciables o incluso nulas (Peraza, 2011). Es el mayor componente del sistema (Sehgal, 2008), el más importante (Li *et al.*, 2004) y el de mayor costo (Abdulla, 2009). Existen varios factores a considerar para el tanque de almacenamiento:

#### **1.11.1 Forma y ubicación**

Existe una cantidad ilimitada de opciones en cuanto a la forma (cilíndrica, rectangular, cuadrada). La ubicación de los tanques puede ser encima o debajo de la tierra. Las ventajas de hacerlo en la superficie son: la facilidad de detección de grietas y fugas, la extracción del agua por gravedad y/o bombeo, la facilidad de drenarlos para su limpieza y que generalmente cuestan menos que los subterráneos, incluso pueden elevarse para incrementar la presión del agua. Las desventajas son que quitan espacio y que se encuentran sujetas a condiciones ambientales. En cuanto a los tanques subterráneos, éstos pueden ahorrar espacio, pero la extracción de agua es más compleja (Abdulla, 2009).

#### **1.11.2 Tamaño**

Se determina por factores como el requerimiento de agua diario y la cantidad de agua de lluvia disponible. La cisterna debe proveer una capacidad adecuada para

recibir la cantidad de agua de lluvia requerida para eficientizar el sistema de captación pluvial y maximizar así la disponibilidad de agua durante los periodos secos (IDRC, 1990).

### **1.11.3 Materiales de construcción**

Gould y Nissen-Petersen (1999) describen diversas maneras y materiales para construir el depósito de almacenamiento. Algunos ejemplos son tanques superficiales, subterráneos y elevados, de tabique, cemento, ferricemento, metálicos y plásticos, de diversas formas y tamaños según la necesidad particular. Deben considerarse los costos de construcción o de compra. Los tanques comerciales generalmente son de materiales plásticos como polipropileno, polietileno de alta densidad, plástico reforzado con fibra de vidrio, acero galvanizado, y aluminio. Sin embargo, los tanques que se fabrican en el lugar como los hechos de concreto (Sehgal, 2008) y de ferricemento (Dillaha, 1985; IDRC, 1990; Sehgal, 2008) son otra alternativa, y también los hay de piedra.

La estructura de almacenamiento ideal es aquella que cumple con los siguientes requisitos:

- Responde a las necesidades del tipo de uso previsto (doméstico, animal o vegetal) en términos de volumen almacenado y de calidad de agua requerida en cada caso.
- Permite mantener, alterar mínimamente y ser capaz hasta de mejorar la calidad del agua captada, por medio de sistemas de filtro, decantación u otro mecanismo.
- Es segura y ofrece facilidades de manejo y mantenimiento.
- Es de bajo costo y fácil de construir, de tal forma que puede ser asumida por la población afectada por la escasez de agua (FAO, 2013).

La esorrentía que proviene de techos, generalmente más limpia que el agua captada de otras fuentes, debe ser almacenada preferencialmente en cisternas o estanques cerrados. Su utilización prioritaria debe ser el consumo doméstico, consumo animal en pequeña escala, como segunda opción, y, finalmente, si hay

disponibilidad, consumo vegetal en pequeña escala (huertos caseros), en régimen de “riego de salvación”. Para finalidades de uso que suponen volúmenes más grandes de consumo de agua, las cisternas y estanques son menos económicos.

En regiones semiáridas con lluvias intensas ocasionales o en regiones subhúmedas, donde hay agua suficiente, pero interrumpida por periodos o estaciones secas, es conveniente prever excedentes que se producen de la captación de techos y almacenamiento en cisternas, estanques o barriles ver Figura 1.13. Una vez sobrepasada la capacidad de almacenamiento para uso doméstico en estructuras más costosas, tales como estanques y cisternas, el agua excedente puede ser derivada a estructuras de almacenamiento más baratas; por ejemplo, estanques excavados, y ser destinada a otros usos. De ese modo, se aprovechará más eficazmente la estructura de captación y el agua captada (Wambeke *et.al.*, 2017).

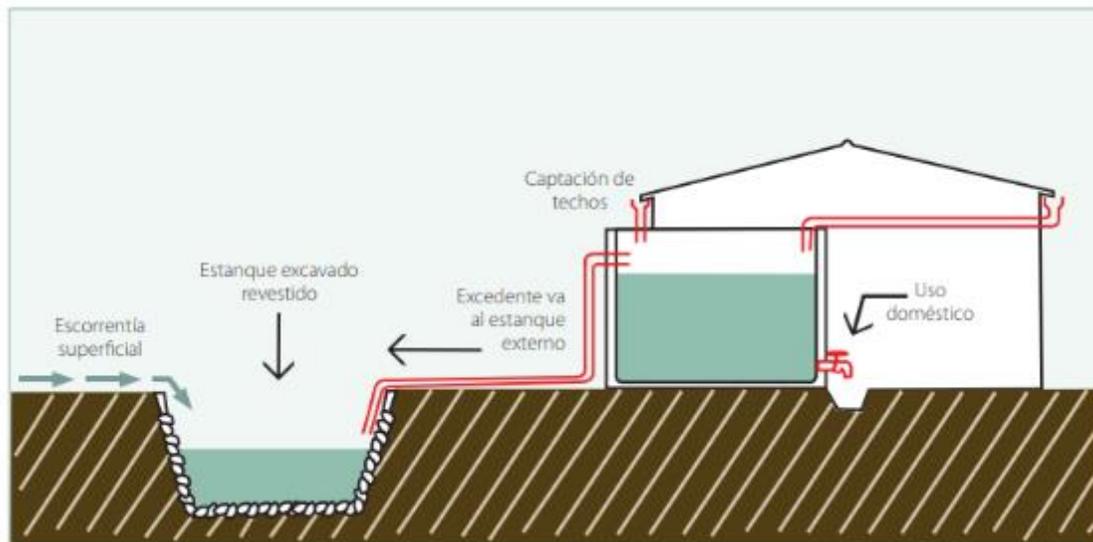


Figura 1.13. Conducción de excedentes de la captación de techos para estructuras más simples y baratas, para aprovechar mejor la estructura de captación. Fuente: (FAO, 2004).

#### **1.11.4 Beneficios de la recolección de agua de lluvia**

Las ventajas asociadas de la recolección de agua de lluvia son que:

- Puede reducir la carga sobre el suministro público de agua, que es la principal fuente de agua de la ciudad.
- Se puede utilizar en caso de emergencia (es decir, incendio).
- Es rentable ya que el costo de instalación es bajo y puede reducir los gastos que uno tiene que pagar por las facturas de agua.
- La utilización del agua de lluvia captada libera en gran medida la dependencia de las fuentes de agua subterránea (Rahman et al., 2014).

#### **1.12 Pluviometría**

De la información sobre las variables climáticas se centra la atención en la pluviometría, por estar dirigido el trabajo a la captación de agua de lluvia.

Para la misma se consultaron los informes que periódicamente emite la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) correspondientes a los años de 2003 hasta 2019, por ser los disponibles en el sitio web de la misma.

En la Tabla 1.8 se muestra el histórico de la precipitación pluvial mensual en milímetros, durante el periodo 2003 al mes de abril de 2019.

Tabla 1.8. Lluvia mensual en mm periodo 2003-2019.

<b>Año/Mes</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ag</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>ANUAL</b>
2003	2.1	0.7	5	14.5	17.6	154.7	130.7	141.8	161	65.4	14.5	0	708
2004	16.1	0	0	11.4	60.4	176.9	119.8	155.6	133.6	70.8	4.9	1.6	751.1
2005	9.4	3.4	4.5	8.9	16.3	58.2	145.5	149.8	71.6	72.4	8	1.1	549.1
2006	3.1	1.6	6.8	24.6	76.1	67.3	137.9	170.4	124.6	74.1	31.9	0.7	719.1
2007	5	13.3	17	28.5	55.7	125	206.8	184.3	163.9	65.9	8.8	2.1	876.3
2008	0.2	1.1	1.9	32.1	25.9	154.1	158.7	171.9	99.4	34.3	0	0	679.6
2009	10	5.2	9.8	3.6	57.3	108.6	98.6	123	216.1	87.7	1.7	4.1	725.7
2010	35.1	124.3	0.4	12.3	22.8	89.7	243.7	161.5	114.3	3.8	1.8	0	809.7
2011	0.7	0.3	2.2	20.8	24.7	131.9	221	116.9	63.5	59.1	16.2	0.3	657.6
2012	3.6	33.6	14.4	9	20.1	130.1	180.7	130.9	78.2	14.8	12.5	0.6	628.5
2013	4.1	0.9	7.7	11.9	56.9	124.2	161.1	133	221.9	71.7	42.1	7.6	843.1
2014	3.1	2.9	6.1	17.9	111.2	183.5	142.5	134.1	148.2	104.1	11.1	20	884.7
2015	1.8	11.4	61.5	15.9	128.7	128.1	141	117	168.2	57.3	17.5	10.2	858.6
2016	14.2	5.8	37.4	18.5	76.7	169.8	171.2	200.3	140.4	31.7	45.3	3.5	914.8
2017	0.1	1.1	17	14.3	86.6	119.7	174.5	209.5	186.3	53	3.3	0.1	865.5
2018	11.5	17.5	6.8	41.7	89.5	241.2	112.6	223.9	172.2	112.6	64.5	4.8	1098.8
2019	4.1	5.8	6.7	7.3	33.3	152	181.9	138.5	140.1	133.4	33.5	1	837.6
<b>Mensual</b>	7.51	13.46	12.07	17.25	56.46	136.18	160.48	156.61	141.3	65.42	17.76	3.54	

Fuente: (CONAGUA, 2019).

### 1.13 Contaminación química por metales pesados

Los metales pesados son elementos con densidades, pesos y números atómicos superiores a  $5\text{g/cm}^3$  44.956 y 20 respectivamente, excepto los elementos de los grupos alcalino, alcalinotérreo, lantánidos y actínidos. Los metales pesados se pueden clasificar en esenciales entre los cuales tenemos Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn, V, entre otros los cuales cumplen alguna función biológica a concentraciones traza y en no esenciales como Cr, Cd, Hg, Pb, As, Sb, los mismos que no cumplen ninguna función biológica conocida (Mejía, 2006).

De acuerdo con la Agencia Internacional para la investigación sobre el cáncer clasifica las sustancias de acuerdo con su condición carcinogénica. En el grupo 1 (Carcinógeno humano) se encuentran los compuestos del cromo (VI), arsénico orgánico e inorgánico, cadmio, fierro (durante exposición ocupacional) y níquel; en el grupo 2A (Probable carcinógeno humano) plomo inorgánico y sus compuestos (Tamay, 2019).

Se han realizado investigaciones sobre la contaminación de agua de lluvia por metales como:

Sultana y Choudhury en su artículo "*Rainwater harvesting for domestic consumption in bangladesh: sizing and construction of storage cisterns*" publicado en 2010, donde se proponen algunas pautas para la recolección económica de agua de lluvia para consumo doméstico en áreas urbanas de Bangladesh, donde obtienen una concentración de 0.19 mg/L de Fe.

Ospina y Ramírez en su artículo "*Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia*" publicado en 2014 cuya investigación comprendió ocho estaciones de muestreo donde se recogió agua de lluvia sin contacto con superficie alguna, obtienen para hierro y aluminio los valores mostrados en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9. Valores de Al y Fe obtenidos por Ospina y Ramírez en 2014.

Parámetro (mg/L)	Agua de lluvia a cielo abierto (Muestras)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Al	0.03	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02
Fe	0.06	0.06	0.09	0.09	0.06	0.07	0.10	0.07

Fuente: (Ospina y Ramírez, 2014).

Zdeb y colaboradores en su artículo “*The Quality of Rainwater Collected from Roofs and the Possibility of Its Economic Use*” publicado en 2020 quienes durante un par de años recolectaron muestras de lluvia desde la primavera hasta el otoño de los siguientes materiales para techos: Techo de concreto tejas, tejas de cerámica, chapa de acero galvanizado y terraza con revestimiento de epoxi, Figura 1.14 y 1.15.

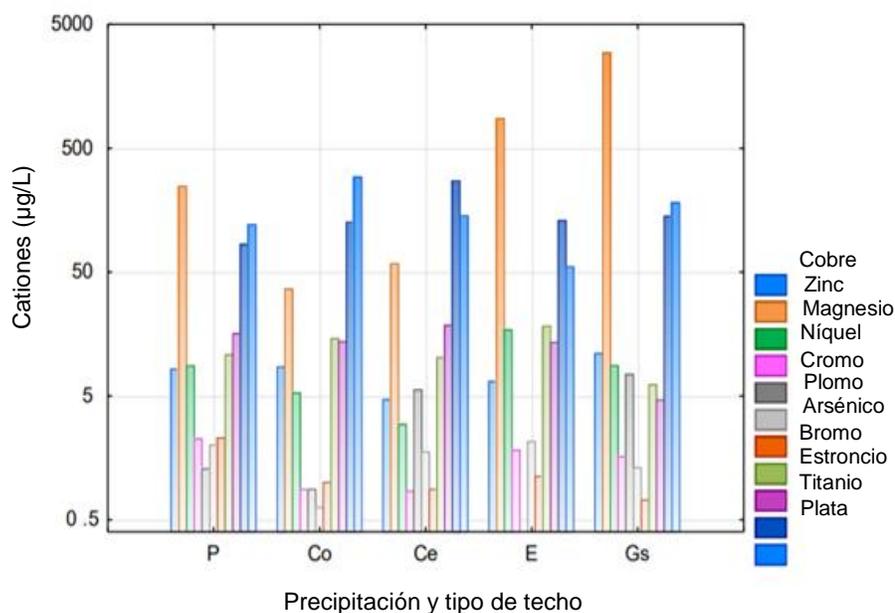


Figura 1.14. Concentración media de cationes en el agua de lluvia en 2015.  
Fuente: (Zdeb *et al.*, 2020).

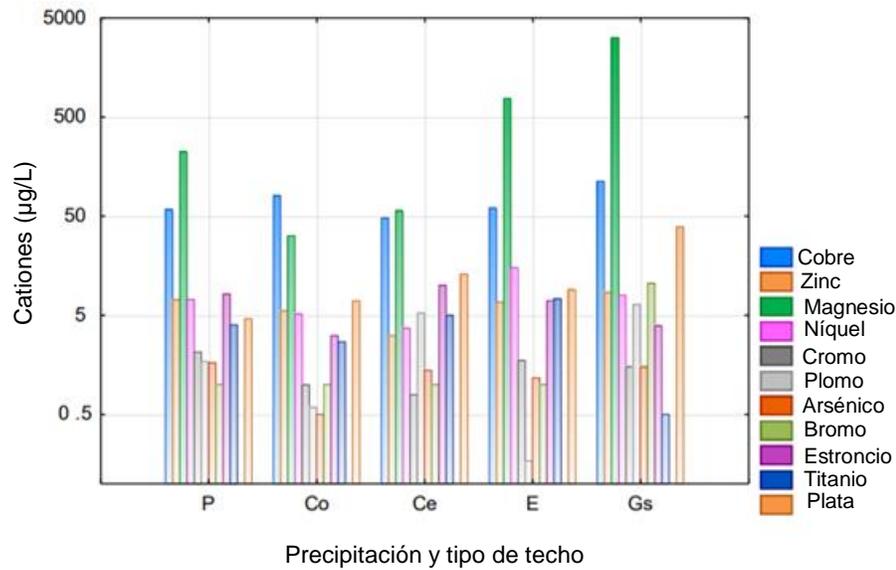


Figura 1.15. Concentración media de cationes en el agua de lluvia en 2016.  
Fuente: (Zdeb *et al.*, 2020).

Donde:

P=es la precipitación a cielo abierto.

Co=Techo de tejas de concreto.

Ce=Tejas de cerámica;

Gs=Lamina de acero galvanizado

E=material recubierto de epoxi.

### 1.14 Calidad del agua de lluvia

La calidad del agua de lluvia recolectada es un tema importante, ya que podría utilizarse para beber. La calidad del agua capturada del techo depende tanto de la calidad del techo como de las condiciones ambientales circundantes, es decir, el clima local, la contaminación atmosférica, etc. (Farreny *et al.*, 2011).

Se deben realizar pruebas para verificar su viabilidad y aplicabilidad antes de usarlo como agua potable. Investigaciones previas mostraron que la calidad del agua

recolectada no siempre cumplió con los límites estándar debido a la recolección sin protección (Despins *et al.*, 2009); (Radaideh *et al.*, 2009).

La evaluación cualitativa es importante antes de introducir el agua de lluvia recolectada como agua potable (Rahman *et al.*, 2014).

El monitoreo del agua de lluvia recolectada es muy preocupante ya que es un riesgo potencial para la salud debido a la presencia de contaminantes químicos y microbiológicos (Vialle *et al.*, 2011). Por lo tanto, la evaluación de la calidad del agua recolectada es esencial antes de su uso (Rahman *et al.*, 2014).

### **1.14.1 Parámetros físicos**

#### **a) Potencial de hidrógeno (pH)**

El pH se define en términos de la actividad relativa de los iones de hidrógeno en la disolución:

$$pH = -\log a_H = -\log(m_H\gamma_H/m^0)$$

Donde  $a_H$  es la actividad relativa del ión hidrógeno (en base molal);  $\gamma_H$  es el coeficiente de actividad molal del ión hidrógeno  $H^+$  a la molalidad  $m_H$ , y  $m^0$  es la molalidad estándar. La magnitud pH es considerada como una medida de la actividad de los iones hidrógeno en la disolución (NMX-AA-008-SCFI-2016).

Sultana y Choudhury (2010) obtienen para una muestra de agua de lluvia de escurrimiento un valor de pH de 6.5.

Ospina y Ramírez (2014) obtienen valores de pH que van de 4.7 a 7.3 en agua de lluvia a cielo abierto.

Rahman y colaboradores en su artículo “*Sustainability of Rainwater Harvesting System in terms of Water Quality*” publicado (2014) obtiene valores de pH para el

agua recolectada de un techo que oscilan entre 6.3 a 7.7, para el agua almacenada en un tanque el valor de pH entre 6.4 a 7.8 ver Figura 1.16.

Zdeb y colaboradores (2020), obtienen valores de pH en agua de lluvia a cielo abierto con valores de pH entre 5 y 6 valores que son más bajos de los que se obtuvo del agua de lluvia recolectada de diferentes techos, como se puede ver en la Figura 1.17. Dónde: (P) es la precipitación a cielo abierto, (Co) Techo de tejas de concreto, (Ce) Tejas de cerámica, (Gs) Lamina de acero galvanizado y (E) Material recubierto de epoxi.

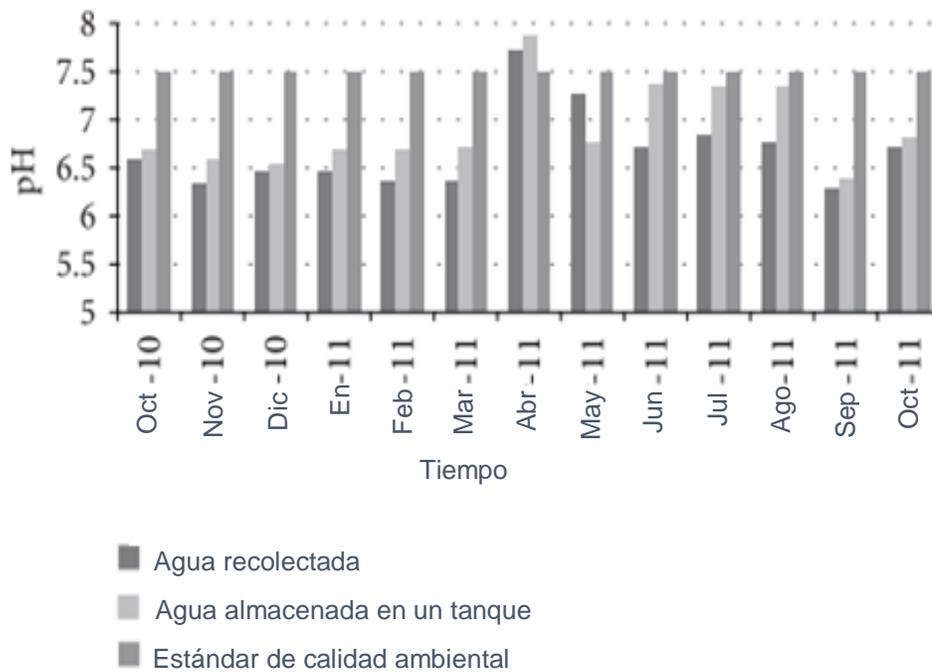


Figura 1.16. Variación del pH en el tiempo. Fuente: (Rahman *et al.*, 2014).

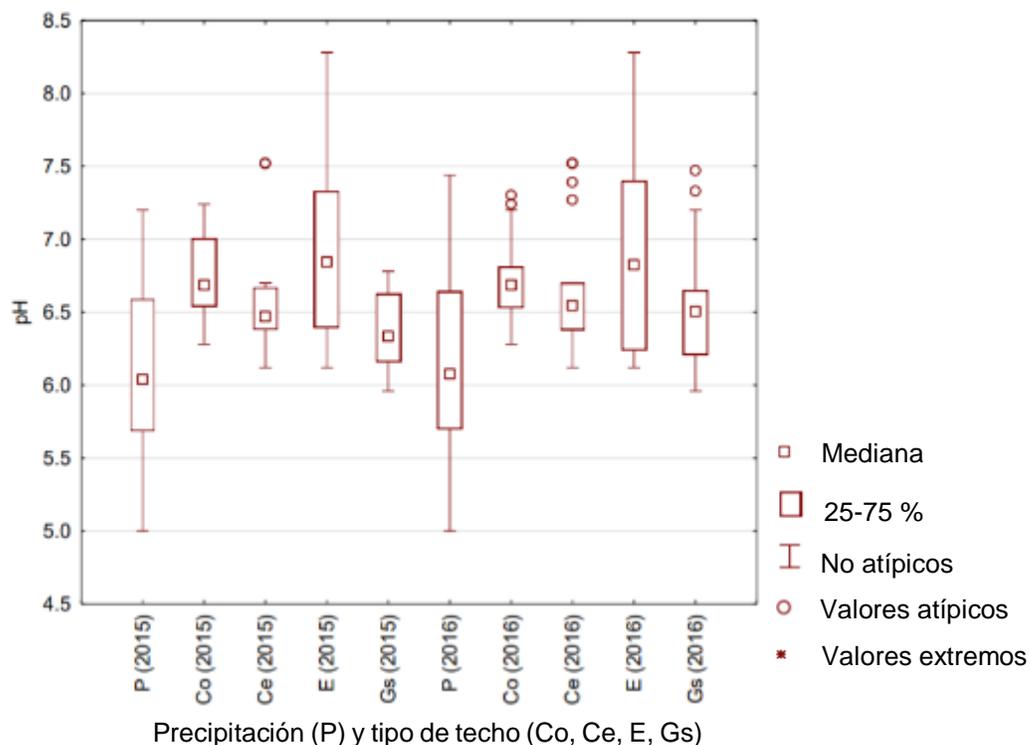


Figura 1.17. Valores de pH del agua de lluvia. Fuente: (Zdeb *et al.*, 2020).

## b) Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de 1,5  $\mu\text{m}$  a una temperatura de 105  $^{\circ}\text{C} \pm 2$   $^{\circ}\text{C}$ .

Farzana Sultana Ifta y Choudhury en un artículo publicado en 2010 obtienen una concentración de sólidos disueltos totales de 48.7 mg/L para una muestra de escurrimiento; para Rahman y colaboradores en su artículo publicado en 2014 obtienen entre 50 y 200 mg/L aproximadamente para agua recolectada de un techo, y para el agua contenida en un tanque los SDT oscilan de 0 a 100 mg/L aproximadamente Figura 1.18.

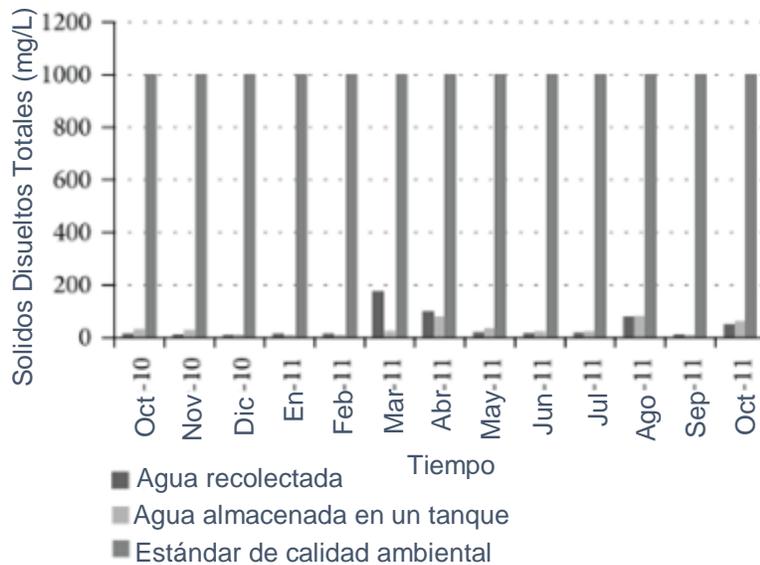


Figura 1.18 Variación de Sólidos Disueltos Totales en el tiempo. Fuente: (Rahman *et al.*, 2014).

### 1.14.2 Parámetros químicos

#### a) Cloruros

El ion cloruro es uno de los iones inorgánicos que se encuentran en mayor cantidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, su presencia es necesaria en aguas potables. En agua potable, el sabor salado producido por la concentración de cloruros es variable. En algunas aguas conteniendo 25 mg Cl<sup>-</sup>/L se puede detectar el sabor salado si el catión es sodio. Por otra parte, éste puede estar ausente en aguas conteniendo hasta 1g Cl<sup>-</sup>/L cuando los cationes que predominan son calcio y magnesio (NMX-AA-073-SCFI-2001).

La concentración de cloruros en aguas residuales de origen municipal es de 70mg/L y en agua de pozos artesanos se han encontrado concentraciones hasta de 30 mg/L (Rossainz, 2017); por lo que probablemente concentraciones mayores a éstas, podrían causar daños a estructuras metálicas y evitar el crecimiento de plantas. Las altas concentraciones de cloruro en aguas residuales, utilizadas para el riego en

campos agrícolas, deteriora en forma importante la calidad del suelo (NMX-AA-073-SCFI-2001).

Es entonces importante determinar la concentración de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas en un amplio intervalo de concentraciones (NMX-AA-073-SCFI-2001). Farzana Sultana Ite y Choudhury (2010) obtienen una concentración de cloruros de 15.128 mg/L; también Ospina y Ramírez (2014) investiga la concentración de éste ion en el agua de lluvia, Tabla 1.10.

Tabla 1.10. Cloruros en agua de lluvia.

Parámetro (mg/L)	Agua de lluvia a cielo abierto (Muestras)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Cloruros	15	17	14	10	12	8	6	8

Fuente: (Ospina y Ramírez, 2014).

## b) Nitratos y nitritos

Son compuestos iónicos que se encuentran en la naturaleza, formando parte del ciclo del nitrógeno. El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) es la forma estable de las estructuras oxidadas del nitrógeno, y a pesar de su baja reactividad química puede ser reducido por acción microbiológica. El nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), es oxidado con facilidad por procesos químicos o biológicos a nitrato, o bien reducido originando diversos compuestos.

En los suelos, los fertilizantes y vertidos residuales conteniendo nitrógeno orgánico son descompuestos para dar en un primer paso amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), que a continuación es oxidado a nitrito y a nitrato. Parte de este nitrato es absorbido por las plantas, que lo emplean en la síntesis de proteínas vegetales, pudiendo el resto pasar a las aguas subterráneas.

En la atmósfera, la formación de compuestos nitrogenados tiene lugar como consecuencia de la combinación de nitrógeno y oxígeno molecular a altas temperaturas producidas por fenómenos naturales como las descargas eléctricas durante las tormentas o la actividad volcánica, o bien producidas por combustiones de vehículos y procesos industriales. Los óxidos de nitrógeno así formados se oxidan dando lugar a nitratos. Los niveles de concentración de nitrato en la atmósfera varían enormemente de unas zonas a otras del planeta, encontrándose en las zonas de menor concentración un rango de 0.1-0.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y en las zonas de mayor concentración valores de 1-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En zonas industriales se han encontrado valores de hasta 5 mg/L en agua de lluvia (Almudena y Lizaso, 2001).

La concentración de nitratos en aguas superficiales normalmente es baja (0-18 mg/L), pero puede llegar a alcanzar elevados niveles como consecuencia de las prácticas agrícolas o residuos urbanos y ganaderos (especialmente granjas), o por la aportación de aguas subterráneas ricas en nitratos (éstas con concentraciones cada vez más elevadas) (Almudena y Lizaso, 2001). Sultana y Choudhury (2010), obtiene una concentración de 4.70 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ ; Ospina y Ramírez (2014) obtiene las siguientes concentraciones tanto para nitratos como para nitritos, en agua de lluvia a cielo abierto, Tabla 1.11

Tabla 1.11. Nitratos y nitritos en agua de lluvia.

Parámetro (mg/L)	Agua de lluvia a cielo abierto (Muestras)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$\text{NO}_3^-$	0.30	0.30	0.40	0.60	0.80	0.20	0.80	0.20
$\text{NO}_2^-$	-	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00

Fuente: (Ospina y Ramírez, 2014).

Zdeb y colaboradores (2020), obtienen una concentración de  $\text{NO}_2^-$  y  $\text{NO}_3^-$  como se ve en la figura 1.19 y 1.20 respectivamente. Dónde: (P) es la precipitación a cielo

abierto, (Co) Techo de tejas de concreto, (Ce) Tejas de cerámica, (Gs) Lamina de acero galvanizado y (E) Material recubierto de epoxi.

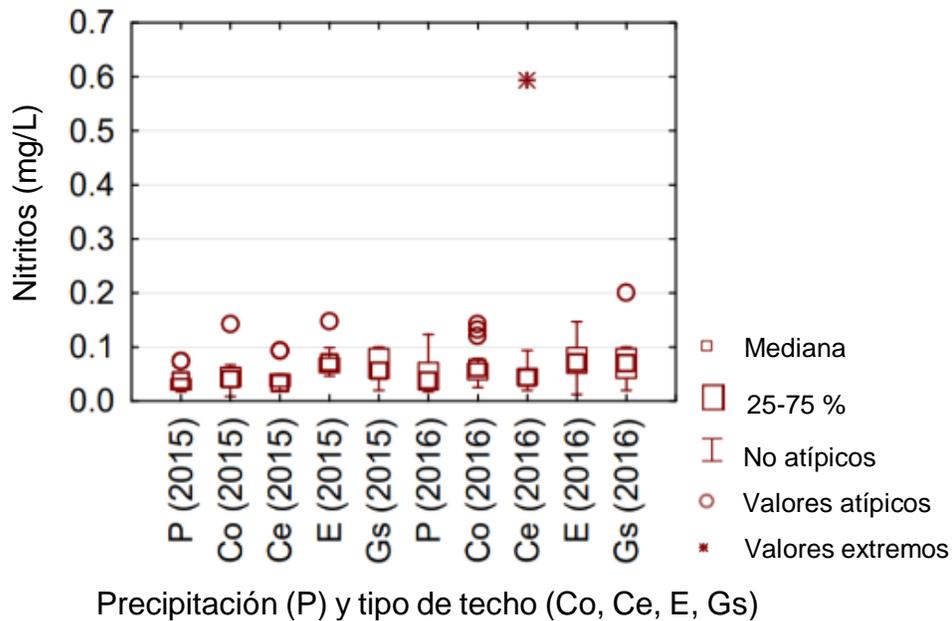


Figura 1.19. Datos estadísticos del contenido de nitritos en el agua de lluvia analizada. Fuente: (Zdeb *et al.*,2020).

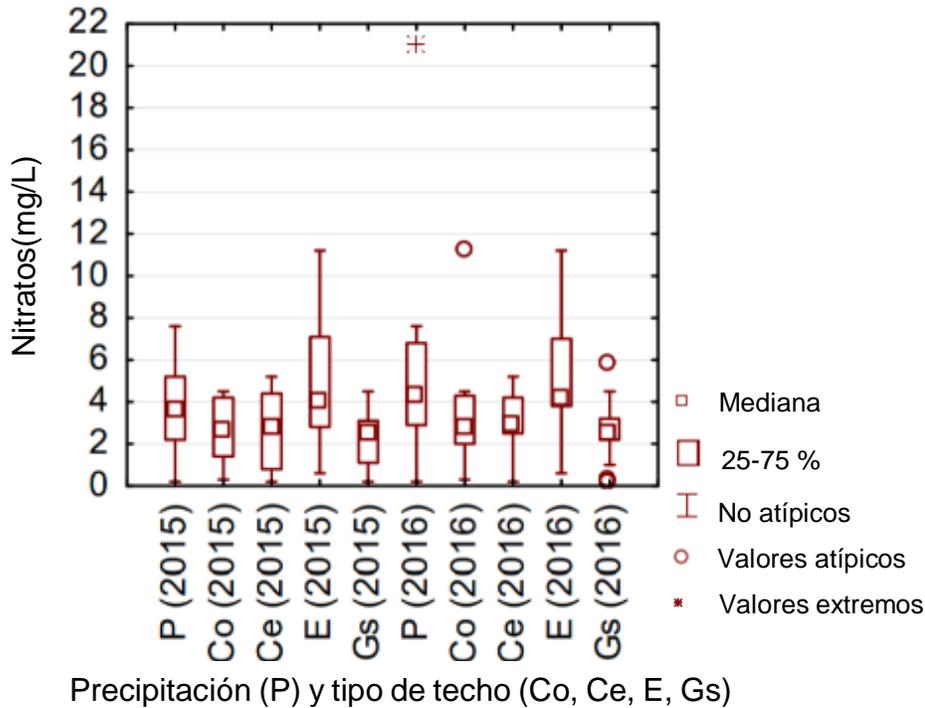


Figura 1.20 Datos estadísticos del contenido de nitratos en el agua de lluvia analizada. Fuente: (Zdeb *et al.*,2020).

### 1.14.3 Parámetros microbiológicos

#### a) Coliformes Totales

La presencia y el grado de contaminación fecal es un factor importante en la evaluación de la calidad de un cuerpo de agua. Examinar muestras de agua para detectar presencia de organismos del grupo de las bacterias coliformes (los cuales normalmente habitan el intestino humano y de otros animales de sangre caliente), provee un indicador de contaminación. Ya que la habilidad de algunos organismos miembros del grupo de las bacterias coliformes de sobrevivir en el agua es limitada, su cantidad puede también ser utilizada para estimar el grado de contaminación fecal reciente.

Los organismos coliformes totales son organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35 °C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 h.

Los organismos coliformes fecales (termotolerantes) son organismos coliformes los cuales tienen las mismas propiedades fermentativas en un periodo de 24 h a 44,5 °C ± 0,2 °C.

*Escherichia coli* (*E. coli*) son organismos coliformes fecales (termotolerantes) como los descritos anteriormente, los cuales además producen indol a partir de triptófano en un lapso de 24 h a 44,5 °C ± 0,2 °C (NMX-AA-042-SCFI-2015).

A continuación, se presenta una clasificación de Coliformes Totales en las fuentes de agua Tabla 1.12.

Tabla 1.12. Clasificación de los Coliformes Totales en las fuentes de agua.

Número de Coliformes Totales en 100 mL de agua (UFC/100 mL)	Observación
0	Cumple con las normas de la OMS
1-10	Riesgo bajo para la salud
10-100	Riesgo intermedio
100-1000	Riesgo alto
>1000	Riesgo muy alto

Fuente: (Bautista *et al.*, 2013).

Ospina y Ramírez (2014) obtiene las siguientes concentraciones para las ocho muestras, Tabla 1.13.

Tabla 1.13. Coliformes Totales en agua de lluvia.

Parámetro (UFC/100mL)	Agua de lluvia a cielo abierto (Muestra)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Coliformes Totales	34.48	241.96	241.96	44.11	241.96	3.41	241.96	3.41

Fuente: (Ospina y Ramírez, 2014)

Rahman y colaboradores (2014) obtienen los siguientes valores de Coliformes Totales, Figura 1.21.

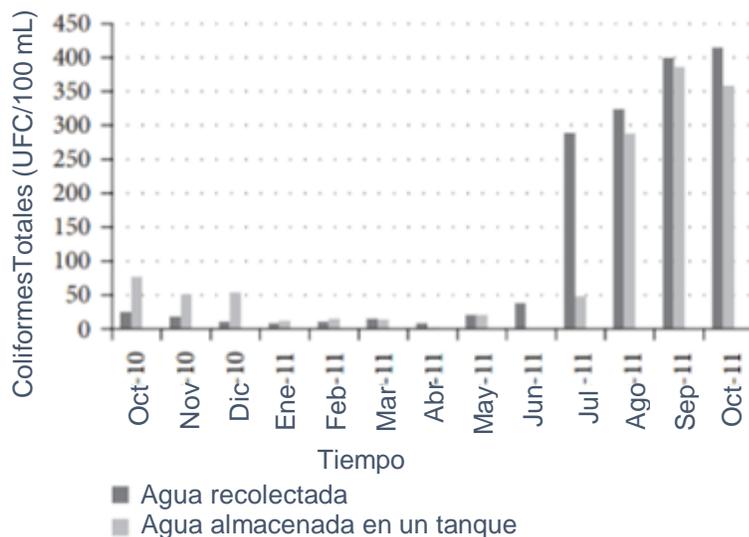


Figura 1.21. Variación de Coliformes totales en el tiempo. Fuente: (Rahman et al., 2014)

Bautista y colaboradores en su artículo *“Calidad microbiológica del agua obtenida por condensación de la atmósfera en Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México”* publicado en 2013 donde llevaron a cabo un monitoreo de la variación de Coliformes Totales, que contempla nueve muestras de agua atmosférica condensada observadas de día y de noche durante los meses de lluvia y de estiaje, Figura 1.22.

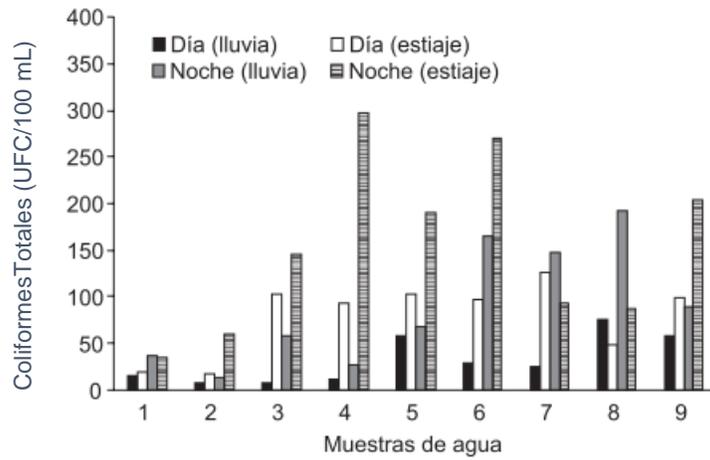


Figura 1.22. Presencia de Coliformes Totales en los muestreos de agua atmosférica condensada en la Ciudad de México en muestras de 100 mL. Fuente: (Bautista *et al*, 2013).

## 2 MÉTODO

En la Figura 2.1. Se presentan los métodos de captación de agua de lluvia para usos secundarios y alimentación del acuífero en el Instituto Tecnológico de Toluca.

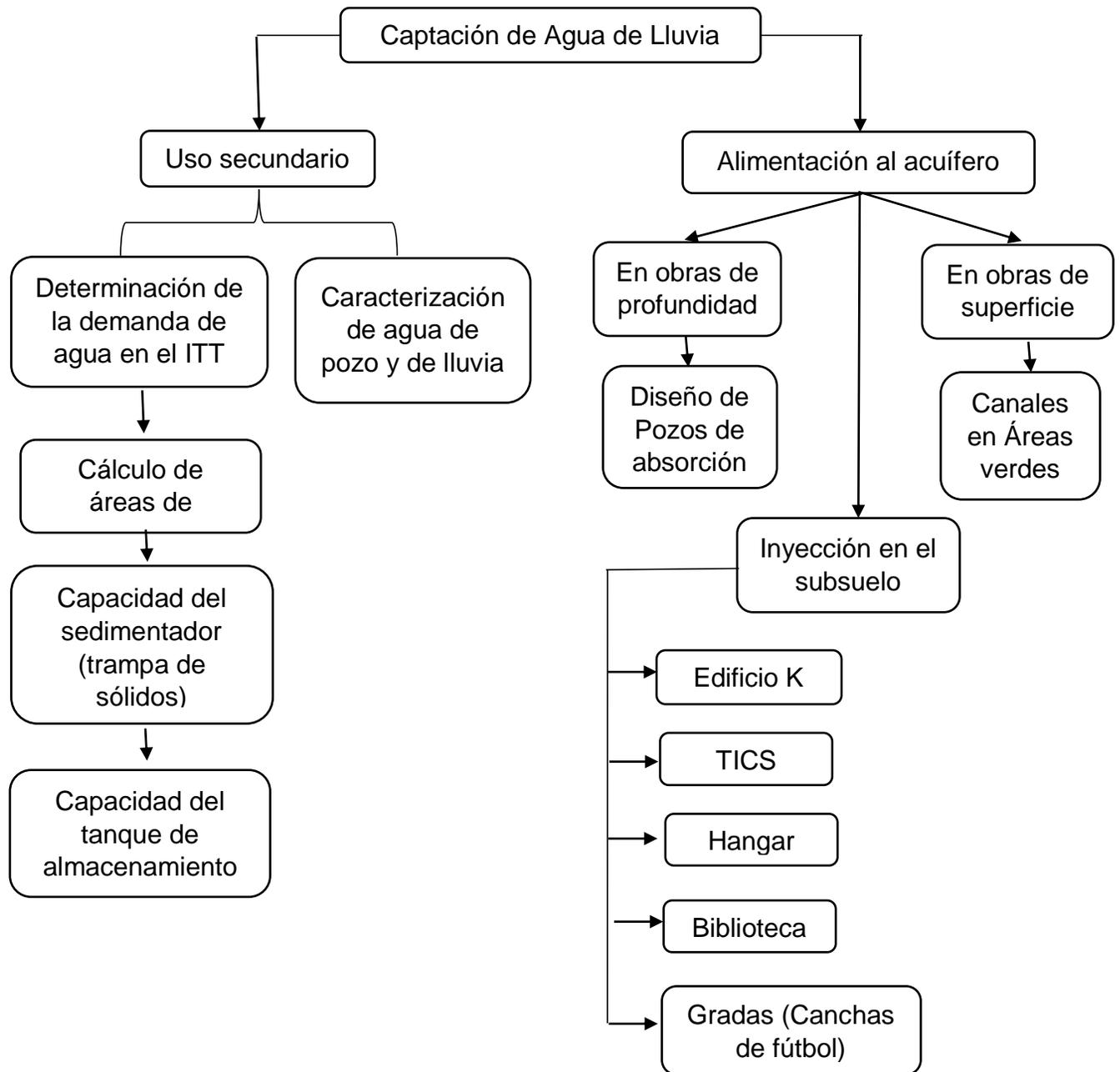


Figura 2.1. Diagrama de flujo de captación de agua de lluvia.

## 2.1 Captación de agua de lluvia

El sitio donde se estableció el sistema de captación de agua de lluvia para alimentación al acuífero en el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) fueron la superficie de los techos del hangar, de las gradas de fútbol, del edificio de Tics, de la Biblioteca y del edificio K.

Se habilitaron los canales que descargan parcialmente el agua de lluvia en las áreas verdes del campo de prácticas de fútbol y de los estacionamientos del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental (LIIA) y de Ingeniería Logística y se hizo el diseño de pozos de absorción para captar las escorrentías excedentes de la cinta asfáltica del campo de prácticas de fútbol y de los estacionamientos del (LIIA) e Ingeniería en Logística.

Se habilitó la cisterna del edificio de Ingeniería Mecatrónica para aprovechar el agua de lluvia de este edificio en el riego del estadio de fútbol.

### 2.1.1 Uso secundario

#### a) Determinación de la demanda de agua en el ITT

Debido al interés de las autoridades de la institución de aprovechar el agua de lluvia para uso secundario (baños, hidratación, limpieza) y consumo humano. Se calculó la demanda de agua requerida por persona en el Instituto Tecnológico de Toluca, por medio de la ecuación 7, descrita en el punto 1.9:

$$D_j = \frac{Nu \times Dot \times Nd_j}{1000}$$

Donde:

$D_j$ =Demanda de agua en el mes ( $m^3 \text{ mes}^{-1} \text{ poblacion}^{-1}$ )

$Nu$ =Número de beneficiarios del sistema

$Dot$ =Dotación ( $L \text{ persona}^{-1} \text{ día}^{-1}$ )

$Nd_j$ =Número de días del mes  $j$

$j$ =Número del mes (1, 2,3...12)

## b) Cálculo de áreas de captación

Para conocer el área de captación efectiva requerida para satisfacer la demanda de agua durante los meses de estiaje, se calcularon los  $m^3$  para satisfacer esta demanda y, la precipitación neta mediante la ecuación 9, 10 y 11 descritas en el punto 1.9.2 y 1.10.2.

$$PN = P * \eta_{captacion}$$

Donde:

$PN$ =Precipitación pluvial neta (mm)

$P$ =Precipitación pluvial promedio mensual histórica (mm)

$$\eta_{captacion} = Ce * 0.85$$

Donde:

$\eta_{captacion}$ =Eficiencia de la captación de agua de lluvia

$Ce$ =Coeficientes de escurrimiento

0.85 es el factor que considera pérdidas por factores como salpicado, velocidad del viento, evaporación, fricción, tamaño de la gota.

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{\sum_{j=1}^n PN}$$

Donde:

$A_{ec}$ =Área efectiva de captación ( $m^2$ )

$D_{anual}$ =Demanda anual ( $m^3$ )

$PN$ =Precipitación Neta (m)

$j.. n$ =Meses cuya precipitación media es  $\geq 25$  mm

### c) Determinación de la capacidad del sedimentador (Trampa de sólidos)

Para el diseño del sedimentador se tomó en cuenta el área efectiva de captación y la máxima lluvia registrada en un día, de acuerdo a la ecuación 1 descrita en el punto 1.6.2.

$$V_{\text{sedimentador}} = A_{ec} * l_d$$

Donde:

$V_{\text{sedimentador}}$  = Volumen del sedimentador, (m<sup>3</sup>)

$A_{ec}$  = Área efectiva de captación de agua de lluvia, (m<sup>2</sup>),

$l_d$  = Es el día con máxima lluvia registrada, (m).

El Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI-CP) recomienda utilizar de 50 a 100 mm/h (0.05-0.1m/h).

### d) Determinación de la capacidad del tanque de almacenamiento

Se consideró la población aproximada del ITT y el consumo per cápita de esta, para tener un volumen mínimo en m<sup>3</sup>, para cumplir con la demanda en los meses de estiaje, utilizando la siguiente ec.13 descrita en el punto 1.11

$$V_{\text{cisterna}} = D_j \times M_{\text{sequia}+2}$$

Donde:

$V_{\text{cisterna}}$ : Volumen mínimo de la cisterna (m<sup>3</sup>)

$D_j$  = Demanda mensual (m<sup>3</sup> mes<sup>-1</sup>)

$M_{\text{sequia}+2}$  = Meses con sequía más 2

### e) Caracterización de agua de lluvia

Se realizó la caracterización del agua de lluvia para conocer su calidad tomando en cuenta los parámetros de la Tabla 2.1

Tabla 2.1 Parámetros analizados en el agua de lluvia.

Parámetro		Unidad	LMP	Regulación
Físico	pH		6-9	Ley Federal de Derechos Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano, 2020.
	SDT	mg/L	500	
Químico	Aluminio (Al)	mg/L	0.02	
	Arsénico (As)	mg/L	0.05	
	Cromo (Cr),	mg/L	0.05	
	Cobre (Cu)	mg/L	1	
	Hierro (Fe)	mg/L	0.3	
	Manganeso (Mn)	mg/L	0.05	
	Níquel (Ni)	mg/L	0.01	
	Plomo (Pb)	mg/L	0.05	
	Zinc (Zn).	mg/L	5	
	Cloruros	mg/L	250	
	Nitratos	mg/L	5	
Nitritos	mg/L	0.05		
Microbiológico	Coliformes Totales	UFC/100 mL	2	NOM-127-SSA1-2000

## 2.1.2 Alimentación al acuífero

### a) Inyección en el subsuelo

Para inyectar al subsuelo el agua de lluvia captada en los techos, se colecta en una canaleta, la cual descarga a un tubo de PVC de desagüe de los techos y el agua llega a un sedimentador (Trampa para sólidos), posteriormente a un Manifold de distribución, que consta de tubos de PVC perforados para dar salida al agua captada en el edificio; el Manifold descansa en un lecho de distribución el cual está formado con grava con un espesor de 20 cm, teniendo 20 cm más de longitud en cada extremo del Manifold, como se ve en la Figura 2.2

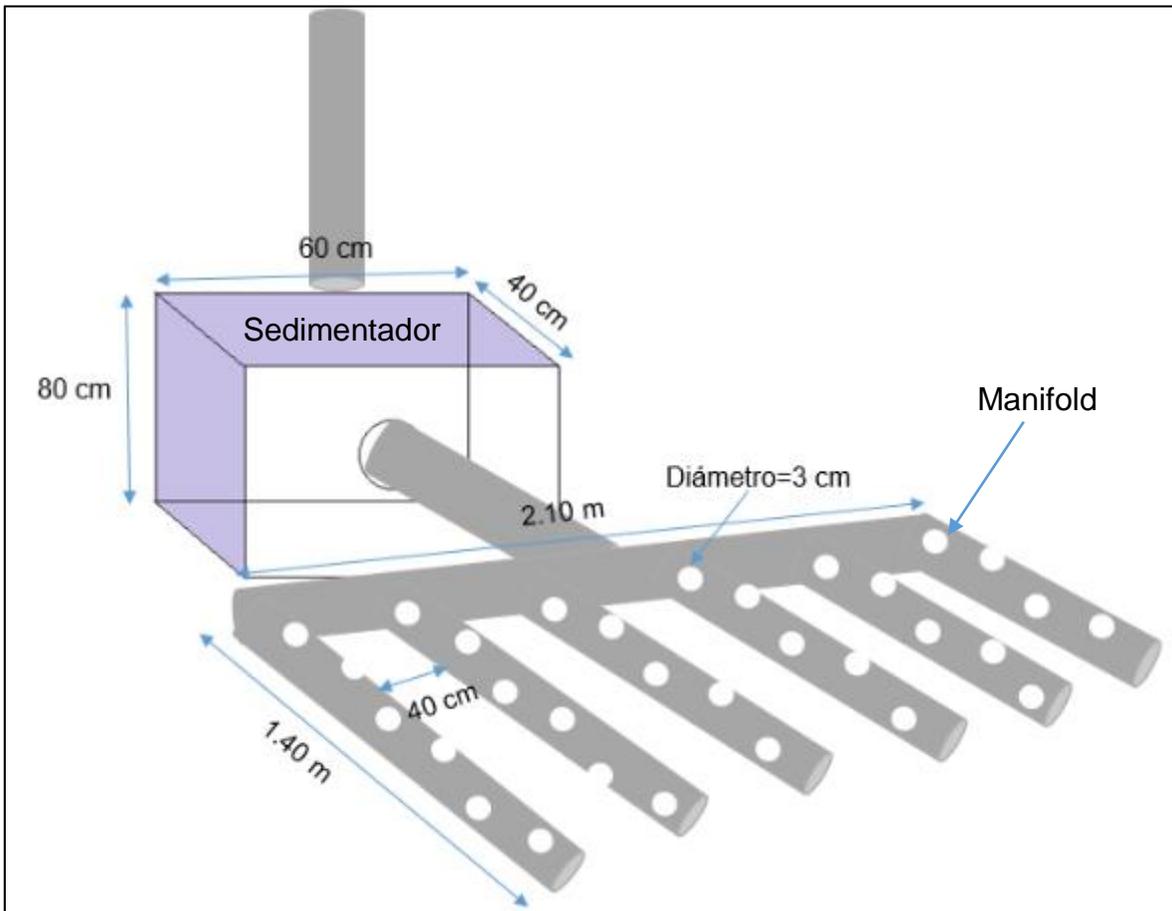


Figura 2.2 Manifold con tubo de 4" de diámetro y 31 orificios por tubo.

## **b) Obras de superficie**

### **Áreas verdes**

Se habilitaron conductos de agua de lluvia para alimentar áreas verdes en el campo de futbol, Laboratorio de Ingeniería Ambiental LIA y de los edificios de ingeniería industrial, logística, de béisbol y de otros edificios de la institución.

### **Pozos de absorción**

Se llevó a cabo un análisis de textura de suelo para verificar si el terreno es apto para la construcción de pozos de absorción, así como el cálculo de capacidad de infiltración del suelo con un infiltrómetro de doble anillo como el que se describe en la Figura 1.8, también se determinó el área de captación asfáltica donde escurrirá la lluvia para finalmente alimentar a los dos pozos de absorción.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Captación de agua de lluvia en el ITT

Se recolectó agua de lluvia de escurrimiento en un Techo de concreto (Edificio B), Techo de policarbonato (Edificio de mecatrónica) y agua de lluvia a cielo abierto, Figura 3.1.

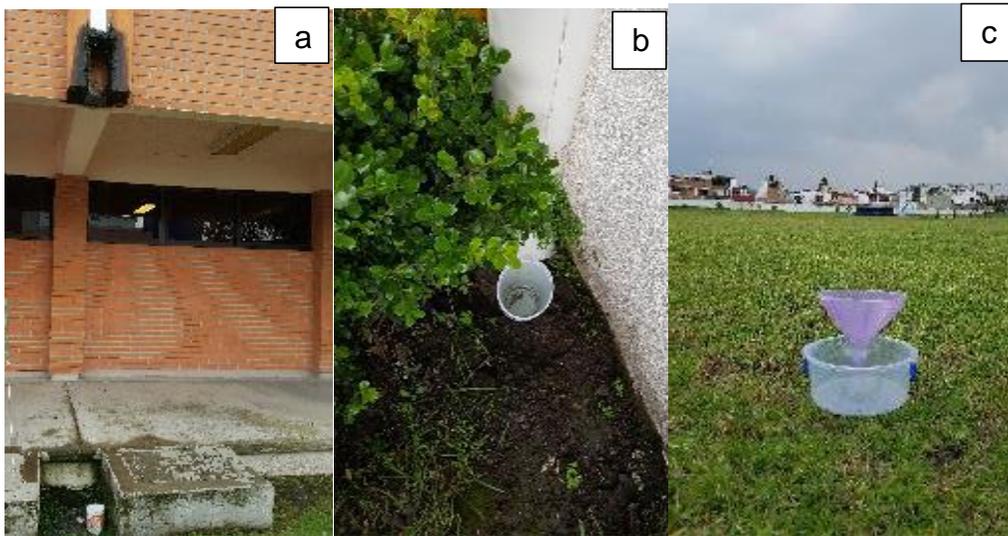


Figura 3.1 (a) Agua de lluvia colectada del Edificio B; (b) Agua de lluvia colectada del edificio de Mecatrónica; (c) Agua de lluvia a cielo abierto.

Como se observa en la Figura 3.1 el material utilizado para la recolección a cielo abierto fue un frasco de vidrio esterilizado, para la recolección de escurrimiento se hizo en un recipiente limpio, y en bolsa de polietileno estéril como la que se muestra en la Figura 3.2.



Figura 3.2 Bolsa estéril para la recolección de agua de lluvia.

### 3.1.1 Uso secundario

#### a) Determinación de demanda de agua en el ITT

Para determinar la dotación de L/(persona\*día) se usó el Anexo I, para determinar el número de beneficiarios del sistema Anexo II, de acuerdo con reportes que CONAGUA hace al Tecnológico Nacional de México. Para el cálculo de la demanda de agua en el ITT, se utilizó la ecuación 7 que sustituyendo se tiene:

Datos:

$D_j$ =Demanda de agua en el mes ( $m^3 \text{ mes}^{-1} \text{ poblacion}^{-1}$ )

$Nu$ =Número de beneficiarios del sistema=5615 personas en el ITT

$Dot$ =Dotación ( $L \text{ persona}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) =18.32 L/día

$Nd_j$ =Número de días del mes  $j=30$

$$D_j = \frac{Nu \times Dot \times Nd_j}{1000}$$

Sustituyendo en la ecuación 7 se tiene:

$$D_j = \frac{5615 \times 18.32 \times 30}{1000} = 3085.4 \text{ m}^3 * \text{mes}^{-1} * \text{poblacion}^{-1}$$

### b) Determinación de precipitación neta

Se determinó la precipitación pluvial con la ecuación 9 y 10 descrita en el punto 1.9 considerando  $C_e$  de 0.8 y con base al histórico de lluvia de la Tabla 1.8 se tiene una precipitación pluvial neta por mes Tabla 3.1, éstos valores se presentan en la Figura 3.3.

Tabla 3.1 Precipitación media mensual del Estado de México.

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precipitación pluvial Mensual (mm)	7.51	13.46	12.07	17.25	56.46	136.18	160.48	156.61	141.38	65.42	17.76	3.54
PN (mm)	5.10	9.16	8.21	11.73	39.38	91.93	108.22	107.27	96.19	41.59	12.07	2.41
PN( $\geq 40$ mm)						92.60	109.13	106.5	96.14	44.48		

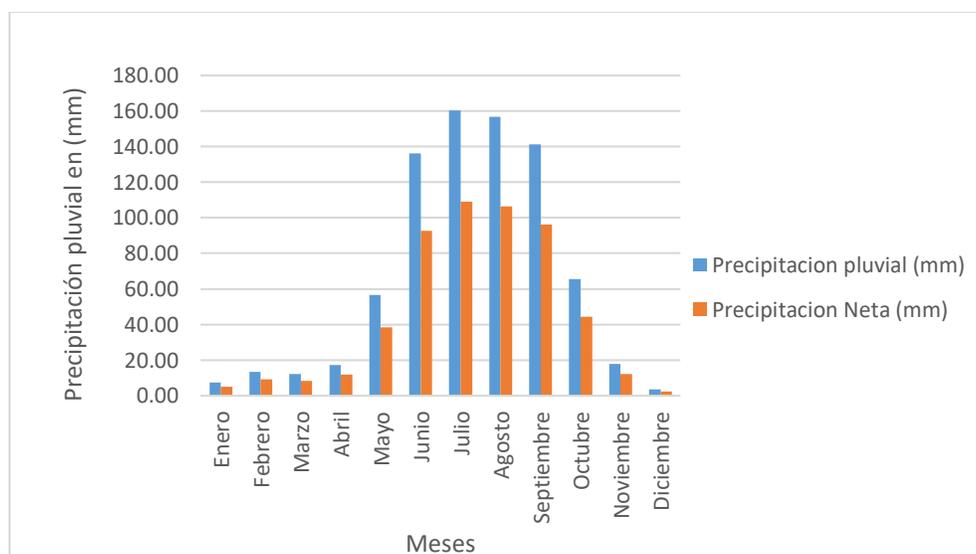


Figura 3.3 Precipitación pluvial promedio mensual histórica en el Estado de México.

### c) Cálculo de áreas de captación

Para lograr una captación de agua de lluvia que satisfaga la demanda de la población ITT durante 4 meses de estiaje, se calculó el área total requerida, por lo tanto, de acuerdo con la ecuación 11 descrita en el punto 1.10.2 se tiene:

Datos:

$$A_{ec}=?$$

$$D_{anual} = 3085.4 \text{ m}^3 * \text{mes}^{-1} * \text{poblacion}^{-1} * 4 \text{ meses} = 12,341.6 \text{ m}^3$$

$$\sum_{j=1}^n PN = 0.45 \text{ m}$$

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{\sum_{j=1}^n PN}$$

Sustituyendo de la ecuación anterior tenemos:

$$A_{ec} = \frac{12,341.6 \text{ m}^3 * \text{poblacion}^{-1}}{0.45 \text{ m}} = 27,496.17 \text{ m}^2$$

La Tabla 3.2 muestra el área que se tiene por edificio en el ITT dando un total de 20,407.90 m<sup>2</sup>

Tabla 3.2 Área total de edificios del ITT.

Edificio	Área (m <sup>2</sup> )	Edificio	Área (m <sup>2</sup> )
Dirección	592.21	C1	186.55
X	202.27	C2	240.07
Sub estación II	84.26	C3	266.71
Q	333.62	U	313.84
P	338.81	Z	228.13
N	213.10	V	272.33
D	417.90	Y	173.13
M	349.96	Ing. logística	1019.08
O	214.07	Industrial	1094.55
S	592.59	Centro de computo	611.40
R	306.88	Laboratorios	801.49
j	395.68	Gimnasio	2239.96
Edif 2 niveles	612.20	Hangar	400.66
Mecatrónica	869.32	Biblioteca	1084.25
Cafetería	458.54	K	2226.78
G	368.34	Tics	908.96
F	212.55	Gradas	364.32
E	316.90	Posgrado	1096.5
		<b>Superficie Total</b>	<b>20,407.90</b>

Como se observa en la Tabla 3.2, el ITT tiene una superficie instalada de 20,407.90 m<sup>2</sup> en los techos de sus edificios; siendo menor a la requerida ( $A_{ec} = 27496.17$  m<sup>2</sup>) por lo cual, en caso de implementarse la captación, se tendrán que hacer ajustes.

Se calculó el área de los edificios a captar agua de lluvia mediante AutoCAD, para el edificio TICS Figura 3.4, para el edificio K Figura 3.5, para el techo de las gradas de las canchas de fútbol Figura 3.6, para la biblioteca Figura 3.7, para el Hangar Figura 3.8. En la tabla 3.3 se muestran las áreas efectivas de los edificios estudiados.

Tabla 3.3 Área efectiva de capitación de edificios.

EDIFICIO	Aec (Área efectiva de capitación en m <sup>2</sup> )
TICS	908.96
K	2,226.78
Gradas(Canchas fútbol)	364.32
Biblioteca	1,084.25
Hangar	400.66
Superficie total	4,984.99

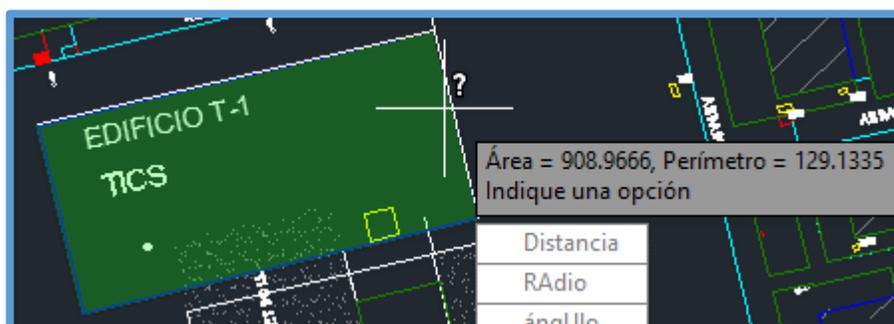


Figura 3.4 Área del Edificio de TICS.



Figura 3.5 Área del Edificio K.

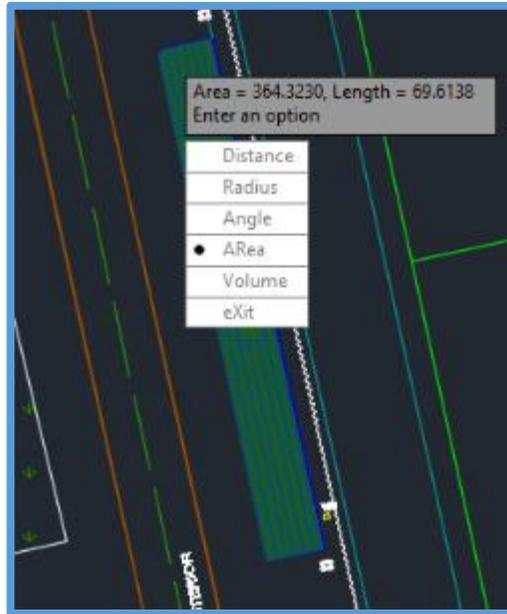


Figura 3.6 Área de las gradas de la cancha de fútbol.

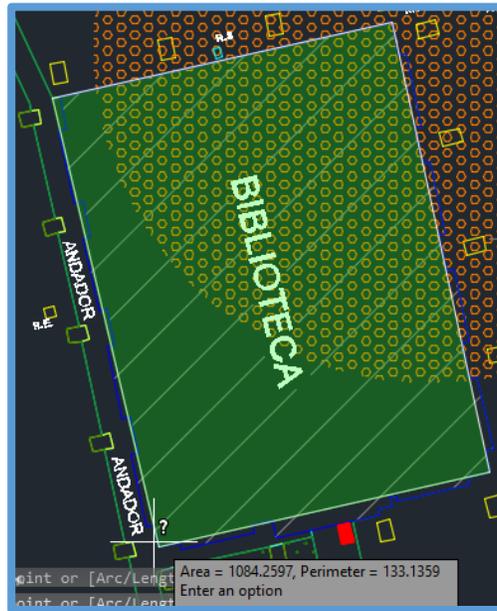


Figura 3.7 Área de la biblioteca.

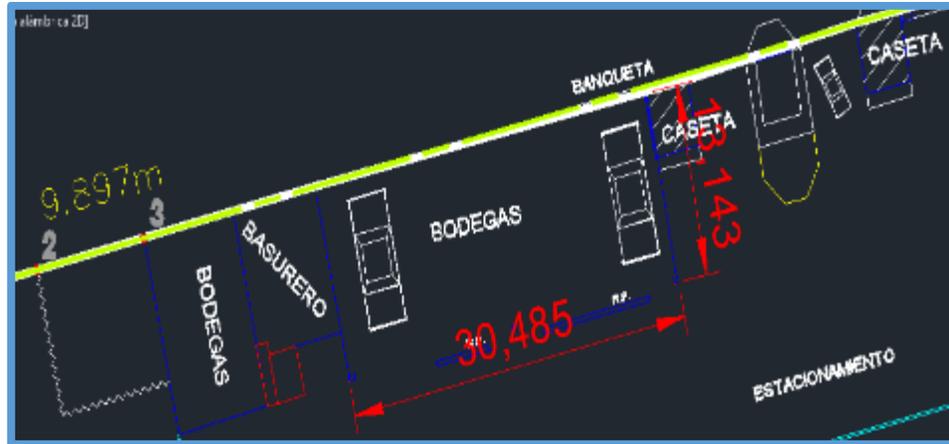


Figura 3.8 Área del Hangar.

Para determinar la cantidad anual de agua que se inyectará en el subsuelo, se tiene:

$$D_{anual} = A_{ec} \left( \sum_{j=1}^n PN \right)$$

Donde:

$$A_{ec} = 4984.99m^2$$

$$PN_{anual} = (0.0926 + 0.1091 + 0.1065 + 0.0961 + 0.0445) = 0.45m$$

Por lo tanto, se tiene:

$$D_{anual} = 4984.99m^2(0.45 m) = 2,243.25m^3$$

Considerando una precipitación promedio anual de 785.64 mm que es del año 2003 a 2019 con el área efectiva de captación de los edificios que es de 4,984.99 m<sup>2</sup> y realizando una interpolación en la tabla 1.7 se tendrá un volumen de captación de 3'916,400.65 L ó 3,916.400 m<sup>3</sup> anual.

#### d) Capacidad del sedimentador (Trampa de solidos)

Para determinar la capacidad que habrá de tener el sedimentador para cubrir la demanda de los cuatro meses de estiaje en el ITT se tiene:

Datos:

$$A_{ec} = 27,496.17 m^2$$

$$ld = 0.05 - 0.1\text{m/h}$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación se tiene:

$$V_{\text{sedimentador}} = A_{ec} * ld$$

$$V_{\text{sedimentador}} = 27496.17 \text{ m}^2 * 0.05 \text{ m/h} = 1,374.81 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{\text{sedimentador}} = 27496.17 \text{ m}^2 * 0.1\text{m/h} = 2,749.62 \text{ m}^3/\text{h}$$

### e) Capacidad del tanque de almacenamiento

Para determinar la capacidad de la cisterna o tanque de almacenamiento y cubrir la demanda de agua para 5615 personas en el ITT durante los cuatro meses de estiaje en el ITT, se tiene:

Datos:

$$D_j = 3085.4 \text{ m}^3 * \text{mes}^{-1} * \text{poblacion}^{-1}$$

$$M_{\text{sequia}+2} = 2 + 2 = 4 \text{ meses}$$

$$V_{\text{cisterna}} = D_j * M_{\text{sequia}+2}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$V_{\text{cisterna}} = 3085.4 \text{ m}^3 * \text{mes}^{-1} * \text{poblacion}^{-1} * 4 \text{ meses} = 12,341.6 \text{ m}^3$$

Se cuenta con una cisterna para captación de agua de lluvia en el edificio de mecatrónica, con una capacidad de 75 m<sup>3</sup>; el área que tiene éste edificio es de 869.32 m<sup>2</sup> presentando una capacidad de captación anual de 682.96 m<sup>3</sup> (Interpolación de la Tabla 1.7) Figura 3.9.



Figura 3.9 Cisterna para agua de lluvia del edificio de Mecatrónica.

El agua es captada en esta cisterna durante el ciclo de lluvias, periodo en el cual se utiliza como agua de riego del estadio de fútbol, del campo de prácticas y áreas verdes circundantes; manteniéndolas verdes durante prácticamente todo el año, ayudando a que sirvan como medio para facilitar la infiltración del agua de lluvia al acuífero y mantener así la biodiversidad.

#### **f) Caracterización de agua de pozo del ITT**

Se realizó la caracterización de agua de pozo del ITT, con el fin de conocer su calidad fisicoquímica y biológica. El reporte se presenta en el Anexo III, en la Tabla 3.4 se presentan los resultados.

Tabla 3.4 Caracterización de agua de pozo en el ITT.

Identificación de la muestra	Parámetro	Unidad	Resultado (mg/L)	LMP	Regulación
Grifo	Cloruros	mg/L	1.49	250	Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano, 2020.
	Nitratos	mg/L	2.52	5	
Cisterna	Cloruros	mg/L	1.74	250	
	Nitratos	mg/L	3.72	5	

El valor de nitrógeno de nitratos y cloruros están bajos (5 y 250 mg/L respectivamente), sin riesgo para usar el agua con fines domésticos (NOM-127-SSA1-200); encontrándose también dentro del valor máximo permisible por Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano (LAN, 2020).

#### g) Caracterización de agua de lluvia

Se captó agua de lluvia en el ITT para determinar las características fisicoquímicas y microbiológicas de ésta, y conocer si con aceptables por la ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano.

#### Parámetros físicos

Se consideraron el pH y los SDT ya que la Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano, los contempla.

#### a) Potencial de hidrogeno (pH)

Se midió el pH a dos muestras de agua (1 y 2) tomada a cielo abierto durante en el mes de Septiembre y a dos muestras (3 y 4) que estuvieron en contacto con superficie del techo en el mes de Octubre.

En la Tabla 3.5 se muestra la comparación del valor de pH obtenido (LAN,2020).

Tabla 3.5 pH en agua de lluvia.

Límite máximo permisible (LAN, 2020)	Agua de lluvia					
	Cielo abierto (Muestra)			Escurrimiento (Muestra)		
Entre 6 y 9	1	2	$\sigma$	3*	4*	$\sigma$
	7.2	7.3	$\pm 0.421$	5.7	6.3	$\pm 0.016$

\* La muestra 3 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de una lámina galvanizada. La muestra 4 corresponde a una superficie de captación de concreto.

Para las muestras 1, 2 y 4 el valor de pH está dentro del valor máximo permisible por (LAN, 2020) la muestra 3 está fuera de especificación. Si se comparan los resultados obtenidos en la experimentación con Ite y Choudhury (2010) el pH de 6.5 que obtuvieron, el resultado se encuentra dentro del rango obtenido en la experimentación.

El pH para 8 puntos diferentes de muestreo obtenido por Ospina y Ramírez (2014) fue ligeramente ácido (4.7), en comparación con el que se obtuvo en la muestra 3 (5.7); Rahman y colaboradores (2014) obtiene valores similares a los que se obtuvieron en la experimentación, a excepción del de la muestra 3.

Para Zdeb y colaboradores (2020) obtiene valores de pH entre 5 y 6 en agua de lluvia sin tener contacto con la superficie, que son valores más bajos que los obtenidos en la experimentación. La mediana de pH para una superficie con lámina galvanizada fue aproximadamente de 6.3 en 2015 y de 6.5 para el año 2016; el valor obtenido en la experimentación para la muestra 3 (superficie con lámina galvanizada) fue de 5.7 éste valor puede deberse a que la toma de la muestra fue con lluvia constante y 15 min después de haber comenzado; por lo cual el pH se mantuvo constante al tener un contacto casi nulo con la superficie de lámina galvanizada. Para el caso de la muestra 4 (superficie de concreto) el valor de pH obtenido en la experimentación fue de 6.3; Zdeb y colaboradores (2020), obtuvieron una mediana aproximada tanto para el año 2015 como para el 2016 de 6.6 que es

muy cercano al obtenido en la experimentación. Para las muestras 1 y 2 el pH obtenido en la experimentación es relativamente neutro cabe mencionar que este pH fue medido en el mes de septiembre donde se tuvo una precipitación de 140.1 mm que es mayor a la precipitación que se tuvo en el mes de octubre (133.4 mm), cuando se tomaron las muestras 3 y 4.

### **b) Sólidos Disueltos Totales (SDT)**

Se consideraron tres puntos de recolección diferentes ver Figura 3.10 a) el agua recolectada del edificio de Mecatrónica (Techo de policarbonato), b) edificio B (Techo de concreto) y c) cielo abierto.

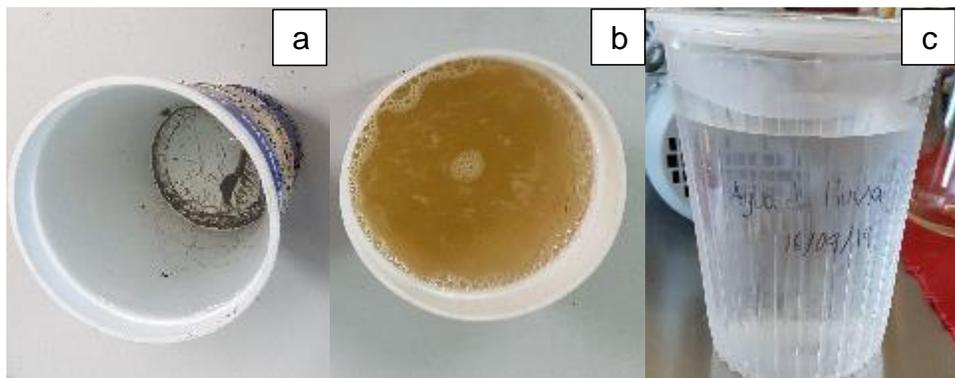


Figura 3.10 a) Agua de lluvia del edificio de Mecatrónica b) agua de lluvia del edificio B, c) agua de lluvia a cielo abierto.

La Tabla 3.6 Muestra la comparación del valor de SDT contenidos en el agua de lluvia.

Tabla 3.6 SDT en agua de lluvia.

Parámetro (LAN, 2020)	Límite Máximo Permisible (mg/L)	Agua de lluvia			
		Cielo abierto (Muestra)	Escurrimiento (Muestra)		
SDT	500	1	2*	3*	$\sigma$
		18.57	107.14	99.71	$\pm 5.252$

\* La muestra 2 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de concreto. La muestra 3 corresponde a una superficie de captación de policarbonato.

Los SDT están dentro de especificación por (LAN, 2020). Sultana y Choudhury (2010), obtuvieron 48.70 mg/L el promedio de los valores, esta ligeramente mayor al obtenido por estos autores (75.14mg/L), pero dentro de especificación.

Los SDT obtenidos en la muestra 2 y 3 recolectada de un techo, están dentro del rango obtenido por Rahman y colaboradores (2014) que fue de 50 a 200 mg/L.

### Parámetros químicos

Se consideraron los cationes indicados en el inciso a) porque la NOM-127-SSA1-2000 los contempla; algunos por ser peligrosos y otros por macro elementos necesarios en procesos biológicos sobre todo de las plantas.

**a) Aluminio (Al), Arsénico (As), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Zinc (Zn).**

En la Tabla 3.7 se muestran los resultados de cationes en agua de lluvia.

Tabla 3.7 Contenido de cationes en agua de lluvia.

Parámetro (LAN, 2020)	Límite máximo permisible (mg/L)	Agua de lluvia		
		Cielo abierto	Escurrimiento	
		1	2*	3*
Al	0.02	0.07	0.20	0.35
As	0.05	<0.0100	<0.0100	<0.0100
Cr	0.05	<0.0054	<0.0054	<0.0054
Cu	1.0	0.0279	0.0403	0.1106
Fe	0.3	0.09	0.26	0.27
Mn	0.05	0.0030	0.0143	0.1111
Ni	0.01	0.0357	<0.0055	<0.0055
Pb	0.05	0.0380	<0.0123	<0.0123
Zn	5	0.2082	0.2166	2.4498

\* La muestra 2 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de concreto. La muestra 3 corresponde a una superficie de captación de policarbonato.

Los valores de Al que se obtuvieron del agua de lluvia tanto a cielo abierto como de escurrimiento están fuera de especificación (LAN, 2020), siendo más altos la muestra 2 y 3 que son de escurrimiento, en donde existe contacto con la superficie de los techos.

Ospina y Ramirez (2014) obtienen valores que van de 0.01 a 0.04 mg/L para lluvia a cielo abierto, el que se obtuvo en la experimentación es mayor (0.07 mg/L).

Para el As, Cr, Cu, Fe, Pb, Zn los valores obtenidos en la experimentación están dentro de especificación para (LAN, 2020). Sin embargo, la concentración de 0.1111 mg/L de Mn en agua de lluvia de escurrimiento de un techo de policarbonato no es aceptable, esto debido a la posible contaminación por residuos industriales, lo cual es tóxico para las plantas y puede dañar las piezas sanitarias formando manchas (Manahan, 2007).

## b) Cloruros (Cl<sup>-</sup>)

En la Tabla 3.8 se presentan los cloruros obtenidos en agua de lluvia.

Tabla 3.8 Cloruros en agua de lluvia.

Parámetro (LAN, 2020)	Límite máximo permisible (mg/L)	Agua de lluvia						
		Cielo abierto (Muestra)				Escurrimiento (Muestra)		
		1	2	3	$\sigma$	4*	5*	$\sigma$
Cloruros	250	1.28	2.13	3.93	$\pm 1.353$	2.99	3.84	$\pm 0.601$

\* La muestra 4 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de concreto. La muestra 5 corresponde a una superficie de captación de policarbonato.

El valor de cloruros en agua de lluvia tanto de escurrimiento como a cielo abierto en la experimentación son aceptables (LAN, 2020).

Los valores obtenidos por Ospina y Ramírez (2014) oscilan entre 6 y 17 mg/L, el valor obtenido por Sultana y Choudhury (2010) fue de 15.128 mg/L los cuales son más altos que los obtenidos en el agua de lluvia.

## c) Nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)

En la Tabla 3.9 se compara el nitrógeno de nitratos y nitritos obtenidos en el agua de lluvia.

Tabla 3.9 Contenido de nitratos y nitritos en agua de lluvia.

Parámetro (LAN, 2020)	Límite máximo permisible (mg/L)	Agua de lluvia			
		Cielo abierto (Muestra)		Escurrimiento (Muestra)	
		1	2	3*	4*
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5	0.40	0.08	7.09	1.1
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.05	0.0048	0.0031	0.0320	0.02

\* La muestra 3 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de concreto. La muestra 4 corresponde a una superficie de captación de policarbonato.

Ospina y Ramirez (2014) también obtienen valores de nitritos muy próximos a cero, para cielo abierto (0 a 0.01 mg/L). Los nitratos obtenidos en la experimentación para la muestra 1 a cielo abierto (0.40 mg/L) esta dentro del rango obtenido por Ospina y Ramirez (2014); Sultana y Choudhury (2010) obtienen 4.7 mg/L de nitratos para una muestra de agua de lluvia de escurrimiento; Zdeb y colaboradores (2020) obtienen para nitritos valores de mediana, menores a 0.05 mg/L a cielo abierto, tanto para el año 2015 como para el año 2016; sin embargo, también valores atípicos que son cercanos a 0.1 mg/L. Para el techo de tejas de concreto obtienen una mediana que oscila en 0.05 mg/L para el año 2015 y 2016, que es próximo al valor obtenido en la experimentación (0.0320 mg/L). Los nitratos tienen una mediana aproximada a 3 mg/L en el año 2015 y aproximada a 4 mg/L en el año 2016 a cielo abierto. En la experimentación se obtuvieron valores próximos a cero que para Zdeb y colaboradores (2020) son considerados como no atípicos. Para el techo de tejas de concreto obtienen una mediana que oscila entre 2 y 3 mg/L para el año 2015 y 2016 respectivamente, y es en este año 2016 donde se obtienen valores atípicos que oscilan entre 10 y 12 mg/L; en la experimentación se obtuvo un valor de 7.09 mg/L que sería considerado también como atípico.

## Parámetros microbiológicos

Se consideraron los Coliformes Totales porque la NOM-127-SSA1-2000 los contempla debido a que el agua de escurrimiento puede tener contacto humano, sin embargo, la Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales, para uso público urbano, no los contempla

### a) Coliformes Totales

Se utilizó el método APHA (1992) de filtración por membrana, empleando caldo endo como medio de cultivo. En la Tabla 3.10 se muestra una comparación de los Coliformes Totales obtenidos durante la experimentación contra la NOM-127-SSAI-2000.

Tabla 3.10 Coliformes Totales en agua de lluvia.

Parámetro (LAN, 2020)	Límite máximo permisible (UFC/100 mL)	Agua de lluvia			
		Cielo abierto (Muestra)			Escurrecimiento (Muestra)
Coliformes Totales	2	1	2	3*	4*
		6600	15000	2000	100

\* La muestra 3 en la experimentación corresponde a una superficie de captación de concreto. La muestra 4 corresponde a una superficie de captación de policarbonato.

Los Coliformes Totales obtenidos en la experimentación tanto para cielo abierto como de escurrimiento no son aceptables para la norma NOM-127-SSAI-2000; se utilizó esta norma porque el agua de lluvia captada de esta forma tiene contacto con las personas, aunque no se utilice para consumo. Ospina y Ramírez (2014) obtienen valores (3.41 a 241.96 UFC/100 mL). La muestra 1 y 2 a cielo abierto presenta valores muy elevados, lo que refleja el nivel de contaminación que en esa fecha presentaba el aire. Esto es el reflejo de fecalismo al aire libre, falta de cañerías para

conducir las aguas negras y animales sin control en medio urbano (Manahan, 1994). Además de que en la zona afortunadamente se tiene una gama importante de aves lo que contribuye a estos valores y también al de nitritos y nitratos.

En la Figura 3.11 se observan las unidades formadoras de colonias para el agua de lluvia de escurrimiento y a cielo abierto.

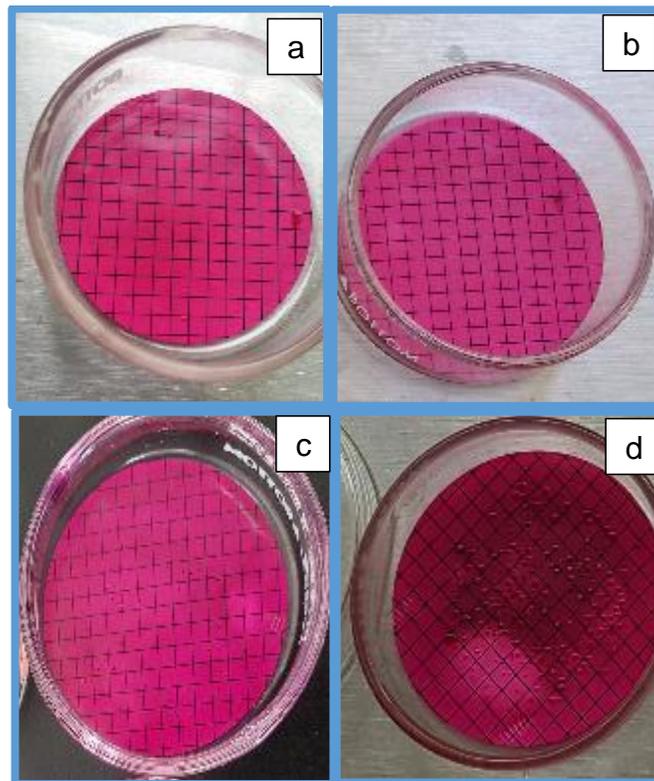


Figura 3.11 Cajas Petri con Coliformes Totales. (a) y (b) muestras de lluvia de escurrimiento; (c) y (d) muestras de lluvia a cielo abierto.

Comparando los resultados obtenidos en el mes de Septiembre y Octubre en la experimentación con Rahman y colaboradores (2014), los Coliformes Totales obtenidos en los mismos meses oscilan entre 400 y 450 UFC/100mL.

En la Ciudad de Mexico en Diciembre de 2011 se llevó a cabo un monitoreo que contempla nueve muestras de agua atmosférica condensada observadas de día y

de noche durante los meses de lluvia y de estiaje, (Bautista *et al*, 2013) observándose un incremento de Coliformes Totales en la época de estiaje y durante la noche.

### 3.1.2 Alimentación al acuífero

#### a) Inyección en el subsuelo

El agua recolectada de los techos de los edificios seleccionados, fue transportada por canaletas de acero galvanizado y conducida por medio de tubería de PVC de 6 pulgadas de diámetro. Para la inyección en el subsuelo se construyó un Manifold con las dimensiones descritas en el punto 2.1.2.1 Figura 2.2.

Con la ecuación de Bernoulli se calculó lo siguiente:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g h_2$$

Donde:

$\rho$  = Densidad

$P_1$  = Presión del fluido en el punto uno

$V_1$  = Velocidad del fluido en el punto uno

$h_1$  = Altura del fluido en el punto uno

$P_2$  = Presión del fluido en el punto dos

$V_2$  = Velocidad del fluido en el punto dos

$h_2$  = Altura del fluido en el punto dos

**Edificio Hangar:** altura 7 m

Considerando que la velocidad inicial es cero, se tiene:

$$V = V_0 + at$$

$$s = s_0 + vt$$

$$0 = 7 + (at)t$$

$$0 = 7m + 9.81 \frac{m}{s^2} t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{7m}{9.81 \frac{m}{s^2}}} = 0.84s$$

$$V = at$$

$$V = V_1 = 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.84s = 8.28 \frac{m}{s}$$

Asumiendo que:

$$Q_1 = A_1 V_1$$

$$A_1 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.1016m)^2}{4} = 0.00810m^2$$

$$Q_1 = 0.00810m^2 * 8.28 \frac{m}{s} = 0.06 \frac{m^3}{s}$$

Por el principio de continuidad todo lo que entra debe ser igual a lo que sale, por lo tanto, se tiene:

$$Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = A_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{Q_1}{A_2}$$

Si se considera que la estructura del Manifold tiene 6 tubos de 4" (0.1016 m) de diámetro a la descarga y cada uno tiene 31 orificios de 0.03 m de diámetro entonces se tiene un área a la descarga de:

$$A_2 = \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 * 31 \right] =$$

$$= \left[ \frac{\pi * (0.1016m)^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * (0.03m)^2}{4} * 6 * 31 \right] = 0.1801m^2$$

Sustituyendo en la ecuación se tiene una  $V_2$  de:

$$V_2 = \frac{0.06 \frac{m^3}{s}}{0.1801 m^2} = 0.37 \frac{m}{s}$$

También se realizó el mismo cálculo para el edificio de TICS y el edificio K, que se presentan en el anexo IV, a continuación, en la Tabla 3.11 se puede ver el resumen.

Tabla 3.11 Resumen de cálculos de Bernoulli.

EDIFICIO	A <sub>1</sub> (m <sup>2</sup> )	A <sub>2</sub> (m <sup>2</sup> )	s (m)	Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>1</sub> (m/s)	V <sub>2</sub> (m/s)
<b>TICS</b>	0.0081	0.18011	16	0.1015	12.5283	0.5639
<b>K</b>	0.0182	0.1801	10	0.1806	9.9045	1.0030
<b>Hangar</b>	0.0081	0.1801	7	0.0671	8.2867	0.3729

Como se puede ver en la Tabla 3.16 la velocidad de entrada de flujo de agua es mayor que en la descarga para los tres edificios, lo que indica que el diseño del Manifold es adecuado para dar salida al caudal que ingresa al sistema.

Se calculó el volumen del afluente por edificio con la ecuación 2 descrita en el punto 1.8.2.1.4 para comparar si este volumen era menor al flujo que podría estar ingresando al Manifold, así para los tres edificios el coeficiente de escurrimiento superficial ( $C$ ), la intensidad de la lluvia ( $It$ ), y el tiempo ( $t$ ) son con constantes. Entonces sustituyendo para cada edificio en la ecuación 2 se tiene:

$$V_{afl} = 0.00125 * C * It * A * t$$

Para el edificio TICS corresponde un área de 908.96 m<sup>2</sup> por lo tanto se tiene:

$$V_{afl} = 0.00125 * 0.8 * \frac{1.39 \times 10^{-5} m}{s} * 908.96 m^2 * 3600 s = 45.448 L$$

Este volumen es menor para el caudal que puede estar ingresando al sistema de Manifold ( $Q_1=101.5$  L/s)

Para el edificio K corresponde un área de 908.96 m<sup>2</sup> por lo tanto se tiene:

$$V_{afl} = 0.00125 * 0.8 * \frac{1.39 \times 10^{-5} m}{s} * 2226.78 m^2 * 3600 s = 111.34 L$$

Este volumen es menor para el caudal que puede estar ingresando al sistema de Manifold ( $Q_1=180.6$  L/s)

Para el edificio Hangar corresponde un área de 400.66 m<sup>2</sup> por lo tanto se tiene:

$$V_{afl} = 0.00125 * 0.8 * \frac{1.39 \times 10^{-5} m}{s} * 400 m^2 * 3600 s = 20.033 L$$

Este volumen es menor para el caudal que puede estar ingresando al sistema de Manifold ( $Q_1=67.1$  L/s)

## **b) Instalación de Manifold en el subsuelo**

Se preparó el lecho de distribución Figura 3.12 (a); Figura 3.12 (b) el cual tiene 2.10 m de largo por 1.50 m de ancho, y una profundidad hasta donde termina el horizonte

“O”, se acondiciona con grava colocando un espesor de 30 cm, después se instala el Manifold a la trampa de sólidos Figura 3.12 (c), cubriendo nuevamente con grava Figura 3.12 (d); finalmente se rellena el lecho con tierra, compactándola hasta el nivel del suelo.

### c) Trampa de sólidos

La trampa de sólidos se realizó como se describe en la Figura 1.5 que está en el punto 1.6.2.1.1, el piso es de tierra para evitar la colmatación, las dimensiones de esta son: alto= 80 cm; largo= 60 cm; ancho = 40 cm, descritas también en la Figura 2.2 que está en el punto 2.1.2.1.



Figura 3.12 (a) Manifold con 31 orificios; (b) Acondicionamiento del lecho de distribución con grava; (c) Manifold conectado en trampa de sólidos; (d) Recubrimiento del lecho de distribución con grava.

Se instalaron 7 Manifold en el edificio K; 8 Manifold en el edificio de TICS, y uno en el Hangar Figura 3.13 (a); 3.13 (b); 3.13 (c).

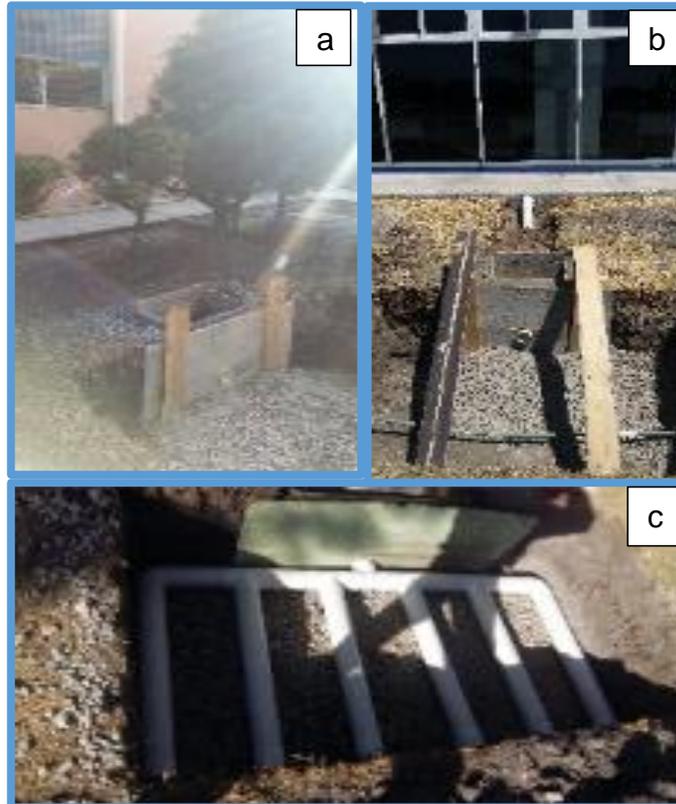


Figura 3.13 Instalación de Manifold: (a) Edificio K; (b) TICS; (c) Hangar.

En el techo de las gradas situada a un costado de la cancha principal de fútbol, se hizo un acondicionamiento de tubo de PVC de 4" como se puede ver en la Figura 3.14 (a).

Para el edificio de la biblioteca se habilito el sistema en cascada que consiste en un lecho de 1m de ancho por 1.5 m de largo y aproximadamente 0.80 m de profundidad, rellenándolo con un espesor de 30 cm de grava y arriba con piedra de bola, Figura 3.14 (b) ambos para alimentación al subsuelo.



Figura 3.14 Alimentación al subsuelo: (a) Techo de las gradas de las canchas de futbol; (b) Sistema en cascada en la Biblioteca.

En la Figura 3.15 se presenta el calendario de mantenimiento preventivo para el sistema de Manifold el cual contempla que cada año deberá realizarse entre la última semana de abril, la primera semana de mayo y durante el ciclo de lluvias (junio a septiembre).

Este mantenimiento consiste en revisar la trampa de sólidos y eliminar hojas de árboles y cualquier otro residuo que se encuentre en la descarga o salida de la tubería y hacer limpieza de la grava si hay colmatación, si este fuera el caso, colocarla limpia nuevamente. En el mantenimiento de septiembre hacer limpieza de la línea de agua de la trampa de sólidos, que debe estar entre la parte inferior de la tubería de descarga y la parte media de esta.

En los techos se debe hacer limpieza de las canaletas y de los filtros a la descarga de los tubos de PVC para evitar taponamientos y derrames del agua durante la lluvia. Asegurarse del buen funcionamiento de los filtros.

Actividad	PROGRAMA DE LIMPIEZA DE LOS FILTROS DE ALIMENTACIÓN EN LOS EDIFICIOS: BIBLIOTECA, HANGAR, K, TECHO DE GRADAS DE FÚTBOL Y TICS.																											
	Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre							
	SEM 14	SEM 15	SEM 16	SEM 17	SEM 18	SEM 19	SEM 20	SEM 21	SEM 22	SEM 23	SEM 24	SEM 25	SEM 26	SEM 27	SEM 28	SEM 29	SEM 30	SEM 31	SEM 32	SEM 33	SEM 34	SEM 35	SEM 36	SEM 37	SEM 38	SEM 39		
Revisión de trampa de sólidos: Eliminar hojas de árboles y cualquier otro residuo que se encuentre en la descarga o salida de la tubería, hacer limpieza de la grava si hay colmatación.																												
Hacer limpieza de la línea de agua de la trampa de sólidos (Se encuentra en la parte inferior de la tubería de descarga y la parte media de ésta).																												
Limpieza de techos, canaletas y filtros de descarga a los tubos de PVC.																												
Asegurarse del buen funcionamiento de los filtros.																												

Figura 3.15 Calendario de limpieza de los filtros de alimentación en los edificios de captación de agua de lluvia.

Planeado:

Hecho:

#### **d) Obras de superficie**

Para ello se realizó el diseño de pozos de absorción, a través de una prueba con un infiltrómetro de doble anillo y así calcular la capacidad de infiltración.

#### **Diseño de pozos de absorción**

Se propone realizar los pozos de absorción en esta zona (Figura 3.16) porque es donde ocurre el mayor escurrimiento de agua de lluvia en el ITT. El agua se captaría de los estacionamientos del edificio de Ingeniería en Logística, del Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental y del circuito que pasa por la parte poniente del estadio de futbol y campo de prácticas, que en total suma un área de captación de 5026.45 m<sup>2</sup> delimitada por la línea roja, como se puede ver en la Figura 3.17, en donde se estima que se generan 251.3 L (Volumen del afluente). Para realizar los pozos de absorción, es necesario conocer la textura y capacidad de absorción o infiltración del suelo, para ello se realizó un análisis de textura del suelo, Anexo IV, donde se indica un tipo de suelo es Franco Arenoso.



Figura 3.16 Zona donde se diseñarán los pozos de absorción.

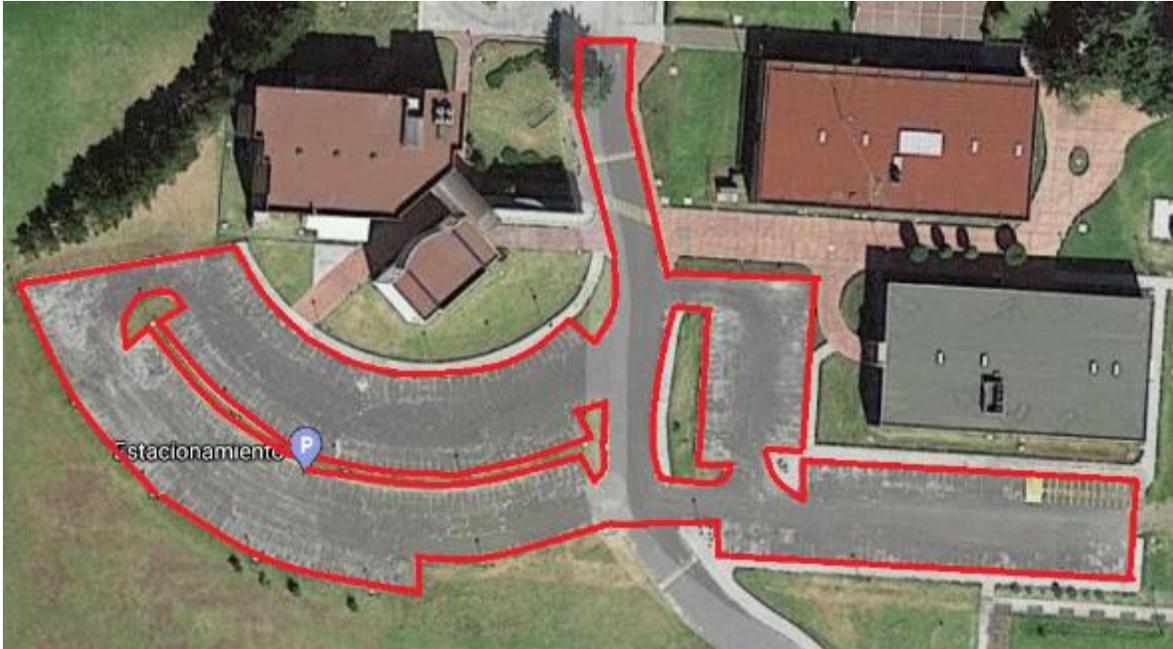


Figura 3.17 Área de captación para pozos de absorción.

Se calculó el volumen del afluente acumulado de acuerdo con la ecuación 2 descrita en el punto 1.8.2.1.4:

Datos:

$$V_{afl} = ?$$

$$C = 0.8$$

$$It = 0.05 \text{ m/h (Recomendado por CIDECALLI-CP)}$$

$$A = 5026.45 \text{ m}^2$$

$$t = 1 \text{ h}$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación se tiene:

$$V_{afl} = 0.00125 * C * It * A * t$$

$$V_{afl} = 0.00125 * 0.8 * 0.05 * 5026.45 * 1 = 251.3 \text{ L}$$

Por lo tanto, en un área de 5026.45 m<sup>2</sup> se estaría captando 251.3 L considerando una intensidad de lluvia de 0.05 m/h.

### Capacidad de infiltración

Para determinar la capacidad de infiltración del suelo Franco Arenoso se realizó una prueba de infiltrómetro de doble anillo, como se describe en el punto 18.2.1.2, utilizando un tambo y una cubeta que fueron cortadas de la base quedando a una altura de 50 cm aproximadamente, posteriormente fueron acomodadas de manera concéntrica y clavadas a 10 cm de profundidad del suelo (Figura 3.18). Se monitoreo durante 4 horas la capacidad de infiltración del suelo, obteniéndose así los datos de la Tabla 3.12 con los que se determinó la tasa de infiltración ( $f$ ).



Figura 3.18 Prueba de infiltración de doble anillo.

Tabla 3.12 Prueba de infiltración de doble anillo.

Hora	Lamina infiltrada (cm)	Tiempo (h)	Velocidad de infiltración instantánea (cm/h)	Velocidad de infiltración instantánea (m/h)
11:00	0	0	-	-
11:02	0.5	0.0333	15	0.15
11:04	0.3	0.0333	9	0.09
11:06	0.2	0.0333	6	0.06
11:08	0.5	0.0333	15	0.15
11:13	0.5	0.0833	6	0.06
11:18	0.5	0.0833	6	0.06
11:23	1.1	0.0833	13.2	0.132
11:28	1.2	0.0833	14.4	0.144
11:38	1.7	0.1667	10.2	0.102
11:48	1.9	0.1667	11.4	0.114
11:58	1.9	0.1667	11.4	0.114
12:18	2.5	0.3333	7.5	0.075
12:38	3.5	0.3333	10.5	0.105
12:58	3.2	0.3333	9.6	0.096
13:28	6.4	0.5	12.8	0.128
13:58	5.1	0.5	10.2	0.102
14:58	7	1	7	0.07
			<b>Promedio</b>	<b>0.10</b>

La tasa de infiltración obtenida es de 0.10 m/h equivalente a 103.05 mm/h, por lo que el sitio para la construcción de pozos es apto ya que la tasa de infiltración es mayor a 20 mm/h (MINVU, 1996).

Lozano (2018), en su libro “*Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio*” clasifica para la tasa de infiltración obtenida (que también equivale a 5.821 min/cm) un suelo semipermeable.

Se determinó también el caudal de infiltración de acuerdo a la ecuación 3 descrita en el punto 1.8.2.1.5:

Datos:

$$Q_i = ?$$

$$C_s = 0.3333 \text{ (Factor considerado de la figura 1.9)}$$

$$f = 0.1 \text{ m/h (Determinado en la prueba de infiltración de doble anillo)}$$

$$S = 2 \text{ m}^2 \text{ (De la propuesta de diseño)}$$

Sustituyendo en la siguiente ecuación se tiene:

$$Q_i = 0.001 * C_s * f * S$$

$$Q_i = 0.001 * 0.3333 * 0.1 * 2 = 0.00007 \text{ m}^3/\text{h} = 0.066 \text{ L/h}$$

Conociendo el volumen del afluente se puede determinar el volumen de almacenamiento del pozo usando la ecuación 5 descrita en el punto 1.8.2.1.7

Datos:

$$V_{afl} = 0.2513 \text{ m}^3$$

$$Q_i = 0.00007 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$V_{alm} = ?$$

$$\rho = 0.30$$

$$V_{pozo} = ?$$

Por lo tanto, se tiene:

$$V_{alm} = V_{aft} - 0.5 * Q_i * t$$

$$V_{alm} = 0.2513 \text{ m}^3 - 0.5 * 0.00007 \text{ m}^3/\text{h} * 1 \text{ h} = 0.2513 \text{ m}^3 = 251.3 \text{ L}$$

El volumen del pozo se calculó mediante la ecuación 6 descrita en el punto 1.8.2.1.7:

Datos:

$$V_{alm} = 0.2513 \text{ m}^3$$

$$\rho = 0.30$$

$$V_{pozo} = ?$$

Sustituyendo de la ecuación 6 se tiene:

$$V_{pozo} = V_{alm}/\rho$$

$$V_{pozo} = 0.2513 \text{ m}^3 / 0.30 = 0.8376 \text{ m}^3 = 837.5746 \text{ L}$$

Para calcular el volumen infiltrado se usó la ecuación 4 descrita en el punto 1.8.2.1.6:

$$V_i = 0.001 * C_s * I_t * A_i * t$$

Datos:

$$V_i = ?$$

$$A_i = 2 \text{ m}^2$$

$$I_t = 0.1 \text{ m}/\text{h}$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$C_s = 0.3333 \text{ (Factor considerado de la figura 1.9)}$$

Sustituyendo de la ecuación 4 se tiene:

$$V_i = 0.001 * 0.3333 * 0.1 \frac{m}{h} * 2m^2 * 1 h = 0.0666 L$$

Por lo tanto; el agua que entrará al pozo ( $V_{afl}$ ) será de 251.3 L con una intensidad de lluvia de 0.05 m/h, para lo cual el volumen del pozo ( $V_{pozo}$ ) tendría que ser de 837.5746 L, con un volumen de infiltración ( $V_i$ ) de 0.0666 L, como se observa el volumen del pozo será tres veces mayor al volumen de entrada de agua, lo cual es una ventaja a pesar de que se tenga un suelo semipermeable y un volumen de infiltración bajo.

Para garantizar el volumen que debe tener el pozo, se propone que sean dos con las siguientes dimensiones cada uno: altura de 1.5 m, ancho 1m y largo 1m, de esta forma se logrará un volumen total de 1.5 m<sup>3</sup> lo que multiplicado por la porosidad del relleno (30% para bola de río) da un volumen de 0.9 m<sup>3</sup> lo que equivale a 900 L. Adicionalmente se propone rellenar el pozo con arena, grava y gravilla. Se sugiere llevar a cabo una limpieza anual del pozo, para retirar raíces que puedan obstaculizar su funcionamiento.

En la Figura 3.19 se muestra el material con el cual se rellenará el pozo de absorción, así como las dimensiones antes mencionadas.

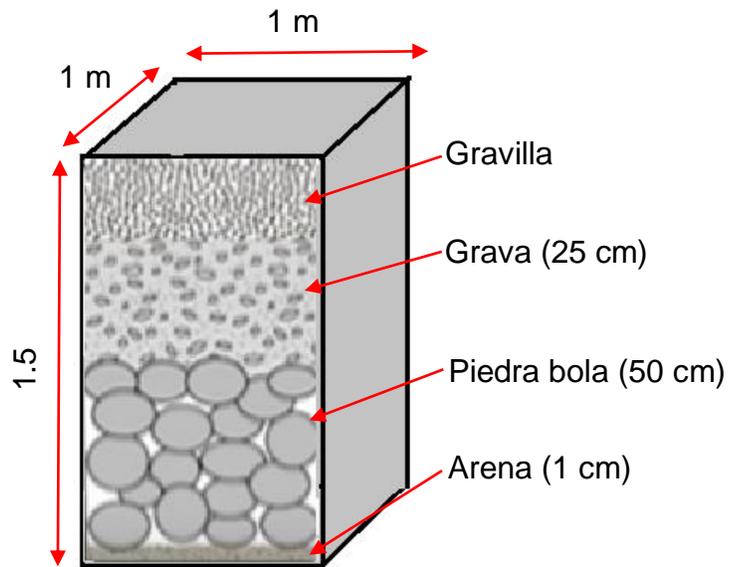


Figura 3.19 Dimensiones y composición del pozo de absorción.

Se recomienda instalar los dos pozos de absorción a 4 m de distancia entre uno y otro, con alimentación independiente, debido a que el agua llega muy dispersa y con una trampa para sólidos para alargar el tiempo de limpieza del relleno. Figura 3.20.

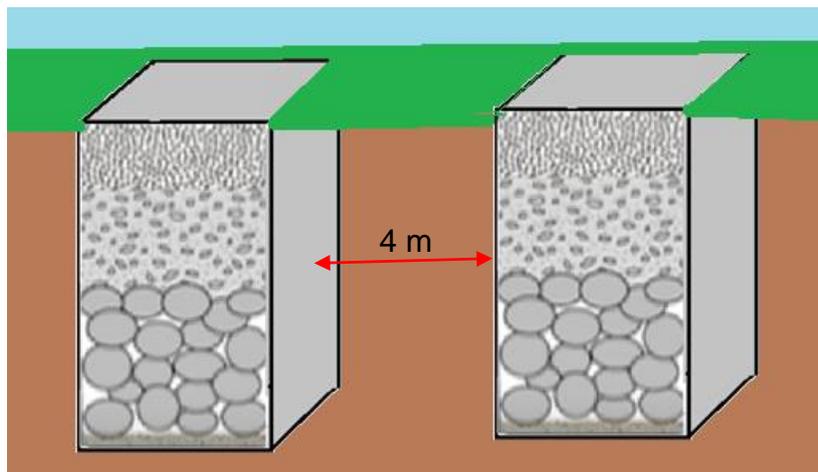


Figura 3.20 Instalación de los pozos de absorción.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La capacidad de captación de agua de lluvia es de 3,916.40 m<sup>3</sup> anuales superficie aprovechando una superficie de 4,984.99 m<sup>2</sup> de los techos de los edificios TICS, K, Gradas de las canchas fútbol, Biblioteca y Hangar.

El agua de lluvia captada en los edificios casos de estudio, es alimentada al cien por ciento a los mantos freáticos mediante la técnica inyección al subsuelo.

El agua de lluvia captada en la cisterna del edificio de Mecatrónica es utilizada en el servicio de riego a las áreas verdes de las canchas de fútbol y de prácticas.

El agua de lluvia tanto de escurrimiento como a cielo abierto presenta Coliformes Totales que van de 100 a 6600 UFC/100mL lo cual no es aceptables para la norma NOM-127-SSAI-2000; sin embargo, se tendrán que analizar los Coliformes Fecales para conocer si son aceptables para la Ley federal de derechos disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales 2020 para uso público urbano.

Las concentraciones más altas de nitrógeno como nitrato en agua de lluvia fueron registradas en agua recolectada de techos de concreto. Concentraciones similares de nitrato se han encontrado en techos de este tipo que están en zonas altamente urbanizadas.

Las fuentes de metales pesados presentes en el agua de lluvia probablemente provienen de la contaminación en el ambiente y también de lo acumulado en las superficies de canaletas durante el año debido a la deposición seca.

El tipo de suelo en el ITT es Franco Arenoso, y es considerado por Lozano (2018,) como un suelo semipermeable, ya que su tasa de infiltración promedio es de 5.821 min/cm.

El volumen de entrada al pozo será de 251.3 L y el volumen de agua que pueden almacenar los pozos es de 837.57 L, por lo tanto, con un volumen de infiltración de 0.0666 L se podrá captar el agua de lluvia sin problema en una hora, que es el tiempo que se considera para tener una precipitación máxima de 50 mm.

## 5 FUENTES CONSULTADAS

Abdulla, F. A., y Al-Shareef, A. W. 2009. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1-3): 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.013>

Almudena, A., y Lizaso, J. 2001. Nitritos, Nitratos y Nitrosaminas. Fundación Ibérica para la Seguridad Alimentaria. Madrid, España.

Anaya, M. 2010. Aumento de la oferta hídrica: Impreso en República Dominicana.

Anaya, M. 2017. Aprovechamiento del agua de lluvia (E. d. C. d. Postgraduados Ed. 1 ed.).

Arias, J. 1979. Cartilla núm. 2: Sistema de captación y almacenamiento del agua pluvial. México: SAHOP-Dirección General de Ecología Urbana.

Bautista, O., Tovar, A., Salinas, J., Mancilla, O. R., Flores, H. M. Ramírez, C., Arteaga, R., Vázquez, M. A. 2013. Calidad microbiológica del agua obtenida por condensación de la atmósfera en Tlaxcala, Hidalgo y Ciudad de México.

Brown, C., Gerston, J., y Colley, S. 2005. *Manual of Rainwater Harvesting or Collection*. Austin, Texas.

CEPIS/OPS. 2003. Especificaciones técnicas. Captación de agua de lluvia para consumo humano. Lima, Perú.

Choudhury, I., y Sultana, F. 2010. AC 2010-345: Rainwater harvesting for domestic consumption in bangladesh: sizing and construction of storage cisterns. American Society for Engineering Education.

CONAGUA 2019. Consultado en enero de 2020 en <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/PREC/2019.pdf>

CONAGUA 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México.

CONAGUA. (s. f.). Estadísticas del agua en México (2018.a ed.) [Libro electrónico]. [http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf).

Despins, C., Farahbakhsh, K., y Leidl, C. 2009. Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. *Journal of Water Supply Research and Technology-aqua - J WATER SUPPLY RES TECHNOL-AQ*, 58. doi:10.2166/aqua.2009.013.

Dillaha, T. A., y Zolan, W. J. 1985. Rainwater Catchment Water Quality in Micronesia. *Water Research*, 19(6): 741-746.

FAO, 2004. Training Course on Water Harvesting. Rome, Land and Water Digital Media Series 26.

FAO, 2013. Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago de Chile. E-ISBN 978-92-5-307581-2

Farreny, R., Morales, T., Guisasola, A., Tayà, C., Rieradevall, J., y Gabarrell, X. 2011. Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45(10), 3245-3254. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.036>

García, J. H. 2012. Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la Ciudad de México 2012. Universidad Nacional Autónoma de México

Gavito, J. 2007. Diseño de sistemas de Captación del Agua de Lluvia. (Documento web último acceso 07/Junio/2019) <https://es.slideshare.net/SociedadJulioGaravito/diseo-de-sistemas-de-captacin-de-agua-de-lluvia-12213385>

Gould, J., y Nissen, E. 1999. Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply: Design, Construction and Implementation. Estados Unidos: Action Publishing, p. 33.

Hanna Instruments. (s. f.). Manual de Análisis de Suelo Ciencia y Gestión del Suelo (Documento web último acceso 24/Julio/2020) (MAN3896R105/99 ed.). [https://www.infoagro.com/instrumentos\\_medida/instrucciones/instrucciones\\_kit\\_analisis\\_suelo\\_hi3896.pdf](https://www.infoagro.com/instrumentos_medida/instrucciones/instrucciones_kit_analisis_suelo_hi3896.pdf)

IDRC. 1990. Sistema para recolección de agua de lluvia. El IDRC Informa, 18(4): 20-21. Canadá. (Documento web último acceso 21/Mayo/2019) Disponible en: <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/25094>

Jalife, A.S., Quiroa, H.J.A., Villanueva, S.J. 2018. Captación de agua de lluvia: tipos, componentes y antecedentes en zonas áridas de México como estrategia de uso sustentable del agua. 2 (3), 77

Ley Federal de Derechos Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2020. (Documento Web, último acceso 25/Agosto/2020) <https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2020?state=published>

Li, X., Xie, Z., y Yan, X. 2004. Runoff Characteristics of Artificial Catchment Materials for Rainwater Harvesting in the Semiarid Regions of China. Agricultural Water Management, núm. 65, pp. 211-224.

Lozano, W. A. 2018. Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio (primera edición ed., Vol. 1). Universidad Piloto de Colom.

Manahan, S. E. 2007. Introducción a la Química Ambiental. Reverté. S.A.

Manahan, S. E. 1994. Environmental Chemistry. Sixth Edition. Lewis Publishers. 179-214.

Mejia, G. 2006. Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. (Documento Web, último acceso 18/Diciembre/2019) <https://www.redalyc.org/pdf/3214/321428096010.pdf>

MINVU, 1996. Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos. Guía de Diseño. Ministerio de vivienda y urbanismo. Santiago, Chile.

NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua. - Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. -Método de prueba- (cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2011).

NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua - Enumeración de organismos Coliformes Totales, organismos Coliformes Fecales (Termotolerantes) y Escherichia Coli –Método del número más probable en tubos múltiples (cancela a la NMX-AA-42-1987).

NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la NMX-AA-073-1981).

NOM-127-SSA1-2000. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA,1997. "Fosas sépticas prefabricadas: especificaciones y métodos de prueba".

Órgano Oficial de Gobierno Municipal de Metepec, Estado de México. (2016). Gaceta Municipal de Metepec. Obtenido de [http://www.metepec.gob.mx/wpcontent/uploads/files/GACETA/GACETA%2016/033116\\_GACETA\\_31\\_2016.pdf](http://www.metepec.gob.mx/wpcontent/uploads/files/GACETA/GACETA%2016/033116_GACETA_31_2016.pdf)

Ospina, O. E., Ramírez, H. 2014. Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v9i17.812>

Pérez, A. 2012. Uso del agua de lluvia: retroceso al futuro, Revista Energía y tú, No. 60, octubre - Diciembre, pp. 13-16, ISSN 1028-9925, Cubasolar, La Habana.

Peraza, V. 2011. Sistema de captación de agua pluvial dentro de la Esime Culhuacan. Tesis de Ingeniería Mecánica. Instituto Politécnico Nacional.

Radaideh, J., Al-Zboon, K., Al-Harashsheh, A., y Al-Adamat, R. (2009). Quality assessment of harvested rainwater for domestic uses. Jordan Journal of Earth and Environmental Sciences, 2(1), 26-31.

Rahman, S., Khan, M. T. R., Akib, S., Din, B. C., Biswas, S. K., y Shirazi, S. M. (2014). Sustainability of Rainwater Harvesting System in terms of Water Quality. The Scientific World Journal, 2014, 10. doi:10.1155/2014/721357

Reséndiz, R. 2012. Universidad Nacional Autónoma de México. Universidad Nacional Autónoma de México.

Rossainz, L. 2017. Actividad microbiana de la clinoptilolita modificada con Ag o Cu frente a un consorcio microbiano (Coliformes y levaduras) en presencia de componentes orgánicos asociados al agua residual municipal. Instituto Tecnológico de Toluca. Tesis Doctoral.

SAGARPA. 2020. Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación. (Documento Web, último acceso 27/Enero/2020) <https://www.slideshare.net/demetriofernandez313/pozos-de-absorción>

Sehgal, J. D. 2008. Roof-top Harvesting of Rainwater —A sustainable Water Resource in S. E. Asia. 4th International Conference on Sustainable Water Environment: Innovative Technologies and Energy Efficient Solution. Singapur, 17-19 de noviembre.

Tamay, C. 2019. Determinación de la capacidad de biosorción y desorción de la corona de piña (*Ananas comosus*) para la remoción de metales pesados.

Wambeke J., Prieto., J. M. et al., 2017. Captación y almacenamiento de agua de lluvia opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe.

Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., Jacob, S., Huau, M. C., y Montrejaud-Vignoles M. (2011). Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. *Water Research*, 45(12), 3765-3775. doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.04.029>

Zdeb, M., Zamorska, J., Papciak, D., y Slys, D. (2020). *The Quality of Rainwater Collected from Roofs and the Possibility of Its Economic Use*. researchgate. [https://www.researchgate.net/publication/338781278\\_The\\_Quality\\_of\\_Rainwater\\_Collected\\_from\\_Roofs\\_and\\_the\\_Possibility\\_of\\_Its\\_Economic\\_Use](https://www.researchgate.net/publication/338781278_The_Quality_of_Rainwater_Collected_from_Roofs_and_the_Possibility_of_Its_Economic_Use)

**ANEXO I: Reporte de lecturas del medidor del ITT.**



**CONAGUA**  
Comisión Nacional del Agua

**COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA**

" REPORTE DE LECTURAS DE MEDIDOR " 16-A  
ART. 225 DE LA LEY FEDERAL DE DERECHOS

ANTES DE INICIAR SU LLENADO, LEA LAS INSTRUCCIONES AL REVERSO

<b>1. DATOS DEL CONTRIBUYENTE</b>	
REGISTRO FEDERAL DE CONTRIBUYENTES:	TNM140723GFA
CLAVE ÚNICA DE REGISTRO DE POBLACION:	
APELLIDO PATERNO, MATERNO Y NOMBRE (S), DENOMINACIÓN O RAZÓN SOCIAL, TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA	
CALLE AV. TECNOLÓGICO S/N	No. Int. No. Ext.
LOCALIDAD / COLONIA COL. AGRICOLA BELLAVISTA	
MUNICIPIO O DELEGACIÓN METEPEC, ESTADO DE MEXICO	C.P. 52148
ENTIDAD FEDERATIVA MEXICO	CLAVE LADA (01722) TELEFONO 2-08-72-05
NUMERO DEL TITULO DE CONCESIÓN SMEX101981/121MK0E97	
ACTIVIDAD PREPONDERANTE	SERVICIOS
<b>2. DATOS DEL REPRESENTANTE LEGAL</b>	
REGISTRO FEDERAL DE CONTRIBUYENTES:	SCORE3707111E1
CLAVE ÚNICA DE REGISTRO DE POBLACION:	ROBJ570011E3
APELLIDO PATERNO, MATERNO Y NOMBRE (S) ROJAS RAUDA	
MARIA ELENA	
<b>3. DATOS DEL APROVECHAMIENTO</b>	
TIPO DE APROVECHAMIENTO:	AGUAS NACIONALES
FUENTE:	POZO PROFUNDO
USO INICIAL:	SERVICIOS
COORDENADAS DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN	
LATITUD	19°15'16.4"
LONGITUD	99°24'48.7"
NUMERO DE ANEXO DEL APROVECHAMIENTO:	
<b>4. DATOS DEL MEDIDOR</b>	
MARCA:	MS RICELAND
TIPO:	
NUMERO DE SERIE:	S/N
DIAMETRO:	4"
UNIDAD:	METROS CUBICOS

EJERCICIO FISCAL: 2019 PERIODO: MES 01 AÑO 2019 A MES 03 AÑO 2019

a) ÚLTIMA LECTURA DEL TRIMESTRE ANTERIOR:	762487.7	m3
FECHA DE LECTURA:	21/12/2019	dd/mm/aaaa

1er. MES: ENERO	2do. MES: FEBRERO	3er. MES: MARZO
b) LECTURA: (m3) 764839.2	c) LECTURA: (m3) 768055.8	d) LECTURA: (m3) 771743.9
FECHA DE LECTURA: (dd/mm/aaaa) 31/01/2019	FECHA DE LECTURA: (dd/mm/aaaa) 29/02/2019	FECHA DE LECTURA: (dd/mm/aaaa) 29/03/2019
EXTRACCIÓN EN m3 (b - a) 2351.5	EXTRACCIÓN EN m3 (c - b) 3216.6	EXTRACCIÓN EN m3 (d - c) 3688.1

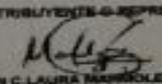
VOLUMEN TOTAL EXTRAIDO POR TRIMESTRE: (d - a) 8254.2M3

Nota: las lecturas serán tomadas en m3 y el último día del mes.

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

DECLARO BAJO PROTESTA DECIR VERDAD QUE LOS DATOS CONTENIDOS EN ESTE REPORTE SON CIERTOS

FIRMA DEL CONTRIBUYENTE O REPRESENTANTE LEGAL



M. EN C. LAURA MARQUELLO GARCIA  
JEFA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO Y SERVICIO

**ANEXO II: Matricula de licenciatura, posgrado y trabajadores del ciclo escolar: Agosto-Diciembre 2018.**

MATRÍCULA DE LICENCIATURA ENERO-JULIO 2019										
ASIGNATURAS PLAN ACREDITACIÓN 2011/17	NUEVO INGRESO		REINGRESO		TOTAL	TOTAL 2018-2019	CARRERAS CON PLAN DE 2010			TOTAL CON PLAN 2010
	H	M	H	M			H	M	H	
ELECTROMECÁNICA (PA)	0	0	0	0	0		0	0	0	0
ELECTROMECÁNICA 2010	0	0	447	30	482	582	10	0	13	3
ELECTRÓNICA (PA)	0	0	0	0	0		0	0	0	0
ELECTRÓNICA 2010	0	0	214	28	242	292	19	1	5	0
INDUSTRIAL (PA) ESCOLARIZADO ABIERTO	0	0	0	0	0		0	0	0	0
INDUSTRIAL 2010 (ESCOLARIZADO)	31	26	620	338	1013		53	30	23	22
INDUSTRIAL 2010 (A DISTANCIA)	13	2	89	26	130	1,143	3	0	0	0
QUÍMICA (PA)	0	0	0	0	0		0	0	0	0
QUÍMICA 2010	14	40	307	380	751	751	13	27	12	19
SISTEMAS COMPUTACIONALES (PA)	0	0	0	0	0		0	0	0	0
SISTEMAS COMPUTACIONALES 2010	0	0	398	106	504	504	18	11	11	4
MECATRÓNICA (PA)	0	0	0	0	0		0	0	0	0
MECATRÓNICA 2010	3	90	716	93	872	872	43	4	41	6
LOGÍSTICA	17	24	185	249	455	455	5	10	5	5
GESTIÓN EMPRESARIAL LIC. ADMON	0	0	184	306	502	502	16	32	7	7
TTCS	0	0	108	90	198	198	0	0	0	0
TOTALES	78	152	3,256	1,633	5,119	5,119	189	119	118	67
TOTAL / GENERO	HOMBRES 3,334		MUJERES 1,785		5,119		HOMBRES 307		MUJERES 182	
<b>MATRÍCULA TOTAL</b>					<b>5,119 ALUMNOS</b>					

MATRÍCULA DE POSGRADO ENERO-JULIO 2019										
CARRERA	NUEVO INGRESO		REINGRESO		TOTAL	TOTAL 2018-2019	FORMACIÓN CON PLAN 2010			TOTAL CON PLAN 2010
	H	M	H	M			H	M	H	
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL	4	8	7	12	28		1	4	1	4
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA	3	2	10	7	22		3	3	3	3
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA	7	7	11	14	39					
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE COMPUTACIÓN	1	1	1	1	4					
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA	0	0	1	0	1		0	0	0	0
EN CIENCIAS AMBIENTALES	3	2	14	21	40		2	1	2	1
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE COMPUTACIÓN	1	1	16	21	41		2	1	2	1
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE COMPUTACIÓN	1	1	16	21	41		2	1	2	1
INGENIERÍA EN SISTEMAS DE COMPUTACIÓN	1	1	16	21	41		2	1	2	1
MEDICINA										

TITULADORES DEL CICLO ESCOLAR AGOSTO-DICIEMBRE 2018			
CONCEPTO/GENERO	H	M	TOTAL
LICENCIATURA	118	67	185
MAESTRIA	4	7	11
DOCTORADO	2	1	3

INGRESADOS DEL CICLO ESCOLAR AGOSTO-DICIEMBRE 2018			
CONCEPTO/GENERO	H	M	TOTAL
LICENCIATURA	189	115	304
MAESTRIA	4	7	11
DOCTORADO	2	1	3

PERSONAL DEPARTAMENTO			
CONCEPTO/GENERO	H	M	TOTAL
FUNCIONARIOS	12	10	22
DOCENTES	2	2	4
DIRECTIVOS	14	12	26

PERSONAL POR UNIDAD			
CONCEPTO/GENERO	H	M	TOTAL
DOCENTES	147	116	263
ADMINISTRATIVOS	57	59	116
TOTAL	204	175	379

INFRAESTRUCTURA DEL INSTITUTO	
AULAS	107
UNIDAD ACADÉMICA DEPARTAMENTAL	4
LABORATORIOS	58
TALLERES	6
ÁREAS	
EDIFICIO ADMINISTRATIVO	1
SALA AUDIOVISUAL	4
SALA DE USOS MÚLTIPLES	2
BIBLIOTECA	1
NÚMERO DE VOLUMENES	NÚMERO DE TÍTULOS
51,028	13,367
CUBÍCULOS DE PROFESORES	165
CAFETERIA	1
CENTRO DE CONVENCIONES	1
INSTALACIONES DE PORTAVOZ	
ALBERCA TECHADA	1
BEISBOL / ESTADIO	1 / 1
BÁSQUETBOL TECHADA	1
FÚTBOL PASTO	2
GIMNASIO - AUDITORIO	1
PISTA DE ATLETISMO	1
VOLEIBOL AL AIRE LIBRE	2
BÁSQUETBOL AL AIRE LIBRE	2
ÁREAS	
ÁREA TOTAL CONSTRUIDA	63,513
ÁREA TOTAL DEL TERRENO M <sup>2</sup>	185,556
ÁREA FACTIBLE DE CONSTRUIR M <sup>2</sup>	2,766
EQUIPOS DE COMPUTO	
ATENCIÓN A ALUMNOS	704
ALUMNOS POR COMPUTADORA	6
USO ADMINISTRATIVO	359

**ANEXO III: Informe de resultados del análisis del pozo.**



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA**  
**LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYOS**



Informe No. 18036/225  
 Página 1 de 2  
 Fecha de elaboración: 2018/11/23

Cliente: Dr. Juan de la Rosa Gómez, Instituto Tecnológico de Toluca.  
 Dirección: Av. Tecnológico s/n, Colonia Agrícola Buenavista, Nezahualcóyotl, Estado de México.

**DATOS DE MUESTRAS**

Lugar de muestreo: No especificado  
 Tipo de muestra: Líquida  
 Tipo de muestreo: No especificado

Preparación de muestras realizada por el LIIA  Preparación de muestras realizada por el Cliente

**RESULTADOS**

**LUGAR DE ANÁLISIS:**

	<input checked="" type="checkbox"/>			Condiciones ambientales	
Punto de muestreo	<input checked="" type="checkbox"/>	Fecha de muestreo	<input checked="" type="checkbox"/>	Temperatura °C	Humedad Relativa %
No especificado	<input type="checkbox"/>	No especificado	<input type="checkbox"/>	---	---

Camp: Instituciones del LIIA Otro: No aplica

Fecha de recepción de muestras: 2018/11/07

Identificación de la muestra	Parámetro	Resultado	Incógnitas	Unidades	Fecha de análisis	Condiciones ambientales	
						Temperatura °C	Humedad Relativa %
Grifo	Cobalto	1,49	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---
	Nitrato	2,52	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---
	Fósforo total como PO <sub>4</sub>	NQ	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---
Cisterna	Cobalto	1,74	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---
	Nitrato	3,72	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---
	Fósforo total como Fosfato	NQ	No detectado	mg/L	2018/11/08	---	---

NA: No aplica, NQ: No cuantificable, ND: No detectado

**Observaciones:**

Se reporta NQ ya que el resultado se encuentra por debajo del primer punto de calibración para

PC-04-FB-02 5/15/18

---

Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental, Edificio "B1" del Instituto Tecnológico de Toluca.  
 Av. Tecnológico s/n, Colonia Agrícola Buenavista, Nezahualcóyotl, Estado de México, C.P. 52149.  
 Tel.: 01 (722) 2 18 72 36

## ANEXO IV: Cálculos de Bernoulli.

**Edificio Tics:** altura 16 m

Considerando que la velocidad inicial es cero, se tiene:

$$V = V_0 + at$$

$$s = s_0 + vt$$

$$0 = 16 + (at)t$$

$$0 = 16m + 9.81 \frac{m}{s^2} t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{16m}{9.81 \frac{m}{s^2}}} = 1.27s$$

$$V = at$$

$$V = V_1 = 9.81 \frac{m}{s^2} * 1.27s = 12.5283 \frac{m}{s}$$

Asumiendo que:

$$Q_1 = A_1V_1$$

$$A_1 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.1016m)^2}{4} = 0.00810m^2$$

$$Q_1 = 0.00810m^2 * 12.5283 \frac{m}{s} = 0.1015 \frac{m^3}{s}$$

Por el principio de continuidad todo lo que entro debe ser igual a lo que sale tenemos:

$$Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = A_2V_2$$

$$V_2 = \frac{Q_1}{A_2}$$

Considerando que la estructura del Manifold tiene 6 tubos de 4" (0.1016 m) de diámetro a la descarga y cada uno tiene 31 orificios de 0.03 m de diámetro entonces se tiene un área a la descarga de:

$$A_2 = \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 * 31 \right] =$$

$$= \left[ \frac{\pi * (0.1016m)^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * (0.03m)^2}{4} * 6 * 31 \right] = 0.1801m^2$$

Sustituyendo en la ecuación se tiene una  $V_2$  de:

$$V_2 = \frac{0.1015 \frac{m^3}{s}}{0.1801 m^2} = 0.5639 \frac{m}{s}$$

**Edificio K:** altura 10 m

Considerando que la velocidad inicial es cero, se tiene:

$$V = \cancel{V_0} + at$$

$$s = s_0 + vt$$

$$0 = 16 + (at)t$$

$$0 = 10m + 9.81 \frac{m}{s^2} t^2$$

$$t = \sqrt{\frac{10m}{9.81 \frac{m}{s^2}}} = 1.009s$$

$$V = at$$

$$V = V_1 = 9.81 \frac{m}{s^2} * 1.009s = 9.9045 \frac{m}{s}$$

Asumiendo que:

$$Q_1 = A_1 V_1$$

Para este edificio el valor del  $D_1 = 0.1524 \text{ m}$ , ya que el tubo de entrada del flujo es de 6".

$$A_1 = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.1524\text{m})^2}{4} = 0.0182\text{m}^2$$

$$Q_1 = 0.0182\text{m}^2 * 9.9045 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.1806 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por el principio de continuidad todo lo que entro debe ser igual a lo que sale tenemos:

$$Q_1 = Q_2$$

$$Q_1 = A_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{Q_1}{A_2}$$

Considerando que la estructura del Manifold tiene 6 tubos de 4" (0.1016 m) de diámetro a la descarga y cada uno tiene 31 orificios de 0.03 m de diámetro entonces se tiene un área a la descarga de:

$$\begin{aligned} A_2 &= \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * D^2}{4} * 6 * 31 \right] = \\ &= \left[ \frac{\pi * (0.1016\text{m})^2}{4} * 6 \right] + \left[ \frac{\pi * (0.03\text{m})^2}{4} * 6 * 31 \right] = 0.1801\text{m}^2 \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación se tiene una  $V_2$  de:

$$V_2 = \frac{0.1806 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.1801 \text{m}^2} = 1.0030 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

# ANEXO V: Informe de resultados de análisis del suelo.



GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO



## LABORATORIO DE SUELOS INFORME DE RESULTADOS

Metepec, México a miércoles, 26 de febrero de 2020

Información General					
Nombre de Cliente:	Isaias	Ubicación:	Metepec	Tamaño del predio:	Si
Apellido del Cliente:	de la Rosa Gómez	Municipio:	Metepec	Cultivo Anterior:	Si
Fecha de Recepción:	25/02/2020	Estado:	México	Cultivo a Plantar:	Si
Folio:	LS-02-16, LS-02-17, LS-02-18	Fecha de muestreo:	06/02/2020	Meta de Rendimiento:	Si
ID:	P1, P2, P3	No. de submuestras:	Si	Tipo de Agricultura:	Si
		Prof. del muestreo:	30 cm		

### Propiedades Físicas

Muestra	Determinación	Resultado	Unidad
P1	Clasificación Textural	Franco arenoso	
	% Arena	68	%
	% Arcilla	14	%
	% Limo	18	%
P2	Clasificación Textural	Franco arenoso	
	% Arena	78	%
	% Arcilla	10	%
	% Limo	12	%
P3	Clasificación Textural	Areno franco	
	% Arena	80	%
	% Arcilla	10	%
	% Limo	10	%

### NOTAS

SI	Sin información
N/A	No aplica
%	Por ciento
ppm	Partes por millón
meq/100g	Miliequivalentes por cien gramos
g/cm <sup>3</sup>	Gramos por centímetro cúbico
dS/m <sup>1</sup>	Decisiemens por metro

ANALIZÓ

ING. MIGUEL ANGEL VALENZUELA SOTO  
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE SUELOS



Secretaría de Desarrollo Agropecuario  
Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria,  
Acuicola y Forestal del Estado de México  
Dirección de Apoyo Técnico y Divulgación  
Laboratorio de suelos

Conjunto SEDAORO s/n, Metepec, Estado de México, C.P. 52140  
icamex\_suelos@edomex.gob.mx  
(722) 2 32 29 22

**ANEXO VI: Participación en el 1<sup>er</sup> Congreso Internacional de Ingenierías del  
TecNM / ITToluca**

