



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño ejecutivo de un tren
de tratamiento de agua
pluvial para uso indirecto,
que corresponda con la
vivienda promedio de la
Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Marcopolo Alcantara Fuentes

DIRECTOR DE TESIS

M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, porque todo lo que tengo se los debo a ustedes. Gracias, nunca podría pagarles todo lo que han hecho por mí.

A mi hermana, por acompañarme toda mi vida y ser un ejemplo para mí.

A toda mi familia, en especial a mi abuelita, Betty, Toño y mis primitos. Sé que siempre voy a contar con ustedes.

A mi director de tesis, Cristian. Gracias por brindarme sus consejos y guiarme en este trabajo, pero, sobre todo, gracias por su tiempo y paciencia.

A la UNAM, por ser parte fundamental de mi formación como profesional y, más aún, como persona.

Contenido

Resumen	7
Introducción.....	8
Objetivo general	8
Objetivos particulares.....	8
Justificación.....	8
Alcances y limitaciones	9
1. Problemática del agua en México y en el mundo	11
1.1 El agua y el hombre	12
1.2 Problemática de la escasez y el saneamiento de agua a nivel mundial.....	14
1.3 Problemática del agua en México.....	19
1.4 Problemática del agua en la Ciudad de México.....	22
2. Aspectos relevantes del aprovechamiento del agua pluvial	26
2.1 ¿Qué es el agua pluvial?	27
2.2 Antecedentes del agua de lluvia como recurso para uso humano alrededor del mundo.....	27
2.2.1 África	28
2.2.2 América	29
2.2.3 Asia.....	29
2.2.4 Europa	31
2.2.5 Oceanía	31
2.3 Antecedentes del agua de lluvia como recurso para uso humano en México	31
2.4 Características del agua pluvial.....	32
2.4.1 Características físicas y organolépticas	33
2.4.2 Características bacteriológicas	36
2.4.3 Características químicas.....	37
2.4.4 Característica radiactivas.....	39
2.5 Sistemas de captación de agua de lluvia convencionales	39
2.5.1 Superficie de captación.....	40
2.5.2 Sistema de conducción	41

2.5.3 Discriminador de primeras lluvias	41
2.5.4 Filtro.....	41
2.5.5 Tanque de almacenamiento.....	42
2.5.6 Otros elementos de los SCALL	42
2.6 Impacto potencial de la implementación de sistemas de captación de agua pluvial en el hogar	42
2.7 Marco legal.....	43
2.7.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.....	43
2.7.2 Ley de Aguas Nacionales	44
2.7.3 Ley del Derecho a los Servicios Públicos de Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado y Tecnología Hídrica de la Ciudad de México	44
2.7.4 Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal.....	45
2.7.5 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización.....	45
3. Perfil de la vivienda promedio en la Ciudad de México	48
3.1 Aspectos demográficos generales de la CDMX.....	49
3.2 Características socioeconómicas de la población de la CDMX.....	51
3.2.1 Vivienda	51
3.2.2 Educación	53
3.2.3 Ingresos.....	54
3.3 Sistemas domiciliarios para el manejo de agua pluvial en la vivienda promedio de la CDMX	55
3.4 Definición del espacio disponible promedio para la instalación del tren de tratamiento a desarrollar	58
4. Consumo habitacional de agua en la Ciudad de México	59
4.1 Distribución del consumo habitacional.....	60
4.2 Clasificación del uso del agua en el hogar.....	62
4.2.1 Uso primario	63
4.2.2 Uso secundario	63
4.2.3 Uso terciario.....	63
4.3 Determinación del uso de diseño	64

5. Descripción general del tren de tratamiento.....	66
5.1 Afluente y efluente.....	67
5.2 Diagramas de flujo y funcionamiento del tren de tratamiento.....	68
5.3 Operaciones y procesos unitarios a desarrollar	71
5.3.1 Filtración mediante filtro dual	71
5.3.2 Desinfección mediante cloración.....	81
6. Construcción del sistema de tratamiento	84
6.1 Construcción del modelo del filtro dual	85
6.1.1 Carbón activado, arena sílica y grava	85
6.1.2 Estructura del filtro dual	87
6.2 Adaptación del dosificador FibroPool® FC 200 al tren de tratamiento	89
7. Pruebas de tratabilidad en el laboratorio.....	91
7.1 Condiciones supuestas para la operación en casa habitación.....	92
7.1.1 Análisis de la potencia de la bomba	93
7.2 Pruebas a desarrollar	95
7.2.1 Turbiedad.....	95
7.2.2 Color	96
7.2.3 Potencial hidrógeno	96
7.2.4 Cloro residual libre	97
7.3 Muestras a emplear.....	98
7.3.1 Muestra sintética	98
7.3.2 Muestras de agua pluvial	99
7.4 Filtración.....	100
7.4.1. Instalación del dispositivo en el laboratorio	101
7.4.2 Acciones previas a la operación del filtro	101
7.4.3 Filtración con muestra sintética.....	102
7.4.4 Filtración con agua de lluvia.....	102
7.5 Desinfección.....	103
7.5.1 Instalación en el laboratorio	103
7.5.2 Acciones previas a la operación del dosificador	104
7.5.3 Desinfección con agua destilada.....	105

8. Diseño final del tren de tratamiento	106
8.1 Diagrama definitivo del funcionamiento del tren de tratamiento.....	107
8.2 Operación del tren de tratamiento definitivo	109
8.2.1 Prototipo final.....	109
8.2.2 Resultados obtenidos	110
8.2.3 Prueba de retrolavado	113
8.3 Costo del tren de tratamiento.....	115
9. Conclusiones	117
Apéndice 1. Planos del tren de tratamiento.....	120
Apéndice 2. Manual de operación del tren de tratamiento	129
Referencias bibliográficas	137

RESUMEN

La cosecha de agua de lluvia es una práctica común en todo el mundo, sin embargo, en la Ciudad de México esta práctica, a pesar de algunas iniciativas desarrolladas, ha encontrado dificultades en su lucha por posicionarse como una fuente de abastecimiento convencional. Es por esto que, el presente documento tiene como finalidad desarrollar el diseño ejecutivo de un tren de tratamiento que se adapte lo mejor posible a las características de la vivienda promedio en la CDMX, brindado así agua apta para su consumo indirecto.

Tras consultar diversas bases de datos, se llega a un perfil de la vivienda promedio en la capital mexicana. Ésta está habitada por 3.4 personas, de las cuales sólo una realiza una actividad remunerada. Además, se tiene que la vivienda está constituida por cuatro cuartos, los cuales cuentan con un techo de concreto o del sistema conocido comúnmente como vigueta y bovedilla; mientras que el almacenamiento del agua potable se realiza principalmente empleando tinacos de distintas capacidades.

El consumo habitacional promedio en la CDMX es de 191 litros por día por cada habitante, considerando este dato, puede inferirse que la vivienda promedio consume casi 650 litros de agua cada día, de los cuales, tras analizar diversas fuentes de datos referidos al consumo habitacional, al menos 40% son empleados en el WC y el lavado de ropa, es decir, alrededor de 260 litros. Esto, aunado al análisis realizado por el Ing. Chinchilla, sustenta el hecho de que el objetivo del sistema de tratamiento sea producir agua para dichos fines.

El uso indirecto demanda satisfacer los lineamientos establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 para características físicas y organolépticas y características bacteriológicas, por lo cual se hace uso de la filtración, mediante un filtro dual, y de la desinfección, ésta mediante cloración. Es importante recalcar que se hace uso también de un equipo de bombeo y un sistema de bypass que permite regular el flujo de agua a través del sistema.

El filtro dual está compuesto por carbón activado, arena sílica y un soporte de grava. Estos materiales se seleccionan en función de la granulometría que poseen y se colocan dentro de una estructura construida con diversas piezas de PVC, la cual es configurada de tal manera que sea desmontable, facilitando así las labores de mantenimiento. Una vez elaborado el filtro, éste se somete a diversas pruebas de tratabilidad empleando una muestra sintética y muestras de agua de lluvia captadas in situ. Los resultados obtenidos en cuanto a turbiedad, color y pH fueron, en general, muy favorables.

En lo que respecta a la desinfección, se hace uso de un dosificador de pastillas de tricloro. Este dispositivo, originalmente diseñado para su uso en piscinas, permite clorar el agua de una manera práctica, pues sólo se necesita ajustar la válvula dosificadora en una posición que brinde la cantidad de cloro residual libre deseada, en este caso entre 0.2 y 1.5 mg/l. Tras adaptar el dosificador al sistema que se tenía diseñado hasta el momento -el sistema de bombeo, bypass y el filtro dual- y añadir las tabletas de tricloro estabilizado requeridas, se realizaron pruebas con agua destilada para determinar las características de la dosificación y así poder alcanzar la cantidad de cloro residual libre óptima.

Por último, se establece la configuración final del sistema de tratamiento y se pone a prueba con las muestras de agua de lluvia. El tratamiento resultó exitoso; todas las muestras se encuentran por debajo de los límites de color y turbiedad, además de encontrarse dentro del rango de alcalinidad establecido; en cuanto a la cloración, tres de las cinco muestras cumplieron con la normativa para cloro residual libre, mientras que las dos restantes estuvieron muy cerca de hacerlo. El costo total del sistema es de \$8,433.88 MXN. Adicionalmente se anexan los planos ejecutivos y el manual de operación del tren de tratamiento.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis muestra el proceso para llegar al diseño ejecutivo de un tren de tratamiento cuya implementación en la casa habitación promedio de la zona de estudio sea viable y éste tenga la capacidad de cumplir con los requerimientos planteados.

A lo largo del documento se muestra el marco teórico del proyecto, mismo que involucra desde aspectos geográficos relevantes hasta el marco legal que rige el desarrollo y la operación de sistemas análogos al que se desarrolla. Haciendo uso de diversos recursos y bases de datos se determina un perfil tanto del usuario como de la vivienda promedio y, con base en estudios de caracterización del agua de lluvia y los procesos y operaciones requeridas para producir agua con la calidad deseada, se procede a elaborar el diseño ejecutivo del sistema de tratamiento.

Además de detallar los procedimientos seguidos para elaborar cada uno de los componentes del sistema, se anexan los planos ejecutivos y el manual de operación de éstos.

Objetivo general

Elaborar el proyecto ejecutivo de un tren de tratamiento de agua pluvial que corresponda con las condiciones de la vivienda promedio de la Ciudad de México, capaz de producir agua con características aptas para uso humano doméstico en muebles y aparatos sanitarios que no involucren contacto directo.

Objetivos particulares

- Definir la problemática de la baja disponibilidad de agua en la zona de estudio.
- Establecer los aspectos relevantes del aprovechamiento pluvial y los efectos que éste conlleva.
- Establecer el consumo habitacional promedio de agua potable en la Ciudad de México.
- Definir las condiciones promedio de los sistemas domiciliarios para el manejo de agua de lluvia en la zona de estudio.
- Establecer el espacio promedio disponible para la posible instalación de sistemas para el aprovechamiento de agua de lluvia.
- Diseñar el sistema de tratamiento de agua pluvial.
- Elaborar planos ejecutivos de los elementos del tren de tratamiento de agua pluvial.
- Integrar las memorias de cálculo y descriptivas del proceso de diseño del tren de tratamiento de agua pluvial.
- Elaborar el manual de operación del sistema diseñado.

Justificación

Como es sabido, el agua es un recurso vital con el que el ser humano ha contado a lo largo de la historia. No obstante, el hombre ha agotado poco a poco las reservas provenientes de las fuentes de abastecimiento más comúnmente explotadas, tales como aguas subterráneas y

superficiales, lo cual, en conjunto con los cambios en la población a nivel mundial, ha generado un problema de falta del recurso para los años venideros.

Partiendo de dicha problemática se plantea una solución que, aunque se ha dejado de lado con el paso de los años, diversas culturas han empleado desde tiempos remotos: el uso del agua de lluvia para satisfacer las necesidades cotidianas del ser humano. El objetivo primordial es materializar esta idea en un proyecto ejecutivo que brinde una alternativa práctica y asequible, tomando en cuenta las condiciones en las que vive el habitante promedio de la Ciudad de México, lugar donde, lamentablemente, las alcaldías con mayor pobreza patrimonial¹ en muchas ocasiones son coincidentemente las que cuentan con la menor disponibilidad de agua en la capital (INEGI, 2015). Dicho proyecto ejecutivo se refiere a un tren de tratamiento de agua pluvial capaz de producir agua para uso doméstico indirecto, recurso que será útil para realizar labores de limpieza y emplearse en algunos muebles sanitarios, teniendo así el potencial de cubrir cerca de la mitad de la cantidad de agua demandada en el hogar capitalino promedio.

Alcances y limitaciones

Como se mencionó anteriormente, la presente tesis se basa en investigaciones realizadas previamente, entre las cuales destaca la elaborada por el Ing. Rodrigo Chinchilla en el año 2020, donde se hace la propuesta conceptual de diversos trenes de tratamiento, mismos que varían en función del uso al que se destina el agua a la salida del sistema.

Partiendo de esto, se tomará el tren de tratamiento para uso primario propuesto realizado, además de tomar en cuenta las características socioeconómicas del sector de la población al cual se pretende que el sistema esté destinado. Dicho uso, el primario se refiere al uso de WC, lavado de ropa, lavado de pisos, lavado en exteriores y jardinería; a lo que se suma el bajo costo de instalación, operación y mantenimiento del tren de tratamiento, además de su fácil manejo en cada una de estas instancias.

En este trabajo se elabora el diseño ejecutivo en su totalidad, mismo que abarca tuberías, dispositivos de almacenamiento, filtros, válvulas, entre otros elementos, éstos se detallan a lo largo del texto que se presenta; por lo que el producto final son los planos ejecutivos del tren de tratamiento desarrollado.

También se entrega como producto final el manual de operación de todo el sistema, documento en el cual se especifican los pasos necesarios para alcanzar un óptimo funcionamiento de cada uno de los componentes, además de las diversas dosificaciones de los compuestos necesarios para obtener la calidad objetivo; todo esto con un lenguaje detallado y comprensible para cualquier mexicano.

Aunado a esto, el presente trabajo no involucra un muestreo de agua lluvia ni propone otros trenes de tratamiento, puesto que dichas acciones han sido realizadas por otros autores, entre ellos compañeros de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, por lo que se limita a hacer uso de los resultados obtenidos con anterioridad que puedan servir para el desarrollo de este proyecto.

A su vez, las características de interés del agua de lluvia se limitan a aspectos bacteriológicos, físicos y organolépticos, esto dada la naturaleza del uso indirecto que se pretende dar al recurso

¹ La pobreza patrimonial o de patrimonio está definida como la insuficiencia del ingreso disponible para adquirir la canasta alimentaria, así como realizar los gastos necesarios en salud, vestido, vivienda, transporte y educación, aunque la totalidad del ingreso del hogar fuera utilizado exclusivamente para la adquisición de estos bienes y servicios. (CONEVAL, 2019)

tratado. Es por esto que las pruebas a realizar en el laboratorio corresponderán con dichos parámetros, dejando de lado las características químicas del agua cosechada.

Es necesario mencionar que el sistema desarrollado, si bien puede ser empleado en otras regiones, no es recomendable su uso fuera de la zona de estudio, pues éste es el resultado final de una exhaustiva investigación de las características, de todo tipo, del entorno del tren de tratamiento.

Además, es importante recalcar que el sistema desarrollado no se implementará en una casa habitación en esta fase, por lo cual un análisis de costo contra beneficio, que tome en cuenta todas las variables que involucra un ejercicio de este tipo, excede los alcances de esta tesis y se propone como el siguiente paso en la línea de investigación.

CAPÍTULO 1

PROBLEMÁTICA DEL AGUA EN MÉXICO Y EN

EL MUNDO

El ser humano siempre estará en la búsqueda de agua, ya sea para consumirla directamente o emplearla en distintas actividades. Es por ello, que la relación de ambos, agua y hombre, es inherente, lo cual, a su vez, indica que ésta ha tenido un pasado, un presente y un futuro.

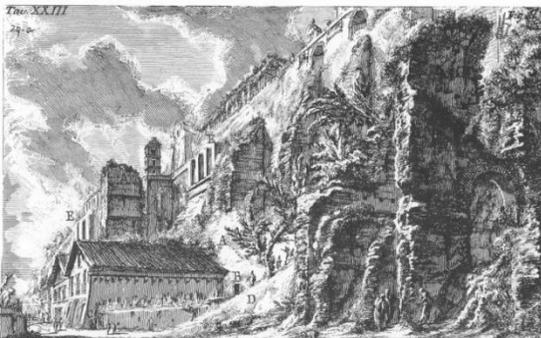
Este capítulo tiene como finalidad presentar la influencia que el agua ha tenido en la vida del hombre, desde la antigüedad hasta el día de hoy; pero, sobre todo, enfatizar cómo es que se ha mermado el recurso disponible para las épocas venideras y las consecuencias que esto podría representar.

1.1 El agua y el hombre

A lo largo de su historia el hombre ha tenido y tendrá necesidades por satisfacer, las cuales van desde lo primordial para vivir hasta aquellas que pueden resultar banales, desde ciertos puntos de vista. Una de las necesidades fundamentales para el ser humano es la alimentación, es por ello que, desde el inicio de su historia se vio relacionado, directa o indirectamente, con un recurso natural primordial para la vida de toda especie en el planeta: el agua.

Gracias al agua el hombre fue capaz de desarrollar diversas actividades, por ejemplo, la agricultura que a la postre le permitieron pasar de una vida nómada a una sedentaria, formando así las primeras civilizaciones del mundo antiguo, las cuales, casi invariablemente, se asentaron cerca de fuentes de abastecimiento de agua, mismas que en su mayoría eran de tipo superficial, es decir ríos, lagos, lagunas, por mencionar algunas, lo cual contribuyó al mejoramiento de la calidad de vida en aquel entonces.

Una de las primeras civilizaciones en asentarse alrededor de cuerpos de agua, principalmente en ríos, fue la de Shang (también conocida como Yin en algunos textos), pues hay evidencias de que esta dinastía estableció centros urbanos en las llanuras cercanas a los ríos *Changjiang* (o *Yangtse*) y, principalmente, *Huang He* (más comúnmente conocido en México como *Amarillo*) desde el siglo XVIII a.C., lo cual significa que fue la primera en hacerlo en China. De esta manera, la dinastía Shang, explotando los recursos hídricos que tenía al alcance debido a su posicionamiento geográfico, pudo consolidar a la agricultura como la base de su economía, además de contribuir enormemente a la actividad ganadera; aunque el desarrollo tecnológico solo se desarrolló al punto de elaborar instrumentos de piedra capaces de transportar pequeñas cantidades de agua y no así sistemas de riego, es indudable que la cercanía a una fuente de abastecimiento de agua representó una ventaja de consideración, esto debido a las actividades se pudieron desarrollar y para consumo humano (Botton Beja, 2008).



Fotografia degli avanzi di antichi fabbricati alle falde dell'Acquedotto sulla strada detta di Marmorata. A. Avanzi delle mura antiche. B. Spazio del condotto dell'acqua d'opus. C. Fontanella moderna proveniente dal d'opus. D. Salto moderno della sottostante al Clivo di Publico. E. Avanzi della costruzione dell'Acquedotto. Giovanni Battista Piranesi.

Figura 1.1 Acueducto Aqua Appia. Fuente: Roman Aqueducts (2019)

Con el paso del tiempo, las civilizaciones alrededor del globo fueron sofisticando cada vez más su forma de vida, lo cual dio lugar a constantes avances tecnológicos en las obras hidráulicas y el manejo de los recursos hídricos, entre estos avances se pueden encontrar canales, sistemas de riego, sistemas de abastecimiento, drenajes, etc. Entre estas obras hidráulicas se encuentra la presa *Sadd el-Kafara* en Egipto, la cual se estima se construyó alrededor del año 2600 a.C. y fue la primera presa de gran magnitud (Bard & Blake, 1999);

otro ejemplo de la ingeniería hidráulica de la antigüedad son los acueductos romanos, de los cuales el primero fue el *Aqua Appia*, construido en la capital italiana en el año de 312 a.C. (Ball, 1929).

Si bien dichos avances han sido de gran ayuda al desarrollo de la humanidad, y no obstante el avance tecnológico en todo el mundo hasta alcanzar las grandes obras actuales, también han contribuido a mermar poco a poco los recursos hídricos con los que cuenta el planeta. Se estima que actualmente la Tierra cuenta con aproximadamente 1,386 billones hm^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 billones de hm^3 , es agua dulce, la cual podría ser de consumo humano, pero de esta cantidad casi el 70% no está disponible para este fin, puesto que se encuentra en glaciares, nieve y hielo (CONAGUA, 2018); además de considerar que gran parte de dicha agua no se encuentra lista para ser consumida, sino hasta después del tratamiento pertinente.

Pero, en términos fisiológicos, ¿por qué es vital el consumo de agua en los seres humanos? Desde el momento de su nacimiento, el organismo del hombre está compuesto en gran medida por agua; se estima que al momento de nacer el agua corporal total representa, en promedio, un 74% del peso total, mientras que en la etapa adulta un 50% y 59% para mujeres y hombres, respectivamente. Ante estos números, es evidente la necesidad del ser humano de saciar su demanda de agua, pues de lo contrario se presentarían problemas en la asimilación de nutrientes, la temperatura corporal no se podría regular adecuadamente, no habría un medio adecuado para la disolución de líquidos corporales, por mencionar algunos (Grandjean & Campbell, 2004).

Algunos autores sugieren que la ingesta diaria de agua para una persona adulta promedio debe de estar entre 30 y 35 mililitros por cada kilogramo de peso (Martin, 2000), mientras que otros precisan de factores como la temperatura media diaria y la actividad a realizar para dar un valor de ingesta diaria recomendado, tal como se muestra en el gráfico de la figura 1.2 (Grandjean & Campbell, 2004).

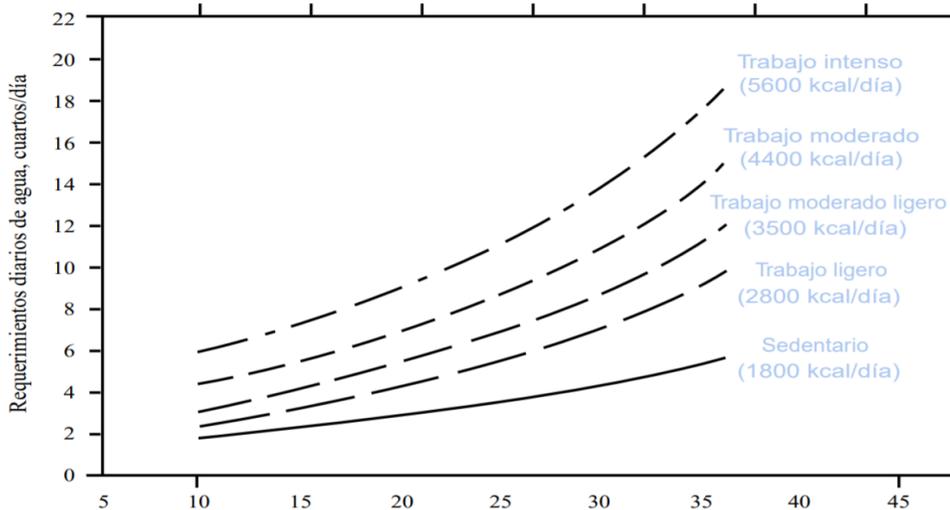


Figura 1.2 Ingesta de agua diaria recomendada. Fuente: Grandjean & Campbell (2004)

NOTA:

El gráfico muestra la unidad cuartos/día. Es pertinente aclarar que 1 cuarto es equivalente a 0.9463 litros.

² Un hectómetro cúbico, con símbolo hm^3 , es un volumen igual al de un cubo de 100 metros de cada lado, es decir, $1,000,000 \text{ m}^3$.

La importancia del agua a nivel fisiológico juega un papel fundamental en la vida de todos los individuos, mas, dicha relevancia no está limitada a este aspecto. El agua es un recurso tan preciado debido a que, más allá de las actividades económicas que facilita, cuando se dispone de ésta permite elevar la calidad de vida de la población; una sociedad con suficiente agua potable es capaz de llevar día a día una vida más saludable, puesto que las condiciones de sanidad son propicias para realizar de manera óptima actividades básicas como la higiene corporal, aseo de la vivienda, ingesta de agua, manejo de desechos y, en general, la limpieza de todo el entorno.

Como se puede inferir hasta este punto, uno de los retos actuales de la humanidad es buscar alternativas de abastecimiento del tan preciado recurso, tratando de minimizar la huella ecológica y brindando una solución que sea tanto asequible como factible, en todos los sentidos, y así sostener la permanente relación agua-hombre.

1.2 Problemática de la escasez y el saneamiento de agua a nivel mundial

El hombre depende permanentemente del agua, y está es la razón por la cual ha explotado las fuentes de abastecimiento a lo largo de la historia a nivel mundial. Como se mencionó anteriormente, la mayor parte del agua en la superficie terrestre es salada, por lo que solo es potencialmente consumible para el humano un volumen del orden de 10.6 billones de hm^3 , los cuales son los correspondientes al agua dulce; la figura 1.3 muestra una infografía relativa.

Aunado a esta distribución completamente polarizada, se tiene el factor de los cambios en el número de la población a nivel mundial, hecho que podría generar un aumento en cuanto a la cantidad de agua demandada; aunque también hay que tomar en cuenta que dichos cambios podrían ser tanto a la alza como a la baja.

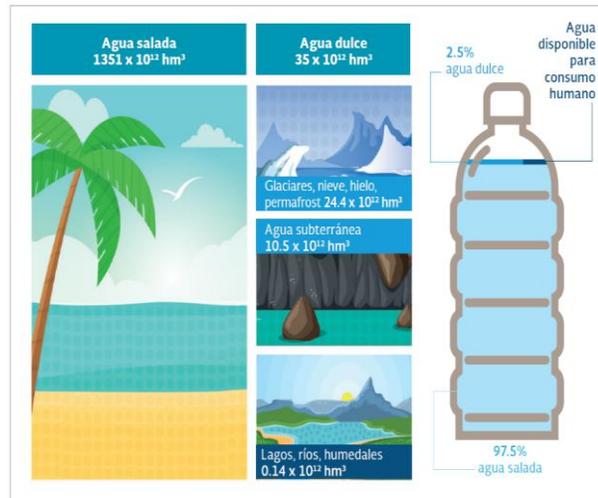


Figura 1.3 Distribución de agua en el mundo. Fuente: CONAGUA (2018)

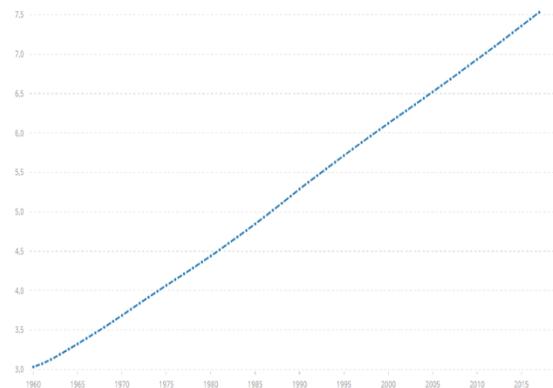


Figura 1.4 Población a nivel mundial desde el año 1960 (cifras en miles de millones en el eje de las ordenadas). Fuente: Banco Mundial (2019)

Al año 2017, la Tierra se encontraba habitada por aproximadamente 7.53 mil millones de personas, de las cuales 60% se localizaban en Asia y Oceanía, mientras que el resto se encontraba distribuido de manera, relativamente, equitativa entre los demás continentes. Dicho número de habitantes representa un aumento sumamente considerable cuando se le compara con el de hace solo unas décadas, cuando en 1960 la población a nivel mundial era de poco más de 3 mil millones de habitantes. Dichas cifras se ven reflejadas en la figura 1.4 (Banco Mundial, 2019).

Como la figura 1.5³ lo muestra, al año 2019, 10 de los primeros 23 países en cuanto al número de población son asiáticos, continente donde se concentra el grueso de la población a nivel mundial. Sin embargo, y aunque pudiera ser fácil pensar lo contrario, de los 23 países mostrados, muchos están próximos a alcanzar su pico poblacional, es decir, llegará un momento en el cual la tendencia irá a la baja, tal y como se muestra en la figura 1.6; uno de los casos más notables es el de China, puesto que se prevé que alcance su pico en los siguientes 10 años, para posteriormente comenzar a tener un menor número de habitantes; además del caso de Rusia, nación que alcanzó dicho punto en el pasado. Se espera que naciones como India, Indonesia, Brasil, Bangladesh y México alcancen su máximo poblacional en un plazo no mayor a 50 años, otras más seguirán el mismo camino o estarán en vías de hacerlo. Es por ello que se espera que, a finales del presente siglo, el número de la población a nivel mundial alcance un máximo definitivo de 11 mil millones de habitantes (GAPMINDER, 2019).

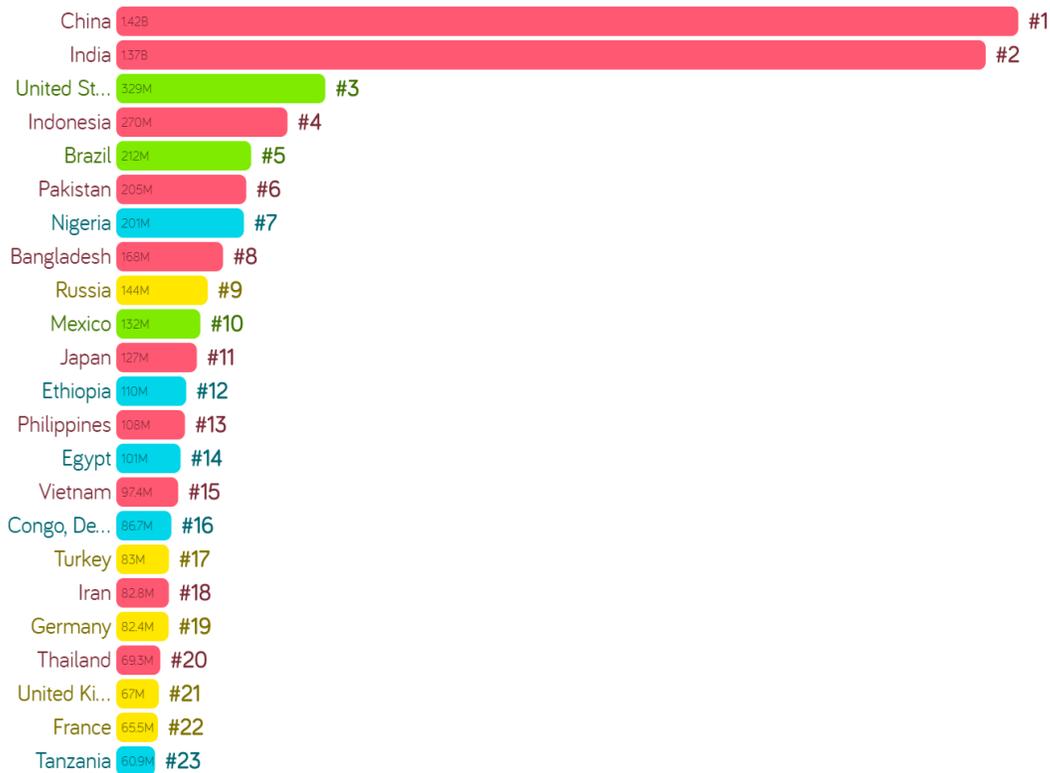


Figura 1.5 Países con mayor número de habitantes al año 2019. Fuente: GAPMINDER (2019)

Una vez mencionado lo anterior, puede entresverse que, aunque la población mundial no aumentará infinitamente, sí habrá un incremento importante en el número de habitantes, lo cual es un factor fundamental en la demanda requerida de agua a futuro. Se estima que hoy en día la escasez de agua afecta a 4 de cada 10 habitantes en el mundo (OMS, 2019), relación que muy probablemente se verá incrementada en caso de no realizar acciones que reviertan la tendencia.

³ Las figuras provenientes de la fuente GAPMINDER, díganse 1.5, 1.6, 1.10 y 1.11, muestran el nombre de las naciones en inglés. En la mayoría de los casos la traducción al español resulta obvia, sin embargo, se presentan casos en los que los nombres de los países difieren considerablemente en cada uno de los idiomas, estos casos pudieran ser: EE.UU. (United States), Filipinas (Philippines), Turquía (Turkey), Alemania (Germany), Gran Bretaña (United Kingdom), Sudán del Sur (South Sudan), Guinea Ecuatorial (Equatorial Guinea), en orden de aparición.

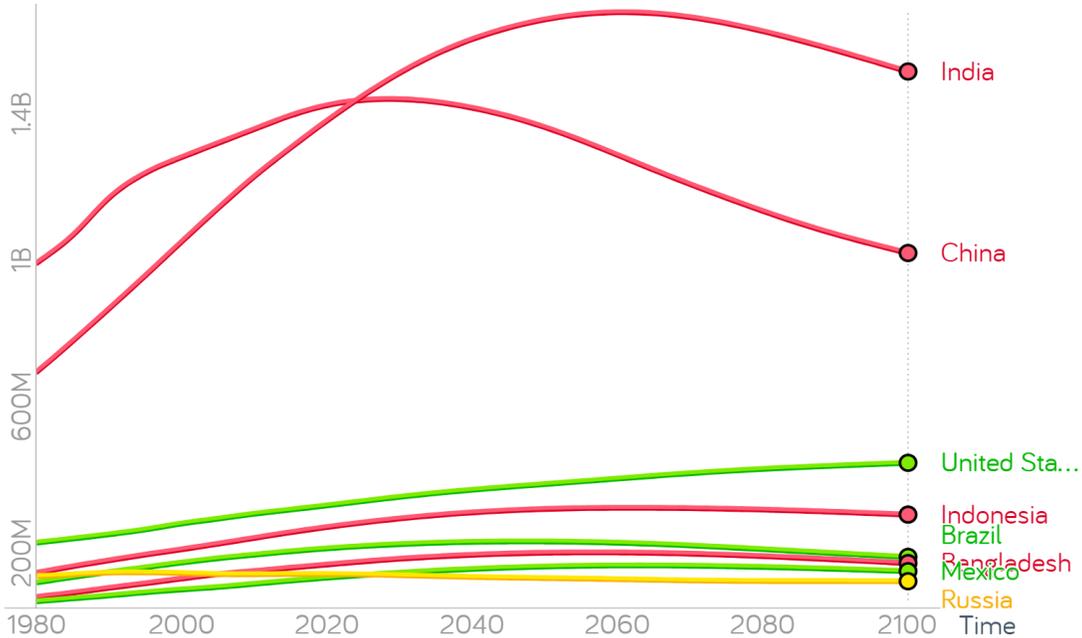


Figura 1.6 Proyección de población en algunos países. Fuente: GAPMINDER (2019)

NOTA: El gráfico muestra el eje de las ordenadas en billones anglosajones. 1 billón anglosajón es igual 1,000 millones del castellano.

Otro de los problemas que se involucran directamente con la escasez de agua a nivel mundial es el cambio climático, el siguiente párrafo explica de manera breve algunos de los efectos de dicha problemática:

En términos de agua dulce, se prevé que durante el siglo XXI se reduzca el agua renovable superficial y subterránea en la mayoría de las regiones subtropicales secas, lo que incrementará la competencia entre los usuarios. Los efectos del cambio climático se acentuarán en las zonas con rápidos procesos de urbanización, sin dejar de lado los impactos en el medio rural por la disponibilidad del agua y los cambios de temperatura, que podría derivar en el desplazamiento de las zonas de cultivo y, por consiguiente, incidir tanto en la población rural como en la seguridad alimentaria en general (CONAGUA, 2018).

Como consecuencia del efecto de factores como el cambio climático y los cambios en la población, también se espera que en el 2050 cerca de 2000 millones de personas vivirán en regiones donde la escasez de agua será casi total y los recursos hídricos por persona estarán por debajo de los 500 metros cúbicos anuales recomendados, lo cual es la cantidad de agua que necesita una persona para llevar una vida sana e higiénica de acuerdo a recomendaciones establecidas (OMS, 2019).

Uno de los indicadores más usados internacionalmente es el agua renovable. Éste se refiere a la cantidad de agua que es factible explotar anualmente sin alterar el ecosistema, es decir, aquella que se puede obtener nuevamente proveniente de la lluvia o de otras regiones o países; el agua renovable *per cápita* también es un indicador recurrente. Como se puede observar en la figura 1.7, los países que tienen la menor cantidad de agua renovable se encuentran en África y Asia, mayoritariamente en el noreste africano y el medio oriente, regiones desérticas y, consecuentemente, con una baja cantidad de precipitación al año. No obstante, también es de

considerar la baja disponibilidad del recurso en el centro de Europa, distintas zonas de África y algunas regiones del centro y sur de Asia.

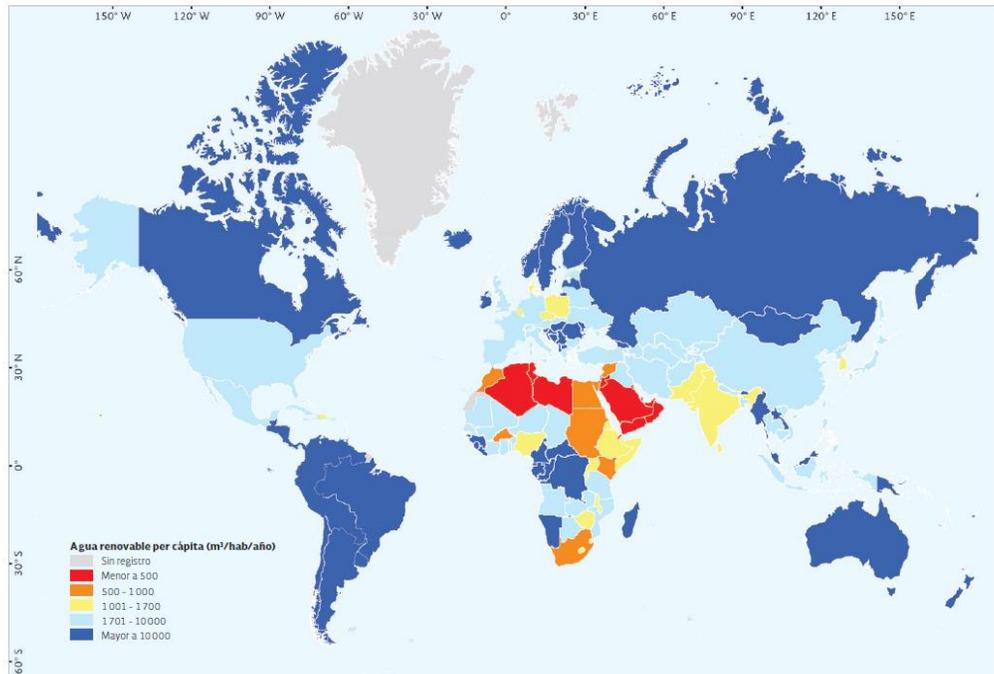


Figura 1.7 Agua renovable per cápita. Fuente: CONAGUA (2018)

Aunque la escasez en cuanto a la cantidad de agua es un tema de vital importancia, no se debe de descuidar el hecho de que el agua que se entrega a la población debe de cumplir con todas las normativas establecidas por los distintos organismos que rigen el abastecimiento del recurso. El agua de mala calidad puede aumentar el riesgo de contraer enfermedades diarreicas como el cólera, la fiebre tifoidea, la salmonelosis, otras enfermedades víricas gastrointestinales y la disentería. En su sitio web, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), publica los siguientes datos para el 2019:

- 2,100 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura.
- 4,500 millones de personas carecen de servicios de saneamiento gestionados de forma segura.
- 340,000 niños menores de cinco años mueren cada año por enfermedades diarreicas.

En el año 2000, la ONU fijo los *Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM)*, los cuales tenían como finalidad primordial reducir la pobreza extrema en un lapso de 15 años. Su objetivo número 7 fue titulado “Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente”, y dentro de éste se encontraba el apartado 7.C, mismo que estipulaba que se tenía la meta de reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso sostenible a fuentes mejoradas de agua potable⁴ y también a servicios mejorados de saneamiento⁵, tomando como punto de partida el año 1990 y como fecha de culminación el 2015.

⁴ Aquellas que están protegidas contra la contaminación exterior, especialmente de materia fecal.

⁵ Aquellos que garantizan higiénicamente que no se produzca contacto de las personas con la materia fecal.



Figura 1.8 Población con acceso a fuentes mejoradas de agua potable al año 2015. Fuente: CONAGUA (2018)

En lo que respecta al agua potable, la meta global se obtuvo en el año 2010, mientras que para el año 2015 el 91% de la población mundial empleaba una fuente mejorada de agua potable, lo cual se traduce en 96% de la población urbana y 84% de la población rural. De 1990 al 2015, 2,600 millones de personas obtuvieron acceso a dichas fuentes. No obstante, algunas regiones del mundo no pudieron cumplir la meta: Asia Central, Oceanía, África del Norte y África Subsahariana, siendo estas dos últimas regiones las más preocupantes. Al 2015, 663 millones de personas continuaban sin acceso a fuentes mejoradas de agua potable, como se aprecia en la figura 1.8 (CONAGUA, 2018).



Figura 1.9 Población con acceso a servicios mejorados de saneamiento al año 2015. Fuente: CONAGUA (2018)

Por otra parte, se puede ver en la figura 1.9 que desde el año 2015 en casi todas las naciones del mundo al menos el 75% de su población tiene acceso a servicios mejorados de saneamiento, mientras que naciones como Rusia y Mongolia con al menos el 50%. El problema es coincidente con el del acceso a fuentes mejoradas de agua potable, donde regiones sumamente pobres como las partes centrales de África y Asia son las más rezagadas en estos dos rubros.

Es evidente que las regiones del mundo con menores recursos generalmente son las más afectadas por la falta de agua para uso humano. Consecuentemente el reto a nivel internacional es el de llevar agua de que cumpla con la normativa establecida en todas aquellas regiones marginadas de manera asequible, facilitando así el desarrollo humano de todos los individuos que integran las comunidades que habitan estas zonas.

Las figuras 1.10 y 1.11 muestran los países con mayor rezago cuando se habla de acceso a fuentes mejoradas de agua potable y acceso a servicios mejorados de saneamiento. Como se puede observar, todos los integrantes, salvo Papúa Nueva Guinea, se encuentran en África, confirmando así que dicha región ha sido históricamente la más vulnerable al abordar el tema del agua potable.



Figura 1.10 Países con mayor rezago en cuanto a fuentes mejoradas de agua potable al año 2015. Fuente: GAPMINDER (2019)

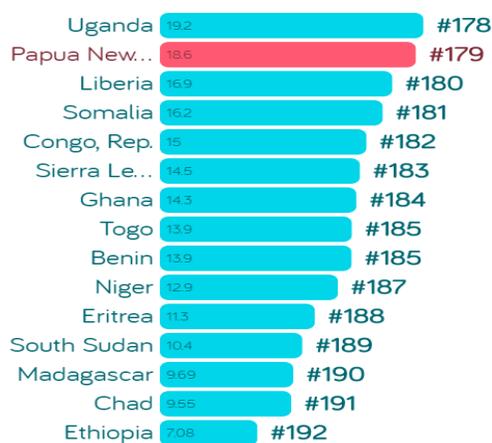


Figura 1.11 Países con mayor rezago en cuanto a acceso a servicios mejorados de saneamiento al año 2015. Fuente: GAPMINDER (2019)

1.3 Problemática del agua en México

México no está exento de la problemática que se vive a nivel mundial en cuanto a la disponibilidad de agua para uso humano. Algunas de las causas son la baja disponibilidad de agua en algunas zonas, la gran cantidad de habitantes alrededor del país, el uso que se le da al recurso, entre otros.

Nuestro país ocupa el décimo primer lugar a nivel mundial en cuanto al volumen de población - 123.5 millones de habitantes al año 2017- y el tercer puesto entre los países con mayor extensión territorial -con un total de 1.96 millones de km²-, del cual 67% es de clima árido y semiárido, siendo el norte y noreste las regiones más secas; mientras que el 33% restante corresponde al clima húmedo, el cual predomina en las zonas sur y sureste (CONAGUA, 2018).

Esta división regional parece también regir dos factores de consideración: el Producto Interno Bruto (PIB)⁶ y la cantidad de agua renovable con la que cuenta México. El primero está compuesto en casi un 65% por el sector terciario, 32% por el secundario y la parte restante por el sector primario, números que sugieren que el PIB se origina en gran medida en los estados donde hay más comercios, restaurantes, hoteles, servicios de comunicación y servicios financieros; dichos estados se encuentran en las regiones del norte y del centro, principalmente. A su vez, el agua renovable tiene una estrecha relación con el clima predominante de la región, ya que el 67% se concentra en el sur y sureste del país. En conjunto, todos los elementos mencionados generan un marcado contraste regional (figura 1.12) (CONAGUA, 2018).

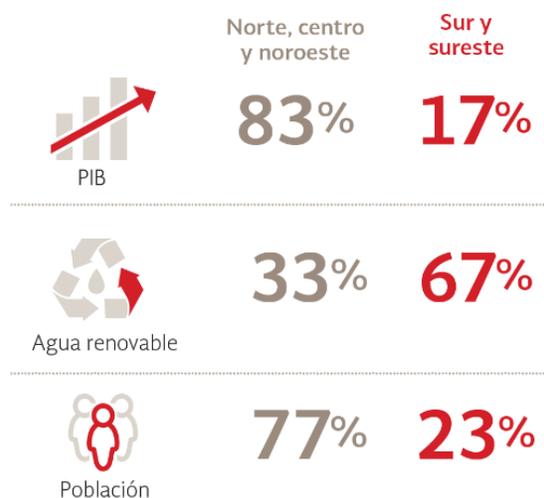


Figura 1.12 Contraste regional de la República Mexicana. Fuente: CONAGUA (2018)

⁶ El PIB se define como el valor total de los bienes y servicios producidos en el territorio de un país en un periodo determinado, libre de duplicaciones (Banco de México, 2019).

Consecuentemente, esta distribución influye en la gestión del agua en las mencionadas regiones. La baja disponibilidad del recurso en el norte, aunado a la gran cantidad de población y de diversas industrias, requiere un manejo eficiente del agua, preponderando la conservación y el reúso. En contraparte, la relativa abundancia de agua, poca población y menor actividad económica en el sur, demanda una mejor protección contra inundaciones y la gestión de los grandes proyectos hídricos en beneficio de toda la nación (CONAGUA, 2018).

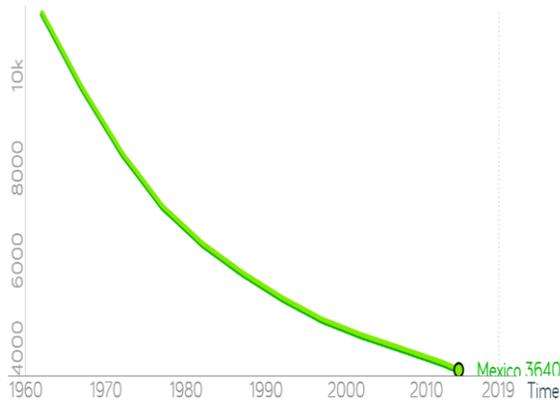


Figura 1.13 Agua renovable per cápita en México 1962 - 2014. Fuente: GAPMINDER (2019)

Los factores anteriormente descritos han contribuido, en mayor o menor medida, a mermar la cantidad de agua renovable en la república. Dicha merma es claramente visible al comparar las figuras 1.13 y 1.14, las cuales muestran las variaciones en el agua renovable *per cápita*, primero en un enfoque global, donde se aprecia que en poco más de cinco décadas pasó de casi 11 mil metros cúbicos por persona a solo 3,600 en el año 2014. Posteriormente, se presenta el mismo indicador, pero con un enfoque regional, donde se pone en evidencia que la región del centro es, y será, más afectada en este aspecto.



Figura 1.14 Agua renovable per cápita en México en el año 2017. Fuente: CONAGUA (2018)

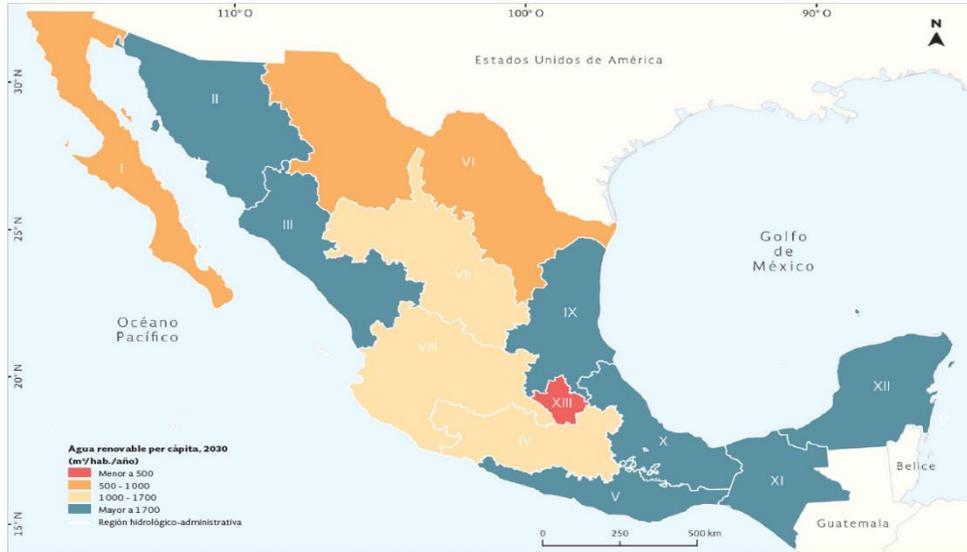


Figura 1.15 Proyección al año 2030 del agua renovable per cápita en México. Fuente: CONAGUA (2018)

Otro indicador de gran ayuda empleado en México, en el contexto de la escasez de agua es el grado de presión. Éste se obtiene de dividir el agua usada, sin contar la hidroelectricidad, entre el agua renovable. Entre más bajo sea este número es mejor para el futuro bienestar; se considera un grado de presión alto a partir de 40%. El grado de presión nacional, en el 2017, fue de 19.5%, es decir, bajo (CONAGUA, 2018).

Como lo pone en evidencia la figura 1.16, el grado de presión es alto en siete de las trece regiones hidrológico-administrativas, en tres no tiene estrés, en dos más es de media a baja y una presenta un grado de presión muy alto. Dicha región es la de *Aguas del Valle de México*, donde se encuentra la Ciudad de México, el punto con mayor actividad económica del país, y que presenta un grado de presión sumamente alto: 141.4%. Esto, en conjunto con los datos anteriormente mostrados relativos al agua renovable, hacen creer que en años venideros el grado de presión aumentará, no solo en esta región, sino en todo el territorio nacional, de no tomarse acciones correctivas.

Al igual que a nivel mundial, la escasez de agua no es la única gran problemática, pues también se debe de garantizar que el agua con la que se abastece a la población sea de la calidad deseada, evitando así diversas enfermedades que pudieran contraerse debido a la ingesta o el contacto con agua contaminada.

México ha hecho un buen papel al respecto durante las últimas dos décadas, logrando así brindar agua entubada y servicios de saneamiento básico a casi el 93% del país, hecho que se traduce en una reducción significativa de las muertes causadas por enfermedades diarreicas en los infantes menores a cinco años. Sin embargo, un 7% se podría traducir en casi 9 millones de habitantes, mismos que no contarían con garantías para poder consumir el agua sin exponerse a distintos padecimientos, razón por la cual es menester brindar soluciones.



Figura 1.16 Agua y salud en México. Fuente: CONAGUA (2018)

1.4 Problemática del agua en la Ciudad de México

En la Ciudad de México, capital de los Estados Unidos Mexicanos, se concentra el 7.5% de la población total del país -es decir, 8,918,653 habitantes-, lo cual, definitivamente, es uno de los factores que hace que la contribución de esta entidad al PIB nacional sea de 16.5% (INEGI, 2019). Si bien la intensa actividad económica de la región puede generar grandes beneficios, también puede contribuir al deterioro de los recursos naturales, entre ellos el agua, pues, como se vio en el subcapítulo 1.3, la región hidrológico-administrativa XIII, de la cual la CDMX es parte importante, es la que presenta menor cantidad de agua renovable y mayor grado de presión en todo el país.

Dentro de la mencionada *RHA XIII Aguas del Valle de México*, se encuentra la Cuenca de México, la cual originalmente era una cuenca cerrada (o endorreica)⁷, lacustre y se encuentra delimitada al este por la Sierra Nevada y la Sierra Río Frío, al poniente por la Sierra de las Cruces, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al norte por la Sierra de Guadalupe. Tiene una extensión cercana a los 9,600 km² y en ella se encuentra la CDMX (Burns, 2009).

La ubicación geográfica de la CDMX le brinda características únicas en todo el mundo. Cuando se considera a la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)⁸ en su totalidad, se tiene que hablar de un caso extraordinario, puesto que ninguna otra de las 10 *megaurbes*⁹ más grandes del planeta se encuentra a más de 2 mil metros sobre el nivel del mar, ni fue fundada sobre una laguna, en una cuenca cerrada (Gutiérrez, 2017). Además, el hecho de estar rodeado por un

⁷ Una cuenca cerrada o endorreica es un área delimitada en la cual el agua no drena hacia grandes cuerpos de agua, por ejemplo, un océano (Nichols, Williams, & Paola, 2007).

⁸ Incluye a la CDMX en su totalidad, 59 municipios del Estado de México y uno más del estado de Hidalgo (Gutiérrez, 2017).

⁹ *Megaurbe* o *megaciudad* son los términos más comúnmente empleados para traducir la palabra anglosajona *Megacity*, la cual, a su vez, se define como “una gran ciudad, generalmente con más de 10 millones de habitantes” (HarperCollins Publishers, 2019).

sistema montañoso representó para el Valle de México una condición única desde el inicio, esto en cuanto a la composición de su suelo, tal como se describe en los siguientes párrafos:

A lo largo de los años, en el fondo del lago se depositó una gruesa capa de arcilla, compuesta de la materia fina acarreada por las aguas de las lluvias precipitadas en los cerros que circundan la Cuenca. Esta capa se conoce como “acuitardo”, por ser casi impermeable. Tiene un grosor de unos 40 metros, excepto en el sur de la Cuenca, en donde presenta entre 100 y hasta 130 metros de profundidad.

Las arcillas de la Cuenca de México tienen entre 8 y 10 partes de agua por cada porción sólida, lo cual se considera como excepcionalmente poroso. Esta propiedad hace que el acuitardo quede especialmente susceptible a compactarse y agrietarse ante la pérdida de humedad. Una construcción sobre arcillas, que normalmente experimentaría contracciones de 2.5 cm. en otras regiones del mundo, en la Ciudad de México, se compactaría 25 centímetros (Burns, 2009).



Figura 1.17 Apariencia original de la Cuenca de México. Fuente: SACMEX (2012)

Otra de las consecuencias geológicas de la ubicación de esta zona fue la formación de los depósitos aluviales, los cuales son formaciones donde se almacena el agua por debajo del nivel de la superficie, misma que ha fungido desde hace siglos como la principal fuente de abastecimiento interna de la cuenca (Burns, 2009). Hoy en día estos acuíferos aportan el 68% -lo que se traduce como 59.5 m³/s- de la cantidad de agua potable demandada en el Valle de México (Banco Mundial, 2013), porcentaje muy elevado, sin embargo, esta oferta resultaría insuficiente por sí sola.

Dadas las condiciones del suelo de la Ciudad de México y otras partes de la ZMVM, la extracción de agua subterránea ocasiona diversos problemas, tales como hundimientos diferenciales y sobreexplotación de los acuíferos, por mencionar algunos, lo cual, aunado a la

merma en la recarga debido a la urbanización, provoca un abastecimiento insuficiente. Es por ello que desde el siglo pasado se han desarrollado sistemas de importación de agua potable, esto para combatir el déficit que se tendría en el caso de solo contar con el agua proveniente de los pozos de extracción que se encuentran dentro de la cuenca. Los dos sistemas de abastecimiento externos más importantes con los que cuenta la CDMX y, en general, el Valle de México son el Sistema Lerma y el Sistema Cutzamala (Gutiérrez, 2017).

El primero, el Sistema Lerma, es un proyecto cuya construcción se inició en el año de 1942; ideado como una obra hidráulica continental que transferiría agua desde el Océano Pacífico hasta el Océano Atlántico, pues el agua que se toma en la Cuenca de Lerma proviene de caudales que atraviesan la Sierra del Pacífico, mientras que la desembocadura final se da con el drenaje que llega hasta el Golfo de México, es decir el Atlántico, con el agua que ha sido utilizada y drenada en el Valle de México. La primera etapa de construcción consistió en la captación de aguas superficiales en Almoloya del Río, Texcaltenango y Alta Empresa, en el Estado de México, además de cinco pozos de captación de entre 50 y 308 metros de

profundidad; esta etapa duró cerca de 10 años (Legorreta, 2006). Este sistema abasteció de agua al Valle de México en 1951, pero, debido a una crisis de agua en la CDMX en la década de los sesenta, la Secretaría de Recursos Hidráulicos en conjunto con el Departamento del Distrito Federal, dependencias gubernamentales de aquel entonces, decidieron aumentar el flujo, razón por la cual una segunda etapa (1965-1975) comprendió la construcción de 230 nuevos pozos (Gutiérrez, 2017). Hoy en día, el Sistema Lerma abastece de 4.8 m³/s al Valle de México, es decir, 5% de su demanda total (Banco Mundial, 2013). Es pertinente recalcar que dicho caudal ha ido disminuyendo con el paso del tiempo debido a severos hundimientos generados por el sobrebombeo en los acuíferos de Lerma, y se espera que esta tendencia continúe (Burns, 2009).

Por otra parte, se tiene al Sistema Cutzamala. La construcción de este sistema, considerado como una de las grandes obras hidráulicas en América Latina, fue iniciada en 1978; se elaboraron ocho presas, las cuales están conectadas mediante grandes acueductos y plantas de bombeo. La más baja de éstas se encuentra a 1600 msnm, mientras que el punto más alto, el cual es casi inmediatamente antecedido por una gran potabilizadora, está a 2700 msnm, nivel desde el cual se abastece el agua a la CDMX mediante la acción de la gravedad. Su operación, al 100%, inició en la década de los noventa (Legorreta, 2006). Actualmente, aporta 14.7 m³/s al Valle de México, lo cual corresponde con el 17% de la demanda total (Banco Mundial, 2013).

El aporte restante en la cantidad de agua abastecida al Valle de México corresponde a fuentes superficiales locales (3%) y aguas de reúso (7%) (Banco Mundial, 2013).

Como se puede inferir hasta este punto, la importación de agua, la urbanización y la configuración original de la cuenca, generan un desequilibrio que se puede ver materializado constantemente en severas inundaciones y otros problemas de drenaje en la ciudad. Dichos problemas se ven agravados durante la época de lluvias, donde factores como la falta de infraestructura eficiente, el poco número de áreas verdes en la ciudad, la poca infiltración y, por supuesto, la sobreexplotación del agua, provocan que los mencionados problemas sean aún peores.

Mucho se ha hablado en épocas recientes sobre las llamadas “lluvias atípicas” en la CDMX, sin embargo, algunos autores (Adams, 2017) afirman que dichas lluvias se encuentran dentro de lo esperado, es decir que regularmente se presentan cada año durante el mismo periodo, el cual va de mayo a julio, teniendo una pequeña disminución durante la *canícula*¹⁰ y, aunque su intensidad es variable, no están fuera de lo común.

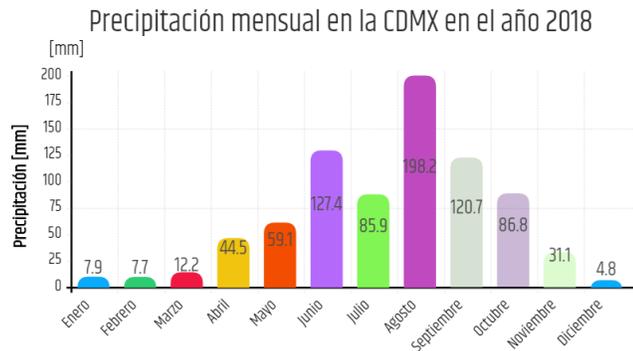


Figura 1.18 Precipitación mensual en la CDMX en el año 2018. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2019)

La figura 1.18 muestra la distribución, con respecto a los meses del año, de la precipitación en la Ciudad de México en el año 2018. En esta se puede observar que, contrario a lo que se afirma en la fuente citada en el párrafo anterior (Adams, 2017), el mes con mayor precipitación fue agosto, teniendo casi 200 mm de lluvia en el año indicado.

¹⁰ Periodo del año en que es más fuerte el calor. En algunos países centroamericanos se emplea el término para referirse a un periodo de sequía dentro de la temporada de lluvias. (Real Academia Española, 2019)

En general, se considera que la temporada de lluvias no ha sufrido cambios significativos. Usualmente se presentan dos tormentas durante la tarde, una más fuerte que la otra; o, en contraparte, se presentan lluvias intensas pero breves. A *grosso modo*, se tiene que la precipitación anual en la CDMX es de 600 mm en las regiones más secas -noreste de la ciudad- y de 1200 mm en partes húmedas -ejemplo, el Ajusco- (Gutiérrez, 2017).

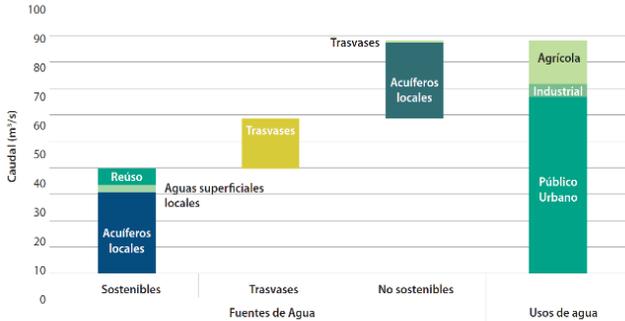


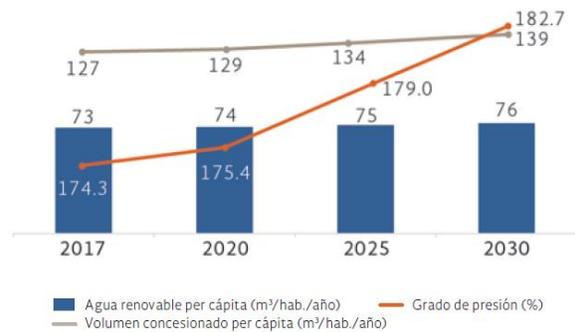
Figura 1.19 Balance de fuentes y usos para el agua del Valle de México. Fuente: Banco Mundial (2013)

Como la figura 1.19 lo exhibe, las fuentes de abastecimiento con las que cuenta la ZMVM pueden dividirse en tres categorías: sostenibles, los trasvases provenientes de otras cuencas y aquellas que no son sostenibles. Las primeras, es decir las sostenibles, son provenientes de acuíferos locales, aguas superficiales locales y el reúso; representan cerca del 40% del agua de la cuenca. Las fuentes de abastecimiento no sostenibles representan cerca del 35% del total de

agua de la cuenca y se refieren a acuíferos locales y trasvases. El agua obtenida de las diversas fuentes de abastecimiento es empleada en casi un 70% para el abastecimiento público, alrededor del 5% para uso industrial y el porcentaje restante se usa para fines agrícolas. Cabe destacar que el agua de lluvia no es una fuente de abastecimiento relevante para el balance mostrado.

Es pertinente recalcar que el volumen pluvial aprovechado es prácticamente nulo, por lo que se tiene que drenar en gran medida. Como consecuencia, las obras de drenaje han tenido que ampliarse, e incrementar su pendiente con la finalidad de disminuir el impacto de los hundimientos diferenciales y poder transportar un mayor caudal. Entre las principales obras de drenaje están: los emisores Poniente y Central, el Gran Canal y, próximamente, el Túnel Emisor Oriente.

Todos los puntos presentados, tanto en el presente subcapítulo como en el anterior, sustentan la idea de que el porvenir de los recursos hídricos en la CDMX puede verse seriamente afectado en caso de no tomar acciones que corrijan el rumbo que hasta ahora ha sido seguido en cuanto al aprovechamiento del agua. Como lo muestra la proyección de CONAGUA (figura 1.20), se espera que el grado de presión en la capital del país se eleve en un 8% durante la siguiente década, mientras que el agua renovable *per cápita* no crecerá a la par, provocando un déficit que habrá de resolverse con soluciones como la cosecha de agua de lluvia.



Grado de presión: Menor a 10% (Sin estrés), De 10 a 20% (Bajo), De 20 a 40% (Medio), De 40 a 100% (Alto), Mayor a 100% (Muy alto)

Figura 1.20 Variaciones del grado de presión y el agua renovable per cápita esperados en la CDMX. Fuente: CONAGUA (2018)

CAPÍTULO 2

ASPECTOS RELEVANTES DEL **APROVECHAMIENTO DEL AGUA PLUVIAL**

El capítulo 1 del presente texto enunció los problemas que se tienen alrededor del mundo cuando se aborda el tema del agua para uso o consumo humano; muchas veces es insuficiente, algunas otras, no es de la calidad deseada y en unas cuantas más la falta de un buen manejo del recurso puede llevar a condiciones adversas para los pobladores de una región.

Es por esta razón que el agua pluvial es el eje central de este y muchos otros trabajos que buscan brindar una alternativa sustentable para contribuir como una solución a los problemas mencionados. A lo largo de este capítulo se expondrán los puntos que sugieren que el recurso proveniente de la lluvia pueda fungir como una fuente complementaria y asequible en términos de calidad y, además, su aprovechamiento sirva como agente de mitigación contra inundaciones y contribuya a la recarga de los acuíferos que han sido sobreexplotados durante un periodo de tiempo considerable.

2.1 ¿Qué es el agua pluvial?

La ciencia define al agua como la sustancia cuya molécula está integrada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. A su vez, la lluvia, del latín *pluvia* (Real Academia Española, 2019), está definida como la “precipitación de partículas de agua líquida en forma de gotas de diámetro superior a 0,5 mm, o de gotas más pequeñas y muy dispersas” (Organización Meteorológica Mundial, 2012).

Así, se puede entender por agua pluvial al agua proveniente de la lluvia, sin importar sus características biológicas, químicas o fisiológicas.

La mencionada precipitación de partículas de agua es, a su vez, parte de un ciclo vital para la existencia tal y como la conocemos: el ciclo hidrológico. Dicho ciclo actúa de manera conjunta con el sol, pues este último es el encargado de dotar de un calor latente que propicia la separación del agua que queda sobre las superficies mojadas y las hojas de las plantas, produciendo la evapotranspiración; ésta trata cada año una cantidad de agua equivalente a un metro de espesor que rodeara toda la superficie de la Tierra. El vapor de agua que se forma es transportado por las corrientes de aire hasta que éste se condensa y, finalmente se precipita, formando así a la lluvia (Masters & Ela, 2008).

2.2 Antecedentes del agua de lluvia como recurso para uso humano alrededor del mundo

Existen distintos estudios que indican que el agua de pluvial puede ser empleada por el humano en distintas actividades, esto con la correcta captación, recolección, almacenamiento y, en caso de ser necesario, tratamiento.

Como se estableció en el inicio del presente texto, el recurso pluvial ha acompañado al hombre desde tiempos remotos. Sin embargo, los *Sistemas Captación de Agua de Lluvias (SCALL)* no han sido la opción más empleada, al menos a gran escala; esto debido a factores como la creencia infundada, popular y científica, de que el agua de lluvia contiene muchos más contaminantes en comparación con otras fuentes; la irregular cantidad de precipitación en muchos lugares, falta de infraestructura, solo por mencionar algunas. Como ejemplo de la mala fama con la que suele contar el agua de lluvia como fuente de abastecimiento para uso humano se tiene un estudio realizado por investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, mismo que adquirió relevancia en distintos medios de comunicación nacionales

en octubre de 2018, el cual afirmaba que “*el agua de lluvia no es apta para consumo directo*” (El Sol de México, 2018).

Si bien el mencionado artículo no miente, tampoco muestra todo el panorama que rodea a la cosecha de agua de lluvia y su subsecuente uso o consumo. Las condiciones calidad de la lluvia que se capta están en función de variables como la ubicación de la zona de estudio, la época del año, las condiciones técnicas, de operación y mantenimiento del sistema de captación, entre otras, además de poder contar con procesos de potabilización, lo que implica la posibilidad de que sea viable para consumo humano; lo cual no contraria al artículo, pero demuestra que un titular aparatoso puede desencadenar en prejuicios mal fundamentados.



Figura 2.1 Collage con diversas portadas de los medios que retomaron la noticia a la que se hace referencia. Fuente: Elaboración propia con información de diversos portales (2019)

Pese a todos los obstáculos que presenta la cosecha de agua pluvial, poco a poco ésta ha tomado una mayor relevancia al momento de buscar fuentes sustentables de agua que permita aliviar algunas de las problemáticas vistas con anterioridad, pues se ha visto que las ventajas pueden ser muchas más que las desventajas. Es por ello que en el pasado reciente los SCALL han detonado importantes líneas de investigación alrededor del mundo y, consecuentemente, su implementación es cada vez más usual, principalmente a nivel domiciliario.

2.2.1 África

Diversas naciones africanas, a lo largo de los últimos 20 años, se han visto favorecidas con el interés de organizaciones no gubernamentales -UNESCO, SIDA, UNEP, por mencionar algunas- de implementar los SCALL como una fuente útil de abastecimiento que les permita desarrollar diversas actividades, programas que principalmente son orientados a comunidades donde la pobreza es evidente (Campisano, y otros, 2017).

Adicionalmente a estos esfuerzos, estudios han mostrado que el aprovechamiento del agua pluvial representa una fuente sustancial en todo el continente (Handia, Tembo, & Mwiindwa, 2003), además, con ayuda de *Sistemas de Información Geográfica* o, por sus siglas en inglés, herramientas *GIS*, se ha podido puntualizar que los países con mayor potencial de aprovechamiento de los SCALL son Botsuana, Etiopía, Kenia, Malawi, Mozambique, Ruanda, Tanzania, Uganda, Zambia y Zimbabue (Mati, y otros, 2017).

En general, se tiene que la forma de SCALL más utilizada es aquella en la cual un dispositivo de almacenamiento, ya sea un tanque o un estanque, es empleado para, como su nombre lo indica, almacenar el agua proveniente de la lluvia para posteriormente ser conducido a un gran número de domicilios por medio de una tubería (Dobrowksy, y otros, 2014). Esto puede relacionarse con otras investigaciones (Fisher-Jeffes, 2015) que señalan que la cosecha del recurso pluvial a nivel doméstico solo es una opción económicamente viable para minorías en las áreas urbanas, ya sea por la necesidad de contar con un techo (el cual funge como superficie

de captación) o por el aislamiento de domicilios sin ninguna otra fuente de abastecimiento de agua potable; lo cual podría explicar el porqué se ha usado esta técnica de manera comunal.

2.2.2 América

Al hablar del continente americano se tiene que tomar en cuenta que las condiciones de vida en dos países de la misma región pueden ser completamente distintas. El tema de la cosecha y aprovechamiento de agua pluvial no escapa de este contexto, pues en naciones como EE.UU. o Canadá esta alternativa ha sido ampliamente estudiada e implementada, mientras que en la gran mayoría de los países restantes dicha línea de investigación se encuentra en las primeras etapas, sin embargo, también se tienen algunos casos dignos de ser mencionados.

Los EE.UU., país que claramente lidera el continente cuando se habla de la utilización de los SCALL. Se tiene que al año 2002 ya se encontraban en uso cerca de 100,000 sistemas de cosecha de agua de lluvia del tipo doméstico, ya sea con fines de riego exclusivamente o como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano (Lye, 2002). Una de las causas de este *boom* por los SCALL es el otorgamiento de incentivos por parte de algunos de los gobiernos estatales -ejemplo, Texas-, los cuales pueden ser exenciones en algunos impuestos o flexibilidades en cuanto a leyes que rigen el uso del agua pluvial (Campisano, y otros, 2017).

En el sur del continente, Brasil ha mostrado un gran interés por explotar el potencial de la cosecha de agua proveniente de la lluvia. En el año 2001 el programa “One Million Cisterns” fue impulsado por diversas ONG, el cual consistía en que las mujeres de las comunidades más pobres de la región semi-árida de Brasil construyeran ellas mismas cisternas que les permitirían cosechar agua de lluvia; once años después, en el 2012, más de 300,000 cisternas habían sido construidas (De Moraes & Rocha, 2013). Posteriormente, otro estudio (Gomes, Heller, & Pena, 2012) incluyó encuestas a 623 beneficiarios del programa, quienes dijeron que los aspectos a mejorar del sistema pueden ser la calidad de la superficie de captación, el tamaño del tanque de almacenamiento (en este caso la cisterna) y la implementación de dispositivos que puedan automatizar la salida del primer flujo.

Estos son solo dos ejemplos de los casos donde se ha recurrido al agua de lluvia como recurso para el abastecimiento a una población en el continente americano, no obstante, se pueden encontrar muchos otros más, tal es el caso de México, el cual se abordará a lo largo del presente capítulo.

2.2.3 Asia

Asia es probablemente uno de los continentes que más ha recurrido a esta alternativa de abastecimiento de agua potable. Algunos de los países donde los SCALL han tenido éxito, en mayor o menor medida son, Singapur, Japón, Corea del Sur, Vietnam, Bangladesh, por mencionar algunos.

El gobierno japonés ha trabajado desde la década de los ochenta en la promoción del uso del recurso pluvial como agua para uso y consumo humano. Como la figura 2.2 lo muestra, este apoyo se ve reflejado claramente en el aumento del número de SCALL instalados en distintos edificios, tanto públicos como privados, en todo el país. En el año 1979 se contaba con menos de 10 sistemas de este tipo y para inicios del nuevo milenio ya se habían rebasado las 1000 unidades. No obstante, se tiene que para el año 2012, a pesar de contar con casi 1900 SCALL instalados, esto solo representaba el 0.01% de la cantidad de agua potable usada en el país (MLIT Japan, 2017).

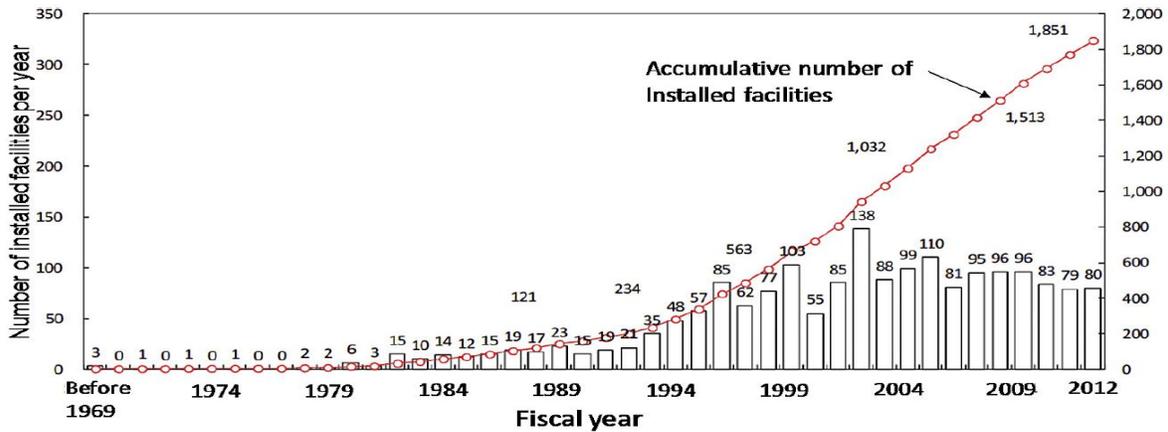


Figura 2.2 SCALL instalados en Japón con respecto al tiempo. Fuente: Campisano (2017)

Otra de las naciones con grandes avances en la cosecha de agua de lluvia es Corea del Sur, donde, al igual que en Japón, las condiciones extremas del clima han orillado desde hace algunas décadas a orientar los esfuerzos a encontrar diversas formas de abastecimiento de agua. En la capital del país, Seúl, se han desarrollado complejos habitacionales que se abastecen, casi en su totalidad, de agua de lluvia; tal es el caso de *Star City*, un conjunto de edificios donde se cuenta con un SCALL que, además de usar el agua de lluvia, presenta una característica “híbrida”, pues al contar con varios tanques ubicados en el sótano uno de éstos también aprovecha el agua que se infiltra para llevar a cabo actividades como el riego (Han & Mun, Operational data of the Star City rainwater harvesting system and its role as a climate change adaptation and a social influence, 2011).

Los esfuerzos de algunos investigadores (Han, Kim, Kabubi, Sohn, & Nguyen, 2016) se han traducido muchas veces en SCALL comunales de gran apoyo para comunidades rurales o de pocos recursos. Uno de estos casos se dio en la “Escuela Primaria Cukhe”, ubicada en Hanoi, Vietnam, donde se instaló un sistema que brinda agua potable que cumple con los estándares establecidos, en una región de bajos recursos donde la única opción para conseguir agua para consumo humano era comprarla embotellada, puesto que las fuentes de abastecimiento de la región se encuentran fuertemente contaminadas con arsénico.

China también ha implementado un gran número de SCALL. Desde el año 2000 hasta hoy en día, se han construido más de 2 millones de tanques para almacenar agua de lluvia en la provincia de Gansu, lo cual se traduce en 73 millones de metros cúbicos de agua para casi 2 millones de habitantes y 230,000 hectáreas de tierras por irrigar. El programa establecido en dicha provincia fue el causante de que hoy se tengan en total más de 5.5 millones de tanques de agua de lluvia a lo largo de todo el territorio chino (Zhu, Gould, & Yuanhong, 2014).

2.2.4 Europa

Actualmente, la cosecha de agua de lluvia en Europa también tiende a ser ampliamente usada, mas no con fines de consumo.

Alemania es uno de los líderes en este rubro, especialmente en el ámbito doméstico, pues, gracias a los incentivos que ha ideado el gobierno, hoy en día uno de cada tres edificios habitacionales nuevos tendrá SCALL como un importante elemento; aunque el uso del agua obtenida mediante dichos sistemas esté limitada al uso no potable debido a fuerte políticas de salubridad (Schuetze, 2013).

En general, la mayoría de los países del oeste de Europa, dígase España, el Reino Unido, Francia, Suiza, Bélgica, más los países escandinavos, tienen regulaciones que exigen a las nuevas edificaciones contar con sistemas que aprovechen el recurso pluvial, pero solo en un nivel primario, es decir uso en actividades como la irrigación, algunos muebles de baño, limpieza, entre otros (Campisano, y otros, 2017).

2.2.5 Oceanía

Por último, se tiene el caso de Oceanía, continente donde la información acerca de este tema escasea, salvo en el caso de Nueva Zelanda y Australia, países que, sin duda alguna, son las grandes potencias de la región y han dado un amplio uso al agua recolectada proveniente de la lluvia.

Particularmente en el caso de Australia, se tiene que es una de las naciones con mayor uso de los SCALL en todo el mundo. Según datos de dependencias del gobierno australiano (Australian Bureau of Statistics, 2016), se estima que al año 2015, 1.7 millones de domicilios contaban con tanques para el almacenamiento de agua de lluvia, lo cual significaba un 8% del uso doméstico de agua en todo el país.

La tendencia parece ir en aumento, ya que en 2007, de las casas que podían instalar un SCALL, 24% lo hacía, mientras que en el 2013, sólo 6 años después, 34% hacían válida dicha opción, lo cual refleja un grado de satisfacción considerable. Otro de los factores para la gran aceptación de estos sistemas es el hecho de que 77% de los usuarios australianos reportaron no haber tenido falla alguna con el sistema instalado en su domicilio en un periodo de doce meses (Australian Bureau of Statistics, 2016).

2.3 Antecedentes del agua de lluvia como recurso para uso humano en México

México es un país que había dejado en un segundo plano al recurso pluvial como fuente de abastecimiento de agua; sin embargo, diversos factores como lo son la baja oferta de fuentes de captación, dificultades técnicas y económicas para desarrollar sistemas de abastecimiento de agua potable en distintas zonas del país, la búsqueda de alternativas sustentables y los recursos de los que se disponen, entre otros, han orillado al nacimiento de iniciativas como el *Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR)*, desarrollado por la CONAGUA.

PROCAPTAR nace en el año 2016, como una alternativa para dotar de agua, que cumpla con los estándares establecidos para consumo humano, a poblaciones en zonas rurales altamente marginadas, pero que cuenten con lluvias anuales acumuladas del orden de 1500 mm (CONAGUA, 2019).

Los objetivos del programa se definen de la siguiente manera (CONAGUA, 2019):

(...) dotar de agua a la población rural de México, en donde existen diversas dificultades técnico- económicas para ser abastecidos mediante formas “tradicionales”, siendo la captación de agua de lluvia una alternativa viable de abasto (...)

Dentro de los objetivos específicos del programa se encuentran:

- *Impulsar el desarrollo social, el acceso al agua y saneamiento de las viviendas de zonas rurales de mayor marginación, mediante sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia y tecnologías de tratamiento de aguas residuales a nivel vivienda.*
- *Involucrar a la sociedad de forma activa.*
- *Ayudar a abatir la pobreza multidimensional en el ámbito de los servicios básicos.*

Así, la CONAGUA se compromete con las comunidades donde es factible materializar la iniciativa -las cuales abarcan gran parte del país, exceptuando la mayoría de los estados del norte de México- a cubrir el 100% de la instalación del SCALL correspondiente, mismo que será capaz de otorgar 50 litros diarios por persona, los 365 días del año, esto según datos de la misma dependencia.

Pero no solo el sector público está haciendo uso de la cosecha de agua de lluvia en México. Uno de los proyectos más interesantes de la iniciativa privada, es el de *Isla Urbana*, empresa establecida en la CDMX dedicada a la instalación de SCALL en domicilios particulares, principalmente, aunque de igual manera, recientemente, ha trabajado en conjunto con el sector público (El Economista, 2019).

Isla Urbana afirma brindar un servicio que puede lograr una independencia del suministro municipal en un periodo de 5 a 8 meses en el domicilio donde se instalen sus productos, además de un considerable ahorro de energía, contribución a la recarga de acuíferos naturales de la ciudad y a la disminución de inundaciones (Isla Urbana, 2019). Todo esto hace lucir a la alternativa de manera atractiva, sin embargo, aspectos como la independencia del sistema dependen de varios factores, mismos que, a su vez, se podrán modificar en cada caso particular por la acción de diversos agentes en el entorno del SCALL, por lo cual resulta difícil asegurar periodos de autonomía tan grandes y, consecuentemente, el ahorro de energía o la contribución a la mejora del ambiente también se verán afectados en mayor o menor medida.

No obstante lo loable de esfuerzos provenientes tanto de la iniciativa pública como privada, el objetivo debe seguir siendo llevar esta alternativa de abastecimiento a lugares donde la falta de agua es un tema que afecta diariamente a dichas poblaciones, las cuales, casi inherentemente, son las que cuentan con menos recursos, por lo que adicionalmente se debe buscar que la cosecha de agua de lluvia sea asequible para todos.

2.4 Características del agua pluvial

Tal y como se describió al inicio del capítulo en cuestión, la lluvia es parte del ciclo hidrológico, y ésta viene precedida por una evaporación producida por la acción de la energía solar y que, invariablemente, involucra una desalinización, además de la condensación, la cual es la etapa que antecede inmediatamente a la precipitación (Masters & Ela, 2008). Todos estos procesos representan una transportación del agua necesariamente, por lo que, si bien el agua en sí no contiene contaminantes, su composición podría verse alterada debido al contacto con la atmósfera, por ejemplo.

Adicionalmente, diversos estudios orientados al estudio del agua pluvial y los SCALL han encontrado relación entre contaminantes químicos presentes en el agua analizada y la meteorología. Pero no solo esto, ya que también se ha concluido que factores como la superficie de captación, tipo de tanques de almacenamiento, mantenimiento, materiales del sistema empleado e inclusive el tipo de actividad humana desarrollada en el área de estudio influyen en la composición física, química y biológica del agua (Kaushik, Balasubramanian, & De la Cruz, 2012).

Todo lo anterior sugiere que una generalización de las características del agua de lluvia, aunque necesaria resultaría poco confiable. Muchos estudios afirman que la calidad del agua cosechada mediante una superficie de captación instalada en un techo casero es, por lo general, aceptable tanto para consumo como uso doméstico, otros tantos sostienen que la presencia de diversos patógenos en dicha agua hace imposible el consumo o uso (Kaushik, Balasubramanian, & De la Cruz, 2012).

Como se indica en los alcances y limitaciones de la presente tesis, este trabajo está antecedido por proyectos de tesis elaborados en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, particularmente aquel en el cual se desarrolló a nivel conceptual el tren de tratamiento óptimo para los objetivos trazados (Chinchilla, 2020). Dado que el presente estudio pretende dar continuidad al de Chinchilla, se hará uso de los estudios de caracterización que él consideró, puesto que estos constituyen la base del diseño del tren de tratamiento a desarrollar, retomando así los resultados que presenta en su publicación. Sin embargo, es necesario mencionar que pueden presentarse casos en donde dichos valores sean tomados con algunas reservas o bien, otros valores sean tomados en cuenta, como es el caso del pH, sobre el cual se ahondará al respecto a lo largo del texto.

2.4.1 Características físicas y organolépticas

Se definen como *“aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio”* (Secretaría de Salud, 2000).

Entre las características físicas y organolépticas del agua se tiene a los enunciados en el párrafo anterior, es decir, la turbiedad, el color, el sabor y el olor; aunque también se consideran otros de igual relevancia como lo son el pH, la cantidad de sólidos disueltos, sedimentables y suspendidos totales, y la conductividad.

Para este tipo de características, Chinchilla consideró seis estudios previos, los cuales arrojaron resultados relativamente similares. La tabla 2.1 muestra los datos valores que se obtuvieron en dichos estudios y posteriormente fueron retomados.

La tabla 2.2, muestra los parámetros de este tipo que son de mayor interés para este estudio, ya que son aquellos que han rebasado los límites permisibles establecidos en la normativa que rige al agua que se pretende destinar para uso o consumo humano en la CDMX, misma que se abordará con mayor detalle en el subcapítulo 2.7.

Como la tabla 2.2 lo muestra, solo tres parámetros físicos y organolépticos del agua de lluvia no se encuentran dentro del rango establecido por la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994, estos son el color verdadero, la turbiedad y el pH; éste último tendrá una consideración especial.

Tabla 2.1 Parámetros físicos y organolépticos

Parámetro	Valor	Fuente						Límite permisible NOM-127-SSA1-1994
		García B. (2013)	García H. (2012)	Báez (2014)	Cordero (2011)	Romero (2017)	Ceja (2018)	
Sólidos disueltos [mg/l]	Máximo	90		10		126		1000
	Mínimo	10		2		17		
	Promedio	50		7		53		
Sólidos suspendidos totales [mg/l]	Máximo	93	35	64	10	9		No específica
	Mínimo	17	1	10	7	1		
	Promedio	64	10	24	9	2		
Sólidos sedimentables [mg/l]	Máximo	37		55				No específica
	Mínimo	2		6				
	Promedio	15		17				
Color verdadero [UC-PC]	Máximo		40			10	20	20
	Mínimo		15			0	5	
	Promedio		24			4	13	
Turbiedad [UTN]	Máximo		18	5		9	38	5
	Mínimo		3	2		2	2	
	Promedio		8	3		5	14	
pH [1]	Máximo	7	7	7	7	7	9	6.5 – 8.5
	Mínimo	6	7	5	6	6	7	
	Promedio	7	7	6	6	7	8	
Conductividad [1]	Máximo	96	150	33			30	No específica
	Mínimo	39	60	7			10	
	Promedio	58	90	14			19	

Fuente: Chinchilla (2020)

Tabla 2.2 Parámetros físicos y organolépticos excedidos encontrados en estudios previos

Parámetro	Valor máximo encontrado	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994
Color verdadero [UC-PC]	40	20
Turbiedad [UTN]	38	5
pH [1]	9*	6.5 – 8.5

Fuente: Chinchilla (2020)

El pH se encuentra marcado con un asterisco (*) debido a que dicho valor resulta anormal de sobre manera. Éste fue obtenido durante un estudio de caracterización del agua pluvial (Ceja, 2018) realizado en el año 2018 dentro de las instalaciones del Centro de Investigaciones de Diseño Industrial (CIDI) de la UNAM, sin embargo, dicho trabajo presentó un muestreo con cierto sesgo -consultando a la fuente directa (Ceja, 2018) se afirma que presumiblemente el multiparamétrico pudo haber estado descalibrado-, lo cual pudo haber tenido influencia en el valor de 9 para pH, el cual es sumamente alto en comparación con los otros estudios consultados. Dada esta inconsistencia el valor de pH que se decide considerar es el que se presenta en el informe *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017*, en donde el valor mayor de pH fue de 7.5 y se presentó en la estación ubicada en Nezahualcóyotl, lo cual pone aún más en tela de juicio el valor de 9 obtenido (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, 2018).

La Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX presenta en su informe anual de la calidad del aire en la ciudad, un capítulo correspondiente a las características del depósito atmosférico¹¹, del cual se tomarán los valores de pH encontrados en el depósito atmosférico húmedo. A la izquierda de la figura 2.3 se muestra la ubicación de las diferentes estaciones de monitoreo¹² en las que se tuvo un valor de pH menor a 5.6 -se hace énfasis en los valores mínimos, ya que el valor máximo registrado no rebasó el límite superior permisible-, a su vez, el lado derecho presenta el mapa de la CDMX con la distribución espacial del pH ponderado; como complemento, la tabla 2.3 presenta los resultados obtenidos, para el valor ponderado de pH, por la mencionada dependencia.

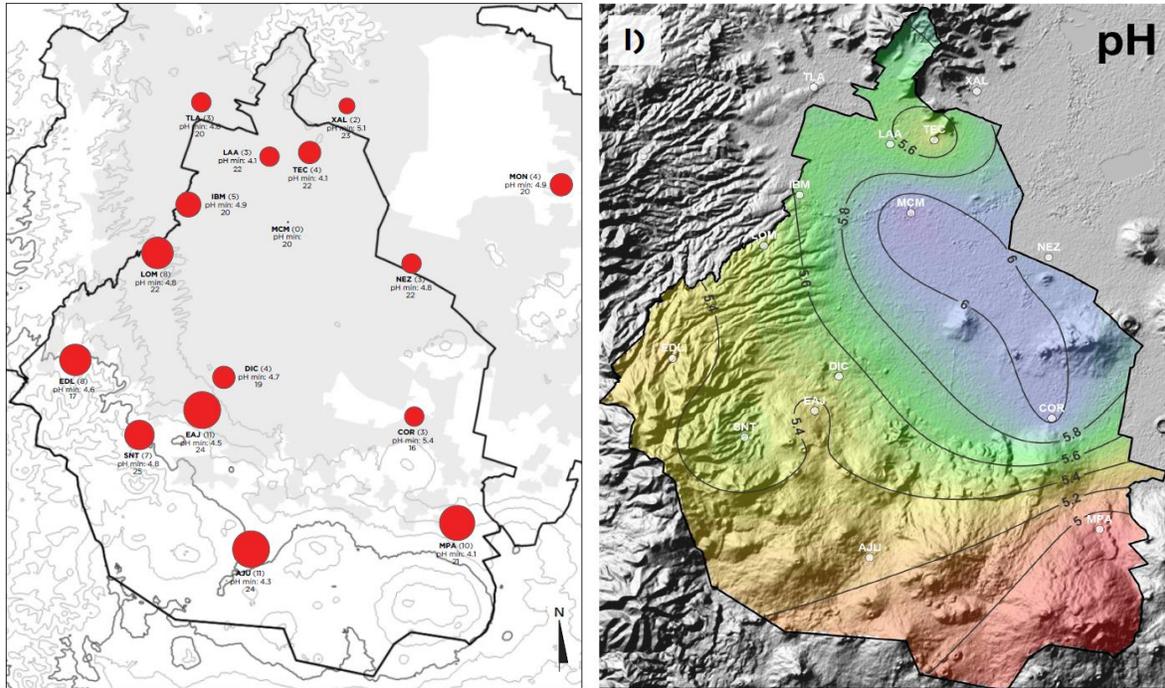


Figura 2.3 A la izquierda, ubicación de las estaciones en las cuales se obtuvo un valor de pH por debajo de 5.6, indicando además el número de muestras que se consideraron como lluvias ácidas a lo largo del año 2017; a la derecha, mapa de la CDMX con la distribución espacial del pH ponderado registrado en el año 2017. Fuente: Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX (2018)

¹¹ El depósito atmosférico, ya sea seco o húmedo, está definido como el proceso por el cual las partículas, aerosoles, gases y todos aquellos compuestos que se encuentran en la atmósfera, generados por fuentes naturales (incendios forestales, volcanes y sal oceánica) o actividades antropogénicas (plantas termoeléctricas, vehículos automotores, fábricas y otras actividades humanas), se depositan de forma natural en la superficie terrestre (National Atmospheric Deposition Program, 1999).

¹² Para consultar el nombre completo de cada estación de monitoreo, véase la tabla 2.3.

Tabla 2.3 pH ponderado y precipitación acumulada por estación en el año 2017

Estación de monitoreo	Clave de la estación	pH ponderado [1]	Precipitación acumulada [mm]
Ajusco	AJU	5.3	1167
Corena	COR	6	455
Diconsa	DIC	5.5	941
Ecoguardas Ajusco	EAJ	5.4	1216
Ex Convento Desierto de los Leones	EDL	5.3	1307
Legaria	IBM	5.6	789
Laboratorio de Análisis Ambiental	LAA	5.6	660
Lomas	LOM	5.5	945
Museo de la Ciudad de México	MCM	6.2	684
Montecillo	MON	5.9	462
Milpa Alta	MPA	4.8	543
Nezahualcóyotl Sur	NEZ	6	660
San Nicolás Totolapan	SNT	5.5	1231
Cerro del Tepeyac	TEC	5.4	716
Tlalnepantla	TLA	5.8	668
Xalostoc	XAL	5.9	589

Fuente: Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX (2018)

En este caso, se tomará en cuenta la estación de monitoreo más cercana a la zona de estudio que realiza esta medición, la cual es la estación Diconsa, misma que se denota con las siglas “DIC” y está ubicada en Insurgentes Sur 3483 en la CDMX, a poco menos de 3.8 km de distancia. Dicho lo anterior, se considerará un pH con valor de 5.5. Cabe aclararse que el sistema de monitoreo atmosférico incluye estaciones más cercanas al sitio de estudio, sin embargo, éstas no registran públicamente los valores de pH.

2.4.2 Características bacteriológicas

Las características bacteriológicas del agua se encuentran definidas como “aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales” (Secretaría de Salud, 2000).

Los coliformes totales y fecales fungen como organismos indicadores, esto es, se consideran especies que indican la posible contaminación con aguas residuales. La diferencia entre estos dos grupos de bacterias radica en que los primeros, los coliformes totales, se refieren a todos los miembros del grupo sin importar su procedencia, mientras que los coliformes fecales son aquellos provenientes de las heces de animales de sangre caliente, ejemplos de estos, y los más comunes, son los diversos tipos de *Escherichia Coli*, bacteria que puede causar diversas enfermedades en los seres humanos.

Los estudios de caracterización bacteriológica previamente considerados se presentan en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Parámetros bacteriológicos

Parámetro	Valor	Fuente			Límite permisible NOM-127-SSA1-1994
		García B. (2013)	García H. (2012)	Ceja (2018)	
Coliformes totales [NMP/100 ml]	Máximo	No detectable	1		
	Mínimo	No detectable	No detectable		No detectable
	Promedio	No detectable	No se calcula		
Coliformes fecales [UFC/100 ml]	Máximo	No detectable	8	4	
	Mínimo	No detectable	No detectable	0.4	No detectable
	Promedio	No detectable	No se calcula	No se calcula	
Mesófilos aerobios	Máximo		24150		
	Mínimo		4		No establece
	Promedio		7717		

Fuente: Chinchilla (2020)

La tabla 2.5 pone en evidencia la vulnerabilidad del agua pluvial ante este tipo de contaminantes, pues muestra que se han encontrado coliformes de ambos tipos en diversas caracterizaciones del agua proveniente de la lluvia. Esto generalmente se encuentra relacionado con la interacción del entorno con el SCALL, pues el excremento de las aves, por ejemplo, puede contactar en cualquier momento con la superficie de captación del sistema, generando de esta manera una potencial contaminación biológica.

Tabla 2.5 Parámetros bacteriológicos excedidos encontrados en estudios previos (2019)

Parámetro	Valor máximo encontrado	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994
Coliformes totales [NMP/100 ml]	1	No detectable
Coliformes fecales [UFC/100 ml]	8	No detectable

Fuente: Chinchilla (2020)

2.4.3 Características químicas

Las características químicas son “aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana” (Secretaría de Salud, 2000).

Algunos de los factores que podrían alterar las características químicas del agua pluvial son los materiales de los que se encuentra constituido el SCALL, condiciones atmosféricas del lugar donde se lleva a cabo la cosecha de agua de lluvia, época del año en que se da la lluvia, entre otros.

La tabla 2.6 muestra los resultados de los estudios de caracterización del agua de lluvia previamente considerados para el efecto de características químicas.

Tabla 2.6 Parámetros químicos

Parámetro	Valor	Fuente			Informe Anual de la Calidad del Aire en la CDMX, Estación DIC (2018) [mg/l]	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994 [mg/l]
		García B. (2013) [mg/l]	García H. (2012) [mg/l]	Báez (2014) [mg/l]		
Sulfato (SO ₄)	Máximo	10	17	100		400
	Mínimo	3	6	50		
	Promedio	6	10	71	3	
Nitrato (NO ₃)	Máximo	15	6	60		10
	Mínimo	3	1	40		
	Promedio	7	2	50	3	
Cloro	Máximo	2	7	15		250
	Mínimo	0.5	0.5	5		
	Promedio	1	2.9	10	0.3	
Sodio	Máximo	3	4	8		200
	Mínimo	0	1	4		
	Promedio	1	2	6	0.07	
Flúor	Máximo	0.2				1.5
	Mínimo	0.1				
	Promedio	0.1				
Aluminio	Máximo	0.9				0.2
	Mínimo	0.1				
	Promedio	0.2				
Cadmio	Máximo	0.0014				0.005
	Mínimo	0.0001				
	Promedio	0.0005				
Cromo	Máximo	0.0013				0.05
	Mínimo	0.0004				
	Promedio	0.0008				
Hierro	Máximo	0.7				0.3
	Mínimo	0				
	Promedio	0.1				
Manganeso	Máximo	0.02				0.15
	Mínimo	0				
	Promedio	0.01				
Plomo	Máximo	0.0043				0.01
	Mínimo	0.0013				
	Promedio	0.0023				

Fuente: Chinchilla (2020) y Secretaría del Medio Ambiente de la CDMX (2018)

La NOM-127-SSA1-1004 enlista una serie de límites de contenido para diversos constituyentes químicos, de los cuales se espera que solo tres de ellos se encuentren fuera de dichos límites. Éstos se enlistan en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Parámetros químicos excedidos encontrados en estudios previos

Parámetro	Valor máximo encontrado [mg/l]	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994 [mg/l]
Nitrato (NO ₃)	60	10
Aluminio	0.9	0.2
Hierro	0.7	0.3

Fuente: Chinchilla (2020)

2.4.4 Característica radiactivas

Como su nombre lo indica, son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos. Sus límites permisibles se centran en la concentración de radiactividad alfa global y radiactividad beta global (Secretaría de Salud, 2000).

No se tiene registro de presencia de elementos radiactivos en los estudios de caracterización del agua proveniente de la cosecha de agua de lluvia consultados. No obstante, la presencia de radionucleidos en el agua pluvial es posible; se ha comprobado que tras accidentes nucleares como el de Chernóbil, por ejemplo, la cantidad de isótopos como el Cesio-137 depositados en el suelo o la vegetación guardaba una notable relación con la cantidad de lluvia que se presentó en Europa del Este en las semanas subsecuentes al desastre (Clark & Smith, 1988).

2.5 Sistemas de captación de agua de lluvia convencionales

Como se ha visto a lo largo del texto, la cosecha de agua de lluvia es una alternativa que se ha empleado, en mayor o menor medida, durante varios años en todo el mundo. Una de las consecuencias del uso del agua proveniente de la lluvia es el constante mejoramiento en los SCALL; no obstante, el diseño de dichos sistemas comprende elementos imprescindibles, los cuales constituyen la base de cualquier tipo de SCALL.

La figura 2.4 muestra la configuración típica de un SCALL, tanto sus componentes como su forma de operación. En ésta se puede apreciar que todo comienza cuando la lluvia (R) entra en contacto con una superficie de captación (A) ubicada en el exterior del domicilio; después el agua es transportada mediante un sistema de canaletas o tubos hasta un filtro (H), pasando siempre por un discriminador de primeras lluvias (F), acciones en las cuales necesariamente se pierde cierta cantidad del recurso captado; tras pasar por el filtro, el agua sigue su camino hasta llegar a un tanque de almacenamiento (Q), el cual tiene una capacidad determinada (S) y por ende debe contar con una salida para desalojar o almacenar en un compartimento adicional el volumen de agua en exceso (O); finalmente, el agua almacenada en el tanque (V) puede ser transferida (Y) a un tanque donde se almacene agua proveniente de la red doméstica de agua potable (M), por ejemplo, para así enviarla a los distintos muebles o instalaciones de uso final (D).

Es importante recalcar que el SCALL debe garantizar que no se presente contaminación en las *conexiones cruzadas*, los cuales son puntos de intersección entre dos o más tuberías, de las cuales al menos una tiene contacto con agua contaminada, y, por ende, existe el riesgo de generarse un reflujo que contamine el resto del agua del sistema (United States Environmental Protection Agency, 2001).

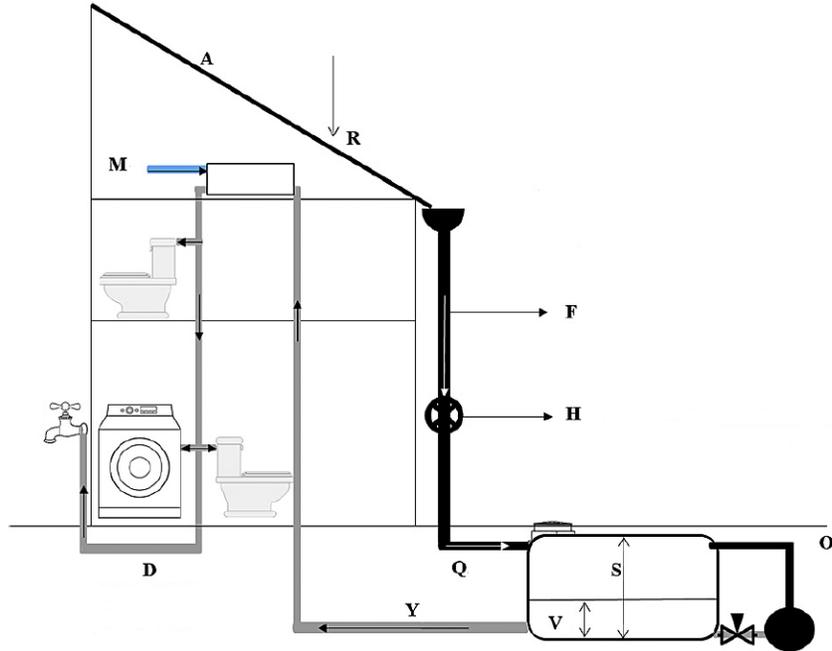


Figura 2.4 Representación de un SCALL convencional. Fuente: Adaptado de Campisano (2017)

A continuación, se describe de manera breve cada uno de los componentes de un SCALL.

2.5.1 Superficie de captación

Se refiere al área sobre la cual la lluvia tiene contacto directo y escurre producto de la pendiente; usualmente se ubica en las azoteas de las viviendas, aunque podría considerarse cualquier otra superficie que se encuentre en contacto con la precipitación.

Este elemento, como todos los demás, debe de ser impermeable y preferente inerte, por lo que los materiales más empleados son placas de fibra de vidrio, acero galvanizado o concreto. Estos materiales pueden emplearse indistintamente, pues se han encontrado pocas variaciones en la calidad del agua captada bajo igualdad de condiciones de operación (Mendez, y otros, 2010). A continuación, se muestran algunas de las conclusiones del estudio al que se hace referencia:

Diferentes materiales (tales como placas de fibra de vidrio, acero galvanizado y concreto) utilizados convencionalmente en la elaboración de superficies de captación, así como materiales alternativos (suelos orgánicos sin fertilizar y membranas de acrílico) empleados con el mismo fin, fueron examinados para determinar su conveniencia en la cosecha doméstica de agua de lluvia, pH, conductividad, coliformes totales, coliformes fecales, turbiedad, sólidos suspendidos totales, nitritos, nitratos, carbón orgánico disuelto, metales, compuestos orgánicos volátiles y compuestos orgánicos semi-volátiles fueron medidos en el agua cosechada. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- *El agua de lluvia cosechada con cualquiera de las superficies de captación empleadas requeriría tratamiento si se desea cumplir con los estándares establecidos por la US EPA para aguas de uso primario y secundario, o cumplir con las normas establecidas por la US EPA para agua de reúso no potable (...)*

- Aunque las superficies de captación metálicas son, comúnmente, las más recomendadas para la cosecha de agua de lluvia, las superficies metálicas examinadas durante este estudio no produjeron agua de mayor calidad en comparación con las otras superficies de captación empleadas. Superficies de concreto o de membranas de acrílico parecen ser también buenas opciones para llevar a cabo la captación, esto dada la gran similitud en cuanto a la calidad del agua de lluvia captada por cada uno de estos materiales (Mendez, y otros, 2010).

2.5.2 Sistema de conducción

Se refiere a las tuberías y canaletas por las cuales se transporta el agua captada y recolectada mediante la superficie de captación hacia el resto de los componentes del sistema, como lo pueden ser tanques, filtros o muebles.

Los materiales deben de ser impermeables, resistentes a la corrosión y que faciliten el mantenimiento. Los más usados son materiales de acero y polímeros como el PVC.

2.5.3 Discriminador de primeras lluvias

El discriminador de primeras lluvias, o aguas, es un dispositivo que permite separar el primer volumen de agua de lluvia que se obtiene en un determinado periodo; esto con el fin de evitar que el SCALL trabaje con agua con características diferentes a las que se diseñó el tren de tratamiento, pues esto podría provocar que la potabilización del recurso no se logre, ya que, casi invariablemente, la primera parte de la precipitación presenta características distintas en comparación con la parte media o final.

Este componente del sistema generalmente trabaja de manera volumétrica, es decir, cuando se alcanza un determinado volumen proveniente de la primera lluvia, el dispositivo deja de permitir el paso del agua, momento en el cual toda el agua que ingresa al SCALL pasará al filtro, que generalmente es la siguiente etapa. Esto podría constituir una desventaja, pues la discriminación es volumétrica y no en cuanto a la calidad del agua, lo cual sería lo óptimo. Actualmente, se tienen diversas opciones en el mercado mundial, las cuales casi invariablemente tienen la ventaja de ser de fácil instalación y mantenimiento, pues se componen de elementos cuya operación es mecánica, lo cual, por otra parte, propicia que la tendencia hacia la automatización sea uno de los retos en este campo, además de una discriminación con base en la calidad del recurso a tratar y no con base en un determinado volumen, como se mencionó anteriormente (Reséndiz Martínez, 2019).

Se presentó como proyecto de tesis (Reséndiz Martínez, 2019) en la Facultad de Ingeniería de la UNAM un dispositivo que permite realizar la discriminación de las primeras lluvias de manera automatizada y, aún más importante, teniendo a diversos parámetros de la calidad del agua como los factores que determinan la cantidad que es separada del resto del sistema, lo cual representa un diferenciador sumamente atractivo en comparación con la gama de discriminadores comerciales actuales. Si bien el dispositivo puede presentar áreas de oportunidad, éste constituye un punto de partida hacia una mejor discriminación.

2.5.4 Filtro

La filtración es una operación que se realiza en prácticamente cualquier SCALL, pues con esta se logra la remoción de partículas suspendidas en el agua y, consecuentemente, se mejora gran parte de sus características; es por esta razón que la instalación de un filtro es menester.

Los filtros usados en los SCALL usualmente están compuestos por materiales granulares como gravas y arenas, arcillas expansivas, carbón activado, diferentes tipos de membranas, entre otras. No obstante la variedad de opciones, problemas como el espacio necesario, colmatación del medio de filtración, el uso de energía en la operación de los filtros, entre otros, siguen estando presentes (Silva Vieira, Weeber, & Ghisi, 2013).

2.5.5 Tanque de almacenamiento

Como su nombre lo indica, es un componente que permite almacenar el agua que ha sido tratada. Debe de ser impermeable, resistente y asequible.

Su volumen debe determinarse al momento de diseñar el SCALL y estará fuertemente influenciado por la extensión de la superficie de captación, el espacio disponible para su instalación, la precipitación que se presente en el área donde se instalará el sistema y el uso que se pretenda dar al recurso tratado. Los materiales empleados suelen ser acero inoxidable, polímeros o concreto.

2.5.6 Otros elementos de los SCALL

Entre los elementos que pueden estar presentes en la configuración de un SCALL, se tienen a dispositivos como válvulas de diversos tipos, dispositivos electrónicos para el control y monitoreo del sistema, por mencionar algunos.

2.6 Impacto potencial de la implementación de sistemas de captación de agua pluvial en el hogar

El uso de la cosecha de agua de lluvia y los SCALL en el hogar representan sin lugar a dudas una alternativa atractiva en muchos aspectos.

El primero en salir a relucir es el de la reducción de la explotación de las reservas del recurso más comúnmente usadas por los sistemas centralizados. Esto es una consecuencia directa del uso del agua pluvial, puesto que al emplearlo en las labores cotidianas se reduciría el consumo del agua proveniente de la red municipal, en este caso el sistema centralizado.

Adicionalmente, se tienen otros efectos benéficos al ambiente, uno de ellos es la posible recarga de los acuíferos subterráneos, objetivo que es alcanzable si, además de contribuir con el volumen que no se toma de la red municipal, se implemente un SCALL que trabaje de manera dual en beneficio de la infiltración en el lugar donde éste se localiza (Dillon, 2005). Sin embargo, este potencial beneficio, así como el sistema en su totalidad, estará sujeto a cumplir con la normativa establecida en el sitio de instalación; en este caso, una de las normas que ejercen más influencia es la NOM-015-CONAGUA-2007, la cual se centra en la infiltración artificial de agua a los acuíferos, y en ella se especifican las características que deberá tener el agua en el punto de infiltración para evitar la contaminación del acuífero existente, esto para sistemas con una capacidad de infiltración mayor o igual a 60 litros por segundo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009).

Otro impacto positivo al medio ambiente, el cual va de la mano con los mencionados sistemas duales, es el evitar el fenómeno de “Isla de calor” (Furamai, 2008). Dicho fenómeno se refiere a áreas urbanizadas donde la temperatura es más alta -de 1 a 3 °C, en promedio- en comparación con áreas rurales cercanas, lo cual afecta a la demanda de energía, incrementa los costos en instalaciones de aire acondicionado, aumenta la contaminación del aire, se emiten mayores gases nocivos, entre otros (United States Environmental Protection Agency, 2019).

Además, los beneficios de la implementación de los SCALL a nivel domiciliario pueden verse relacionados de manera proporcional entre sí. Como ejemplo, se puede hacer referencia a un conjunto habitacional en la ciudad de Seúl, capital de Corea del Sur, donde tras hacer uso de la cosecha de agua de lluvia por un año y contar con un área de captación cercana a los 34,550 m², se lograron ahorrar 26,000 m³ de agua proveniente de la red gubernamental. Tomando en cuenta que en dicha ciudad la energía requerida para hacer que un metro cúbico de agua de la mencionada red llegue al hogar es aproximadamente 0.38 kWh, y la energía requerida para hacer lo mismo con agua proveniente de la cosecha de agua de lluvia es de 0.039 kWh, el volumen de agua ahorrado se tradujo en 8.9 MWh ahorrados al año (Han & Mun, 2011), en una ciudad donde el precio del kWh -tarifa base- oscila los \$1.03 MXN (Samchully Co., 2019), lo cual, como puede verse, se traduce en un ahorro monetario. Pero los casi 9 MWh ahorrados no sólo representan un beneficio económico, éstos son también un factor de mitigación en el rubro ambiental, puesto que la huella de carbono, es decir, la cantidad de dióxido de carbono emitida, que genera la producción de dicha energía es considerable. Se estima que, en promedio, la cantidad de dióxido de carbono generada por cada kWh es de aproximadamente 0.71 kg por cada kWh (United States Environmental Protection Agency, 2019). Haciendo uso del ejemplo citado en este párrafo, se tiene que el ahorro energético representa, a su vez, una reducción de casi 6.4 toneladas de gases efecto invernadero.

2.7 Marco legal

La cosecha de agua de lluvia no se encuentra exenta de cumplir con un marco jurídico establecido, mismo que va desde lo general hasta rubros cada vez más particulares. A continuación, se presentan los aspectos legales que se consideran relevantes para el correcto desarrollo e implementación de sistemas como los SCALL en México.

2.7.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

En su artículo 4, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece lo siguiente:

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

Como se aprecia, este artículo funge como punto de partida en materia legal para el tema del abastecimiento de agua potable en México. Si bien se aborda el tema de manera general, existen otros artículos, tales como el 27 o el 115, por mencionar algunos, en los cuales se ahonda en temas más específicos, como el manejo del recurso, por ejemplo.

2.7.2 Ley de Aguas Nacionales

A partir del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, surge la Ley de Aguas Nacionales, tal y como se expresa en su primer artículo, el cual se muestra a continuación, además del artículo 2, mismo que habla de los alcances de la ley en cuestión.

ARTÍCULO 1. La presente Ley es reglamentaria del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional, sus disposiciones son de orden público e interés social y tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable.

ARTÍCULO 2. Las disposiciones de esta Ley son aplicables a todas las aguas nacionales, sean superficiales o del subsuelo. Estas disposiciones también son aplicables a los bienes nacionales que la presente Ley señala.

Las disposiciones de esta Ley son aplicables a las aguas de zonas marinas mexicanas en tanto a la conservación y control de su calidad, sin menoscabo de la jurisdicción o concesión que las pudiere regir (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2016).

La Ley de Aguas Nacionales establece en su artículo 17 que “es libre la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales superficiales por medios manuales para uso doméstico conforme a la fracción LVI del Artículo 3 de esta Ley, siempre que no se desvíen de su cauce ni se produzca una alteración en su calidad o una disminución significativa en su caudal” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2016), por lo cual se entiende que la cosecha de agua de lluvia puede ser empleada para fines domésticos, aunque se deben de tomar en cuenta algunos otros lineamientos establecidos en distintas normas o leyes.

2.7.3 Ley del Derecho a los Servicios Públicos de Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado y Tecnología Hídrica de la Ciudad de México

Esta ley guarda gran similitud en cuanto a contenido con respecto a la Ley de Aguas Nacionales, sin embargo, como puede inferirse, la mayor diferencia radica en que la ley en cuestión rige solamente a la Ciudad de México. De esta manera, se abordan temas con mayor precisión, tales como el uso del agua pluvial como fuente de abastecimiento, rubro al cual inclusive se le dedica en su totalidad el título noveno de la ley. Algunos de los aspectos más relevantes de dicho título se citan a continuación:

ARTÍCULO 124.- Con base en el principio de que el agua es de todos los seres vivos presentes y futuros de la Tierra; como se establece en esta Ley, toda persona en el Distrito Federal, tiene derecho al acceso suficiente, seguro e higiénico de agua disponible para su uso personal y doméstico, así como al suministro libre de interferencias; y, que la precipitación del agua de lluvia, nieve o escarcha es un fenómeno natural del ciclo hidrológico que no tiene una distribución uniforme en el territorio del Distrito Federal, esta Ley otorga a las dependencias, entidades, organismos, instituciones, organizaciones y entes públicos, privados y sociales, los ejidos, comunidades, barrios y pueblos, así como las y los habitantes del Distrito Federal, los derechos a:

- I. Cosechar agua de lluvia, individual o colectivamente;*
- II. Ser reconocidos como Cosechador(a) Individual o Colectivo de Agua de Lluvia del Distrito Federal e inscritos en el Padrón de Cosechadores de Agua de Lluvia del Distrito Federal;*

- III. Obtener los incentivos del Programa General y, en su caso, de sus Subprogramas;
- IV. Gestionar y obtener apoyo, asistencia y capacitación de técnicos y profesionales, así como atención, orientación, asesoría y los beneficios viables y posibles que se establezcan en las políticas, estrategias, programas, presupuestos y acciones del Gobierno del Distrito Federal en materia de cosecha de agua de lluvia en esta entidad; y
- V. Ser informados; debatir con seriedad, rigor y tolerancia; proponer; y, decidir democráticamente las políticas gubernamentales en materia de cosecha de agua de lluvia en el Distrito Federal (Congreso de la Ciudad de México, 2019).

Es pertinente señalar que, si bien esta ley busca incentivar la cosecha de agua pluvial, en algunos casos ésta ya es de carácter obligatorio, tal y como lo estipula el artículo 125, donde se puntualiza que “en todas las nuevas edificaciones, instalaciones, equipamientos, viviendas y obras públicas que se construyan en el Distrito Federal será obligatorio, construir las obras e instalar los equipos e instrumentos necesarios para cosechar agua de lluvia, con base en las disposiciones que se establezcan en el Reglamento de esta Ley” (Congreso de la Ciudad de México, 2019).

2.7.4 Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal

Por su parte, la Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal fue publicada en el año 2011 y en ella se enunciaban distintas políticas de mitigación y adaptación, entre éstas figuraba de manera importante el fomento a la cosecha de agua de lluvia en las edificaciones del entonces Distrito Federal. (H. Asamblea Legislativa del Distrito Federal, 2011).

No obstante, ésta ha quedado en un segundo plano, al menos en cuanto al tema de los recursos hídricos, debido a que la última reforma de la Ley del Derecho a los Servicios Públicos de Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado y Tecnología Hídrica de la Ciudad de México aborda de manera puntual las especificaciones que involucran a la cosecha de aguas pluviales.

2.7.5 Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización

La Secretaría de Salud publicó en el año 2000 la modificación más reciente a la NOM-127-SSA1-1994, en la cual se establecen los límites que están permitidos en cuanto a las características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas del agua para uso y consumo humano, tal y como se ha visto a lo largo de la presente tesis. Asimismo, busca lograr un adecuado control sanitario del recurso estableciendo los distintos tratamientos a los que éste debe ser sometido con el fin de garantizar la potabilización del mismo (Secretaría de Salud, 2000).

Los límites permisibles determinados por la norma se presentan a continuación.

Tabla 2.8 Límites permisibles de características bacteriológicas

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
<i>E. coli</i> o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables

Fuente: Secretaría de Salud (2000)

Tabla 2.9 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método

Fuente: Secretaría de Salud (2000)

Tabla 2.10 Límites permisibles de características químicas

Característica	Límite permisible
Aluminio	0.20 [mg/l]
Arsénico	0.05 [mg/l]
Bario	0.70 [mg/l]
Cadmio	0.005 [mg/l]
Cianuros	0.07 [mg/l]
Cloro residual libre	0.20 – 1.50 [mg/l]
Cloruros	250 [mg/l]
Cobre	2 [mg/l]
Cromo total	0.05 [mg/l]
Dureza total	500 [mg/l]
Fenoles o compuestos fenólicos	0.30 [mg/l]
Fierro	0.30 [mg/l]
Fluoruros	1.50 [mg/l]
Benceno	10 [µg/l]
Etilbenceno	300 [µg/l]
Tolueno	700 [µg/l]
Xileno (Tres isómeros)	500 [µg/l]
Manganeso	0.15 [mg/l]
Mercurio	0.001 [mg/l]
Nitratos	10 [mg/l]
Nitritos	1 [mg/l]
Nitrógeno amoniacal	0.50 [mg/l]
pH	6.5 – 8.5 [1]
Aldrín y dieldrín (Separados o combinados)	0.03 [µg/l]
Clordano (Total de isómeros)	0.20 [µg/l]
DDT (Total de isómeros)	1 [µg/l]
Gamma-HCH (Lindano)	2 [µg/l]
Hexaclorobenceno	1 [µg/l]
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03 [µg/l]
Metoxicloro	20 [µg/l]
2,4 - D	30 [µg/l]
Plomo	0.01 [mg/l]
Sodio	200 [mg/l]
Sólidos disueltos totales	1000 [mg/l]
Sulfatos	400 [mg/l]
Sustancias activas del azul de metileno	0.50 [mg/l]
Trihalometanos totales	0.20 [mg/l]

Yodo residual libre	0.20 – 0.50 [mg/l]
Zinc	5 [mg/l]

. Fuente: Secretaría de Salud (2000)

Tabla 2.11 Límites permisibles de características radiactivas

Característica	Límite permisible [Bq/l]
Radiactividad alfa global	0.56
Radiactividad beta global	1.85

Fuente: Secretaría de Salud (2000)

En lo que respecta a los tratamientos, éstos varían de acuerdo a la o las características que sobrepasen los límites permisibles. Entre los más comunes están la coagulación-floculación-sedimentación-filtración, ósmosis inversa, intercambio iónico, neutralización, oxidación, filtración por etapas, adsorción por carbón activado, entre otros.

Con base en lo presentado a lo largo del presente capítulo y lo señalado en el apartado 5 de la norma en cuestión, se puede suponer que el conjunto de procesos y operaciones unitarias a considerar para el tratamiento de agua de lluvia, sería el de la coagulación-floculación-sedimentación-filtración y desinfección, aunque, claro está, existen opciones distintas para lograr la potabilización, las cuales son tomadas en cuenta en la elección de un tren de tratamiento óptimo.

CAPÍTULO 3

PERFIL DE LA VIVIENDA PROMEDIO EN LA

CIUDAD DE MÉXICO

Como se ha visto, a lo largo del planeta se hace uso de los SCALL como fuente de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, sin embargo, el grado de implementación y de desarrollo de dichos sistemas suele ser distinto en cada uno de los sitios en donde éstos se encuentran instalados, variaciones que son consecuencia de distintos aspectos que presenta su respectivo entorno.

Entre los aspectos más importantes que se presentan en cualquier zona de estudio o aplicación se encuentran los económicos y sociales, ya que éstos determinarán en gran medida factores como la disponibilidad de espacio y presupuesto para la adquisición de equipo y su instalación. Es por esta razón que resulta pertinente conocer algunas de las características socioeconómicas de las viviendas de la CDMX, tales como aspectos demográficos generales, ingresos mensuales o las instalaciones para el manejo o desalojo de aguas pluviales con las que se cuenta en la vivienda promedio, por mencionar algunos; elementos con los cuales se podrá definir el estado actual de la vivienda promedio y, finalmente, determinar el espacio con el que se dispone para la instalación del SCALL.

3.1 Aspectos demográficos generales de la CDMX

Tal y como se mencionó en el primer capítulo, la CDMX, hasta el año 2015, contaba con un total de 8,918,653 habitantes -53% mujeres y 47% hombres- distribuidos en un total de 1495 km² de superficie, lo cual resulta en una densidad poblacional de aproximadamente 6,000 habitantes por km². Este dato puede resultar poco representativo, pues dicha relación podría ser significativamente diferente en algunos casos; es por esto que en la tabla 3.1 se muestra a detalle la población por alcaldía y la figura 3.1 presenta el mapa de densidades de la Ciudad, donde se puede ver que sólo cinco de las dieciséis alcaldías tienen un valor que se asemeja al promedio (INEGI, 2017).

Tabla 3.1 Población total por alcaldía según sexo

Alcaldía	Total	Hombres	Mujeres
Álvaro Obregón	749,982	355,754	394,228
Azcapotzalco	400,161	187,331	212,830
Benito Juárez	417,416	193,007	224,409
Coyoacán	608,479	283,782	324,697
Cuajimalpa de Morelos	199,224	95,854	103,370
Cuauhtémoc	532,553	253,238	279,315
Gustavo A. Madero	1,164,477	555,140	609,337
Iztacalco	390,348	183,949	206,399
Iztapalapa	1,827,868	878,365	949,503
La Magdalena Contreras	243,886	117,099	126,787
Miguel Hidalgo	364,439	167,085	197,354
Milpa Alta	137,927	67,151	70,776
Tláhuac	361,593	172,825	188,768
Tlalpan	677,104	321,125	355,979
Venustiano Carranza	427,263	200,432	226,831
Xochimilco	415,993	199,513	216,420

Fuente: INEGI (2017)

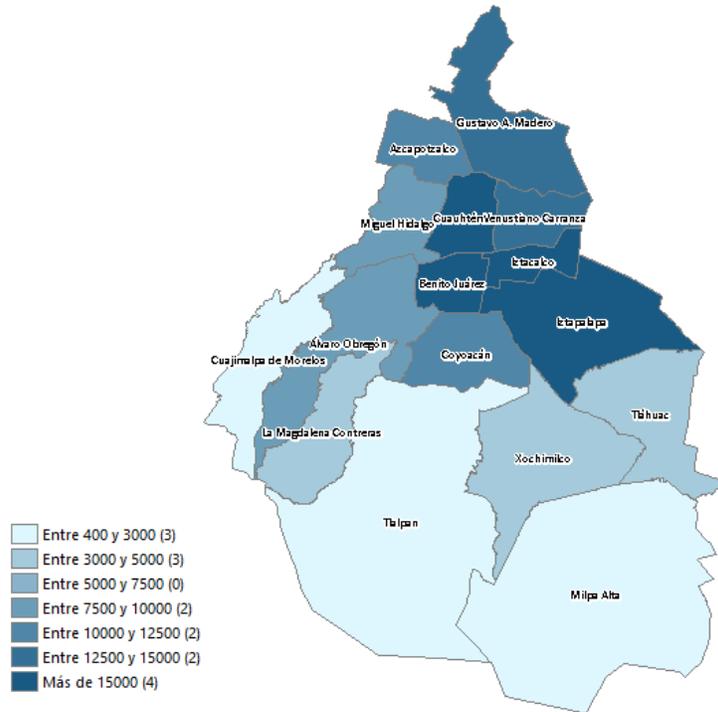


Figura 3.1 Densidad poblacional por alcaldía en la CDMX en habitantes por kilómetro cuadrado. Fuente: INEGI (2019)

Otro de los aspectos demográficos fundamentales es la distribución de la población por edades. En general, se sabe que el promedio de edad en la CDMX es de 27 años. Además, se tiene que en la capital del país el grupo predominante es el de personas entre 20 y 24 años de edad, mientras que el grupo de personas entre los 70 y 74 años es el de menor magnitud (INEGI, 2017). La pirámide poblacional de la CDMX se muestra en la figura 3.2; en ésta se observa que el grueso de la población, tanto femenina como masculina, se encuentra entre los 15 y 44 años de edad; además, la población infantil -desde 0 hasta 9 años- es claramente mayor a la de adultos de 60 años en adelante. Vale la pena mencionar que la relación de dependencia en la entidad es de 52.8, es decir, por cada 100 personas en edad productiva -mayores de 15 años de edad- existen 53 personas que dependen económicamente de éstos (INEGI, 2017).

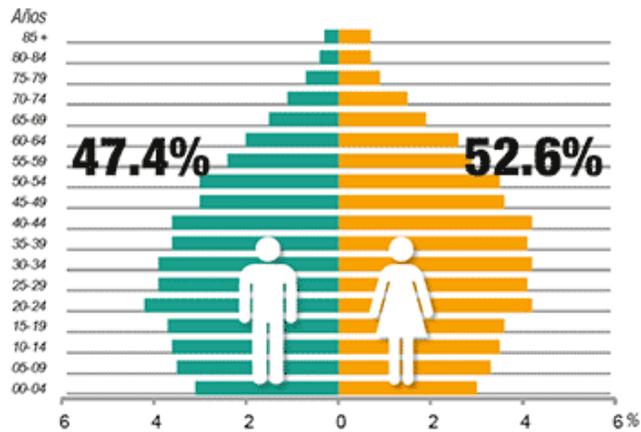


Figura 3.2 Pirámide poblacional de la CDMX. Fuente: INEGI (2019)

Es importante mencionar que la distribución poblacional está asociada a indicadores demográficos de gran relevancia, entre los cuales se puede destacar tasa de crecimiento total¹³,

¹³ Ésta se define como el cociente entre el incremento medio anual durante un periodo determinado y la población media del mismo periodo, como consecuencia de la variación de nacimientos, defunciones y

misma que también se deriva de otros. Dicha tasa pasó de -0.2 a -0.3 desde el año 2014 hasta el 2017, resultado que es consecuencia de una leve disminución en la tasa de natalidad conjugada con un pequeño aumento en la tasa de mortalidad, tomando en cuenta que el crecimiento migratorio o social se mantuvo constante durante el mencionado periodo (INEGI, 2017).

3.2 Características socioeconómicas de la población de la CDMX

Una vez dicho lo anterior, es pertinente establecer la situación en la cual se encuentra la población de la capital del país en cuanto a la vivienda, educación, trabajo e ingresos percibidos, rubros que en la mayoría de los casos se encuentran interrelacionados entre sí y definen en gran medida la calidad de vida de cualquier individuo.

3.2.1 Vivienda

Hasta el 2015, año en que se llevó a cabo la última encuesta intercensal por parte del INEGI, la CDMX contaba con 2,601,323 viviendas particulares habitadas, dígase casas, departamentos, vecindades o cualquier otro tipo. El número de viviendas por alcaldía se muestra en la tabla 3.2 (INEGI, 2017).

Tabla 3.2 Viviendas particulares habitadas y sus ocupantes por alcaldía

Alcaldía	Viviendas particulares habitadas	Ocupantes
Álvaro Obregón	214,895	749,595
Azcapotzalco	119,027	399,845
Benito Juárez	159,700	416,775
Coyoacán	186,317	608,419
Cuajimalpa de Morelos	55,478	199,075
Cuauhtémoc	188,135	531,561
Gustavo A. Madero	324,587	1,163,420
Iztacalco	110,174	390,271
Iztapalapa	495,665	1,827,345
La Magdalena Contreras	66,676	243,878
Miguel Hidalgo	128,042	364,311
Milpa Alta	34,086	137,836
Tláhuac	94,678	361,204
Tlalpan	190,591	676,979
Venustiano Carranza	126,002	426,490
Xochimilco	107,270	415,816

Fuente: INEGI (2017)

movimientos migratorios. Puede definirse también como la suma algebraica de la tasa de crecimiento natural y la tasa de migración (CONAPO, 2019).

Sin embargo, al igual que la población total, el número de viviendas por sí solo podría no ser un indicador de relevancia, es por ello que se calcula un promedio de habitantes por vivienda haciendo uso del número de ocupantes por alcaldía, el cual difiere un poco del número de habitantes debido a que la encuesta intercensal excluye a ocupantes de cierto tipo de viviendas, tales como viviendas móviles o refugios.

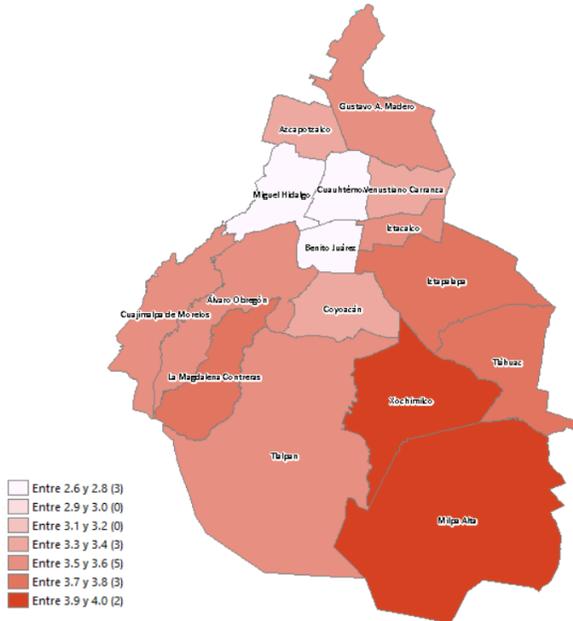


Figura 3.3 Número de habitantes promedio por vivienda según alcaldía. Fuente: INEGI (2017)

Como puede verse, el número de habitantes promedio por vivienda en la CDMX oscila entre 2.6 y 4, teniendo los valores menores sólo en tres alcaldías, mientras que diez alcaldías presentan un valor mayor a 3.5, es decir mayor al promedio global de la capital mexicana, el cual es de 3.4 habitantes por vivienda, mismo que, a su vez, es el más bajo a nivel nacional, contrastando con el valor de 4.2 habitantes por vivienda de Chiapas, estado con el mayor promedio (INEGI, 2016).

Entre los indicadores de mayor interés al momento de diseñar un SCALL está el número de cuartos¹⁴ con los que cuenta la vivienda tipo. En este caso, se puede ver en la figura 3.4 que en once de las dieciséis alcaldías las viviendas con 4 cuartos es el tipo predominante; no obstante, también se tienen cuatro alcaldías donde la vivienda de 6 o más cuartos es la más común.

La figura 3.3 muestra el mapa del número de habitantes en promedio por vivienda que se tiene en cada alcaldía de la ciudad. Se puede apreciar que difiere considerablemente con respecto al mapa de densidades poblacionales, teniendo ahora como punto máximo del indicador a Xochimilco y Milpa Alta, ésta última, la alcaldía menos poblada y una de las que cuentan con mayor extensión, pero que desde este punto comienza a mostrar signos de rezago, puesto que cuenta con una densidad por vivienda de cuatro personas.

El caso opuesto se presenta en las alcaldías Cuauhtémoc y Benito Juárez, las cuales, a pesar de contar con algunas de las densidades poblacionales más altas en la ciudad, presentan el nivel más bajo del indicador, con menos de tres ocupantes por vivienda.

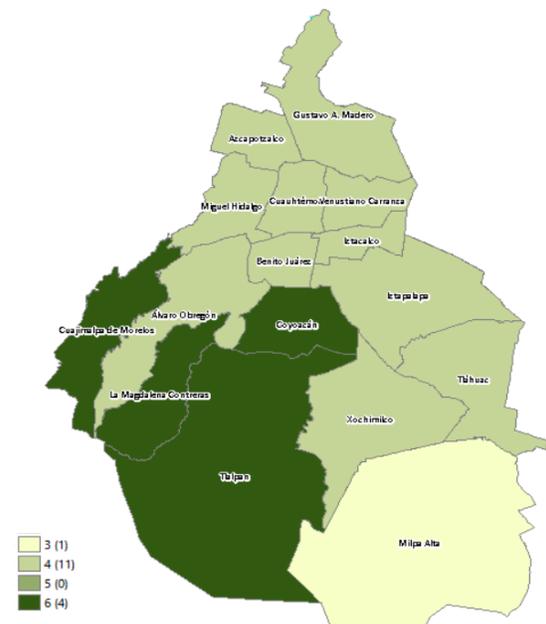


Figura 3.4 Número de cuartos por vivienda predominante en cada alcaldía. Fuente: INEGI (2017)

¹⁴ Cuarto, según el INEGI, puede ser cualquier espacio de la vivienda delimitado por paredes fijas y techo de cualquier material donde se realicen actividades cotidianas como dormir, comer, cocinar, entre otras (INEGI, 2019).

Finalmente, se tiene a Milpa Alta, la demarcación con mayor número de ocupantes por vivienda en promedio y que a su vez cuenta con el menor número de cuartos disponibles, factores que, sin lugar a dudas, influyen en el hecho de ésta sea la alcaldía con mayor índice de rezago social¹⁵ entre todas las de la CDMX, contando con tan solo -0.98 del indicador, lo cual es considerado como “Bajo”, a diferencia de las quince alcaldías restantes, mismas que su indicador es “Muy bajo” (CONEVAL, 2016).

3.2.2 Educación

Como se mencionó al final del subcapítulo antecedente, el índice de rezago social resume distintos factores; uno de éstos es la educación, es por ello que resulta menester conocer algunos de los indicadores de la educación más relevantes para la definición del perfil de la vivienda en la zona de estudio.

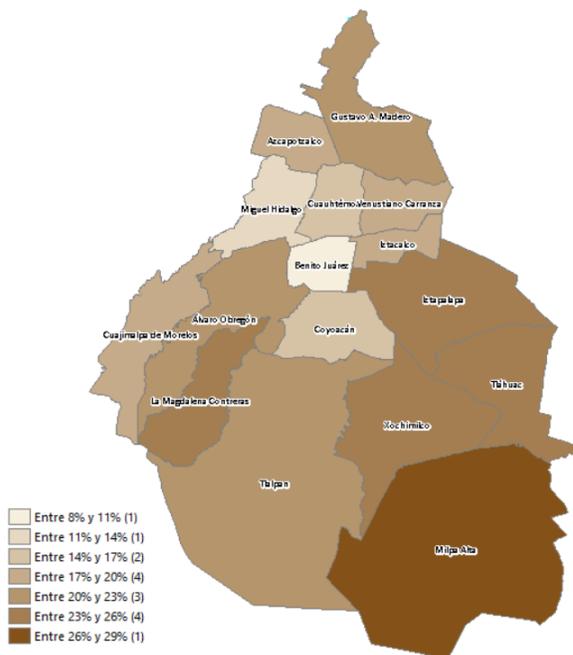


Figura 3.5 Porcentaje de personas mayores de 15 años con educación básica incompleta según alcaldía. Fuente: CONEVAL (2016)

En primera instancia, se tiene a la educación básica; ésta comprende los niveles de educación inicial -jardín de niños o preescolar-, primaria y secundaria, la cual se espera que, en promedio, sea concluida alrededor de los 15 años de edad de cualquier mexicano o persona incorporada al sistema educativo del país. Dicho lo anterior puede entenderse el porqué del indicador mostrado en la figura 3.5, el porcentaje de personas mayores de 15 años con estudios básicos incompletos según la alcaldía de residencia; en éste se puede ver que sólo Benito Juárez tiene un porcentaje menor al 11%, mientras que la mayoría se encuentran entre el 17% y 26%, teniendo sólo una un porcentaje mayor, Milpa Alta, resultado que era de esperarse tomando en cuenta el índice de rezago social mencionado con anterioridad y demás indicadores a los que se ha hecho referencia.

Este dato resulta relevante ya que es necesario conocer el nivel educativo con el cual el usuario del SCALL cuenta y, de esta manera, poder orientar adecuadamente diversos elementos del sistema, como lo puede ser el manual de operación y mantenimiento, mismo que en principio debe presentar un lenguaje comprensible para cualquier habitante de la CDMX, no obstante, existirán ocasiones en donde sea requerido un lenguaje técnico, hecho que se espera no sea un obstáculo, puesto que, como se ve en la figura 3.6, se estima que al menos 40% de la

¹⁵ El Índice de Rezago social es una medida ponderada que resume los indicadores referentes a la educación, acceso a los servicios de salud y calidad de la vivienda. Su finalidad es ordenar las unidades de observación, según los niveles de sus indicadores sociales, así como brindar estratos de unidades de información que tengan características parecidas. Es importante señalar que el índice no constituye una medición de pobreza, puesto que no incluye información sobre el ingreso, el acceso a la seguridad social ni el acceso a la alimentación (CONEVAL, 2016).

población mayor de 15 años de cada alcaldía cuenta con al menos educación de nivel medio superior concluida (INEGI, 2017).

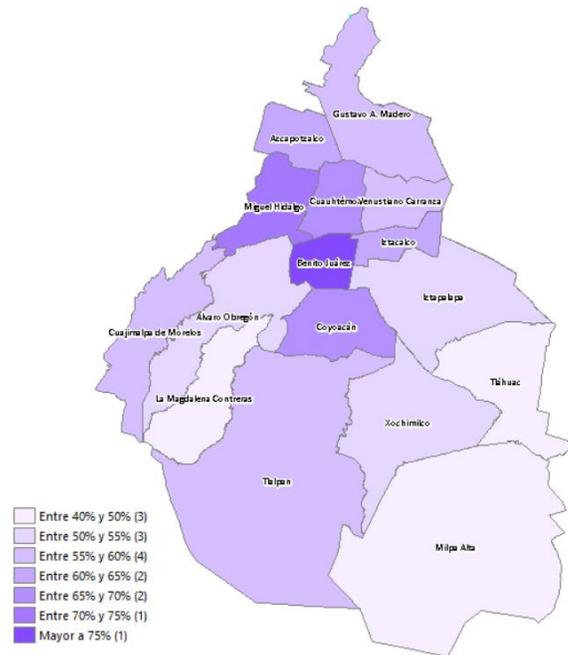


Figura 3.6 Porcentaje de la población mayor de 15 años con al menos educación media superior concluida según alcaldía. Fuente: INEGI (2017)

3.2.3 Ingresos

Sin lugar a dudas, uno de los aspectos más relevantes en la elección de un tren de tratamiento es la disponibilidad económica que en promedio se tiene en la zona de estudio. En el presente subcapítulo se presentan dos indicadores que se consideran representativos: la relación ingreso-gasto¹⁶ de cada alcaldía y, finalmente, las remuneraciones promedio que los habitantes de éstas perciben anualmente.

Comenzando con la relación ingreso-gasto, se tiene que la alcaldía mejor posicionada en este rubro es Azcapotzalco, con poco más de 141% del indicador, seguida de Milpa Alta, con alrededor del 140% del mismo, hecho que contrasta con todos los indicadores presentados con anterioridad; aunque es pertinente aclarar que, como la definición lo indica, la relación ingreso-gasto es una correspondencia, lo cual quiere decir que es un indicador hasta cierto punto indirecto. Siguiendo con este indicador, es de destacar que más de la mitad del total de las alcaldías -9 demarcaciones- se encuentran entre 120% y 125% del indicador y sólo una por debajo de este número -La Magdalena Contreras- (INEGI, 2016). El mapa del indicador se puede ver en la figura 3.7.

¹⁶ Esta relación se refiere a la correspondencia que existe entre el concepto de ingresos respecto de los gastos en la unidad económica. Matemáticamente se define como la multiplicación de la relación de los ingresos totales a la suma de éstos más los gastos totales por cien (INEGI, 2016).

Como último indicador económico se presenta a la remuneración media anual por persona -en miles de pesos- según alcaldía en el mapa de la figura 3.8. Dicho aspecto puede resultar de mayor utilidad para los fines que se persiguen en este texto, puesto que indica directamente las unidades monetarias que perciben los mexicanos en promedio.

En este indicador se puede apreciar una relación directa, en cierto grado, con los indicadores de educación presentados en este capítulo, pues se aprecia que las alcaldías con mayor número de personas con educación básica incompleta y menor número de personas con educación media superior completada, casi invariablemente, son las que presentan las remuneraciones anuales más bajas, éstas son Milpa Alta y Tlahúac. En contraparte, se tienen los casos de Miguel Hidalgo, la cual cuenta con el promedio de remuneraciones anuales más alto -con 269.9 miles de pesos- y Cuauhtémoc, alcaldías que presentan dos de los puestos más altos en los indicadores de educación y, a su vez, los dos mejores niveles de remuneración. Sin embargo es importante mencionar que Benito Juárez rompe esta relación, puesto que cuenta con una buena valoración educacional pero no figura entre las mejores remuneraciones (INEGI, 2016).

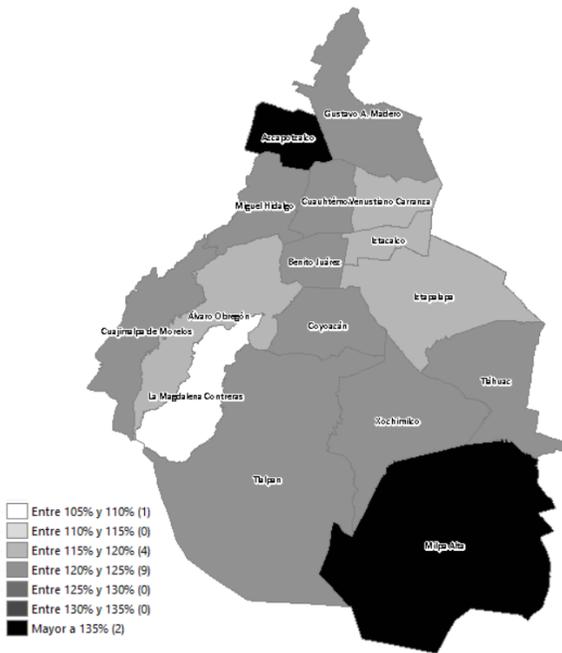


Figura 3.7 Relación ingreso-gasto según alcaldía. Fuente: INEGI (2016)

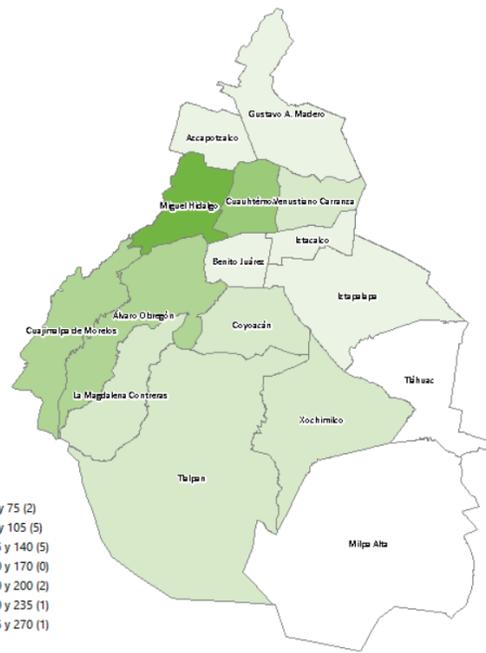


Figura 3.8 Remuneración media anual (en miles de pesos) por persona según alcaldía. Fuente: INEGI (2016)

Al obtener el promedio aritmético de las remuneraciones medias anuales se obtiene un valor de \$127,656 por habitante en la CDMX. Este dato puede ser de utilidad, siempre y cuando se consideren las limitaciones que implica. El porcentaje de personal ocupado en la ciudad es 32.37% de la población total.

3.3 Sistemas domiciliarios para el manejo de agua pluvial en la vivienda promedio de la CDMX

Hasta ahora se ha hecho referencia a algunas de las características fundamentales para conocer la vivienda promedio de la CDMX; teniendo definidos en este punto aspectos tales como el número de ocupantes que se espera por cada vivienda, el número de cuartos con el

que ésta cuenta, algunos indicadores de escolaridad y los ingresos que en promedio percibe un individuo que resida en este estado de la república.

Si bien dichos datos cobran relevancia en el desarrollo del sistema, es necesario ahondar aún más con respecto a otros, como lo son el tipo de material que puede fungir como superficie de captación, el tipo de drenaje de la vivienda o si bien se hace uso de la cosecha de agua pluvial propiamente, aunque esto último no es sinónimo de un SCALL, claro está.

En general, 98.58% de las viviendas en la ciudad se abastece, en teoría, mediante agua entubada, dejando sólo 1.10% para el abastecimiento mediante acarreo, el porcentaje restante se encuentra sin especificar (INEGI, 2017). El acarreo puede ser mediante pipas, el cual es el tipo más común, llave comunitaria, llave de otra vivienda, pozos, ríos, lagos y, finalmente, agua de lluvia. El alto porcentaje del abastecimiento mediante agua entubada puede ser debido a que la pregunta del cuestionario intercensal (INEGI, 2015) va orientada a si la vivienda cuenta con la instalación necesaria para recibir el agua por dicho medio, mas, no se refiere a si diariamente se abastece de agua a la vivienda de esta manera, razón por la cual el 98.58% es un dato que podría resultar engañoso y diferir con lo que se vive día a día en los hogares capitalinos.

El abastecimiento mediante agua pluvial, como era de esperarse, es mínimo. Tomando en cuenta que sólo el 1.10% de las viviendas tiene una fuente de abastecimiento principal distinta al agua entubada, se tienen a 98,401 viviendas; ahora bien, hasta marzo de 2015, se tenía registro de que el 0.24% de dichas viviendas se abastecía principalmente mediante la cosecha de agua de lluvia, sin importar si ésta -la cosecha- cumplía con todos los estándares de calidad, es decir sólo 235 viviendas en toda la ciudad, las cuales se distribuían entre cuatro alcaldías: Tlalpan, La Magdalena Contreras, Xochimilco y Milpa Alta (INEGI, 2017). Dicho esto, puede considerarse que la instalación de SCALL, sea cual sea su grado de desarrollo, es prácticamente nula en la CDMX.

No obstante, se tienen que considerar elementos de la vivienda que tienen potencial para ser parte del SCALL, uno de ellos es el techo, mismo que se espera cumpla la función de superficie de captación. La tabla 3.3 muestra la distribución porcentual de los techos que generalmente se tienen en las viviendas.

Tabla 3.3 Material en techos de las viviendas por alcaldía

Alcaldía	Materiales en techos (Porcentaje)				
	Material de desecho o lámina de cartón	Lámina metálica, lámina de asbesto, lámina de fibrocemento, palma o paja, madera o tejamanil	Teja o terrado con vigería	Losa de concreto o viguetas con bovedilla	Material no especificado
Álvaro Obregón	0.58	5.56	0.08	93.07	0.71
Azcapotzalco	0.22	5.48	0.24	93.24	0.82
Benito Juárez	0.30	0.82	0.06	98.58	0.24
Coyoacán	0.40	2.97	0.04	95.71	0.87
Cuajimalpa de Morelos	1.75	7.14	0.38	90.06	0.67
Cuauhtémoc	0.14	1.58	0.12	96.84	1.32
Gustavo A. Madero	0.36	4.64	0.08	94.30	0.62
Iztacalco	0.22	3.48	0.08	94.94	1.29
Iztapalapa	0.95	6.32	0.07	91.91	0.75

La Magdalena Contreras	2.27	9.97	0.24	86.24	1.28
Miguel Hidalgo	0.06	2.86	0.28	96.37	0.42
Milpa Alta	6.65	11.94	0.14	81.02	0.26
Tláhuac	1.62	7.04	0.00	90.79	0.55
Tlalpan	2.29	6.68	0.07	90.37	0.59
Venustiano Carranza	0.37	2.87	0.08	95.68	0.99
Xochimilco	5.03	10.43	0.15	83.29	1.10

Fuente: INEGI (2017)

Como la tabla 3.3 lo muestra, en cada alcaldía al menos el 81% de las viviendas cuenta con techo de losa de concreto o viguetas con bovedillas. Aunque este dato pueda no ser el eje central de la presente tesis, debido a los alcances de ésta, el tipo de material cobra relevancia en la implementación del SCALL en su enfoque general, por ello se debe tener en cuenta.

Otro de los datos que habrá de ser tomado en consideración es el tipo de almacenamiento con el que es probable encontrarse en la vivienda promedio. En general se estima que en toda la CDMX 82.02% de las viviendas cuenta con tinaco, mientras que sólo el 57.98% de las mismas cuenta con cisterna (INEGI, 2017).

Finalmente, se debe hacer mención al drenaje con el cual se cuenta. El 100% del desalojo de aguas en la red pública se lleva a cabo en cuatro de las dieciséis alcaldías, siete más cuentan con un porcentaje por encima del 95%, dos por encima del 90% y sólo tres se encuentran por debajo de dicho porcentaje. Cuando el desalojo no se lleva a cabo en la red pública, el sitio más común corresponde a fosas sépticas o biodigestores, dejando un porcentaje mínimo para sitios como barrancas, grietas, ríos o, en su defecto, no se dispone o no se especifica (INEGI, 2017).

Tabla 3.4 Disponibilidad de drenaje en las viviendas por alcaldía

Alcaldía	Disponibilidad de drenaje (Porcentaje)					
	Red pública	Fosa séptica o biodigestor	Barranca o grieta	Lago, río o mar	No disponen	No especificado
Álvaro Obregón	98.15	1.03	0.63	0.20	0.05	0.95
Azcapotzalco	99.98	0.02	0.00	0.00	0.01	1.00
Benito Juárez	100.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.45
Coyoacán	97.32	2.37	0.30	0.01	0.15	1.64
Cuajimalpa de Morelos	93.24	4.04	1.33	1.39	0.18	1.11
Cuauhtémoc	100.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.86
Gustavo A. Madero	99.19	0.03	0.76	0.02	0.09	1.12
Iztacalco	100.00	0.00	0.00	0.00	0.05	1.22
Iztapalapa	99.02	0.97	0.00	0.00	0.06	1.16
La Magdalena Contreras	97.55	2.17	0.29	0.00	0.20	0.73
Miguel Hidalgo	99.93	0.07	0.00	0.00	0.01	1.02
Milpa Alta	64.16	35.60	0.24	0.00	1.29	0.17
Tláhuac	91.27	8.68	0.00	0.05	0.25	0.62
Tlalpan	65.24	34.18	0.58	0.00	0.31	0.91
Venustiano Carranza	100.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97

Xochimilco	69.92	29.35	0.05	0.18	0.98	0.80
------------	-------	-------	------	------	------	------

Fuente: INEGI (2017)

3.4 Definición del espacio disponible promedio para la instalación del tren de tratamiento a desarrollar

Una vez establecidos todos los datos anteriores, es posible definir un perfil de vivienda en la zona de estudio, el cual se espera se asemeje lo más posible a lo que se puede encontrar en promedio alrededor de toda la CDMX. La tabla 3.5 resume las características finales esperadas.

Tabla 3.5 Perfil de la vivienda de la CDMX

Concepto	Cantidad
Número de ocupantes	3.4 personas
Número de cuartos	4 cuartos
Porcentaje de ocupantes mayores de 15 años con educación básica incompleta	20%
Porcentaje de ocupantes mayores de 15 años con al menos educación media superior concluida	59%
Ingreso mensual por cada ocupante activo	\$10,638
Ocupantes activos	1
Tipo de techo	Losa de concreto o vigueta y bovedilla
Tipo de almacenamiento de agua potable	Tinaco
Tipo de drenaje	Desalojo en la red pública

CAPÍTULO 4

CONSUMO HABITACIONAL DE AGUA EN LA

CIUDAD DE MÉXICO

En el capítulo 3 se definieron aspectos de suma relevancia para el diseño del tren de tratamiento, puesto que éstos influyen de manera directa en la determinación del consumo habitacional de agua por vivienda esperado y la elección del tipo de uso de agua que el SCALL a implementar pretende satisfacer.

A lo largo del presente capítulo se verá que el consumo de agua en el hogar puede discretizarse en diferentes actividades, mismas que de igual manera pueden clasificarse en distintos usos, ya sea primario, secundario o terciario, según sea su interacción con el ser humano. Dicha clasificación, finalmente, permitirá determinar cuál es la opción que brinde una mejor relación costo-beneficio, considerando los recursos y necesidades de la población de la CDMX.

El consumo de agua se refiere al volumen de ésta que es utilizado para cubrir las necesidades de los usuarios. Uno de los tipos de consumo es el doméstico o habitacional, el cual se refiere a las viviendas y, para los fines que persigue el presente texto, se expresa en unidades de litros por día (l/d) o litros por habitante por día (l/hab/día) si se refiere al consumo *per cápita* (CONAGUA, 2016).

Tomando en cuenta lo establecido por CONAGUA y considerando que el clima templado subhúmedo es el predominante en la CDMX, con una temperatura media anual de 16°C (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2019), se estima que el consumo de agua *per cápita* es de 175 l/hab/día, 203 l/hab/día y 217 l/hab/día para los niveles socioeconómicos bajo, medio y alto, respectivamente. Sin embargo, también se puede hacer uso del subtotal por clima, el cual corresponde a 191 l/hab/día y es el que se tendrá en consideración en este texto.

Dicho lo anterior y retomando el perfil de vivienda establecido en el capítulo 3, donde se tienen a 3.4 personas habitando el hogar promedio, se llega a un consumo habitacional esperado de 650 l/d. Es importante aclarar que dicha cantidad de agua corresponde al consumo total de agua potable, lo cual quiere decir que este volumen se repartirá, tal y como se trata de manera concisa en el siguiente apartado, entre las distintas actividades que se llevan a cabo cotidianamente en el hogar, mismas que, consecuentemente, conllevan una clasificación según sea el uso del recurso.

4.1 Distribución del consumo habitacional

El consumo habitacional, como se vio anteriormente, es el volumen total de agua del que se dispone diariamente en casa. Se puede inferir fácilmente que este volumen se emplea en diferentes actividades como el aseo personal, lavado de ropa, limpieza del hogar, riego, por mencionar algunas; es por ello que es necesario tener una noción bien fundamentada de la consecuente distribución del recurso, la cual depende de la región que se analice, pues, así como las características socioeconómicas y demográficas de la población son variables, se espera que también lo sean sus hábitos de consumo. A continuación, la figura 4.1 presenta distintas tendencias del uso del agua en el hogar

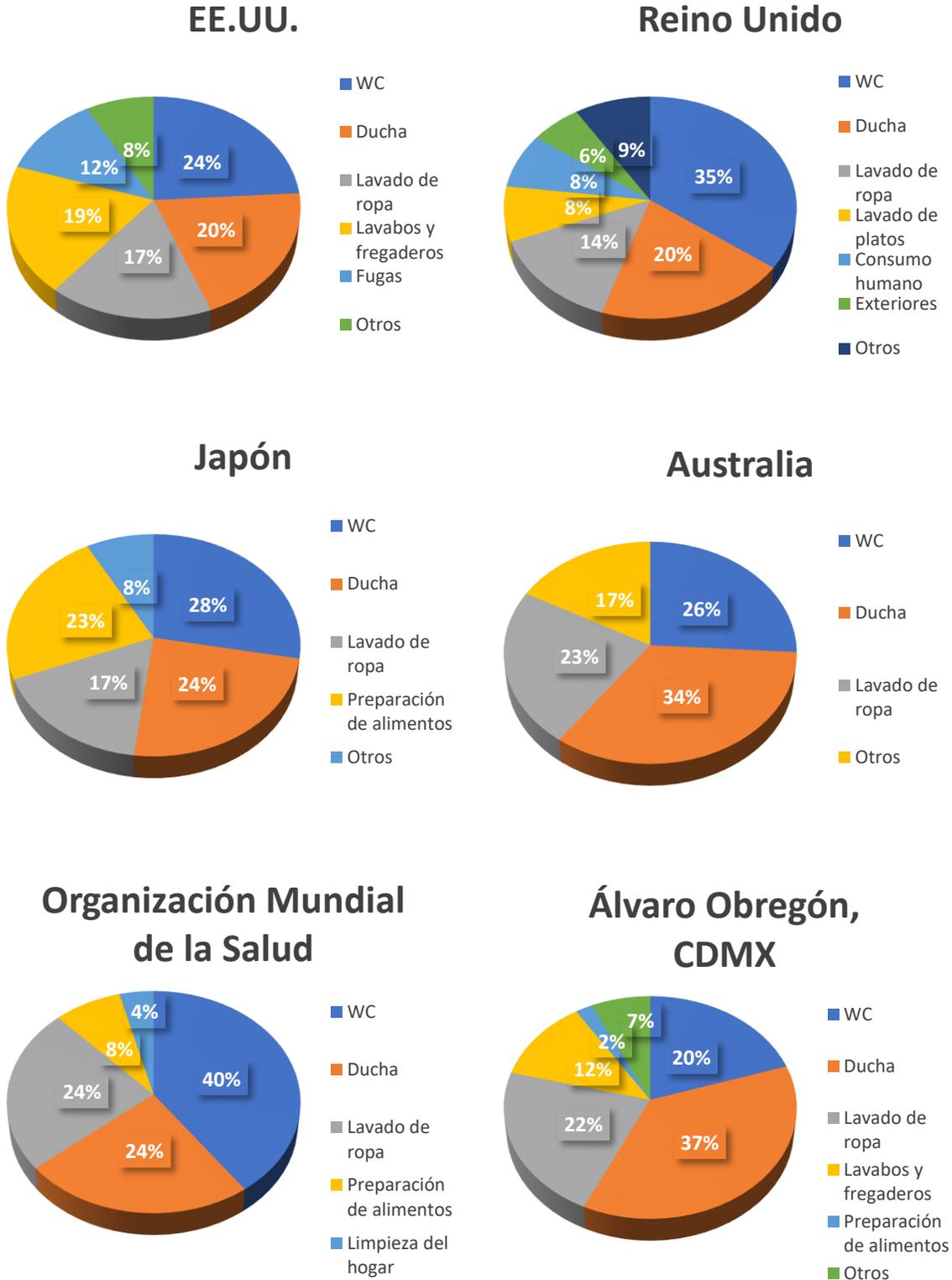


Figura 4.1 Diferentes distribuciones del consumo habitacional. Elaboración propia con datos de EPA (2019), Garden Design Ideas (2019), MLIT Japan (2019), Your Home (2019), UNESCO (2019) y García (2012)

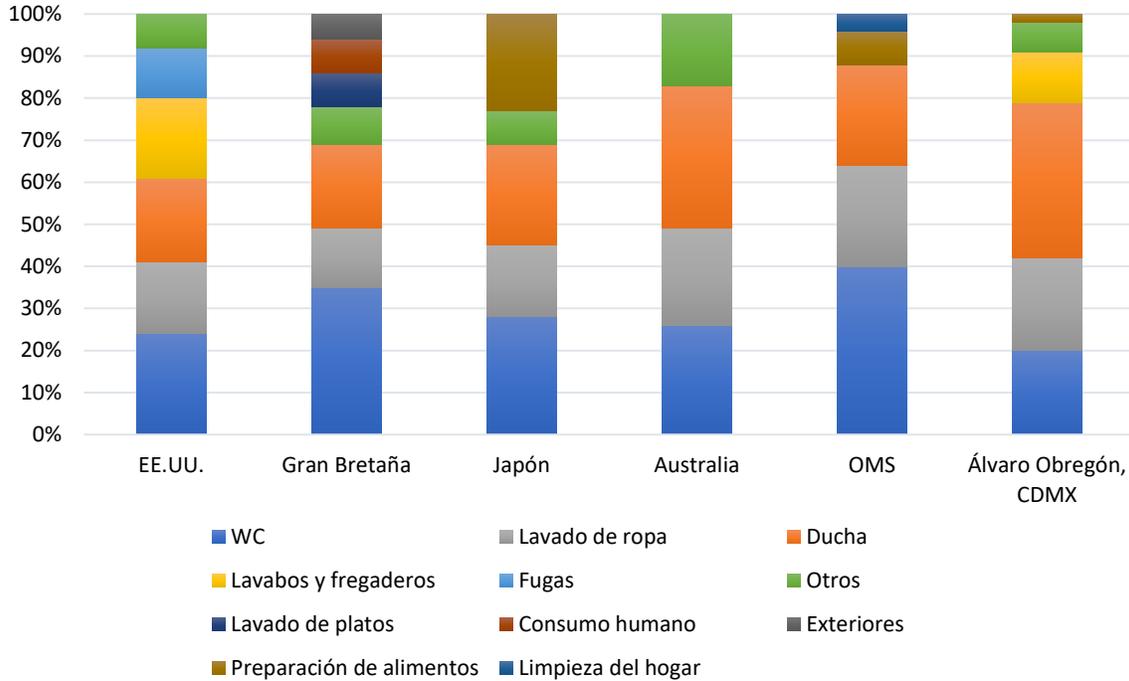


Figura 4.2 Resumen de las diferentes distribuciones mostradas en la figura 4.1. Elaboración propia con datos de EPA (2019), Garden Design Ideas (2019), MLIT Japan (2019), Your Home (2019), UNESCO (2019) y García (2012)

La figura 4.1 pone en evidencia la gran cantidad de agua destinada al WC, con aproximadamente la tercera parte del consumo habitacional, seguido de otros muebles de baño como lo son la regadera o ducha, los cuales tiene un porcentaje similar. A su vez, el lavado de ropa se ubica en la tercera posición con alrededor del 20% del agua utilizada en los hogares del planeta, dejando así el volumen restante a aspectos como la limpieza de alimentos y utensilios de cocina, limpieza en general, riego en exteriores, entre otros.

Si bien no se tienen datos concretos sobre la zona de estudio, es decir la CDMX, puede suponerse que en general, el consumo en el WC, lavado de ropa, limpieza de interiores, uso en exteriores y otras actividades que no involucren un contacto directo con el ser humano, representa un porcentaje del orden del 55% del total del agua que se emplea en el hogar; actividades que suponen un contacto de mayor consideración, es decir ducharse, aseo bucal, lavado de manos y lavado de trastes, constituyen alrededor del 40% -tomando un valor conservador dada la falta de información precisa-; y finalmente el 5% restante, aproximadamente, se destina a actividades como el consumo directo y la preparación de alimentos. En la figura 4.2 pueden apreciarse de manera visual los rangos de valores que son esperados.

Los mencionados grados de contacto del agua con el ser humano resultan de utilidad para definir una clasificación según el uso, misma que se verá en el apartado siguiente, es decir el 4.2.

4.2 Clasificación del uso del agua en el hogar

Como se ha dicho anteriormente, resulta útil clasificar las distintas actividades que conforman el consumo doméstico de agua, pues de esta manera es posible establecer las características

que el recurso debe tener y, en consecuencia, definir los distintos procesos y operaciones unitarias que son necesarias para conseguir la calidad requerida, y así poder destinarlo al uso deseado.

La clasificación considerada durante el presente texto será la de algunos autores anteriormente citados (García, 2012; Chinchilla, 2019).

4.2.1 Uso primario

El uso primario del agua engloba actividades en las cuales el ser humano no establece un contacto que represente un riesgo de ingesta accidental, tales como uso del WC, lavado de ropa, limpieza del hogar, uso en exteriores y jardinería. Como se presentó en la figura 4.2, estas actividades representan la mayor parte del consumo habitacional, entre el rango de 45% a 65% del total del recurso empleado en el hogar.

Basándose en la NOM-127-SSA1-1994, el agua para uso primario no debe exceder las 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN), ni las 20 unidades de color verdadero en la escala platino-cobalto y tanto su olor como su color deben ser agradables para la mayoría de los consumidores. Una de las formas de alcanzar esta calidad es mediante la separación de primeras lluvias, sedimentación, filtración y una adecuada conservación tras el paso por dichos procesos u operaciones unitarias.

4.2.2 Uso secundario

Este uso se conforma por actividades que pueden suponer un determinado riesgo de ingesta por parte del ser humano, además de representar un contacto de mayor consideración. Dichas actividades son la ducha, lavado de manos, aseo bucal y el lavado de trastes y otros utensilios empleados en la preparación de alimentos. Las fuentes consultadas indican que el uso secundario consume entre el 25% y el 50% del agua en el hogar.

Además de cumplir con los requerimientos establecidos por la normativa mexicana que cubre el uso primario, acorde con (García, 2012) el uso secundario requiere un pH entre 6.5 y 8.5 y, además, garantizar la ausencia de coliformes, ya sean fecales o totales. Dicho lo anterior, el tren de tratamiento considerado se espera esté conformado por desinfección y filtración menor a 50 µm, buscando remover contaminantes orgánicos y coliformes.

4.2.3 Uso terciario

Por último, se tiene al uso terciario, éste, como se puede suponer, corresponde al uso que involucra la ingesta de agua, es decir, la preparación de alimentos y el consumo directo en sí mismo. Se espera que el porcentaje destinado a este uso sea mucho menor a los dos anteriores, presentando valores promedio menores al 10% del consumo habitacional total.

El consumo de agua exige un cumplimiento total de la normativa impuesta, por lo que, además de lo requerido en los apartados anteriores, el tren de tratamiento correspondiente a este uso deberá contar con operaciones o procesos unitarios que garanticen la remoción de metales pesados y otros contaminantes químicos que pudieran estar presentes en el agua a tratar.

4.3 Determinación del uso de diseño

Una vez conocidos los distintos usos en los que se puede clasificar el consumo doméstico, se procede a determinar cuál de éstos fungirá como eje central del tren de tratamiento a diseñar. Para este fin, se tomará en cuenta el indicador beneficio-costo elaborado por el autor de la tesis antecedente a ésta (Chinchilla, 2020) en la línea de trabajo del Mtro. Cristian Emmanuel González Reyes, director de tesis de ambas, puesto que la presente pretende dar continuidad al mencionado texto.

El mencionado trabajo propuso distintos trenes de tratamiento correspondientes a los tres usos; posteriormente, haciendo uso de las características esperadas del agua cosechada, la normativa regulatoria, los costos de inversión inicial, el consumo habitacional total -mismo que sólo difiere en menos del 6% con respecto al calculado al inicio de este capítulo- y el porcentaje correspondiente a cada uso -los cuales están dentro de los rangos presentados-, presentó un indicador que evaluaba las diferentes propuestas, teniendo como resultado la tabla 4.1, en donde se pueden comparar los trenes de tratamiento de manera cuantitativa.

Resulta menester mencionar que el indicador presentado (Chinchilla, 2020) considera sólo el consumo final que se pretende cubrir mediante el SCALL, sin tomar en cuenta las variaciones del afluente, es decir, supone que la lluvia es constante y puede cubrir el agua que el consumo habitacional requiere diariamente. Además, el indicador pasa por alto el ahorro en el agua embotellada que se consume en el hogar, pues sólo toma en cuenta el agua proveniente de la red municipal. No obstante, el indicador es una referencia de utilidad para determinar el uso de diseño del tren de tratamiento.

Tabla 4.1 Indicador beneficio-costo

Clasificación del uso	Tren de tratamiento	Costo de inversión [\\$]	Cantidad de agua pluvial aprovechable [l/día]	Índice Beneficio-Costo [1]
Primario	Filtración (Arena-Grava), Filtración (Carbón activado), Desinfección (Cloro)	992	364.6	0.37
Secundario	Además de la filtración para uso primario: Microfiltración (Amiad 50 µm), Desinfección (Cloro)	2,592	653.6	0.25
Secundario	Además de la filtración para uso primario: Microfiltración (Amiad 50 µm), Desinfección (Radiación UV)	2,802	653.6	0.23
Secundario	Además de la filtración para uso primario: Microfiltración (Amiad 50 µm),	9,402	653.6	0.07

Desinfección (Ozono)				
Además de la filtración para uso secundario:				
Terciario	Ósmosis inversa, Intercambio iónico, Desinfección (Cloro)	3,875	688	0.18

Fuente: Adaptado de Chinchilla (2020)

A partir de la comparación presentada en la tabla 4.1, se observa que el tren de tratamiento con un mejor índice beneficio-costo es el que tiene como fin darle al agua pluvial captada un uso primario, es decir, aquel que brinda la posibilidad de emplear el recurso para su uso en el WC, lavado de ropa, limpieza del hogar, uso en exteriores y jardinería. El tren de tratamiento en cuestión tiene un índice beneficio-costo de 0.37. Éste consta de filtración mediante grava, arena y carbón activado, además de cloración, proceso que, aunque no se considera para el uso indirecto, es requerido para un adecuado almacenamiento del recurso tratado.

Adicionalmente, es importante mencionar que, si bien otras opciones pueden lucir atractivas, el tren de tratamiento seleccionado requiere una inversión inicial considerablemente menor con respecto a los demás, un factor que se pondera, pues, como se vio en el capítulo 3, la vivienda promedio de la CDMX tiene un ingreso mensual de poco más de \$10,600, por lo cual se debe buscar la opción más asequible para el usuario.

Finalmente, se tienen que hacer aclaraciones de suma relevancia. En primera instancia, se tiene que la separación de primeras lluvias es una operación antecedente necesaria para cualquiera de los trenes de tratamiento, es por ello que dicho costo se excluye del cálculo del indicador. Además, el pH cobra relevancia especial, ya que el valor considerado, como se dijo anteriormente, será 5.5 y, aunque no sea considerado en el tren de tratamiento debido al uso de diseño -primario-, tendrá que monitorearse debido a que este valor es susceptible a ser alterado indirectamente mediante diversos procesos u operaciones unitarias.

CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL TREN DE **TRATAMIENTO**

Hasta este punto se han descrito los aspectos de interés para el proyecto en cuestión, mismos que van desde el estado del arte de los SCALL hasta la propuesta conceptual de diversos trenes de tratamiento, pasando por la problemática actual del agua a nivel mundial y local, estudios de caracterización del agua de lluvia, definición del perfil de la vivienda promedio de la zona de estudio, entre otros. Todos estos elementos permiten acercarnos a cumplir el objetivo principal de esta tesis, el cual consiste en elaborar el proyecto ejecutivo del tren de tratamiento de agua pluvial a implementar en la CDMX. El capítulo en cuestión pretende brindar un primer bosquejo de lo que será el sistema.

El tren de tratamiento a desarrollar tendrá su caudal de entrada proveniente del separador de primeras lluvias, mismo que se pretende conducir a un dispositivo que funja como elemento para homogenizar caudal y calidad del agua y, de esta manera, poder controlar diversas variables como el volumen, el pH y la turbiedad. Dado que una conducción a superficie libre podría dejar expuesto el caudal y ralentizar el flujo, se conducirá el caudal mediante tubos a presión, haciendo uso de elementos como tuberías, válvulas, bombas u otros, a través de todos los procesos y operaciones unitarias que conforman el tren de tratamiento, tales como la desinfección y la filtración. Finalmente, tras estas acciones, se espera que el agua cuente con la calidad deseada y de esta manera poder almacenarla en otro tanque, donde estará a disposición del usuario, siendo éste -el tanque de almacenamiento de agua tratada- la culminación del tren de tratamiento.

5.1 Afluente y efluente

La calidad que presenta el agua a la entrada y a la salida del tren, es decir, la calidad del afluente y del efluente, respectivamente, son los factores que definen la configuración del conjunto de operaciones y procesos unitarios con los que se contará, puesto que, a *grosso modo*, la calidad del efluente puede entenderse como la calidad del afluente más el efecto de dichos procesos y operaciones.

La propuesta de tren de tratamiento considerada parte de las características físicas y organolépticas, microbiológicas, químicas y radiactivas que se espera presente el agua pluvial captada (Chinchilla, 2020). Éstas han sido mencionadas a lo largo del texto, no obstante, se presenta la tabla 5.1 a manera de recapitulación, mostrando sólo los parámetros cuyo valor ha salido del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994, pues son los que definen el tren de tratamiento a desarrollar, además de considerar el pH debido a que este parámetro está sujeto a cambios a lo largo del tratamiento. De momento, el caudal, tanto a la entrada como a la salida, se deja de lado, pues, como se dijo anteriormente, éste se considerará como constante y su cálculo se abordará en el momento en el cual se determinen los niveles de operación del tanque de regulación.

Tabla 5.1 Parámetros de interés del afluente del tren de tratamiento

Parámetro	Valor del afluente	Límite permisible NOM-127-SSA1-1994
Color verdadero [UC-PC]	40	20
Turbiedad [UTN]	Menor a 10*	5
pH [1]	5.5 – 8.5*	6.5 – 8.5
Coliformes totales [NMP/100 ml]	1	No detectable
Coliformes fecales [UFC/100 ml]	8	No detectable

Dada la naturaleza del uso de diseño -uso primario-, es decir, agua que pueda usarse en actividades que no involucren el contacto directo ni representen un riesgo de ingesta accidental, los parámetros presentados en la tabla 5.1 son sólo los correspondientes a las características físicas y organolépticas y a las características biológicas, pasando por alto al resto. Parámetros como el aluminio, nitratos y el hierro, si bien son considerados por el trabajo antecedente (Chinchilla, 2020), sólo se encontraron fuera del rango establecido por la normativa en un estudio de caracterización del agua de lluvia (Báez, 2014), además de no ser considerados para el uso primario; El pH representa otro caso especial, ya que, aunque no se incluye en los parámetros a satisfacer en el agua para uso primario (García, 2012; Chinchilla, 2019) sí podría alterar otras condiciones, por ejemplo, propiciar el desarrollo de microorganismos si se tiene un pH elevado (Masters & Ela, 2008). Es necesario recalcar que los parámetros de turbiedad y pH se encuentran marcados con un asterisco (*) debido a que se consideran los valores que se obtienen tras la discriminación de primeras lluvias realizada con el dispositivo *DISPLU* (Reséndiz Martínez, 2019), el cual fue elaborado como parte de esta línea de investigación y por ello es tomado en cuenta. Los parámetros de interés del efluente, es decir, los parámetros correspondientes al recurso tratado se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Parámetros de interés del efluente del tren de tratamiento

Parámetro	Valor del efluente
Color verdadero [UC-PC]	Menor a 20
Turbiedad [UTN]	Menor a 5
pH [1]	Menor a 8.5
Coliformes totales [NMP/100 ml]	No detectable
Coliformes fecales [UFC/100 ml]	No detectable

5.2 Diagramas de flujo y funcionamiento del tren de tratamiento

Como se ha dicho en repetidas ocasiones, se desarrollará la propuesta de tren de tratamiento para uso primario elaborada por (Chinchilla, 2019), sin embargo, se realizarán algunas modificaciones, esto con el fin de buscar mayor practicidad en el manejo de los insumos a lo largo de la vida útil del sistema. El diagrama de flujo del tren de tratamiento se muestra en la figura 5.1.

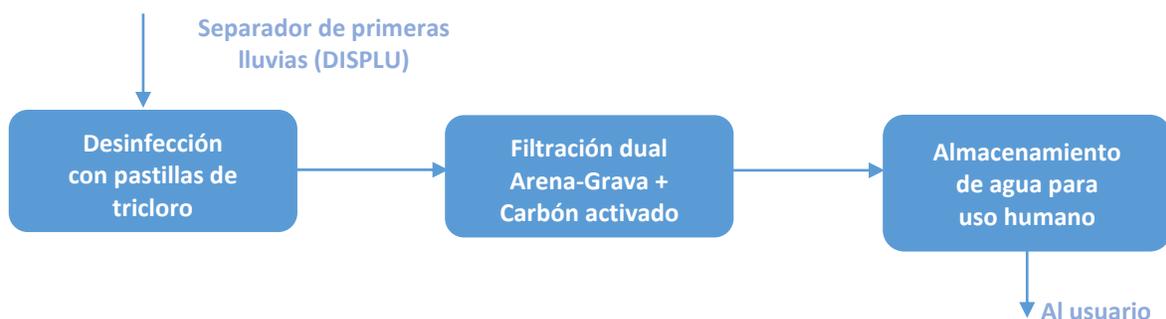
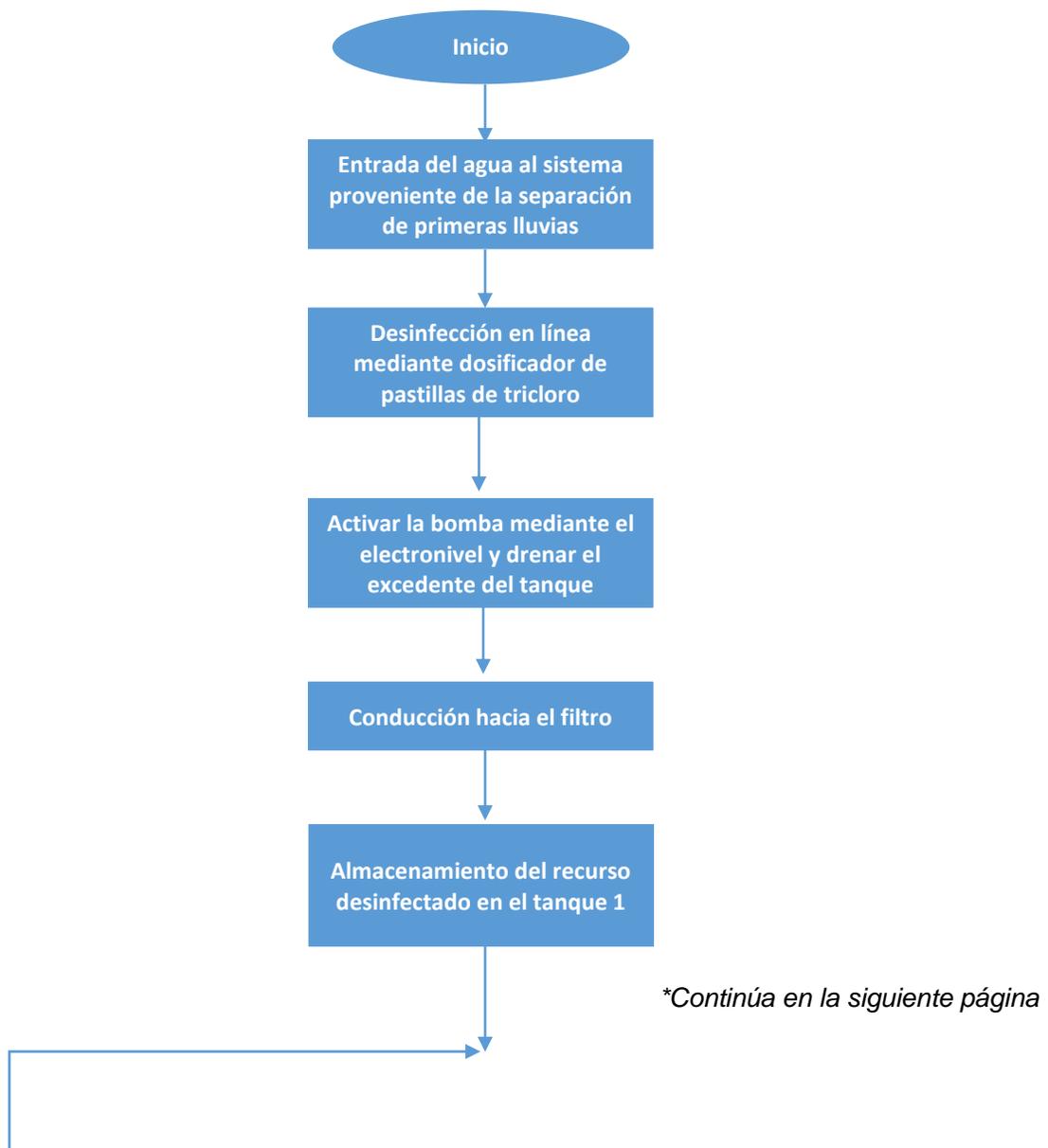


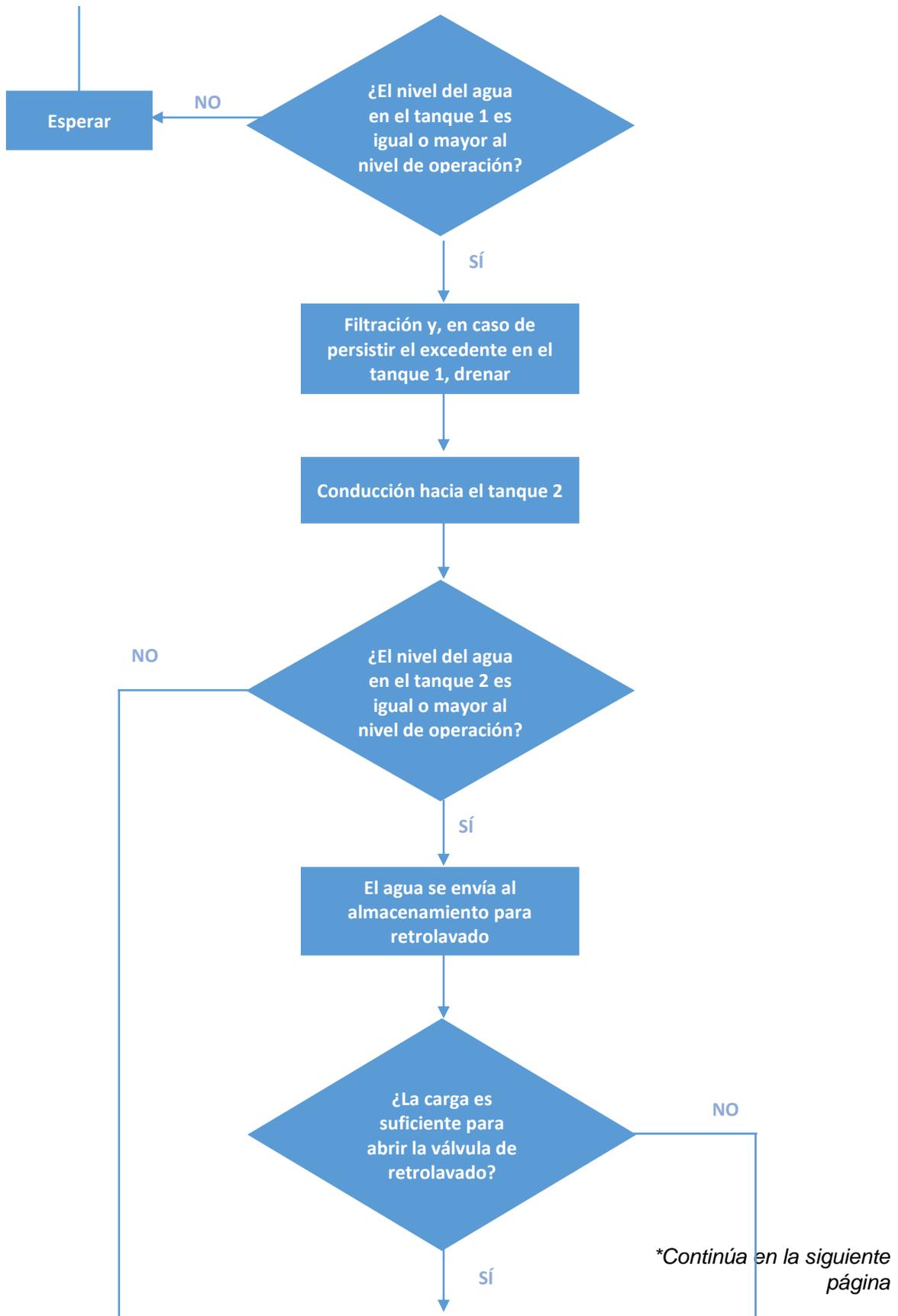
Figura 5.1 Diagrama de flujo del tren de tratamiento

Puede verse en el diagrama de flujo presentado en la figura 5.1 que el tren de tratamiento inicia con la desinfección mediante pastillas de tricloro, se sigue con la etapa de filtración lenta y, finalmente, se almacena el agua tratada y queda a disposición del usuario.

El tren de tratamiento a diseñar tiene como primer proceso unitario a la desinfección; esto es debido al estancamiento momentáneo, por así llamarlo, al que estará sujeto el recurso en el tanque de regulación, lo cual conlleva a proteger el sistema desde este punto con el fin de anular el posible desarrollo de organismos. Una vez realizada la desinfección microbiana, se da paso a la filtración mediante tres componentes: grava, arena y carbón activado; con estas operaciones unitarias se busca cumplir con los límites, tanto de turbiedad como de color, establecidos.

A continuación, se presenta el que se pretende sea el diagrama de funcionamiento lógico del sistema a desarrollar. Como se puede inferir, dicho diagrama se encontrará sujeto a cambios durante todo el proceso de diseño, no obstante, se espera que la composición final de éste -el diagrama- sea muy parecida a esta primera propuesta, misma que se presenta en la figura 5.2.





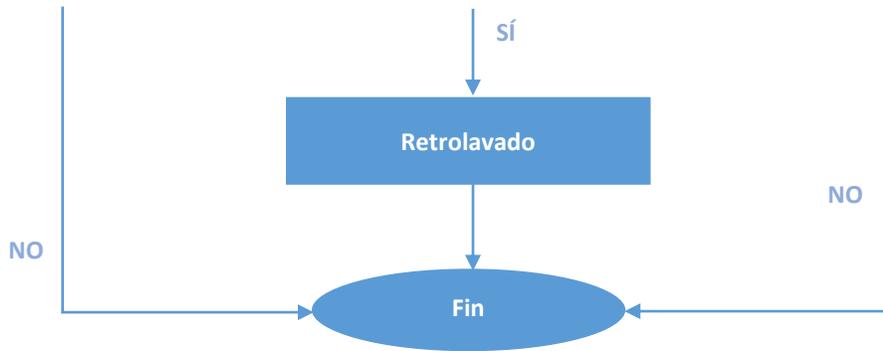


Figura 5.2 Primera propuesta del diagrama de funcionamiento lógico del tren de tratamiento

5.3 Operaciones y procesos unitarios a desarrollar

Tal y como se puede apreciar en los dos diagramas presentados en el apartado antecedente, el tren de tratamiento involucra sólo dos procesos y operaciones unitarias: filtración y desinfección. A continuación, se presentan aspectos teóricos de cada uno de éstos y, finalmente, se aterriza dicha información aplicándola a los distintos dispositivos que se buscan desarrollar y así conformar el tren de tratamiento de manera física.

5.3.1 Filtración mediante filtro dual

Los filtros granulares proporcionan un medio poroso donde se lleva a cabo la remoción de sólidos suspendidos presentes en el agua mediante diversos mecanismos, tales como la fuerza hidrodinámica, difusión, sedimentación, inercia e intercepción; se cree que, bajo condiciones normales, los dos mecanismos predominantes son la difusión y la sedimentación, no obstante, el crecimiento de agentes biológicos puede afectar significativamente el desempeño de éstos (Droste, 1997).

En plantas de tratamiento de agua para consumo humano, la filtración se encuentra antecedida casi invariablemente por los procesos de coagulación, floculación y sedimentación, razón por la cual no se puede referir a ésta como una *filtración directa*. La filtración directa, de la cual se hará uso, es aquella que no cuenta con un proceso previo de sedimentación, puesto que ésta -la filtración directa- se encuentra limitada a aguas relativamente claras, es decir con una turbiedad máxima de 10 UTN (Reynolds & Richards, 1995) y un color de máximo 40 UC-PC; aunque se tiene registro de filtraciones directas que han tratado agua con turbiedades de hasta 60 UTN con gran éxito, empleando filtros duales con dos metros de lecho filtrante (Droste, 1997).

Los filtros duales generalmente están compuestos por un medio de arena y otro de antracita, o bien, derivados de ésta última como lo es el carbón activado. Las principales ventajas de los filtros duales, en comparación con los filtros que cuentan con un solo medio filtrante, son: mayor tiempo en las *carreras* o, en otras palabras, tiempo entre retrolavados, mayores tasas de filtración y la capacidad de tratar agua con mayor turbiedad o color. Dichas ventajas son consecuencia del tamaño de las partículas que conforman el medio, las distintas gravedades específicas que los materiales empleados presentan y la granulometría de éstos (Reynolds & Richards, 1995). La tabla 5.3 muestra las características usuales de los filtros duales empleados en el tratamiento de aguas para consumo humano.

Tabla 5.3 Características de filtros duales para tratamiento de aguas para consumo humano

Característica	Valor	
	Rango	Típico
Antracita:		
Profundidad del lecho [mm]	460 – 610	610
Tamaño efectivo D ₁₀ [mm]	0.9 – 1.1	1.0
Coefficiente de uniformidad (D ₆₀ /D ₁₀) [1]	1.6 – 1.8	1.7
Arena:		
Profundidad del lecho [mm]	150 – 205	150
Tamaño efectivo D ₁₀ [mm]	0.45 – 0.55	0.5
Coefficiente de uniformidad (D ₆₀ /D ₁₀) [1]	1.5 – 1.7	1.6
Tasa de filtración [l/s-m ²]	2.04 – 5.44	3.40

Fuente: Reynolds & Richards (1995)

Como puede verse, el desempeño de este tipo de filtros es consecuencia principalmente de la composición granulométrica de los materiales que lo conforman y la tasa de filtración que sucede. Cabe aclarar que la tasa de filtración es un hecho dinámico, mismo que obedece a la materia sólida acumulada a lo largo del lecho filtrante, lo cual se conoce como colmatación del filtro; a mayor colmatación la tasa de filtración baja, es decir, el filtro tiene la capacidad de tratar un volumen menor de agua en la misma área y el mismo tiempo.

Aspectos granulométricos de gran importancia son el tamaño efectivo y el coeficiente de uniformidad; el primero de éstos se refiere al tamaño de la malla en milímetros por la que pasa el 10% del material cribado, o bien, el aquella en donde se retiene el 90% del peso del material; mientras que el coeficiente de uniformidad se refiere a la relación del percentil 60, en otras palabras, la malla en donde se retiene el 40% del peso del material, al percentil 10, es decir el tamaño efectivo. El tamaño efectivo se considera en función del percentil 10 debido a que se ha encontrado que la resistencia hidráulica en el lecho de arena será relativamente inalterable en tanto el valor de este percentil se mantenga igual (Reynolds & Richards, 1995).

El lecho de arena siempre debe de contar con grava como soporte. Ésta generalmente se coloca dividida en cinco capas correspondientes a cinco distintas graduaciones, mismas que van desde 1/16" en la parte superior hasta 1" en el fondo, conformando así un lecho total de entre 150 y 610 mm de profundidad. La remoción de turbiedad y color a lo largo de este medio resulta mínima. (Reynolds & Richards, 1995).

A su vez, la tasa de filtración, cuando ésta se realiza de manera directa, suele tomar valores de entre 0.8 a 5.4 l/s-m², siendo 4 l/s-m² un valor comúnmente empleado con buenos resultados (American Society of Civil Engineers; American Water Works Association, 1990).

Dicho todo lo anterior, es posible generar la propuesta para el modelo que se empleará para llevar a cabo las pruebas de tratabilidad. Dicha propuesta consiste en establecer los valores granulométricos y de profundidad de cada lecho, así como la tasa de filtración y el área transversal del filtro dual.

Comenzando con la tasa de filtración, se parte del hecho de que, dado lo poco práctico que resultaría proponer una superficie de captación fija, se tiene un tanque de almacenamiento de tipo comercial como elemento para el suministro al filtro, lo cual se traduce en un volumen *V* de 1100 litros de agua pluvial por tratar, lo que representa el caso crítico. Ahora bien, tomando en cuenta que el sistema pretende ser auxiliar a la red municipal, puede considerarse que dicho

volumen de agua pueda tratarse al cabo de un tiempo t igual a 24 horas. Aunado a esto, se pretende que el sistema trabaje a una tasa de filtración T de $4 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$, valor que es el recomendable según la bibliografía citada en los párrafos anteriores de este apartado. Con estos valores propuestos es posible obtener el área transversal del filtro A y, consecuentemente, dado que se elegirá una forma cilíndrica, el diámetro D de éste, mismo que se deberá ajustar a los valores comerciales de tuberías y conexiones, propiciando así cambios en la tasa de filtración y el área propuesta.

Se tiene que

$$V = 1100 \text{ [l]}$$

$$t = 24 \text{ [h]} = 86,400 \text{ [s]}$$

donde se sabe que la tasa de filtración T es igual a

$$T = \frac{V/t}{A}$$

por lo tanto

$$A = \frac{V}{T * t} = \frac{1100 \text{ [l]}}{\left(4 \left[\frac{\text{l}}{\text{s} * \text{m}^2}\right]\right) * (86,400 \text{ [s]})} = 3.18 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

considerando una sección transversal circular

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 3.18 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

por ende se puede definir al diámetro D de la sección como

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * (3.18 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]})}{\pi}} = 6.37 \times 10^{-2} \text{ [m]} = 6.37 \text{ [cm]} = 2.51 \text{ [in]}$$

Es en este momento es donde se elige el diámetro comercial D_C . Se podría inferir fácilmente que este sería de 2.5", sin embargo, debido a que se buscan los materiales de más fácil acceso en el mercado, se opta por el de 3", o bien 7.62 cm, pues, generalmente, es un diámetro que se encuentra en la mayoría de los comercios especializados. Por lo que los valores finales del área transversal y la tasa de filtración, denotados por A_F y T_F respectivamente, difieren de los propuestos o calculados anteriormente. A continuación, se muestra dicho ajuste.

$$A_F = \frac{\pi D_C^2}{4} = \frac{\pi * (7.62 \text{ [cm]})^2}{4} = 45.60 \text{ [cm}^2\text{]} = 4.56 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

Tomando en cuenta nuevamente los valores críticos del sistema, tanto para V como t , se tiene que la tasa de filtración final es

$$T_F = \frac{V/t}{A_F} = \frac{1100 \text{ [l]} / 86,400 \text{ [s]}}{4.56 \times 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}} = 2.79 \left[\frac{\text{l}}{\text{s} * \text{m}^2} \right]$$

Como puede verse, la tasa de filtración final sigue estando dentro del rango establecido.

El filtro dual estará compuesto por arena sílica y carbón activado, materiales de fácil acceso al potencial usuario y con los que se cuenta en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, además, claro está, del respectivo soporte de grava. Dado que la capacidad de filtración de la grava es mínima y su función se limita a ser un soporte, se considerará un medio de 20 cm, compuesto a su vez por cinco capas de 4 cm cada una, las cuales serán de distintas graduaciones. Por su parte, la composición granulométrica de los lechos, tanto de carbón activado como de arena sílica, estarán determinadas por la elección de tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad, los cuales son seleccionados de los rangos que presenta la bibliografía consultada, así como la profundidad de éstos. La tabla 5.4 muestra las características principales del modelo a desarrollar.

Tabla 5.4 Características de los modelos de filtro dual a desarrollar

Característica	Cantidad
Tasa de filtración [l/s-m ²]	2.79
Diámetro [cm] (in)	7.62 (3)
Área [m ²]	4.56 x 10 ⁻³
Grava:	
Profundidad del lecho [cm]	20
Número de estratos	5
Profundidad de cada estrato [cm]	4
	1/16 – 3/16
	1/4 – 3/8
Granulometría (Sup. a inf.) [in]	3/8 - ½
	½ - ¾
	¾ - 1
Arena sílica:	
Profundidad del lecho [cm]	15
Estratificación (Sup. a inf.)	Grueso a fino
Tamaño efectivo D ₁₀ [mm]	0.5
Coficiente de uniformidad (D ₆₀ /D ₁₀) [1]	1.6
D ₆₀ [mm]	0.8
Carbón activado:	
Profundidad del lecho [cm]	45
Estratificación (Sup. a inf.)	Grueso a fino
Tamaño efectivo D ₁₀ [mm]	1.0
Coficiente de uniformidad (D ₆₀ /D ₁₀) [1]	1.6
D ₆₀ [mm]	1.6

Es de destacar que los lechos de arena y carbón activado estarán estratificados, además de que este último difiere por un cm de las recomendaciones consideradas; dicha elección es debida a que la turbiedad y el color del afluente son considerablemente menores en comparación con las que considera la bibliografía. La estratificación en ambos lechos filtrantes se debe a que, si bien no existe una gran diferencia en cuanto a la remoción de turbiedad y color entre lechos estratificados y no estratificados (Ruíz Priego, 2015), se espera que esta configuración permita una mayor carrera.

Ahora bien, con los valores propuestos para los dos lechos es posible obtener la curva granulométrica para cada elemento, misma que nos indica la cantidad de porcentaje de cada granulometría que deben contener la arena sílica y el carbón activado en su totalidad. Dichas curvas se presentan en las figuras 5.3 y 5.4. El método para obtenerlas fue el mismo que el seguido en las pruebas de tratabilidad referidas en el párrafo anterior.

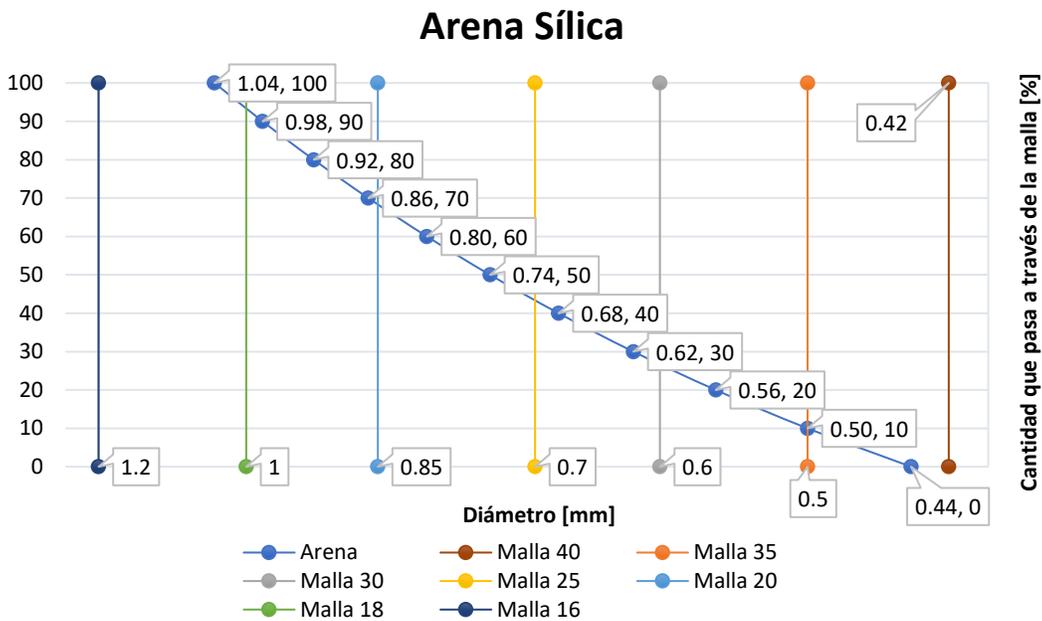


Figura 5.3 Curva granulométrica de la arena sílica propuesta

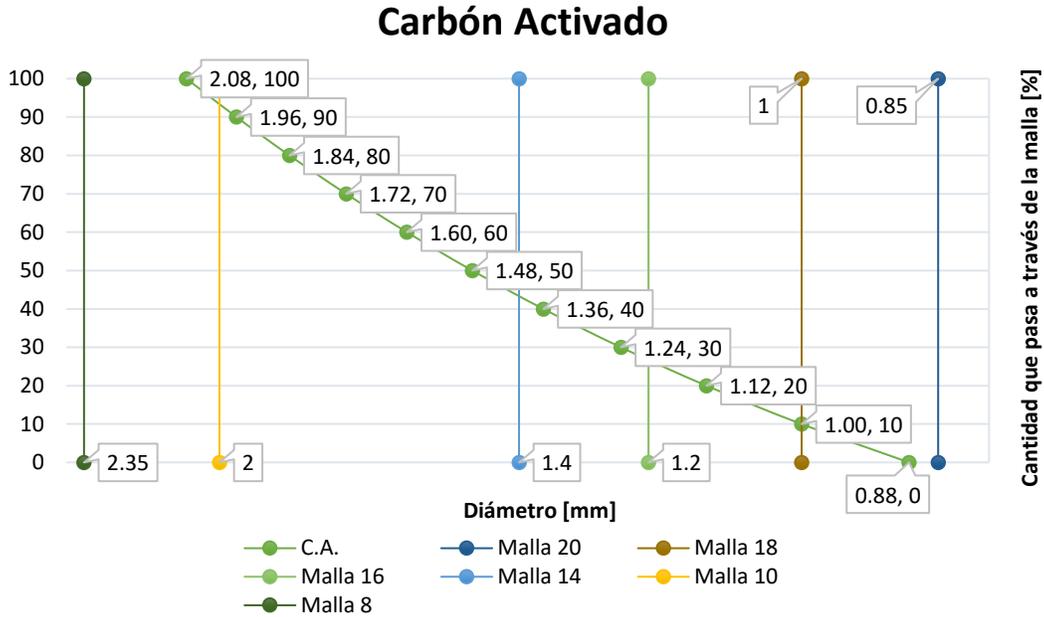


Figura 5.4 Curva granulométrica del carbón activado propuesto

Como se puede ver en los gráficos presentados en las figuras 5.3 y 5.4, tanto la arena sílica como el carbón activado tiene una composición definida por el D₁₀ y el coeficiente de uniformidad seleccionados. Con base en ésta, se pueden conocer los porcentajes de participación que tendrán cada uno de los distintos tamaños, conformando así el cien por ciento del material. Dichos porcentajes son presentados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 Composición de la arena sílica y el carbón activado a emplear

Material	Tamaño	Cantidad [%]
Arena sílica	Malla 16 – Malla 18	6.7
	Malla 18 – Malla 20	25.0
	Malla 20 – Malla 25	25.0
	Malla 25 – Malla 30	16.7
	Malla 30 – Malla 35	16.7
	Malla 35 – Malla 40	10.0
Total		100.0
Carbón activado	Malla 8 – Malla 10	6.7
	Malla 10 – Malla 14	50.0
	Malla 14 – Malla 16	16.7
	Malla 16 – Malla 18	16.7
	Malla 18 – Malla 20	10.0
Total		100.0

Una vez conocidos estos aspectos del filtro, es posible conocer la composición volumétrica de cada uno de los lechos de éste, factor de importancia para posteriormente, obteniendo la densidad de los materiales en el laboratorio, determinar la masa necesaria de cada granulometría. La tabla 5.6 presenta las longitudes de cada estrato y los volúmenes requeridos de todos los tipos de grava, arena y carbón activado, los cuales fueron obtenidos a partir del volumen resultante de la multiplicación del área transversal del filtro por la profundidad del lecho

correspondiente, determinando, a su vez, el porcentaje de volumen que corresponde a cada graduación.

Tabla 5.6 Composición del filtro dual. Mostrada en el orden en que se configurará el filtro dual

Lecho	Profundidad total del lecho [cm]	Tamaño del material	Cantidad del lecho correspondiente [%]	Profundidad del estrato [cm]	Volumen del estrato [cm ³]
Carbón activado	45	8 - 10	6.7	3.0	136.8
		10 - 14	50.0	22.5	1026.1
		14 - 16	16.7	7.5	342.0
		16 - 18	16.7	7.5	342.0
		18 - 20	10.0	4.5	205.2
Arena sílica	15	16 - 18	6.7	1.0	45.6
		18 - 20	25.0	3.8	171.0
		20 - 25	25.0	3.8	171.0
		25 - 30	16.7	2.5	114.0
		30 - 35	16.7	2.5	114.0
		35 - 40	10.0	1.5	68.4
Grava	20	1/16 - 1/8	25.0	4.0	182.4
		1/8 - 3/8	25.0	4.0	182.4
		3/8 - 1/2	25.0	4.0	182.4
		1/2 - 3/4	25.0	4.0	182.4
		3/4 - 1	25.0	4.0	182.4

Asimismo, la curva granulométrica de ambos materiales es de gran utilidad para conocer la pérdida de carga hidráulica asociada al filtro dual en estado limpio, es decir, al iniciar la operación. Para conocer la mencionada pérdida de carga se hará uso de la ecuación de Rose, misma que, para medios estratificados, involucra elementos como el factor de forma y la porosidad, por mencionar algunos (Reynolds & Richards, 1995).

La ecuación de Rose está definida como

$$h_L = \left[\frac{1.067 D v_a^2}{\phi g \varepsilon^4} \right] \sum \frac{C_{D_i} x_i}{d_i}$$

donde

$D \rightarrow$ Profundidad total del lecho [m]

$v_a \rightarrow$ Velocidad superficial $\left[\frac{m}{s} \right]$

$\phi \rightarrow$ Factor de forma o esfericidad [1]

$\varepsilon \rightarrow$ Porosidad [1]

$C_D \rightarrow$ Coeficiente de arrastre [1]

$x \rightarrow$ Porción retenida [1]

$d \rightarrow$ Media geométrica de los tamaños de abertura de las mallas [m]

$g \rightarrow$ Gravedad del lugar $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

a su vez, el coeficiente de arrastre se define como

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad Re \leq 1$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad 1 < Re < 10^4$$

en donde se sabe que el número de Reynolds Re es igual al producto del diámetro por la velocidad superficial entre la viscosidad cinemática ϑ , para este caso

$$Re = \frac{\varphi d v_a}{\vartheta}$$

siendo d la media geométrica de los tamaños de abertura de las mallas que delimitan la fracción considerada

$$d = \sqrt{d_1 d_2}$$

Con este procedimiento, se determina la pérdida para los dos lechos por separados. Una vez obtenidas ambas pérdidas de carga, se sumarán para conocer la pérdida de carga hidráulica total. Se considera una temperatura de 10°C, puesto que es poco probable que la temperatura de operación sea menor a esta durante la temporada de lluvias en la CDMX.

Lecho de arena sílica

Se sabe inicialmente que

$$D = 15 \text{ [cm]}$$

$$v_a = 2.79 \left[\frac{l}{s * m^2} \right] = 2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s * m^2} \right] = 2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\varepsilon = 0.42 \quad (\text{Droste, 1997})$$

$$\varphi = 0.82 \quad (\text{Droste, 1997})$$

$$\vartheta_{T=10^{\circ}\text{C}} = 1.31 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

$$g = 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

ahora, se procede a calcular la suma de las divisiones del producto del coeficiente de arrastre por la porción retenida entre la media geométrica. Los cálculos se muestran en la tabla 1

Tabla 1

Tamaño	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	M.G. [m]	Porcentaje [%]	x _i [1]	Re [1]	C _D [1]	C _D x/d [m ⁻¹]
16 - 18	1.2	1	1.10E-03	6.7	0.07	1.91	15.05	915.66
18 - 20	1	0.85	9.22E-04	25.0	0.25	1.61	17.61	4775.29
20 - 25	0.85	0.7	7.71E-04	25.0	0.25	1.35	20.74	6722.19
25 - 30	0.7	0.6	6.48E-04	16.7	0.17	1.13	24.36	6266.12
30 - 35	0.6	0.5	5.48E-04	16.7	0.17	0.96	25.09	7634.85
35 - 40	0.5	0.42	4.58E-04	10.0	0.10	0.80	29.99	6545.34
Total								32859.45

$$h_{L_{\text{Arena sílica}}} = \left[\frac{1.067 * (0.15 \text{ [m]}) * \left(2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 \right)}{(0.82) * \left(9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \right) * (0.42)^4} \right] * (3.29 \times 10^4 \text{ [m}^{-1}\text{)})$$

$$h_{L_{\text{Arena sílica}}} = 1.64 \times 10^{-1} \text{ [m]} = 16.35 \text{ [cm]}$$

Lecho de carbón activado

Se sabe inicialmente que

$$D = 45 \text{ [cm]}$$

$$v_a = 2.79 \left[\frac{l}{s * m^2} \right] = 2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s * m^2} \right] = 2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\varepsilon = 0.55 \quad (\text{Droste, 1997})$$

$$\varphi = 0.72 \quad (\text{Droste, 1997})$$

$$\vartheta_{T=10^\circ C} = 1.31 \times 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

ahora, se procede a calcular la suma de las divisiones del producto del coeficiente de arrastre por la porción retenida entre la media geométrica. Los cálculos se muestran en la tabla 2

Tabla 2

Tamaño	d ₁ [mm]	d ₂ [mm]	M.G. [m]	Porcentaje [%]	x _i [1]	Re [1]	C _D [1]	C _D x/d [m ⁻¹]
8 - 10	2.35	2	2.17E-03	6.7	0.07	3.32	9.20	283.07
10 - 14	2	1.4	1.67E-03	50.0	0.50	2.57	11.57	3456.04
14 - 16	1.4	1.2	1.30E-03	16.7	0.17	1.99	14.54	1870.03
16 - 18	1.2	1	1.10E-03	16.7	0.17	1.68	16.94	2577.66
18 - 20	1	0.85	9.22E-04	10.0	0.10	1.41	19.84	2151.86
Total								10338.65

$$h_{L_{\text{Carbón activado}}} = \left[\frac{1.067 * (0.45 [m]) * \left(2.79 \times 10^{-3} \left[\frac{m}{s} \right] \right)^2}{(0.72) * \left(9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \right) * (0.55)^4} \right] * (1.03 \times 10^4 [m^{-1}])$$

$$h_{L_{\text{Carbón activado}}} = 5.98 \times 10^{-2} [m] = 5.98 [cm]$$

Pérdida de carga hidráulica total

$$h_L = h_{L_{\text{Arena sílica}}} + h_{L_{\text{Carbón activado}}}$$

$$h_L = 16.35 [cm] + 5.98 [cm] = 22.33 [cm]$$

Es importante destacar que, además de la pérdida de carga que conllevan los distintos lechos filtrantes, se deberá considerar la carga por el sistema de falso fondo con el que cuente el dispositivo, sin embargo, en este caso no es un valor que altere en demasía la operación.

5.3.2 Desinfección mediante cloración

La desinfección se refiere, a *grosso modo*, a la desinfección microbiana en el agua. Esta práctica se lleva a cabo alrededor del mundo desde finales del siglo XIX y constituye el tratamiento más importante que se aplica al agua potable, puesto que gracias a ésta se logra la erradicación de enfermedades que pueden transmitirse fácilmente a través del consumo de agua (Droste, 1997). Prueba de esto es que se estima que hoy en día la principal causa de brotes de enfermedades ocasionadas por el consumo de agua no potabilizada es una inadecuada o interrumpida desinfección, especialmente en sistemas que tienen este proceso como único tratamiento (Craun, 1988).

La desinfección del agua puede alcanzarse mediante diversos agentes, tales como oxidantes químicos, radiación, tratamiento térmico o tratamiento electroquímico, por mencionar algunos. Sea cual sea la elección final, siempre es deseable que, además de cumplir con la encomienda de eliminar a los patógenos de manera eficiente, el agente desinfectante cumpla con las siguientes características (Droste, 1997):

1. Destrucción efectiva de microorganismos patógenos
2. No ser tóxico para humanos ni animales domésticos
3. No ser tóxico para peces u otras especies acuáticas
4. Facilidad y seguridad en su transportación, almacenamiento y aplicación
5. Bajo costo
6. Facilidad y confiabilidad para su análisis en la interacción con el agua
7. Proveer protección residual al agua para consumo humano

De entre las opciones mencionadas, sin duda alguna la más empleada históricamente es la desinfección con cloro. Entre las principales ventajas que supone el uso del cloro están su efectividad ampliamente probada, procedimientos de manejo mundialmente conocidos y bajos costos tanto de inversión como de operación. No obstante, la principal problemática que representa dicha práctica es la formación de trazas de subproductos de desinfección (SPD), esto como resultado de las reacciones que éste -el cloro- produce en conjunto con la materia orgánica presente en el agua (American Society of Civil Engineers; American Water Works Association, 1990).

Los subproductos de desinfección incluyen, principalmente, dos tipos: los trihalometanos (THM) -tales como cloroformo y carcinógeno- y los ácidos haloacéticos (AHA). Es importante recalcar que la desinfección con cloro suele posicionarse al final de los trenes de tratamiento convencionales, lo cual es debido a que, si ésta se realiza antes del proceso de coagulación y filtración, la producción de SPD puede aumentar (Masters & Ela, 2008). En el caso del tren de tratamiento a desarrollar en esta ocasión, la posición de la cloración no se ve comprometida debido a que la filtración directa -de la cual se hace uso- no dispone de agentes coagulantes.

A pesar de la formación de SPD, la desinfección con cloro representa una gran ventaja cuando se le compara con otras formas de desinfección, ésta es la creación de un residuo del cloro. Dicho residuo actúa como desinfectante secundario, esto es, aun cuando el agua tratada haya

salido del tren de tratamiento, ésta seguirá contando con una protección ante posibles contaminantes (Masters & Ela, 2008). Es por esta razón que la NOM-127-SSA1-1994 demanda que el agua potable tenga entre 0.2 y 1.5 mg/l de cloro residual libre, es decir, el cloro remanente en el agua tras la destrucción de microorganismos patógenos.

La teoría de la desinfección de Chick-Watson fue desarrollada a principios del siglo XX. Esta teoría establece que “la tasa de destrucción de patógenos de un desinfectante es proporcional al número de patógenos y la concentración del desinfectante” (Chick & Watson, 1908). Ésta se puede expresar como (Morris, 1975):

$$\ln \frac{N}{N_0} = kC^n t$$

donde

N → Número de patógenos presentes

N_0 → Número de patógenos presentes en $t = 0$

C → Concentración del desinfectante

t → Tiempo

k → Coeficiente de letalidad específica

n → Coeficiente de dilución

Como puede verse en la ecuación de la teoría de Chick-Watson, el número de patógenos tras la desinfección depende de variables como el número de microorganismos patógenos antes de llevar a cabo el tratamiento, la concentración del agente desinfectante, el tiempo que éste esté en contacto con el medio, la letalidad o inactivación de éste y cuán diluido se encuentre.

Sabiendo lo anterior, es posible analizar la figura 5.5, donde se muestra un gráfico que comprende la dosificación de cloro, la demanda y el residual generado. En ella puede verse que la oxidación se completa en el mínimo de la curva residual, mismo que se denomina como “punto de quiebre” y se alcanza en un determinado tiempo. Éste se alcanza entre los 1.5 y 2 moles de cloro por mol de nitrógeno amoniacal y representa la dosis en que las cloraminas se han convertido en gases nitrógeno, por lo que, si se continúa añadiendo cloro, éste -el cloro- será cloro residual libre.

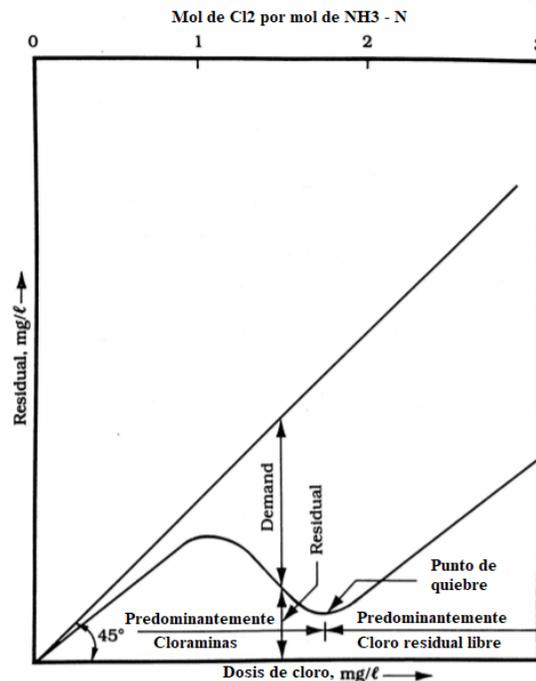
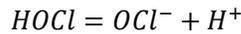
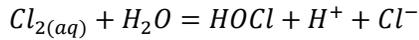


Figura 5.5 Curva de demanda de cloro. Fuente: Adaptada de Reynolds (1995)

El cloro libre en el agua surge de la reacción gas cloro, hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio o cualquier otro compuesto que sea adicionado en el agua, produciendo de esta manera gas cloro ($Cl_{2(aq)}$), ácido hipocloroso ($HOCl$) e hipoclorito (OCl^-), dichas reacciones se muestran a continuación; esto también influye en la alcalinidad del agua, la cual tiende a bajar (Masters & Ela, 2008).



La dosificación de cloro a punto de quiebre está en función de la calidad del agua a tratar, sin embargo, para la mayoría de fuentes de abastecimiento de agua potable, dicha dosis oscila entre los 4 y los 10 mg/l (Reynolds & Richards, 1995).



Figura 5.6 Dosificador de pastillas de tricloro FibroPool® FC 200. Fuente: Amazon (2019)

En el caso del tren de tratamiento a implementar, la dosificación de cloro se realizará mediante un dosificador en línea FC 200 marca FibroPool®. Dicho dispositivo se emplea originalmente para la cloración en albercas, por lo que habrá que poner atención en la dosificación que se realice en el tren de tratamiento, pues el tiempo de concentración se reduce considerablemente debido a que el dosificador está diseñado para tratar agua que se encuentra en circulación contante, caso opuesto al que trabajará en esta ocasión, donde sólo se tiene contacto con el recurso a tratar en un punto. Una de las soluciones a este problema pudiera ser el uso de una solución más concentrada. El desempeño y condiciones de operación del dispositivo se abordan en los capítulos posteriores. El dosificador a usar se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.7 Tabletas de tricloro de 3" marca Aqua Pool®. Fuente: The Home Depot (2019)

El manual de operación del dosificador FC 200 recomienda añadir solamente pastillas de tricloro de 3", lo cual es congruente con el tren de tratamiento, en donde se contempla trabajar con el mismo reactivo. Las pastillas de tricloro a emplear son las "Tabletas de 3" de tricloro estabilizado" de la marca Aqua Pool® (figura 5.7). En las especificaciones del producto se puntualiza que cada tableta contiene un 89% de cloro disponible, lo cual representa un porcentaje mayor en comparación con el hipoclorito de calcio, otra de las opciones comerciales. Resulta de suma importancia mencionar que estas tabletas se consideran de lenta disolución.

La dosificación de cloro, para este caso, dependerá del número de pastillas que se coloquen dentro del dosificador, el tiempo de que permanezcan dentro del dispositivo y la posición de la válvula reguladora con la que cuenta el dosificador; de esta manera, estos aspectos serán variables hasta alcanzar la cantidad de cloro residual libre que exige la normativa.

CAPÍTULO 6

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE

TRATAMIENTO

Tras describir el funcionamiento general del tren, se definirán de manera específica aspectos como el dimensionamiento y elección de los materiales de los componentes del filtro, tuberías, tanques, válvulas y demás elementos que sean requeridos para la operación de éste, Además se hará mención de los elementos necesarios para trabajar con el dosificador de tricloro. A continuación, se describe el proceso seguido para poder llegar a los distintos modelos físicos que funjan como base para el diseño definitivo del tren de tratamiento.

6.1 Construcción del modelo del filtro dual

Una vez definidos aspectos como el área transversal del filtro dual, profundidades de los distintos lechos que lo conforman y los materiales a emplear en éstos, se procede a la elaboración física del modelo. A continuación, se describen las actividades realizadas para, en primera instancia, obtener todos los materiales que fungen como lecho filtrante con las características deseadas para poder así confinarlos en una estructura hidráulica y, finalmente, llegar a la materialización del modelo planteado a lo largo del presente capítulo.

6.1.1 Carbón activado, arena sílica y grava

En la tabla 5.6 se mostró la composición de materiales con la que se configurará el filtro dual, misma que es consecuencia de las curvas granulométricas obtenidas a partir de los percentiles y coeficientes de uniformidad considerados. Como puede verse, se deberá contar con cinco distintos tamaños de carbón activado, seis para arena sílica y otros cinco para la grava que brindará soporte.

Tal y como se hace referencia en el apartado 5.3.1, el material con el que se trabajará -carbón activado, arena sílica y grava- se tenía limpio y a disposición en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental; sin embargo, es necesario verificar la composición granulométrica de éstos y obtener los distintos tamaños requeridos, razón por la cual se debe cribar el material a través de distintas mallas, mismas que se presentaron en las figuras 5.3 y 5.4.

El tamizado de los materiales se llevó a cabo en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Para esta actividad se hizo uso del siguiente equipo y material, mismos que se muestran en la figura 6.1:

- Agitador manual
- Cuchara
- Botes o cubetas
- Mallas no. 4, 10, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35 y 40
- Charola



Figura 6.1 Equipo y material para tamizar la grava, la arena sílica y el carbón activado en el Laboratorio de Geotecnia de la FI UNAM. Fuente: Directa (2019)

Para arena sílica las mallas empleadas fueron las denominadas 16, 18, 20, 25, 30, 35 y 40, las cuales van desde 1.2 hasta 0.42 mm de abertura; por su parte, para el tamizado del carbón activado se utilizaron las mallas 4, 10, 14, 16, 18 y 20, mismas que van desde 2.35 hasta 0.85 mm de abertura. De esta manera, al igual que en las curvas granulométricas, puede verse que el carbón activado será, de manera general, de mayor tamaño en comparación a la arena sílica. Además, se verificó el tamaño de la grava a emplear, misma que ya se encontraba tamizada.



Tras tamizar el material a emplear, se determinó la densidad de éste. Este proceso se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, donde se pudo hacer uso de una balanza, un vaso de precipitados y una probeta (figura 6.2). Con dichos elementos se registró la masa de 40 cm³ de cada material, a la cual se le restan los 113.10 g de masa correspondiente al vaso de precipitados para, de esta manera, obtener la masa de los 40 ml del material en cuestión. Posteriormente, se divide dicha masa entre el volumen, es decir 40 cm³. Los resultados son: 0.28 g/cm³, 1.44 g/cm³ y 1.44 g/cm³ para carbón activado, arena sílica y grava, respectivamente. Es de destacar que se optó por dicho proceso dada la poca relevancia que cobra este dato, pues sólo es de carácter auxiliar al momento de elaborar físicamente el modelo.

Figura 6.2 Balanza, probeta y vaso de precipitados empleados en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la FI UNAM. Fuente: Directa (2019)

Considerando estos valores de densidad y los volúmenes para cada estrato presentados en la tabla 5.6, es posible calcular la masa necesaria de material según su tamaño. Los resultados se muestran en la tabla 6.1.

Figura 6.1. Composición final del filtro dual

Lecho	Tamaño del material	Cantidad del lecho correspondiente [%]	Profundidad del estrato [cm]	Volumen del estrato [cm ³]	Masa del estrato [g]
Carbón activado	8 - 10	6.7	3.0	136.8	38.3
	10 - 14	50.0	22.5	1026.1	287.3
	14 - 16	16.7	7.5	342.0	95.8
	16 - 18	16.7	7.5	342.0	95.8
	18 - 20	10.0	4.5	205.2	57.5
Arena sílica	16 - 18	6.7	1.0	45.6	65.6
	18 - 20	25.0	3.8	171.0	246.3
	20 - 25	25.0	3.8	171.0	246.3
	25 - 30	16.7	2.5	114.0	164.2
	30 - 35	16.7	2.5	114.0	164.2
Grava	35 - 40	10.0	1.5	68.4	98.5
	1/16 - 1/8	25.0	4.0	182.4	262.7
	1/8 - 3/8	25.0	4.0	182.4	262.7
	3/8 - 1/2	25.0	4.0	182.4	262.7
	1/2 - 3/4	25.0	4.0	182.4	262.7
Total			80.0	3648.3	2873.0

6.1.2 Estructura del filtro dual

Definidos los materiales que conforman el lecho filtrante del dispositivo, el siguiente paso es la elección de los materiales que confinen a éstos, proporcionado además un diseño que pueda adaptarse a posteriores modificaciones y de fácil mantenimiento, procurando siempre optimizar el uso de los recursos económicos.

Al inicio de la etapa preliminar del diseño se concluyó en usar un filtro con diámetro de 3 pulgadas. Las opciones de tubería en el mercado más concurridas suelen ser PVC -tanto hidráulico como sanitario-, CPVC, cobre, Tuboplus®, etc.; también fue considerado el acrílico. Dicho lo anterior, y tras cotizar y analizar las distintas alternativas, se optó por el PVC como el material a emplear pues éste es el de menor costo en cuanto a la tubería de 3" de diámetro, método de unión entre elementos y las posibles piezas que puedan ser necesarias, tales como coples, adaptadores espiga, conectores, tuercas, por mencionar algunas.

Además del área transversal, la estructura debe satisfacer los requerimientos referidos a la longitud del lecho filtrante, por lo que ésta deberá ser mínimo de 80 cm en la parte que fungirá como la pared confinante del carbón, la arena y la grava. Aunado a esto, se busca un diseño que propicie el fácil mantenimiento, razón por la cual se usarán piezas roscadas para determinadas uniones. El material seleccionado para la fabricación del dispositivo es el siguiente:

- Tubo de PVC sanitario de 75 mm
- Tubo de PVC hidráulico cédula 40 de 75 mm
- Tuerca unión de PVC hidráulico de 75 mm
- Coples de 75 mm de PVC sanitario
- Coples de 75 mm de PVC hidráulico
- Conectores de PVC hidráulico de 75 mm con rosca interior
- Adaptadores para PVC sanitario gal espiga de 75 mm
- Reducciones 3" a 1 ¼" de PVC hidráulico
- Reducciones de 1 ¼" a 1" de PVC hidráulico

Otro de los aspectos de gran importancia en la estructura es el falso fondo. Éste cumple con la función de dar soporte a todo el material que se encuentra al interior del tubo de PVC al tiempo que permite el paso del agua filtrada y de retrolavado. Dados estos requerimientos, es necesario pueda sujetarse al tubo de PVC, contar con un material que sea resistente para soportar los casi 3 kg de lecho filtrante y las posibles presiones en la operación y no obstruya el paso del agua.



Figura 6.3 Parte de los materiales y herramientas usadas para la elaboración de la estructura confinante del filtro dual. Fuente: Directa (2019)

Tras cotejar diversas opciones como la elaboración de piezas hechas de madera, acrílico u otros polímeros, se optó por usar malla mosquitera de fibra de vidrio. Esta malla representa diversas ventajas en comparación con las demás opciones consideradas, entre ellas, que este material no interactúa químicamente con el agua, su gran oferta comercial, el bajo costo, practicidad en la unión con la estructura de PVC del filtro y resistencia considerable para los fines que se persiguen. No obstante, se colocará una capa doble buscando brindar mayor

durabilidad al diseño, mismas que se colocan en el extremo del tubo de PVC hidráulico que va pegado al conector con rosca interior.

La herramienta requerida para el ensamblaje de los distintos elementos consistió sólo en un arco con segueta, flexómetro, tijeras, lija, limpiador de PVC, cementante para PVC y cinta teflón. Parte del material y herramientas empleadas se muestran en la figura 6.3.

La figura 6.4 presenta un primer esquema de la configuración hidráulica del filtro dual. Se puede ver que presenta distintos adaptadores espiga, los cuales serán de gran utilidad al momento de realizar labores de mantenimiento trabajando en conjunto con los conectores con rosca interior o "hembra". Otro elemento a destacar es la tuerca unión con la que se cuenta, pues dicha pieza dotará de libertad de movimiento a las demás al momento de desarticular el filtro dual, permitiendo así el correcto desensamble desde abajo hacia arriba. Se considera que el filtro dual culmina con la reducción de 3" a 1", diámetro pretendido para el resto de la instalación hidráulica.

Además, puede verse en la figura 6.4 que el filtro dual puede discretizarse en cuatro partes cementadas que se roscan entre sí en el orden de 1 – 2 – 3 – 4, conformando así el dispositivo en su totalidad. La malla mosquitera que sirve como falso fondo está colocada en la parte 3 entre los elementos D y E, es decir el conector hembra y el tubo de PVC hidráulico; para la fijación de ésta no es requerido un componente adicional.

Adicionalmente, se muestran las cuatro partes del dispositivo listas para su ensamblaje y la correspondiente inserción de los diversos lechos filtrantes en la figura 6.5.

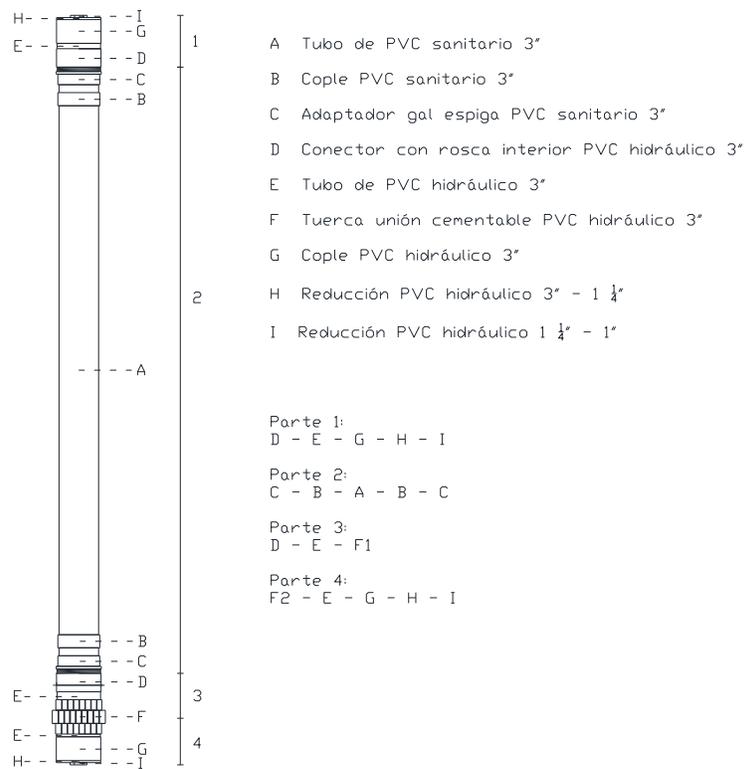


Figura 6.4 Esquema de la estructura del filtro dual



Figura 6.5 Filtro dual desensamblado en sus cuatro partes. Fuente: Directa (2019)

6.2 Adaptación del dosificador FibroPool® FC 200 al tren de tratamiento

En contraposición con lo realizado para obtener un modelo físico de filtro dual, el dispositivo encargado de suministrar el agente desinfectante, en este caso tricloro estabilizado, no fue desarrollado desde cero, sino que se adaptará un dosificador empleado en el mantenimiento de piscinas, tal y como se hizo mención en el capítulo 5. El dispositivo en cuestión es el FibroPool® FC 200

La figura 6.6 muestra el esquema del dosificador, mismo que es proporcionado por el proveedor. Como se puede ver, la altura total del elemento es de 357.5 mm y su ancho de 205 mm, lo cual le permite almacenar hasta 4 kg de pastillas de tricloro de lenta disolución; éste cuenta con cuatro elementos desmontables o móviles: una tapa superior (1), empaque de plástico para el cierre hermético de la tapa (2), una válvula de drenado (3) y la válvula reguladora (4), la cual regula, valga la redundancia, la dosis de cloro suministrada. Aunado a esto, el FC 200 cuenta también con una entrada y una salida, ambas son de tipo hembra y diámetro de 1 ½”.

El FC 200 está diseñado para trabajar en línea, es decir, conectado directamente a la línea de conducción del tren de tratamiento. Es por esta razón que, para poder trabajar con él, al igual que como se hizo con el filtro dual, la adaptación consiste en añadir reducciones tras la conexión de 1 ½”, para así homogeneizar el diámetro de toda la conducción a 1”.

Resulta importante mencionar que se deben colocar dos válvulas check para evitar el paso del recurso clorado, ya sea de vuelta al tramo antecedente al dosificador o al dosificador en sí.

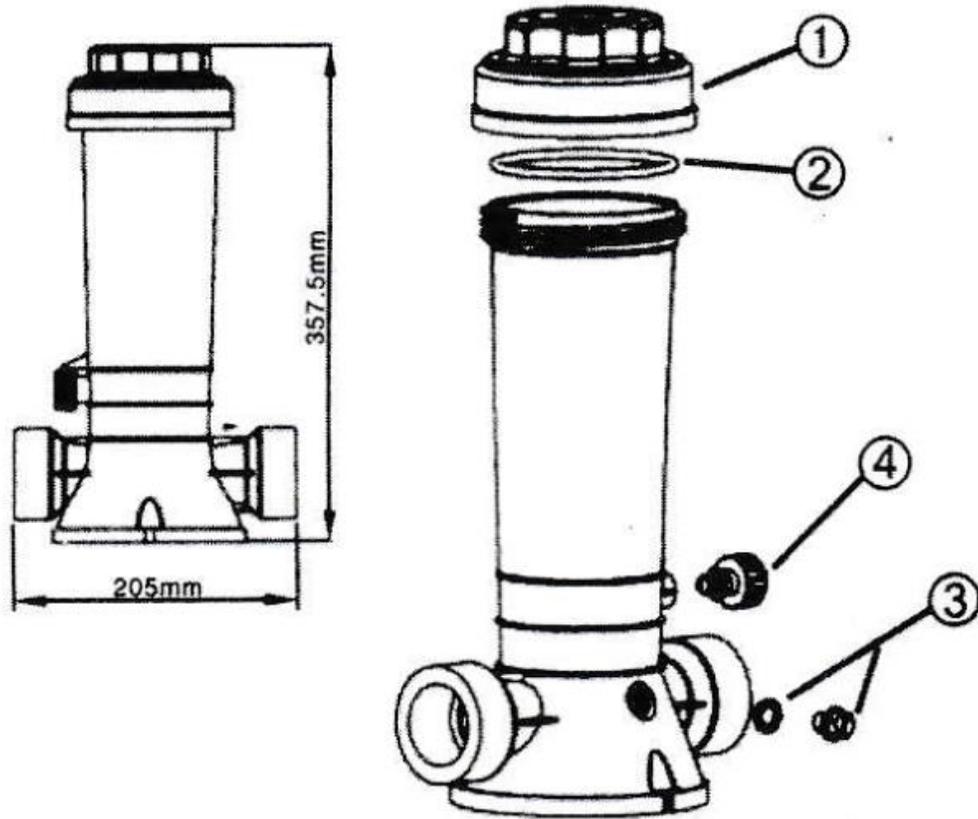


Figura 6.6 Esquema del dosificador FibroPool® FC 200. Fuente: FibroPool® (2019)

CAPÍTULO 7

PRUEBAS DE TRATABILIDAD EN EL

LABORATORIO

Una vez llenada la estructura confinante con los distintos materiales que conforman el lecho filtrante y hechas las adecuaciones necesarias para operar con el dosificador FC 200, es posible comenzar las pruebas de filtración y desinfección, respectivamente. Estas pruebas buscan asemejarse lo más posible a las condiciones que se enfrentará el filtro en su instalación final en casa habitación, por lo que es necesario realizar ciertas aseveraciones como lo pueden ser alturas de separación entre los elementos del tren de tratamiento con los que se pretende que interactúen ambos dispositivos u otras pérdidas de energía, por mencionar algunas.

Como se ha establecido a lo largo del presente texto y en la tesis que plantea el tren de tratamiento a seguir (Chinchilla, 2020), el filtro de arena y carbón activado tiene como principal objetivo el mejoramiento de las características físicas y organolépticas del agua pluvial, es decir olor, sabor, color y turbiedad. De dichos parámetros, los últimos dos -turbiedad y color- pueden ser fácilmente cuantificados en el laboratorio con el instrumental y equipo adecuado, mientras que los dos restantes son de carácter subjetivo; no obstante, se busca que todas y cada una de estas características entren dentro del rango establecido por la NOM-127-SSA1-1994.

A su vez, la dosificación de tricloro estabilizado al 89% tiene como objetivo la desinfección del recurso tratado, lo cual puede garantizarse siempre y cuando se cuente con un residual de cloro en el agua. Es por esto se realizará la medición de cloro residual libre en el agua tratada, buscando cumplir con el rango especificado en la normativa.

A lo largo de este apartado se hará mención de los distintos pasos seguidos en el laboratorio para poder llevar a cabo las pruebas de tratabilidad correspondientes, las cuales también serán descritas puntualmente, y, como principal objetivo, se asentarán los resultados obtenidos en éstas.

7.1 Condiciones supuestas para la operación en casa habitación

Dada la importancia de configuración hidráulica final que tendrá el tren de tratamiento y los pocos datos de la distribución del espacio disponible para la instalación de éste en la vivienda promedio de la CDMX, se busca que el SCALL sea, hasta cierto punto, flexible, por lo cual se considerarán valores relativamente conservadores en cuanto al desnivel de los distintos componentes como tanques de almacenamiento o dispositivos que se asemejen, pues se considera a la superficie de captación en la azotea de la vivienda, desde donde el recurso pluvial bajará hasta el *DISPLU*, ubicado en la planta baja, seguirá con la desinfección en línea y el tanque que funge como regulador, hasta llegar al filtro -todo esto en la planta baja-, punto desde donde se enviará el recurso tratado a un segundo tanque. Dicho anterior, se establece que el tren de tratamiento será instalado en una vivienda que cuenta con dos entrepisos de aproximadamente 2.4 metros cada uno -sin considerar la losa-, por lo que será necesario bombear el agua tratada hasta el almacenamiento final y, desde este punto, la distribución hacia los distintos usos será a gravedad.

Adicionalmente, se considerará un 15% de la carga estática a vencer como las pérdidas en la conducción. Esto tratando de limitar lo menos posible al sistema.

7.1.1 Análisis de la potencia de la bomba

Se parte de la base diseñada hasta el momento, es decir el filtro de 3" o 75 mm, el cual, si bien fue diseñado originalmente para operar a una tasa de 2.79 l/s-m², puede operar en un rango de hasta 13.9 l/s-m² debido a que, desde ahora, se trata de un filtro dual a presión (Droste, 1997), siendo éste el valor a considerar dado que es el caso crítico, en donde se opera para tratar 1100 litros de la manera más rápida y generando las mayores pérdidas de energía en la filtración.

Una vez teniendo este valor y sabiendo que el área correspondiente al filtro es de 4.56 x 10⁻³ m², se calcula la pérdida de energía en el filtro con el mismo procedimiento seguido en el apartado 5.2.1, obteniendo un valor de 1.41 metros para la velocidad correspondiente a la nueva tasa de filtración. A su vez, también se determina el nuevo gasto con el que se trabajará; éste será de 3.8 litros por minuto, hecho que reduce el tiempo para tratar el volumen de 1100 litros, puesto que ahora se realizará dicha acción en sólo 4.82 horas.

Ahora, es posible calcular la potencia requerida para el bombeo, procedimiento que se describe a continuación.

Sabiendo que la potencia requerida se define como

$$P = \frac{\rho g Q H_B}{n}$$

donde

$P \rightarrow$ Potencia [W]

$\rho \rightarrow$ Densidad del agua $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$g \rightarrow$ Aceleración de la gravedad del sitio $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$Q \rightarrow$ Gasto $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$H_B \rightarrow$ Carga de bombeo [m]

$n \rightarrow$ Eficiencia de la bomba [1]

el sistema pretende bombear el agua desde el primer tanque de almacenamiento hasta un segundo tanque, pasando por la galería de filtros, es por ello que la carga de bombeo se define como la carga estática H_E más las pérdidas por los filtros h_F más las pérdidas a lo largo de la conducción h_L

$$H_B = H_E + h_F + h_L$$

para la carga estática se considerará una casa tipo de dos niveles, cada entrepiso con una altura de 2.4 m y losa de 0.15 m de espesor, además de la altura del tinaco que funge como almacenamiento de 1 m, es decir

$$H_E = 2 * (2.4 [m] + 0.15 [m]) + 1 [m] = 6.10 [m]$$

por su parte, para las pérdidas se considerarán dos coeficientes, uno de colmatación para la galería de filtros y otro de relación con la carga estática para las pérdidas en la conducción, éstos serán 1.5 y 0.15 respectivamente. Se toma en cuenta que la pérdida calculada en la filtración corresponde a un lecho limpio, es por ello que se aumenta en un 50% a pesar de contar con retrolavados. La carga de bombeo queda de la siguiente manera

$$H_B = 6.10 [m] + 1.5 * (1.41 [m]) + 0.15 * (6.10 [m])$$

$$H_B = 9.13 [m]$$

suponiendo una eficiencia del 60% en la bomba, es posible calcular la potencia

$$P = \frac{\left(1000 \left[\frac{kg}{m^3}\right]\right) * \left(9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]\right) * \left(3.8 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s}\right]\right) * (9.13 [m])}{0.60}$$

$$P = 9.46 [W]$$



Figura 7.1 Motobomba periférica Munich® BA-1208HD.
Fuente: The Home Depot (2019)

De esta manera puede verse que la bomba de ½ HP resultaría suficiente y aunque el caudal será mayor al requerido para la tasa de filtración, éste puede regularse mediante un sistema de *bypass* que brinde sólo el gasto requerido al filtro, además de poder vencer la carga estática planteada fácilmente.

En este caso, se optó por una motobomba periférica modelo BA-1208HD de la marca Munich®, el cual se muestra en la figura 7.1. Este modelo brinda una potencia de 373 watts, además de poder alcanzar una altura máxima de 23 metros y conducir un caudal de 30 l/min, todo esto operando con un 60% de eficiencia (The Home Depot, 2019).

7.2 Pruebas a desarrollar

A continuación, se describen los materiales y procedimientos empleados para llevar a cabo cada una de las pruebas que se realizarán tras someter las diferentes muestras a filtración y desinfección. Dichos procedimientos son los seguidos en las prácticas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la FI UNAM en la asignatura de Tratamiento de Agua para Consumo Humano impartida en la licenciatura en Ingeniería Civil. Éstos se encuentran especificados en el manual correspondiente (Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería UNAM, 2017).

7.2.1 Turbiedad



Figura 7.2 Turbidímetro Hach® 2100N. Fuente: Directa (2019)

La turbiedad puede definirse como el resultado de la dispersión y absorción de la luz ocasionadas por los sólidos suspendidos en el agua, por lo cual ésta -la turbiedad- siempre será un parámetro estético (Droste, 1997).

La medición de la turbiedad en el laboratorio resulta muy simple pues se hace uso del turbidímetro o nefelómetro, equipo que mide la dispersión de la luz a través de una celda que contiene el recurso a analizar; éste se muestra en la figura 7.2. No obstante la simplicidad de la medición, se presenta tanto el material como el procedimiento empleados.

Material:

- Al menos 100 ml de la muestra de agua
- Turbidímetro Hach® 2100N
- Celda para turbidímetro
- Tela para celda
- Agua destilada
- Cronómetro

Procedimiento:

1. Conectar y encender el turbidímetro calibrado. Esperar al menos 5 minutos tras el encendido.
2. Tomar una celda para turbidímetro, enjuagarla con agua destilada y posteriormente llenarla con la muestra de agua.
3. Limpiar perfectamente la celda con la tela especial, introducirla al nefelómetro y cerrar la tapa.
4. Esperar 20 segundos y tomar la lectura del valor indicado en la pantalla del turbidímetro. Éste se encuentra expresado en UTN.

7.2.2 Color

El color en el agua es impartido por constituyentes disueltos que absorben luz blanca y emiten luz en específicas longitudes de onda. El color puede verse también influenciado por la turbiedad (Droste, 1997).

Para llevar a cabo la prueba de color es necesario hacer uso de un colorímetro (figura 7.3). Este instrumento permite igualar el color observado en dos muestras de agua con la ayuda de discos graduados, en este caso en unidades de color en la escala platino-cobalto. A continuación, se describe la prueba.

Material:

- Colorímetro
- Discos graduados en la escala platino-cobalto
- Celdas para colorímetro
- Agua destilada
- Al menos 100 ml de la muestra a analizar

Procedimiento:

1. Abrir el compartimento destinado a las celdas.
2. Llenar una de las celdas con agua destilada y la otra con la muestra a analizar.
3. Introducir las celdas en el espacio destinado y cerrarlo.
4. Quitar la tapa superior del colorímetro
5. Colocar un disco. Este se elige, en primera instancia, en función del color que se cree tiene la muestra.
6. Poner la tapa nuevamente y encender el colorímetro.
7. Observar a través de la mirilla e igualar el color del agua destilada con el del blanco en cuestión. De ser necesario, cambiar el disco graduado y repetir los pasos 6 y 7, de lo contrario, tomar la lectura.



Figura 7.3 Colorímetro empleado. Fuente: Directa (2019)

7.2.3 Potencial hidrógeno



Figura 7.4 Multiparamétrico empleado. Fuente: Directa (2019)

El pH es una escala que permite expresar la concentración de iones hidrógeno (H^+) de una sustancia. Con ella es fácil indicar si una solución es básica, neutra o ácida; una solución básica es aquella en donde la concentración de iones hidróxido (OH^-) es mayor que la de iones hidrógeno, por el contrario, una solución ácida presenta una concentración de iones hidrógeno mayor. Dicha escala va de 0 (valor más ácido) hasta 14 (valor más básico), teniendo al 7 como valor neutro (Masters & Ela, 2008).

La medición del pH en el laboratorio se realiza con un multiparamétrico como el mostrado en la figura 7.4, equipo que recibe su nombre debido a que es capaz de realizar otras

mediciones además del pH, tales como temperatura, conductividad, etc.

Material:

- Multiparamétrico
- Agua destilada
- Muestra de agua suficiente para sumergir el sensor de pH

Procedimiento:

1. Enjuagar el sensor de pH con agua destilada.
2. Sumergir el sensor en el agua que se desea analizar.
3. Esperar a que se estabilice el valor indicado en la pantalla.
4. Tomar lectura.

7.2.4 Cloro residual libre

Para determinar el *cloro residual libre*¹⁷ se emplean diversos reactivos que fungen como indicadores visuales, esto es, haciendo uso de sustancias que propicien en medio óptimo para la prueba –ácidos-, se añaden indicadores que viran el color del agua, mismo que, mediante titulación con otro elemento, debe virar al color original.

En este caso en particular, la prueba se realiza con una ligera modificación en comparación con lo indicado en el manual citado (Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería UNAM, 2017). En dicho texto se añade de manera controlada la solución cloradora, sin embargo, en este caso dicha acción resulta difícil de llevar a cabo puesto que la inyección de la solución se realiza mediante el dosificador; es por esto que para llevar a cabo la prueba se varía la posición de la válvula dosificadora, lo cual resultará en distintos valores de cloro inicial en el agua.

Material:

- Matraz Erlenmeyer
- Vaso de precipitados
- Bureta con soporte universal
- Pipeta graduada con propipeta
- Probeta
- Cronómetro
- Espátula
- Balanza
- Al menos 100 ml de la muestra clorada

Reactivos

- Ácido acético
- Yoduro de potasio
- Disolución de almidón
- Tiosulfato de sodio 0.01 [N]

¹⁷ Concepto desarrollado en el capítulo 5, apartado 5.3.2.

Procedimiento:

1. Añadir el tricloro estabilizado mediante el dosificador FC 200 y esperar 20 minutos.
2. Tomar 100 ml del agua tratada y colocarlos en un matraz Erlenmeyer. Es muy importante tomar en cuenta el color de la muestra en este punto, pues éste será el blanco a igualar en el punto 6.
3. Añadir 2 ml de ácido acético y 1 g de yoduro de potasio al agua tratada. Mezclar por 30 segundos.
4. Añadir entre 3 y 5 gotas de almidón y nuevamente mezclar por unos segundos. Se observará que el color cambia ligeramente (en este caso con tono azulado).
5. Titular, con ayuda de la bureta previamente llenada y colocada en el soporte universal, con tiosulfato de sodio al 0.01 [N]. Agitar ligeramente durante este proceso.
6. Terminar la titulación en el momento en el que la muestra retome el color que tenía inicialmente. Tomar lectura del volumen de tiosulfato de sodio empleado.

Concluido el procedimiento, la cantidad de cloro residual libre en 100 ml de muestra se determina mediante la siguiente expresión:

$$Cl_f = \frac{35450NV}{100}$$

donde

$Cl_f \rightarrow$ Cloro residual libre $\left[\frac{mg}{l}\right]$

35450 \rightarrow Factor de conversión de unidades a $\left[\frac{mg}{l}\right]$

$N \rightarrow$ Concentración normal del tiosulfato de sodio, en este caso 0.01 [N]

$V \rightarrow$ Volumen de tiosulfato de sodio empleado en la titulación [ml]

7.3 Muestras a emplear

Una vez definidas las pruebas a desarrollar, es necesario establecer las características del agua que se someterá a tratamiento. En este apartado se presentan los dos tipos de muestras a emplear, mismas que son la muestra sintética y las muestras de agua pluvial. La primera es de carácter artificial, es decir, fue creada en el laboratorio con la finalidad de servir para, principalmente, calibración del sistema; por su parte, las muestras de agua de lluvia fueron captadas *in situ* y resultan de primordial importancia pues son la representación física del agua que se pretende tratar.

A continuación, se muestra el método de obtención y características de los dos tipos de recurso disponible.

7.3.1 Muestra sintética

Para la elaboración de una muestra con color y turbiedad destinada para la primera corrida del filtro dual y el sistema de bombeo se emplearon los siguientes materiales:

- Hierbabuena
- Caolín
- Vasos de precipitados
- Agitador magnético
- Parrilla
- Agua de la llave
- Cuchara de plástico
- Báscula

Tras hervir la hierbabuena, se obtuvo el concentrado similar al té que se muestra en la figura 7.5, elemento que brindará color a la muestra; a su vez, el caolín es un material que es capaz de añadir turbiedad al agua de manera artificial aun añadiendo pocas cantidades de éste.



Figura 7.5 Materiales empleados para la elaboración de la muestra sintética. Fuente: Directa (2019)

Tomando como base el manual de prácticas del laboratorio citado con anterioridad (Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería UNAM, 2017), se realizaron distintas dosificaciones de ambos componentes hasta que se llegó a una turbiedad y color considerados óptimos para la prueba. La dosificación final consistió en añadir 600 ml del concentrado de manzanilla y 0.56 g de caolín a 18 litros de agua de la llave. Las características de interés de la muestra se enlistan en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Características de interés de la muestra sintética

Característica	Valor
Turbiedad [UTN]	28
Color [UC-PC]	Mayor a 50
pH [1]	7.52

7.3.2 Muestras de agua pluvial

Las muestras de agua pluvial resultan de vital importancia para el desarrollo del tren de tratamiento a diseñar. Para lograr captar un volumen considerable de agua es necesario contar con la superficie de captación suficiente y las facilidades para su almacenamiento, todo esto tomando en cuenta que la temporada de lluvias en la CDMX suele ocurrir entre mayo y octubre, hecho que podría representar una dificultad más para llevar a cabo la captación.

Afortunadamente, en esta ocasión se contó con el apoyo del estudiante de Ingeniería Civil David Salazar Vázquez, quien se espera que en el primer semestre de 2020 presente la tesis “Influencia de las superficies más comunes en la Zona Metropolitana del Valle de México en la calidad de agua pluvial para fines de aprovechamiento”¹⁸, por lo cual fue posible, además de captar un volumen que permita la puesta a prueba del sistema, discretizar el agua de lluvia cosechada según el material de la superficie de captación.

¹⁸ Fecha de presentación y título de la tesis sujetos a cambios.

Se instalaron diferentes superficies de captación en la azotea del edificio U del complejo sur de la Facultad de Ingeniería de la UNAM; cada una de estas superficies es de 1 metro cuadrado y cuenta con una pendiente para dirigir la escorrentía a través una canaleta de PVC. Los materiales considerados, y con los que se trabajara en la presente tesis, son: lámina galvanizada, concreto, lámina de acrílico, lámina de cartón y concreto impermeabilizado. La figura 7.6 muestra la instalación de las superficies de captación de agua pluvial.



Figura 7.6 Superficies de captación de agua de lluvia instaladas en el edificio U de la FI UNAM. Fuente: Directa (2019)

La captación de agua de lluvia se realizó del 23 de septiembre al 31 de octubre del año 2019, pudiendo así recolectar alrededor de 12 litros de cada una de las cinco superficies de captación. Éstas se almacenaron en el cuarto frío del laboratorio hasta el momento de su uso en las pruebas de tratabilidad, ya sea filtración o desinfección, por lo cual se emplearon garrafones de uso comercial.

Previo a su uso, las cinco distintas muestras recolectadas fueron sometidas a las pruebas de turbiedad, color y pH. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.2.

Tabla 7.2 Características de interés de las muestras de agua de lluvia

Material de la superficie de captación	Turbiedad [UTN]	Color [UC-PC]	pH [1]
Lámina galvanizada	11.9	12	7.93
Concreto	12.1	12	8.41
Lámina de acrílico	10.7	15	8.29
Lámina de cartón	20.3	Mayor a 50	7.72
Concreto impermeabilizado	10.8	12	7.46

Es de recalcar el hecho de que, como se especifica en las características del afluente del tren de tratamiento en el capítulo 5, el discriminador de primeras lluvias DISPLU tiene la capacidad de dar entrada a agua con parámetros más favorables -10 UTN- en comparación con las muestras, sin embargo, las pruebas de tratabilidad se realizaron con dichas muestras.

7.4 Filtración

Como se hizo mención a lo largo de todo el apartado correspondiente a esta operación unitaria, el filtro dual tiene como fin principal el mejorar las características físicas y organolépticas del agua de lluvia. Sin embargo, dada la subjetividad del olor y sabor del agua, los únicos parámetros a medir dentro del laboratorio serán turbiedad, color y pH. En esta sección se muestra el procedimiento seguido para llevar a cabo la filtración en el laboratorio.

7.4.1. Instalación del dispositivo en el laboratorio

Con el fin de testar el desempeño del filtro dual, éste fue instalado en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la FI UNAM de manera provisional, pero buscando asemejarse lo más posible a una instalación que se realizaría en casa habitación, es decir añadiendo las válvulas y conexiones con las que se pretende cuente el sistema en su etapa de operación.

Es necesario añadir que el dispositivo requiere de una base o soporte propio, el cual no debe interferir con el desarmado del filtro en ningún momento, pues, de lo contrario, el mantenimiento -del filtro dual- puede verse comprometido y la utilidad de las piezas roscadas con las que cuenta la estructura se perdería. Es por ello que un soporte dotado con abrazaderas atornillables tuvo que ser ideado; en este caso particular, se optó por hacerlo de madera, por lo que la elaboración fue designada a un maestro carpintero. Los planos de la pieza se muestran en el apéndice 1, aunque el usuario tiene la libertad de emplear otra estructura como base, sólo tomando en cuenta las consideraciones mencionadas.

Tomando en cuenta todos los aspectos a los que se hace referencia hasta este punto, la instalación para llevar a cabo las pruebas de tratabilidad consistió en montar el equipo de bombeo necesario y conectarlo al filtro mediante tubería de PVC hidráulico cédula 40 de 1" de diámetro, con sus respectivos accesorios, añadiendo un sistema de *bypass*, mismo que se refiere a hacer circular parte del caudal, redireccionándolo de vuelta al tanque de regulación, para poder trabajar a una tasa de filtración máxima de 3.8 litros por minutos y no causar sobrepresiones indeseables en el sistema; dicha acción se logra con dos válvulas de esfera, las cuales se colocan tras la descarga de la motobomba y regulan el gasto que pasa, ya sea, al retorno o al sistema de filtración. El tanque de que abastece al sistema se representa con una cubeta con capacidad de 19 litros. La instalación se muestra en la figura 7.7.

7.4.2 Acciones previas a la operación del filtro

Antes de comenzar a operar el sistema de forma normal, se requiere llevar a cabo dos acciones primordiales: la limpieza de los agregados y la regulación de la tasa de filtración con la que se trabaja.

Tras el cebado de la bomba, es posible hacer circular agua a través de la conducción y el filtro dual, sin embargo, puede observarse que el primer efluente proveniente del filtro tendrá una coloración oscura; esto es debido al carbón activado. Dichos residuos pueden ser removidos con facilidad, puesto que sólo es necesario hacer circular agua proveniente de la red municipal o agua destilada por cierto



Figura 7.7 Instalación del sistema de filtración en el laboratorio. Fuente: Directa (2019)

tiempo. En este caso, se puso en marcha el sistema haciendo uso de agua proveniente de la red de abastecimiento del laboratorio y se operó durante aproximadamente 6 horas antes de la primera corrida en forma.

Sin embargo, antes de dicho “lavado inicial” es menester regular el caudal que es filtrado por el dispositivo, de lo contrario, es muy probable que la tasa de filtración sea mayor a 3.8 l/min, hecho que ocasionaría pérdidas de agregado y, consecuentemente, una contaminación del recurso filtrado. El caudal se regula mediante el juego de válvulas que se encuentra entre la bomba y el bypass, para lo cual se hizo uso de una probeta de 1 litro y un cronómetro. La tasa de filtración fue fijada en 2.4 l/min.

7.4.3 Filtración con muestra sintética

La primera operación consistió en tratar una muestra sintética, esto es, filtrar agua a la cual se la añadió coloración y turbiedad de manera artificial.

Si bien la muestra sintética con la que se trabajó presenta turbiedad y color, éstos provienen de agentes que difieren mucho de los que generan turbiedad y color en el agua de lluvia, por lo cual este primer ensayo tiene que tomarse con reservas. A lo largo del apartado se muestra la conformación de la mencionada muestra sintética y los resultados obtenidos tras la filtración.

La filtración se realizó de tal manera que el efluente fuera de 2.4 l/min y, tratando de evitar sesgos debidos al agua contenida previamente en el filtro y la conducción, se desechó el volumen de agua tratado durante los primeros 20 segundos de operación, considerando así el recurso tratado tras este lapso.

Después de realizar las mediciones correspondientes se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 7.3.

Tabla 7.3 Resultados tras la filtración de la muestra sintética

Característica	Valor
Turbiedad [UTN]	20
Color [UC-PC]	15
pH [1]	6.93

Como puede apreciarse al comparar con la tabla 7.3, la filtración surte efecto aún en la muestra sintética. Si bien la turbiedad fue disminuida, ésta sigue estando lejos de cumplir con el valor establecido por la normativa, sin embargo, esto era de esperarse puesto que la naturaleza de la turbiedad añadida difiere significativamente de la turbiedad esperada en el agua de lluvia, pues esta última es debida a partículas de otra índole y con otro tamaño, en general. Por su parte, el comportamiento del filtro en cuanto a la remoción de color es de destacar, puesto que muestra una alta efectividad, llegando inclusive más allá del valor que establece la NOM-127-SSA1-1994, por lo que se pueden esperar buenos resultados al trabajar con agua pluvial. Finalmente, el pH no presentó grandes cambios, manteniéndose cerca de la neutralidad.

7.4.4 Filtración con agua de lluvia

Al igual que con la muestra sintética, el procedimiento consistió en filtrar a una tasa de 2.4 l/min, dejando pasar 20 segundos antes de comenzar a tomar la muestra a la salida del filtro. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.4, misma que ha de compararse con la tabla 7.2

para así poder observar la eficiencia de la filtración en el mejoramiento de las características físicas y organolépticas.

Tabla 7.4 Resultados de la filtración de las muestras de agua de lluvia

Material de la superficie de captación	Turbiedad [UTN]	Color [UC-PC]	pH [1]
Lámina galvanizada	3.5	3	7.21
Concreto	3.6	2	7.27
Lámina de acrílico	3.5	4	7.41
Lámina de cartón	5.8	12	7.35
Concreto impermeabilizado	4.2	3	7.41

Al comparar las características del recurso tratado con las que éste presentaba antes de llevar a cabo la filtración, puede verse que los resultados obtenidos son sumamente favorables, por lo que, tal como se esperaba, puede afirmarse que el desempeño del filtro dual es mucho mejor al someter agua de lluvia que al someter la muestra sintética.

En cuanto a turbiedad, se tiene que cuatro de las cinco muestras cumplen con lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994, quedando sólo 0.8 UTN por encima del límite el recurso captado a través de una superficie de lámina de cartón, el cual era el caso más desfavorable.

Por su parte, el color y pH de las cinco muestras se encuentran dentro del rango establecido por la normativa, obteniendo así resultados perfectos en estos rubros al tratar el recurso pluvial únicamente con el filtro dual; habrá de confirmarse el desempeño de éste al trabajar en conjunto con la desinfección, donde se espera que la alcalinidad sufra cambios.

7.5 Desinfección

La desinfección del agua pluvial cosechada, como se ha mencionado en reiteradas ocasiones, se realizará con tabletas de tricloro estabilizado (cloro al 89%), mismas que serán dosificadas mediante el FC 200, dispositivo que a través de una válvula reguladora dosifica la solución cloradora que se mezcla con el agua que se trata a lo largo del tren.

El apartado 7.5 tiene como fin describir la instalación del dosificador de cloro en el laboratorio, además del procedimiento seguido para conseguir una solución cloradora capaz de desinfectar el recurso y, finalmente los resultados obtenidos en las pruebas de cloro residual libre realizadas tras llevar a cabo esta operación unitaria.

7.5.1 Instalación en el laboratorio

Como consecuencia del área del filtro y de la tasa de filtración establecida -3.8 l/min como máximo- el dosificador FC 200 trabajará en conjunto con la bomba de la que se dispone y el sistema de bypass establecido, pues, de lo contrario, un caudal de mayor envergadura comprometería el tratamiento subsecuente a la desinfección, es decir, la filtración.

Cabe mencionar que en el primer diagrama de funcionamiento lógico, presentado en el apartado 5.2, se contemplaba a la desinfección antes de la llegada al primer almacenamiento, lo cual se traduce en realizarla inmediatamente después del paso del agua por el DISPLU, sin embargo, dicho modo de operación resultaría poco práctico debido a la regulación de la solución cloradora, por lo cual es preferible trabajar con un gasto controlado. Dicho lo anterior, y tomando en cuenta

que el dispositivo cuenta las válvulas check necesarias y con reducciones para tubo de PVC hidráulico cédula 40 con diámetro de 1" instaladas tanto a la entrada como a la salida, sólo resta conectar el dosificador al sistema de bombeo.

En primera instancia, la instalación en el laboratorio consistió sólo en conectar la bomba y el sistema de válvulas al dosificador en línea, dejando la descarga de éste a superficie libre. No obstante, tras las primeras pruebas, fue perceptible que el dispositivo no era capaz de trabajar bajo estas condiciones ya que se necesitaba una descarga que se viera influenciada por la presión; es por esta razón que se instaló el filtro dual tras el dosificador. La instalación del sistema se muestra en la figura 7.8.



Figura 7.8. Dosificador FibroPool® FC 200 adaptado con válvulas, reducciones y tubo de PVC 1" (A). Sistema de bombeo, desinfección y filtración instalado en el laboratorio (B). Fuente: Directa (2019)

7.5.2 Acciones previas a la operación del dosificador

Se busca que el dosificador trabaje con un gasto constante, por lo que, al igual que en procedimientos anteriores, éste se regula de tal manera que no sea mayor a 3.8 litros por minuto. Esta acción se realiza con agua proveniente de la red de abastecimiento y es análoga a la realizada en la sección 7.4.2.

Una vez regulado el gasto, se apaga el sistema de bombeo y, tras esperar por 15 segundos a que el agua deje de circular por completo, se abre la tapa superior del FC 200. Después de verificar que hay agua en el contenedor del dosificador -lo cual indica que éste trabaja de manera adecuada-, se agregaron tres tabletas de 3" de tricloro estabilizado y se cerró de manera hermética la tapa.

El último paso previo a la operación consiste en ajustar la válvula reguladora en una posición que permita el paso de la solución cloradora. En esta ocasión, se ajustó en el máximo nivel, pues hay que considerar que el dispositivo está diseñado para clorar el agua en piscinas, lo que significa que el agua, en ese caso, se encuentra en un sistema de retorno.

7.5.3 Desinfección con agua destilada

Contrario a lo realizado con el filtro dual y buscando optimizar el recurso captado, las primeras pruebas de desinfección no fueron realizadas con muestra sintética, en contraparte se hizo uso de agua destilada.

El agua destilada fue seleccionada debido a la ausencia de elementos ajenos de cualquier índole, como lo pudiera ser cloro residual, por lo que todo el residual a encontrarse en las pruebas a realizar será proveniente del dosificador. Es muy importante tomar en cuenta que el objetivo de estas primeras corridas es encontrar una posición en la válvula reguladora que permita obtener un residual libre mayor a 1.5 ppm, puesto que la posible presencia de microorganismos en el agua de lluvia demandará una dosificación de cloro mayor a la añadida al agua destilada, la cual no contiene microorganismos. La posición inicial de la válvula reguladora fue el máximo

Se estima que el tiempo que transcurrió entre la adición de tabletas de tricloro y la primera corrida con agua destilada fue de 20 minutos. Tras llevar a cabo la desinfección por primera vez, se tomó una muestra representativa y se intentó determinar el cloro residual libre mediante el procedimiento correspondiente; no obstante, dicha prueba no fue efectiva pues el color nunca viró a otro tono, lo cual indica una cantidad mínima de cloro residual libre en el agua destilada. Esto orilló a brindar más tiempo de contacto entre las tabletas y el agua al interior del FC 200, buscando así una concentración mayor; tomando en cuenta que las tabletas son de baja disolución, se consideró un tiempo de dos horas y se puso en operación de nueva cuenta el tren de tratamiento.

Transcurridas las dos horas y habiendo puesto en operación el sistema, se obtuvo otra muestra de agua clorada. Para esta corrida se determinó un cloro residual libre de 2.84 mg/l, razón por la cual se considera que la posición de la válvula es la correcta y, considerando que la concentración pudiera cambiar al momento de realizar las pruebas definitivas, se da paso a la operación definitiva del tren de tratamiento, donde se someterá el agua de lluvia a ambos tratamientos instalados en serie.

CAPÍTULO 8

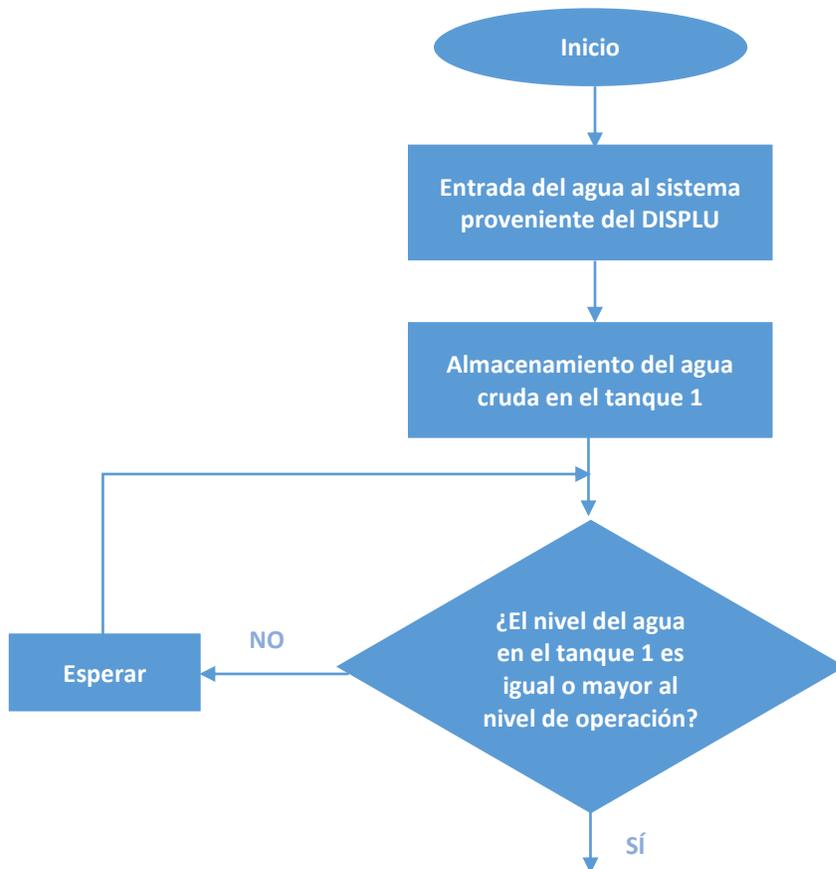
DISEÑO FINAL DEL TREN DE TRATAMIENTO

El objetivo principal del presente texto es la elaboración del proyecto ejecutivo de un tren de tratamiento que, tomando como fuente de abastecimiento el recurso pluvial, sea capaz de brindar agua con la calidad requerida para su uso indirecto en la vivienda promedio de la CDMX. Una vez definidos aspectos tales como la vivienda promedio en la zona de estudio, las características del agua para que su uso en determinadas actividades no suponga un riesgo al usuario, las operaciones y procesos unitarios requeridos para la potabilización del recurso captado, entre otros, y verificado la eficiencia de dicho tren, es posible establecer la configuración final del sistema que cumpla con el propósito planteado.

El presente capítulo tiene como fin esclarecer el estado final del tren de tratamiento desarrollado, mostrando además los resultados obtenidos tras la operación bajo dicha configuración.

8.1 Diagrama definitivo del funcionamiento del tren de tratamiento

En el capítulo 5 se presentó un primer diagrama de funcionamiento acompañado del diagrama de flujo del tren de tratamiento, éste último no cambia, no así el diagrama de funcionamiento lógico, el cual presenta variaciones debidas a la posición de la desinfección, la cual se lleva a cabo tras el primer almacenamiento en el tanque que funge como regulador, además de ligeras variaciones en el empleo del retrolavado para mantenimiento del filtro dual, acción que se realizará de manera manual. La figura 8.1 presenta el diagrama en cuestión.



**Continúa en la siguiente página*

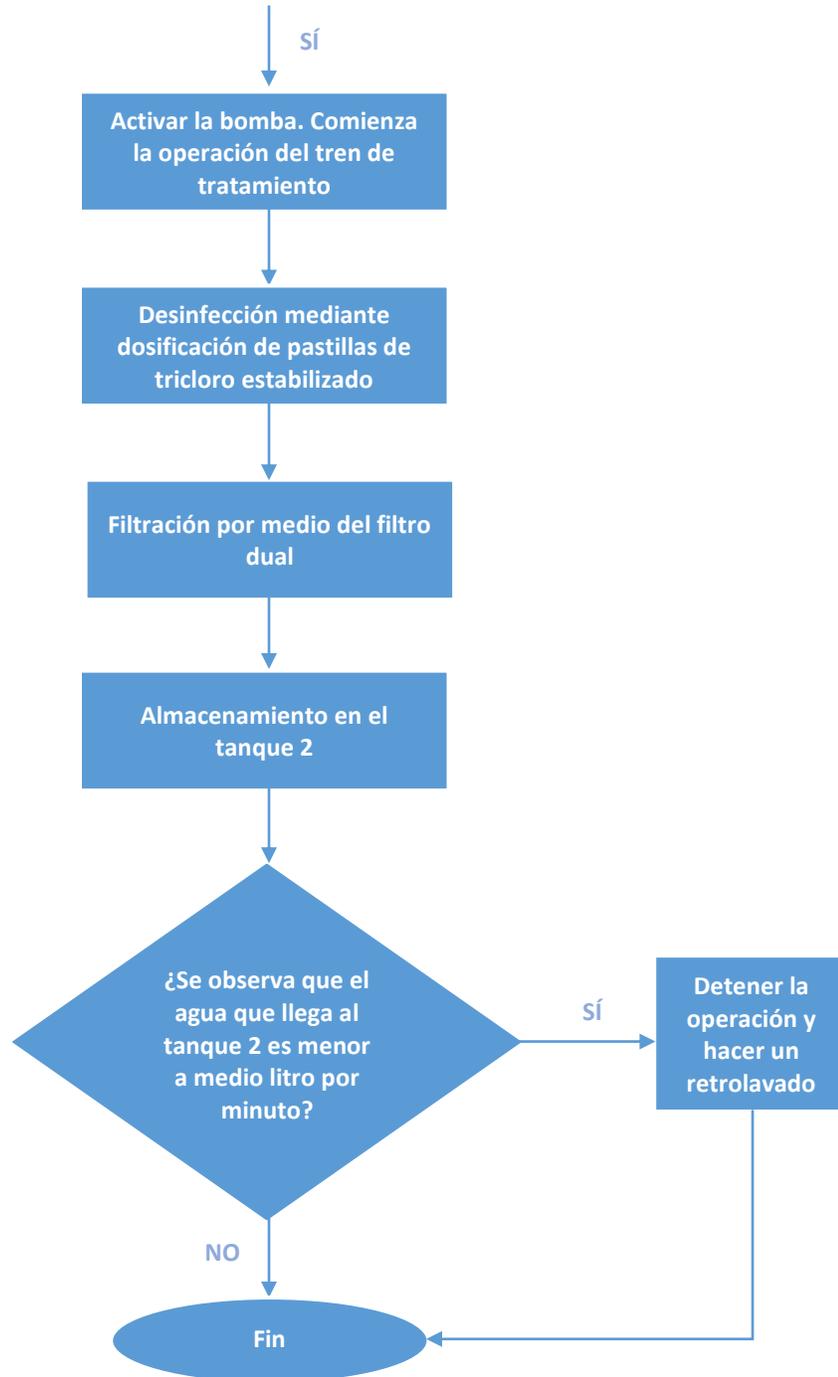


figura 8.1 Diagrama de funcionamiento del tren de tratamiento definitivo

Además de las adecuaciones enunciadas en el párrafo anterior, es necesario aclarar que la determinación de prescindir de la desinfección en el agua que llega al primer tanque es consecuencia de la necesidad de trabajar con un gasto que pueda ser regulado. Aunado a esto, se consideró que, dado el nivel de microorganismos esperados en el agua de lluvia y tomando en cuenta el poco tiempo de estancamiento del agua en este punto, la ausencia de la desinfección no representa un peligro para el recurso almacenado.

8.2 Operación del tren de tratamiento definitivo

Tras definir la configuración final del sistema, haber puesto a prueba por separado a todos los elementos que conforman el tren de tratamiento y evaluado el desempeño de éstos conforme a lo establecido a lo largo del presente trabajo, se dispone a someter al tren de tratamiento diseñado a una corrida final, empleando las muestras de agua de lluvia captadas¹⁹, en la cual trabajarán en conjunto tanto la desinfección como la filtración, es decir, como se pretende que suceda en la instalación final en la vivienda promedio establecida. Además, se realizará una prueba de retrolavado. A lo largo de este subcapítulo se muestran los procedimientos y resultados obtenidos de dichas acciones.

8.2.1 Prototipo final

En la parte final del capítulo anterior se mostró en la figura 7.8 B la instalación del dosificador FC 200 en conjunto con el filtro y el sistema de bombeo, pues, como se hizo mención, ésta era la única forma de llevar a cabo las pruebas de tratabilidad en el rubro de la desinfección.

Como se puede apreciar en el esquema mostrado en la figura 8.2, la configuración final del sistema es muy similar a la de la figura antes mencionada. El prototipo final del tren de tratamiento cuenta con un sistema de bypass adecuado al sistema de bombeo (bomba Múnich® BA-1208 HD), el cual se alimenta de un tanque de agua de lluvia sin ningún tratamiento; tras ser regulado el caudal, dicho recurso es enviado al dosificador de pastillas de tricloro estabilizado FibroPool® FC 200, punto en donde se tiene que ajustar la válvula de dosificación de la solución cloradora; tras este paso, el agua clorada llega al filtro dual, dispositivo que se encarga de la remoción de turbiedad, color, olor y sabor mediante el lecho de carbón activado trabajando en conjunto con la arena sílica. Finalmente, el agua tratada es enviada a su almacenamiento final.

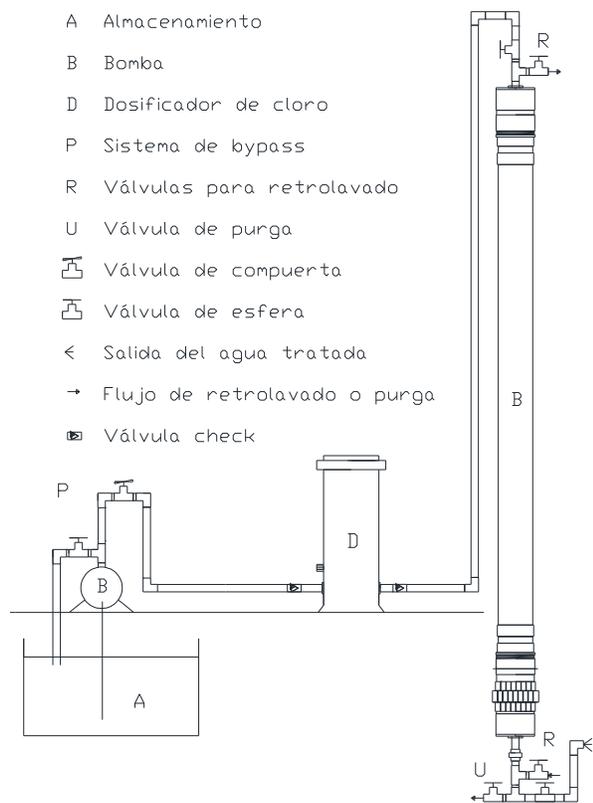


Figura 8.2 Esquema del prototipo final del sistema de tratamiento de agua pluvial

Adicionalmente a los elementos descritos, el sistema cuenta con diversos tipos de válvulas -de esfera, de compuerta y check- para regular el flujo de agua según se requiera. En el caso de las válvulas de paso, éstas son colocadas ya sea para trabajar con el sistema de bypass o bien, para que el filtro dual pueda realizar la operación de retrolavado y purga. También se dispone de una tuerca unión en la parte inferior del filtro para dotar de libertad de movimiento a las partes roscadas y la tuerca unión superior.

¹⁹ Véase el apartado 7.3.2.

8.2.2 Resultados obtenidos

Las últimas corridas del sistema consistieron en tratar las muestras de agua de lluvia especificadas en el apartado 7.3.2. Como se ha descrito en reiteradas ocasiones, el tren de tratamiento consiste en desinfectar el recurso mediante cloración para después mejorar las características físicas y organolépticas mediante filtración con un filtro dual conformado por carbón activado, arena sílica y un soporte de grava.

Mediante el sistema de bypass se reguló el flujo de agua a tratar para obtener un caudal de 2.4 litros por minuto, hecho que se realiza debido a que el caudal máximo de operación del filtro es de 3.8 l/min. Aunado a esto, se trabajó con tres tabletas de tricloro estabilizado -cloro al 89%-, las cuales se encontraban dentro del dosificador desde aproximadamente 24 horas antes de la operación del sistema; la válvula se fijó en la posición "Full".

La operación se realizó de manera análoga a la operación con las muestras anteriormente puntualizada. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.1.

Tabla 8.1 Resultados obtenidos con la configuración final del sistema

Material de la superficie de captación	Turbiedad [UTN]		Color [UC-PC]		pH [1]		Cloro residual libre [mg/l]
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
Lámina galvanizada	11.9	1.69	12	3	7.93	6.69	0.89
Concreto	12.1	2.05	12	5	8.41	6.60	0.36
Lámina de acrílico	10.7	2.04	15	2	8.29	6.61	1.24
Lámina de cartón	20.3	2.16	> 50	7	7.72	6.53	0.18
Concreto impermeabilizado	10.8	3.00	12	5	7.46	6.72	1.77

Comenzando con la turbiedad, puede verse que todas las muestras tratadas cumplen con lo establecido por la NOM-127-SSA1-1994, pues se encuentran por debajo de 5 UTN. Esto ocurre inclusive con la muestra obtenida con la superficie de captación de lámina de cartón, caso contrario a lo ocurrido en las pruebas de tratabilidad. Se cree, extraoficialmente, que este hecho puede deberse a la operación que se llevó a cabo con agua destilada tras las pruebas de filtración, lo cual pudo haber supuesto una contribución al "lavado inicial". La figura 8.3 muestra el gráfico comparativo de todas las pruebas de turbiedad realizadas.

A su vez, el color también presentó ligeras mejorías con respecto a las pruebas de tratabilidad, desde las cuales se había cumplido con lo establecido por la normativa en todas las muestras de agua de lluvia. Se considera muy bueno el desempeño del tren de tratamiento en cuanto a la remoción de color, puesto que, aún con aguas con un color mayor a 50 UC-PC, el color del agua tratada nunca rebasó el límite de las 20 UC-PC. El gráfico de resultados se muestra en la figura 8.4.

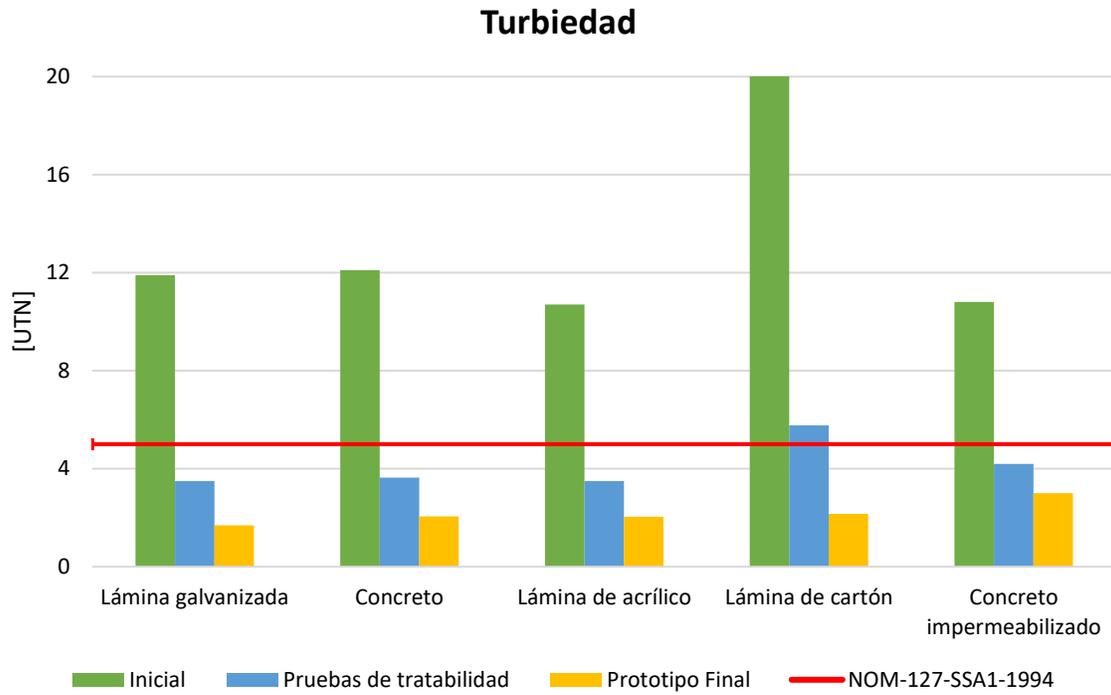


Figura 8.3 Gráfico comparativo de los resultados de turbiedad obtenidos con el tren de tratamiento desarrollado

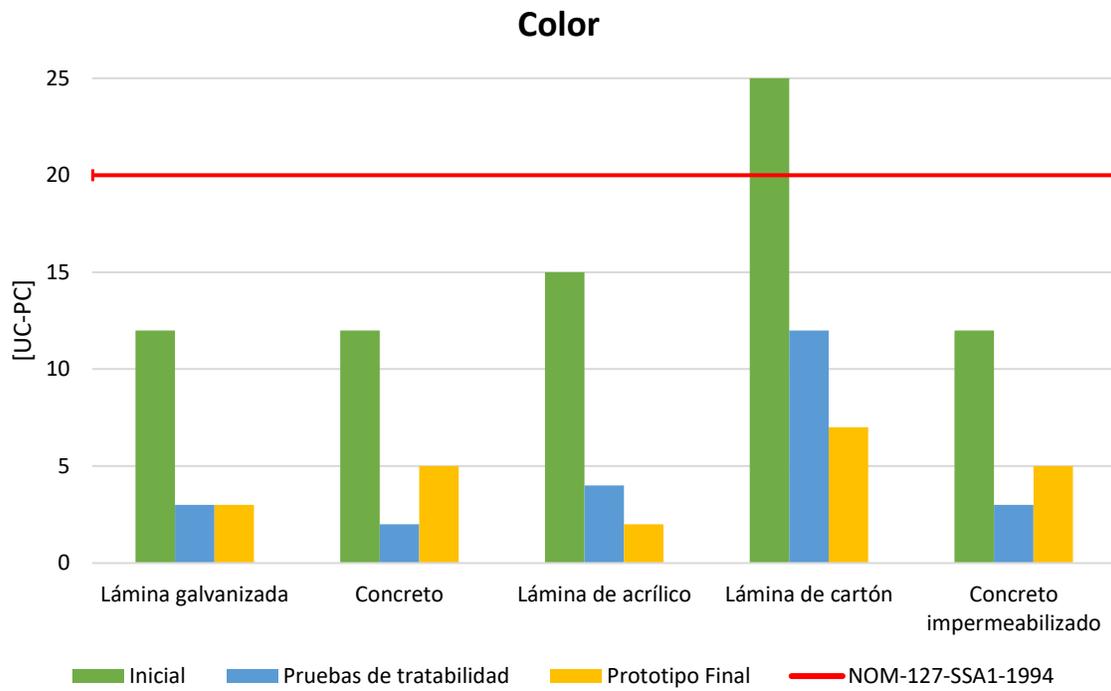


Figura 8.4 Gráfico comparativo de los resultados de color obtenidos con el tren de tratamiento desarrollado

Por último, es notable que, tras contar con un proceso de cloración, el recurso sufre una baja en su alcalinidad, lo cual era de esperarse, aunque ésta sigue estando dentro del rango permisible, estos resultados se pueden apreciar en el gráfico de la figura 8.5. Por su parte, el cloro residual libre, es decir, la protección contra microorganismos patógenos con la que cuenta el agua tratada, se encuentra dentro del rango establecido en tres de las cinco muestras, mientras que las dos restantes se encuentran sumamente cerca (resultados en la figura 8.6).

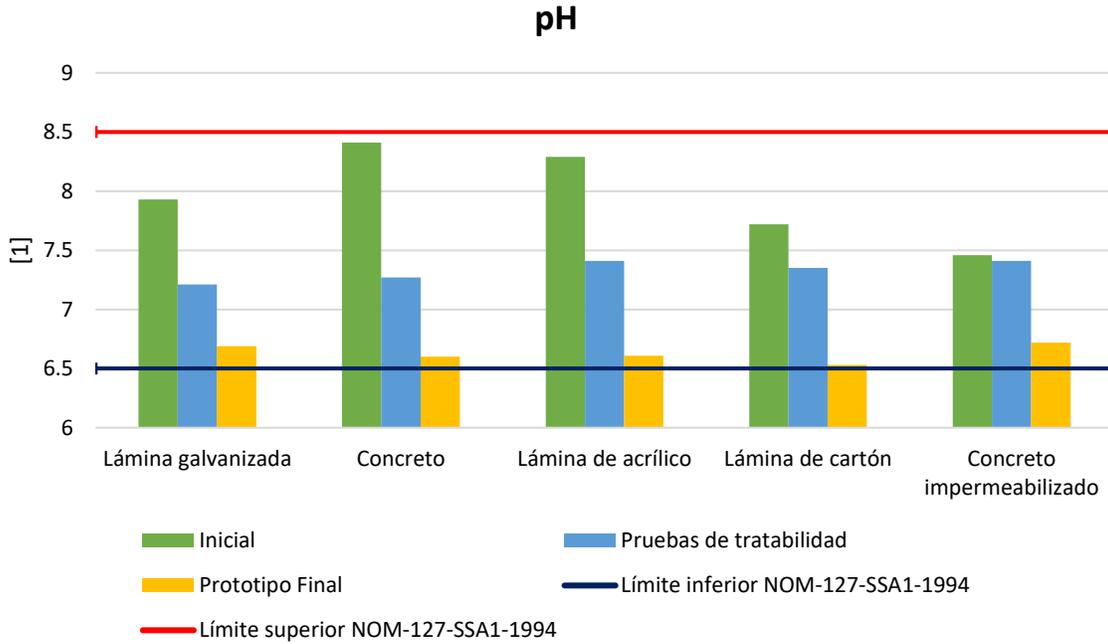


Figura 8.5 Gráfico comparativo de los resultados de pH obtenidos con el tren de tratamiento desarrollado

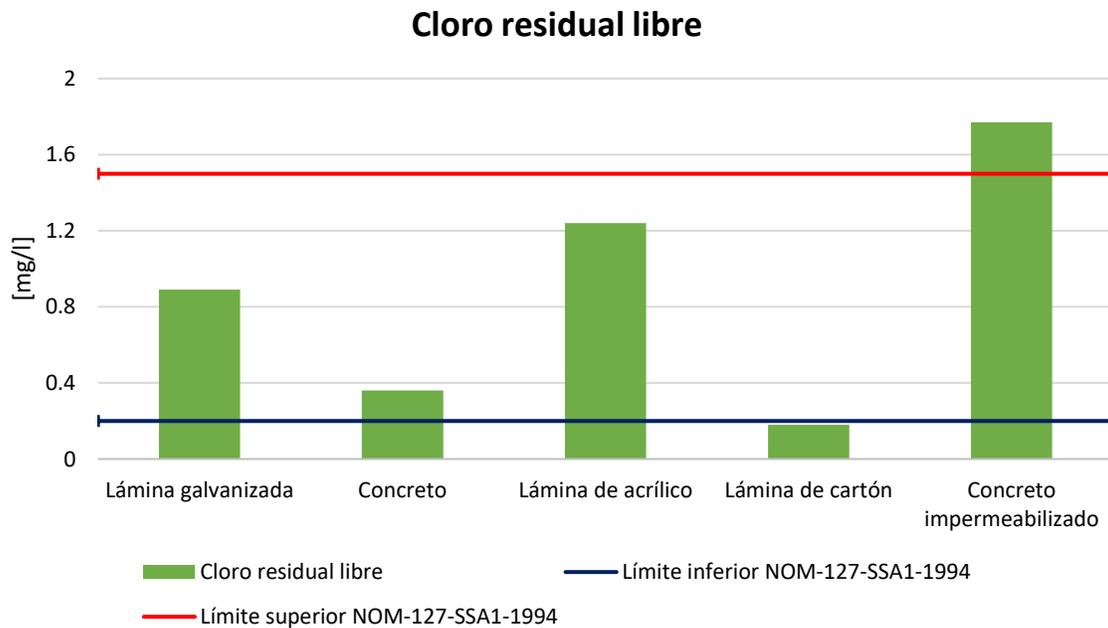


Figura 8.6 Gráfico comparativo de los resultados de pH obtenidos con el tren de tratamiento desarrollado

Sin duda, la desinfección mediante el dosificador debe ser realizada a conciencia, esto es, siempre considerando el número de tabletas, tiempo de contacto de la solución cloradora y la posición de la válvula reguladora para obtener resultados óptimos. Como se mencionó, en esta ocasión dos valores se encontraron fuera del rango, uno por encima y otro por debajo. En el primer caso -concreto impermeabilizado-, si bien sólo se registró un excedente de 0.27 mg/l y no se detectó un olor a cloro importante en el recurso, esto puede suponer efectos adversos en el ser humano debidos al cloro contenido; en el caso contrario -lámina de cartón-, se estuvo muy cerca de llegar al mínimo de 0.2 mg/l, sin embargo, sólo se registró un valor de 0.18 mg/l, lo cual puede considerarse como “aceptable”, no obstante, siempre debe buscarse cumplir con el mínimo establecido para de esta manera garantizar la destrucción de microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en el agua de lluvia.

Finalmente, se presenta la figura 8.7, en la cual se pueden apreciar el color y la turbiedad de dos muestras, una de agua captada mediante lámina de cartón -el caso más desfavorable- y una de la misma fuente -lámina de cartón- pero tras pasar por el sistema de tratamiento. Puede observarse claramente que los dos parámetros físicos y organolépticos en cuestión sufrieron mejorías considerables gracias a la acción del tren de tratamiento.

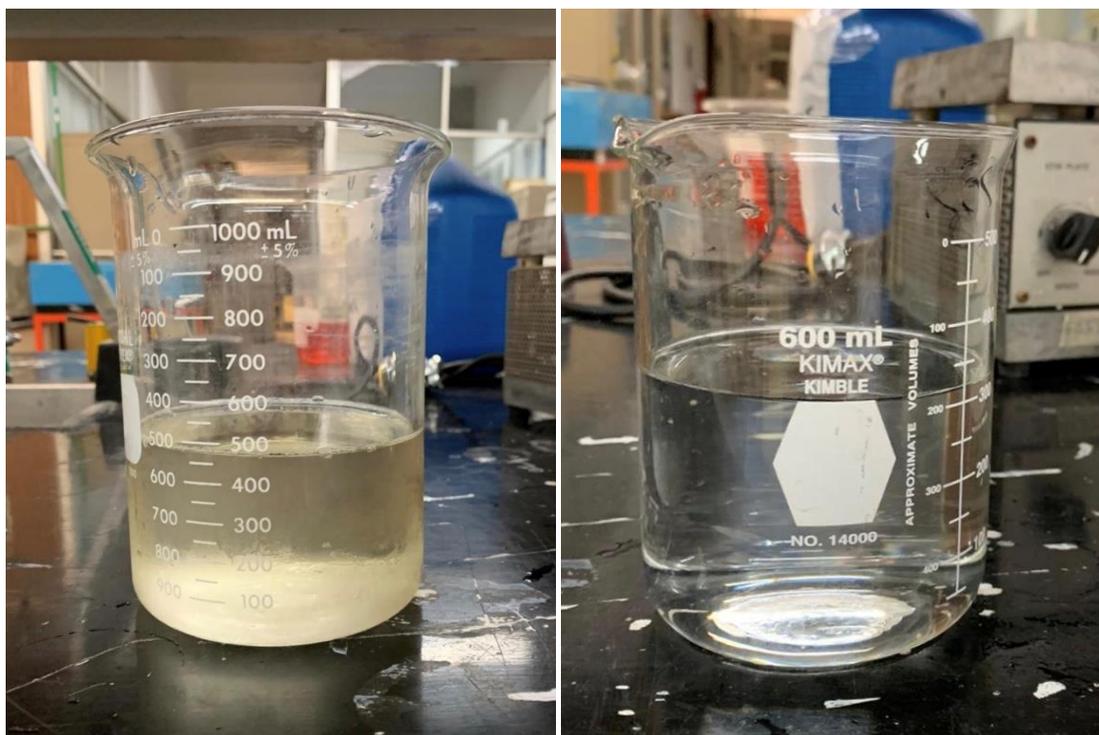


Figura 8.7 A la izquierda, una muestra del agua captada mediante superficie de lámina de cartón. A la derecha, una muestra captada mediante superficie de lámina de cartón tras ser sometida al sistema de tratamiento. Fuente: Directa (2019)

8.2.3 Prueba de retrolavado

Concluida la puesta en operación del sistema de tratamiento desarrollado, sólo resta puntualizar una acción fundamental para el correcto mantenimiento del filtro dual: el retrolavado.

El retrolavado es un procedimiento que permite proteger al filtro ante potenciales efectos nocivos o no deseados producto de la acumulación de sólidos retenidos a lo largo del lecho filtrante, entre éstos se encuentran la formación de diminutas bolas de lodo -mismas que a su vez pueden

romperse y mezclarse con el agua a tratar-, pérdida de la carga de energía, tasas de filtración muy por debajo del rango establecido, entre otras. Es por estas razones que se debe limpiar el lecho filtrante en el sentido opuesto al que éste trabaja regularmente; para este fin, se tienen diversas opciones de abastecimiento, tales como (American Water Works Association; American Society of Civil Engineers, 2012):

- Agua potable proveniente del abastecimiento con el que cuente el predio, la cual se puede conectar directamente para su uso en el retrolavado, o bien, para llenar un tanque de almacenamiento que se encuentre ubicado en una cota mayor a la del filtro y poder así realizar el retrolavado por gravedad.
- Agua que ha sido previamente filtrada y se encuentra en un tanque de almacenamiento en una cota superior, para poder realizar el retrolavado mediante la acción de la gravedad.
- Agua bombeada directamente desde una cisterna u otra facilidad similar.

Adicionalmente, se tiene que garantizar una expansión del lecho filtrante de mínimo el 10% con respecto a la longitud de éste, por lo cual la razón de flujo del agua destinada para retrolavado deberá estar dentro del rango de 10.3 a 13.6 l/s-m² para el caso de filtros duales (American Water Works Association; American Society of Civil Engineers, 2012).

Para este caso particular, se optó por dotar de agua para llevar a cabo el retrolavado a través de una manguera conectada directamente a la llave de abastecimiento del sitio de instalación, es decir, la primera de las opciones planteadas por la AWWA. Tras regular el flujo del agua para retrolavado a 2 l/min, como lo dicta la bibliografía citada y considerando el área transversal del filtro, se configuraron las válvulas marcadas con “R” en la figura 8.2 de tal manera que no pasará agua más allá de la salida destinada al drenaje de lodos provenientes de los retrolavados.

La duración del retrolavado realizado fue sumamente corta en esta ocasión, dado que el tiempo de operación del filtro había sido relativamente poco hasta ese punto, lo cual derivó en una contaminación ligera del lecho filtrante. De manera visual se analizaba el recurso que salía de la llave destinada a drenaje y al detectar que el color y la turbiedad eran las deseables -similares a las del agua potable-, la acción de retrolavado se dio por terminada.

Posterior al retrolavado, se realizó una operación con muestra sintética elaborada conforme lo describe el apartado 7.3.1, no obstante, no se hizo uso de caolín; el fin de esta operación era comprobar si el filtro no había perdido su capacidad de tratar el recurso. La tabla 8.2 muestra los resultados obtenidos en dicha prueba.

Tabla 8.2 Resultados obtenidos al tratar una muestra sintética tras la prueba de retrolavado

Característica	Inicial	Final
Turbiedad [UTN]	13.3	2.62
Color [UC-PC]	25	3
pH [1]	6.98	6.63

Puede verse que el filtro dual conservó su capacidad de remoción, tanto de turbiedad como de color, teniendo resultados similares a los que se presentaron en etapas previas. Además, el pH, también muestra un comportamiento similar al que se obtuvo en el apartado anterior, donde, de igual manera, se tenía conectado el dosificador de tricloro.

8.3 Costo del tren de tratamiento

Como apartado final, se enlistan los precios y cantidades requeridas de todos y cada uno de los elementos necesarios para la construcción del sistema de tratamiento de agua pluvial para uso indirecto, mismos que en conjunto representan un costo total final, el cual se encuentra también puntualizado en la tabla 8.3.

Tabla 8.3. Costos del sistema de tratamiento desarrollado

Concepto	Precio por unidad	Unidad	Cantidad de unidades	Subtotal
Adaptador gal espiga PVC sanitario 3"	\$64.99	pieza	2	\$129.98
Adaptador macho de PVC hidráulico 1 1/2"	\$13.50	pieza	2	\$27.00
Adaptador macho de PVC hidráulico 1"	\$7.10	pieza	8	\$56.80
Arena sílica	\$30.00	kg	0.99	\$29.70
Bomba Múnich® BA-1208HD	\$629.00	pieza	1	\$629.00
Carbón activado	\$42.50	kg	0.58	\$24.65
Cinta teflón 1"	\$16.01	rollo	2	\$32.02
Codo liso PVC 1"	\$6.90	pieza	10	\$69.00
Conector con rosa interior PVC hidráulico 3"	\$75.01	pieza	2	\$150.02
Cople PVC hidráulico 1"	\$7.10	pieza	1	\$7.10
Cople PVC hidráulico 3"	\$75.01	pieza	2	\$150.02
Cople PVC sanitario 3"	\$8.00	pieza	2	\$16.00
Dosificador FibroPool® FC 200	\$870.96	pieza	1	\$870.96
Grava	\$10.00	kg	1.31	\$13.10
Limpiador para PVC 240 ml	\$59.00	bote	1	\$59.00
Malla mosquitera	\$28.10	m ²	0.02	\$0.56
Manguera de 10 metros 1/2"	\$75.01	pieza	1	\$75.01
Pastillas de tricloro estabilizado 3" Aquapool	\$18.90	tableta	3	\$56.70
Pegamento para PVC 240 ml	\$63.50	bote	1	\$63.50
Pichanca roscable de 1"	\$175.00	pieza	1	\$175.00
Reducción PVC hidráulico 1 1/2" - 1"	\$13.50	pieza	2	\$27.00
Reducción PVC hidráulico 1 1/4" - 1"	\$18.00	pieza	2	\$36.00
Reducción PVC hidráulico 3" - 1 1/2"	\$175.00	pieza	2	\$350.00
Soporte de madera para el filtro	\$250.00	pieza	1	\$250.00
Tee lisa PVC 1"	\$11.50	pieza	3	\$34.50
Tubo de PVC hidráulico cédula 40 1"	\$27.00	m	12	\$324.00
Tubo de PVC hidráulico cédula 40 3"	\$116.00	m	0.3	\$34.80
Tubo de PVC sanitario 3"	\$29.00	m	0.67	\$19.43
Tuerca unión cementable PVC hidráulico 1"	\$33.62	pieza	1	\$33.62
Tuerca unión cementable PVC hidráulico 3"	\$370.01	pieza	1	\$370.01
Válvula check horizontal roscable 1"	\$134.00	pieza	2	\$268.00
Válvula de esfera cementable PVC hidráulico 1"	\$59.48	pieza	5	\$297.40
Válvula de compuerta roscable 1"	\$154.00	pieza	1	\$154.00
Total				\$4,833.88

Es evidente que el costo difiere del que se proyectó en la propuesta conceptual del tren de tratamiento (Chinchilla, 2020), lo cual es debido principalmente al dosificador de pastillas de tricloro, el sistema de bombeo y la naturaleza desmontable con la que se dotó al tren de tratamiento. Sin embargo, al ser éste un primer prototipo, se espera que el costo de cerca de \$4,800 MXN pueda disminuir al optimizar el sistema mediante diversas adecuaciones como, por ejemplo, sustituciones de piezas, cotizaciones con diversos proveedores, por mencionar algunas.

La elaboración de un indicador costo-beneficio, en este caso, tiende a ser poco precisa, pues al no haber instalado el sistema en un sitio en específico, es decir, con un área de captación y, por ende, un volumen captado en cierto tiempo determinados, dichas variables representan variaciones que rebasan el alcance del ejercicio realizado. No obstante, se considera que el precio puede ser asequible para los habitantes de la vivienda promedio de la zona de estudio y se destaca que todos los elementos son de fácil acceso comercial en la CDMX.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

La Ciudad de México forma parte de la región hidrológico-administrativa con mayor estrés hídrico en todo el país, teniendo un valor de 141.4%, lo cual es una de las consecuencias de las características geográficas, demográficas y socioeconómicas de la capital del país. Sin embargo, dada la cantidad de precipitación que se presenta anualmente en la región -la cual puede llegar a ser de hasta 1200 mm por año-, es posible recurrir a soluciones que se han empleado a lo largo del globo con resultados satisfactorios pero que históricamente han sido relegadas a un segundo plano en la CDMX; una de estas soluciones es el aprovechamiento del agua pluvial a nivel micro, es decir, a nivel domiciliario.

En lo relativo al perfil de vivienda en la capital, se tiene que, en promedio, el hogar de la CDMX está conformada por entre 3 y 4 habitantes -la media aritmética es de 3.4-, de los cuales sólo uno realiza una actividad remunerada para, de esta manera, tener un ingreso mensual de cerca de \$10,600 MXN. Además, se espera que del consumo total de agua en la vivienda al menos 40% esté destinado a su uso en el WC y el lavado de ropa, fines que convergen con los perseguidos por el sistema de tratamiento desarrollado; este hecho se traduce en que se tiene el potencial de ahorrar alrededor de 260 litros de agua diarios empleando el sistema de tratamiento de agua pluvial para uso indirecto.

Como se hace incapié a lo largo del texto, la presente tesis parte del trabajo realizado por el Ing. Chinchilla, en donde se realizan diversas propuestas de trenes de tratamiento a nivel conceptual y se comparan los posibles beneficios de éstos. Dicho lo anterior, se retoma la propuesta de tren de tratamiento para uso primario y ésta es materializada con el sistema de tratamiento desarrollado. Este sistema comprende filtración y desinfección, mismos que son llevados a cabo mediante diversos componentes, tales como carbón activado, arena sílica, grava, pastillas de tricloro estabilizado, entre otros; además de emplear materiales y equipo de fácil acceso comercial, como el PVC y una bomba de ½ HP, por ejemplo.

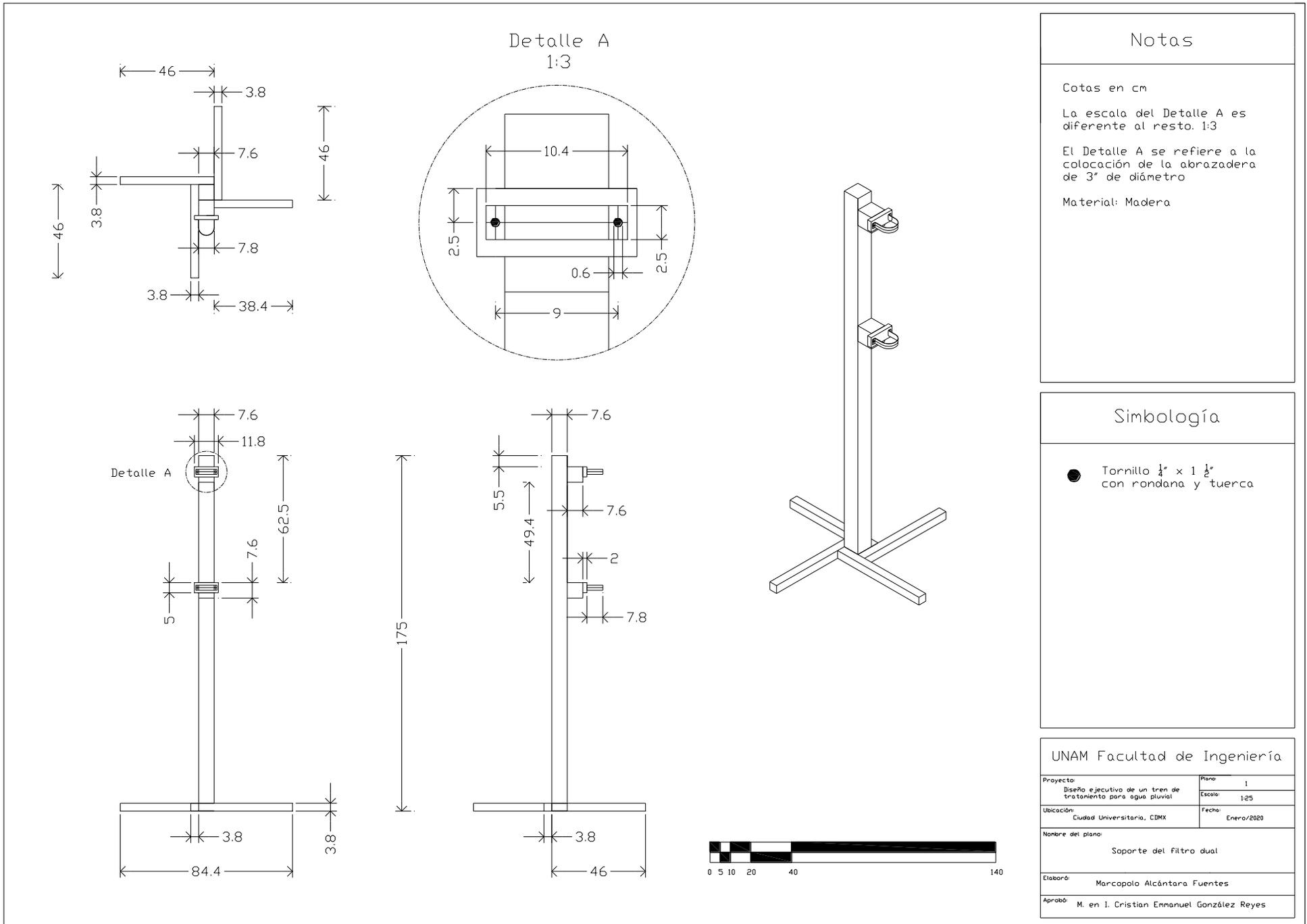
En general, los resultados obtenidos con el sistema de tratamiento pueden considerarse como muy favorables, pues la remoción de turbiedad y color se cumple para todas las muestras de agua pluvial tratadas; mientras que, en el ramo de la desinfección, se logró adaptar un dispositivo capaz de brindar una cloración que cumpla con lo establecido de la normativa que rige en la zona de estudio. Además, la alcalinidad de todas las muestras que pasaron por el tren de tratamiento se encuentra entre 6.5 y 8.5 tras su paso por éste, hecho que representa un estado óptimo del recurso, puesto que se encuentra dentro del rango de la neutralidad.

El costo final del sistema de tratamiento ronda los \$4,800 MXN, lo cual puede considerarse como asequible para el habitante promedio de la CDMX. La naturaleza desmontable del filtro dual puede alargar considerablemente la vida útil del dispositivo, pues de esta manera las labores de mantenimiento son facilitadas, además de contar con válvulas que permiten el retrolavado del mismo. Además, es de recalcar que todas las piezas del sistema son de fácil acceso comercial y no se necesita equipo o herramientas especializadas para su correcto armado.

Aunado a esto, puede afirmarse que, si bien el sistema desarrollado cumple con el objetivo de producir agua con las características aptas para uso primario, el prototipo es perfectible. Los trabajos por venir en la línea de investigación deben apuntar a optimizar costos -acción que se comienza en los planos ejecutivos desarrollados, donde piezas prescindibles se omiten o sustituyen por otras de menor costo-, y su implementación en una edificación en uso, con lo cual se podrán definir los impactos de éste de una manera cuantitativa y mucho más representativa, pues la elaboración de una relación beneficio-costos, hasta este punto, podría suponer un ejercicio que se asemeje poco a la realidad debido a las diversas variables involucradas.

Finalmente, es de recalcar el hecho de que se cumple con el objetivo de elaborar una memoria de cálculo, planos ejecutivos y un manual de operación en lenguaje comprensible para el habitante promedio de la CDMX, correspondientes con el sistema de tratamiento desarrollado.

APÉNDICE 1. PLANOS DEL TREN DE TRATAMIENTO



Notas

Cotas en cm

La escala del Detalle A es diferente al resto. 1:3

El Detalle A se refiere a la colocación de la abrazadera de 3" de diámetro

Material: Madera

Simbología

- Tornillo $\frac{1}{4}$ " x $1 \frac{1}{2}$ " con rondana y tuerca

UNAM Facultad de Ingeniería

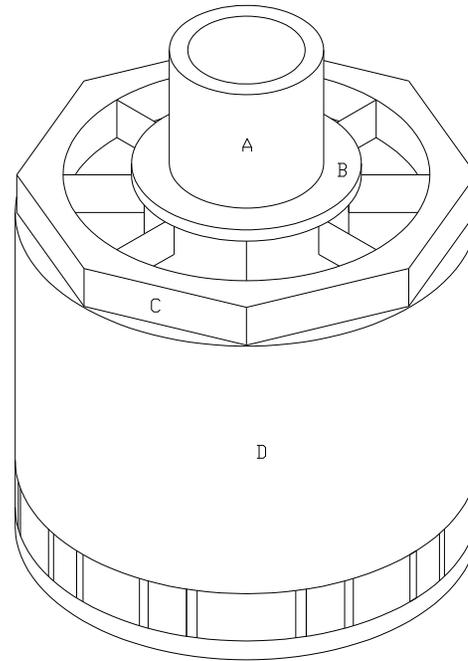
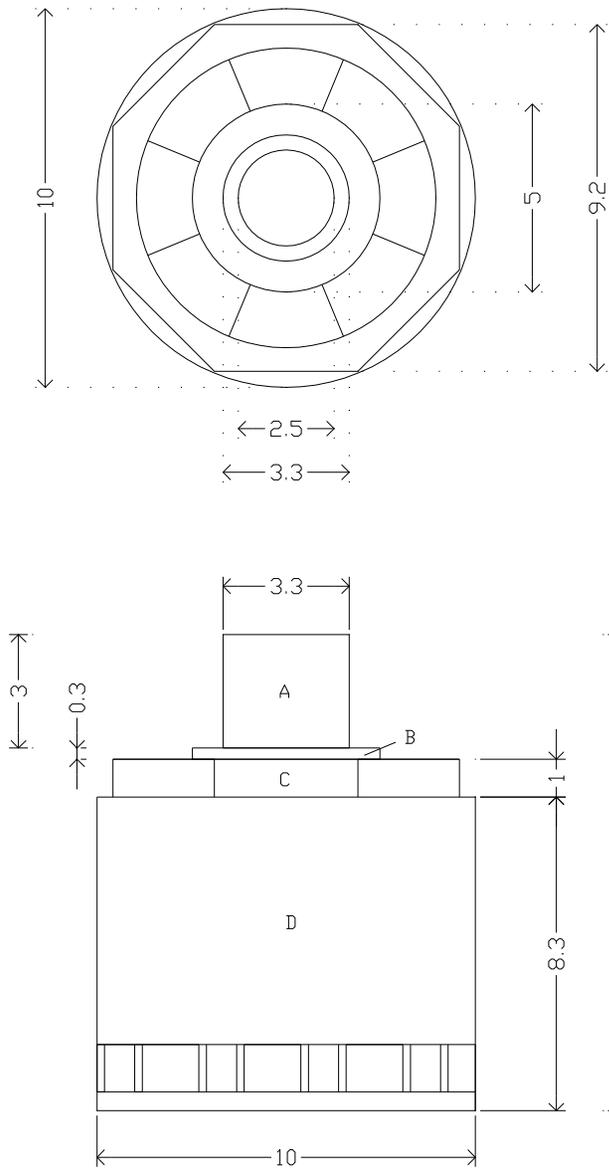
Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 1
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Escala: 1:25
	Fecha: Enero/2020

Nombre del plano:

Soporte del filtro dual

Elaboró: Marcopala Alcántara Fuentes

Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes



Notas

Cotas en cm

Las piezas están cementadas perfectamente

Material: PVC hidráulico cédula 40

Simbología

A Tubo 1"

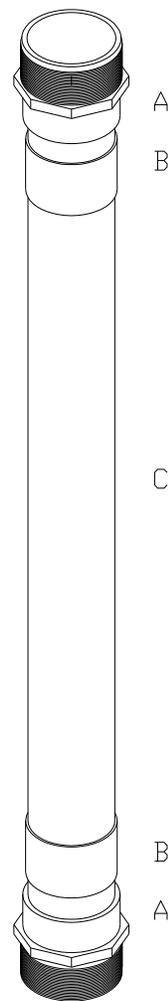
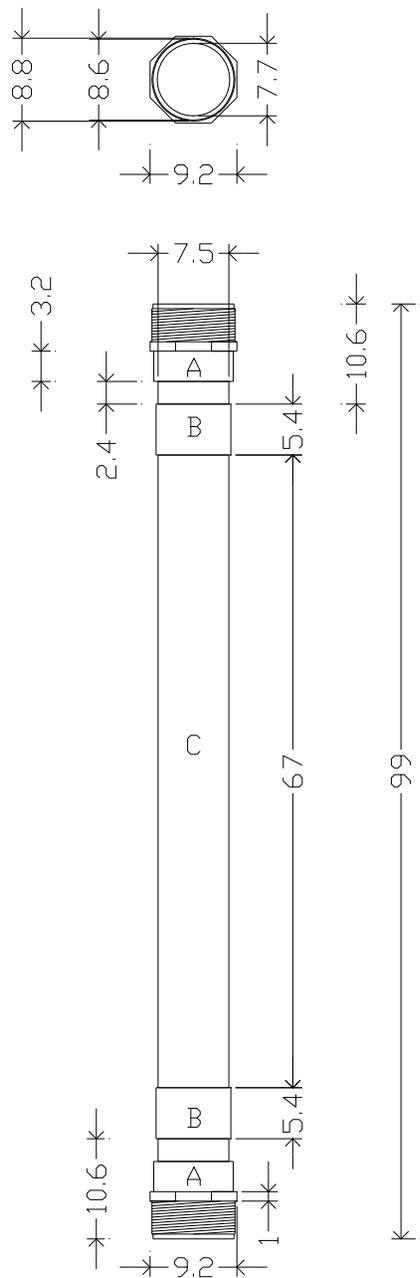
B Reducción Bushing
1 1/4" - 1"

C Reducción Bushing
3" - 1 1/4"

D Conector con rosca interior

UNAM Facultad de Ingeniería

Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 2
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Escala: 1:2
Fecha: Enero/2020	
Nombre del plano: Extremo superior filtro dual	
Elaboró: Marcopolo Alcántara Fuentes	
Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes	



Notas

Cotas en cm
 Las piezas están cementadas perfectamente
 Material: PVC sanitario norma M14 L2

Simbología

- A Adaptador gal espiga 3"
- B Cople 3"
- C Tubo 3"

UNAM Facultad de Ingeniería

Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 3
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Escala: 1:8
Fecha: Enero/2020	
Nombre del plano: Parte central filtro dual	
Elaboró: Marcopolo Alcántara Fuentes	
Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes	

Notas

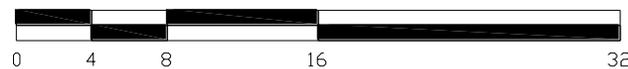
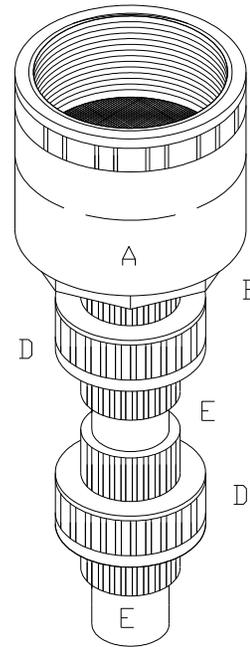
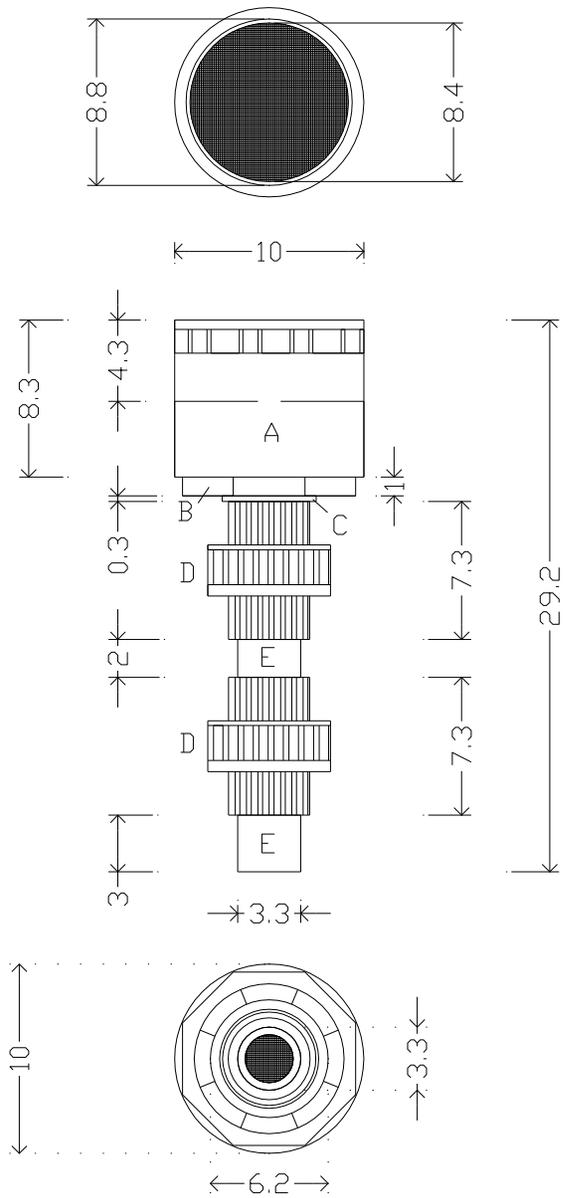
Cotas en cm
 Las piezas están cementadas perfectamente
 Material: PVC hidráulico cédula 40

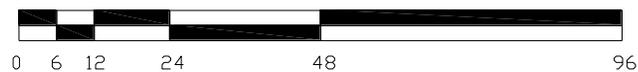
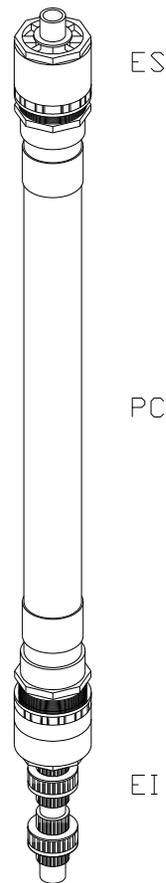
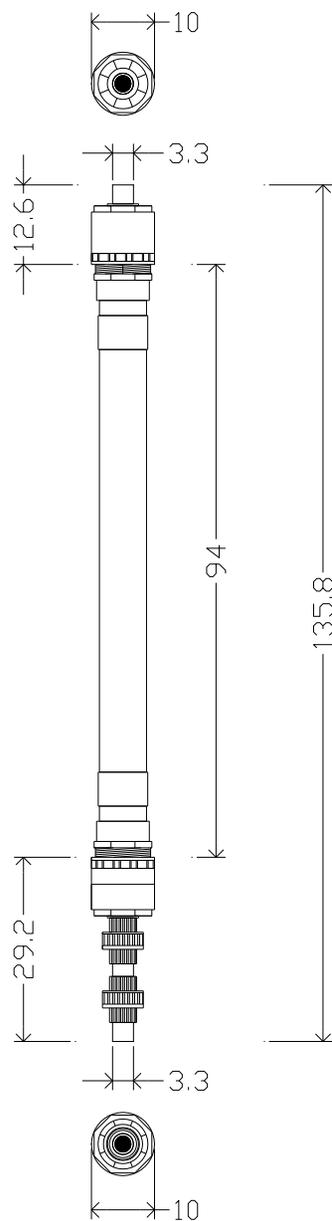
Simbología

- A Conector con rosca interna 3"
- B Reducción Bushing 3" - 1 1/4"
- C Reducción Bushing 1 1/4" - 1"
- D Tuerca unión cementable 1"
- E Tubo 1"
- — Malla mosquitera

UNAM Facultad de Ingeniería

Proyecto	Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano	4
Ubicación	Ciudad Universitaria, CDMX	Escala	1:4
Nombre del plano:	Extremo inferior filtro dual		
Elaboró:	Marcopolo Alcántara Fuentes		
Aprobó:	M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes		





Notas

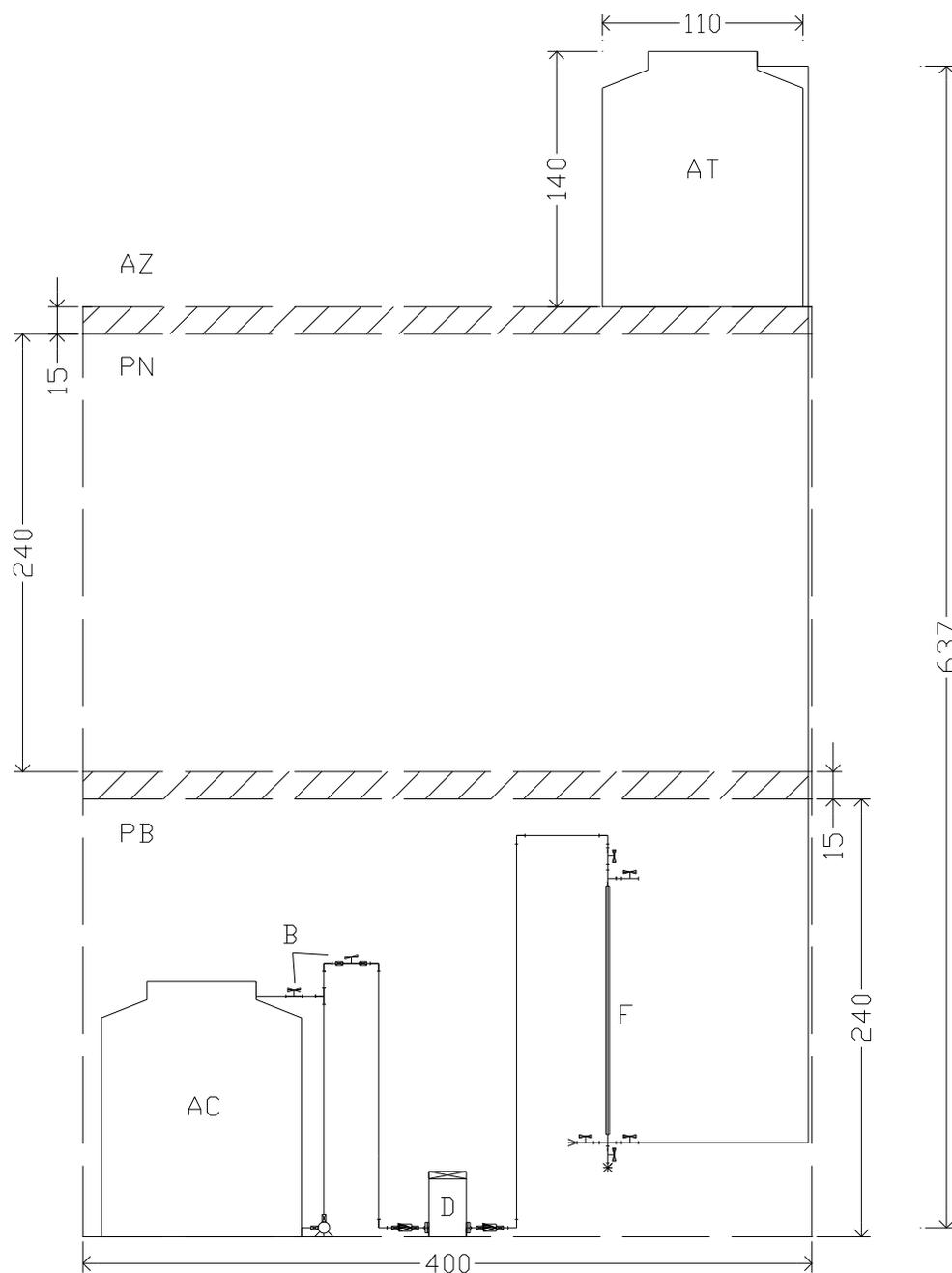
Cotas en cm
 Las piezas están cementadas perfectamente
 Material: PVC hidráulico cédula 40 y PVC sanitario norma M14 L2
 El plano muestra el ensamble final de las tres partes del filtro dual
 Para mayor detalle véanse los planos 2, 3 y 4

Simbología

ES Extremo superior del filtro dual (Plano 2)
 PC Parte central del filtro dual (Plano 3)
 EI Extremo inferior del filtro dual (Plano 4)

UNAM Facultad de Ingeniería

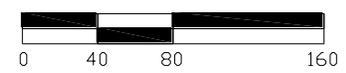
Proyecto:	Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano:	5
Ubicación:	Ciudad Universitaria, CDMX	Escala:	1:12
Nombre del plano:	Filtro dual ensablado		
Fecha:	Enero/2020	Elaboró:	Marcapolo Alcántara Fuentes
Aprobó:	M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes		

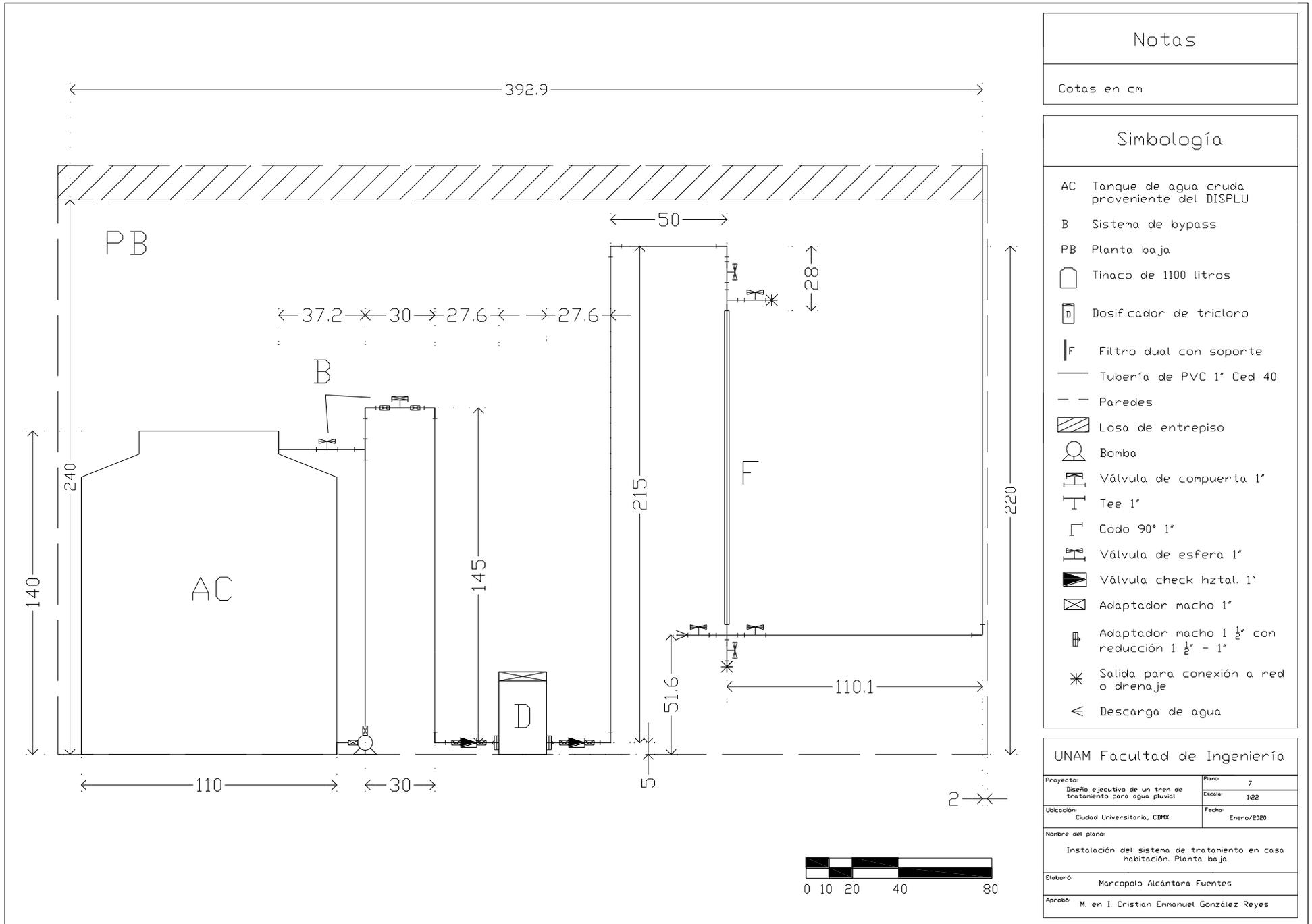


Notas	
Cotas en cm	

Simbología	
AC	Tanque de agua cruda proveniente del DISPLU
AT	Tanque de agua tratada
AZ	Azotea
B	Sistema de bypass
PB	Planta baja
PN	Primer nivel
	Tinaco de 1100 litros
	Dosificador de tricloro
	Filtro dual con soporte
	Tubería de PVC 1" Ced 40
	Paredes
	Losa de entrepiso

UNAM Facultad de Ingeniería	
Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 6
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Fecha: Enero/2020
Nombre del plano: Instalación del sistema de tratamiento en casa habitación. Vista general	
Elaboró: Marcopolo Alcántara Fuentes	
Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes	





Notas

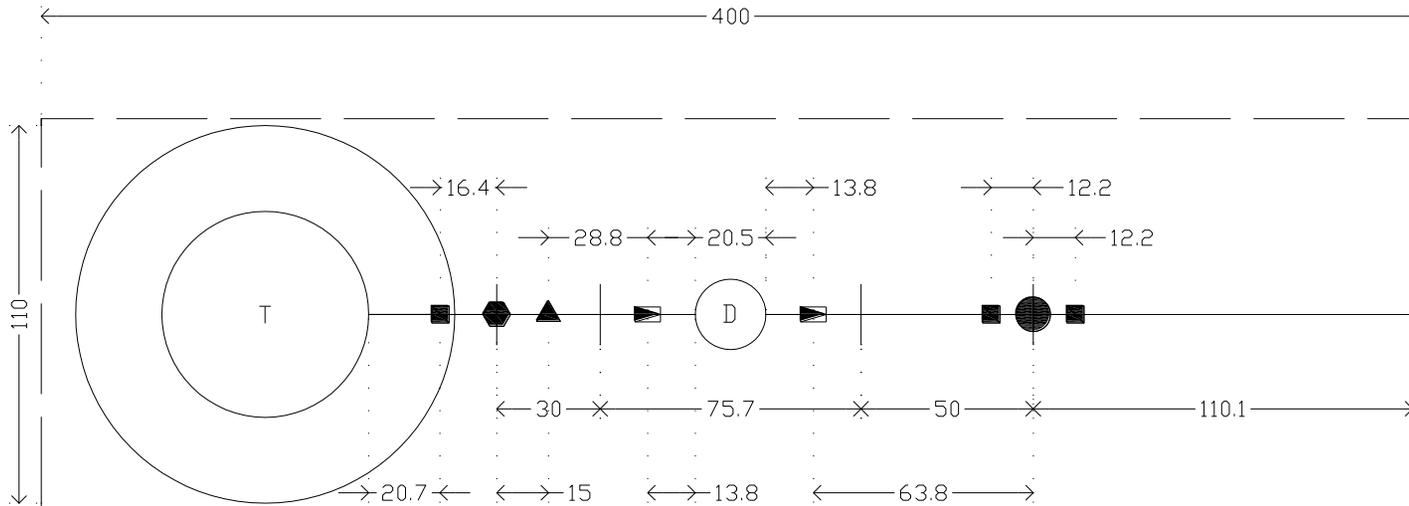
Cotas en cm

Simbología

- AC Tanque de agua cruda proveniente del DISPLU
- B Sistema de bypass
- PB Planta baja
- Tinaco de 1100 litros
- Dosificador de tricloro
- Filtro dual con soporte
- Tubería de PVC 1" Ced 40
- Paredes
- Losa de entpiso
- Bomba
- Válvula de compuerta 1"
- Tee 1"
- Codo 90° 1"
- Válvula de esfera 1"
- Válvula check hzta 1"
- Adaptador macho 1"
- Adaptador macho 1 1/2" con reducción 1 1/2" - 1"
- Salida para conexión a red o drenaje
- Descarga de agua

UNAM Facultad de Ingeniería

Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 7
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Escala: 1:22
Fecha: Enero/2020	
Nombre del plano: Instalación del sistema de tratamiento en casa habitación. Planta baja	
Elaboró: Marcopolo Alcántara Fuentes	
Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes	



Notas

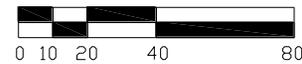
Cotas en cm
 Se supone que el sistema está instalado en un cuarto de 16m²
 Se omite el tinaco en la azotea por fines visuales. Para detalle, véase el plano 6

Simbología

- Tubería de PVC 1" Ced 40
- - - Paredes
- (T) Losa de entrepiso
- (D) Dosificador de tricloro con adaptaciones
- ▤ Válvula check 1" con adaptadores
- ⬡ Bomba
- Filtro dual con soporte
- ▲ Válvula de compuerta 1" con adaptadores
- Válvula de esfera 1"
- | Cambio de dirección 90°

UNAM Facultad de Ingeniería

Proyecto: Diseño ejecutivo de un tren de tratamiento para agua pluvial	Plano: 8
Ubicación: Ciudad Universitaria, CDMX	Escala: 1:22
Fecha: Enero/2020	
Nombre del plano: Instalación del sistema de tratamiento en casa habitación. Vista en planta	
Elaboró: Marcopolo Alcántara Fuentes	
Aprobó: M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes	

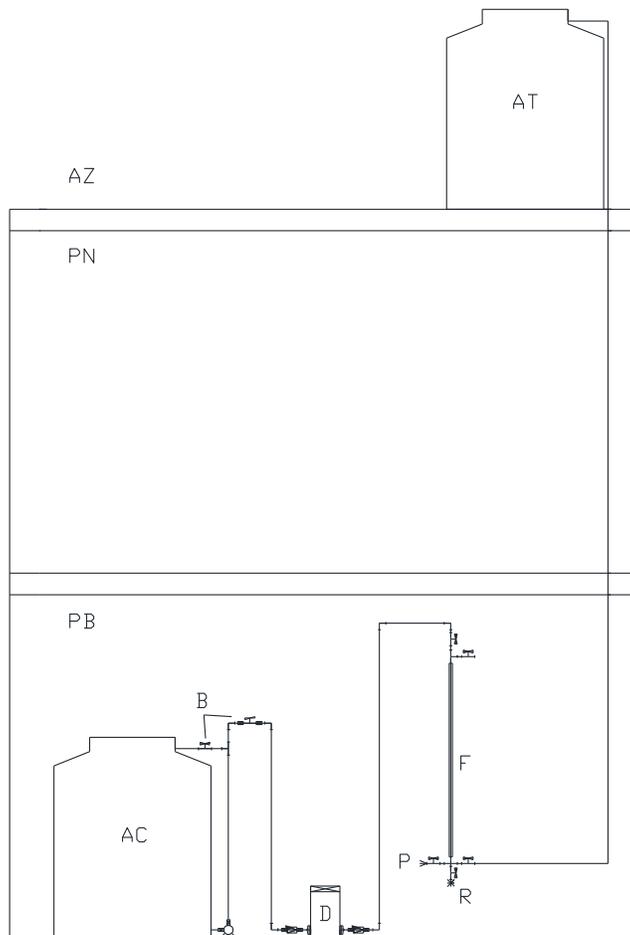


APÉNDICE 2. MANUAL DE OPERACIÓN DEL TREN DE TRATAMIENTO

Sistema de tratamiento de agua pluvial para su uso indirecto en casa habitación

El sistema de tratamiento tiene la capacidad de tratar el agua proveniente de la lluvia para, después de un proceso de clorado y filtrado, poder hacer uso de ésta en diversas actividades del hogar, tales como uso en muebles de baño, lavado de ropa, limpieza en exteriores e interiores o riego. No obstante, el agua tratada con el sistema no debe ser ingerida, pues no se garantiza la ausencia de contaminantes como hierro o aluminio, aunque esto no quiere decir que éstos estén presentes invariablemente.

Tras captar el agua pluvial en el techo de la vivienda, haber pasado ésta por el discriminador de primeras lluvias DISPLU y teniéndola almacenada en el tanque de aguas crudas, el siguiente paso es someterla al tren de tratamiento. Haciendo uso de una bomba de ½ caballo de fuerza, es posible llevar el agua desde el primer tanque hasta el tanque localizado en la azotea, pasando por el dosificador de pastillas de tricloro estabilizado Fibropool® FC 200 y por el filtro de arena y carbón activado con el que se cuenta, logrando de esta manera la remoción de microorganismos patógenos y características indeseables en el agua, tales como olores, colores o sabores, además de mantener el pH en el rango de la neutralidad. En la siguiente figura se puede observar la configuración del sistema de tratamiento.



Instalación del sistema de tratamiento

Puede verse que el sistema está diseñado para trabajar en viviendas de dos plantas (PB y PN), teniendo el tanque de almacenamiento final (AT) en la azotea (AZ), sin embargo, éste puede adaptarse, tomando las debidas consideraciones, a viviendas distintas a la mostrada colocando una bomba con mayor capacidad.

Continuando con la configuración mostrada, puede inferirse que el sistema puede dividirse en cuatro partes: tanques de almacenamiento (AT y AC), sistema de bombeo y bypass (B), dosificador de pastillas de tricloro (D) y filtro dual (F) -éste con su respectivo sistema de retrolavado (R) y purga (P). A continuación, para cada uno de dichos componentes, se muestra una breve descripción, actividades a realizar antes de la operación, procedimiento de operación, actividades de mantenimiento y una sección de preguntas frecuentes.

Tanque de aguas crudas y tanque de agua tratada

Como se dijo, el sistema cuenta con dos tanques, uno que recibe el agua proveniente de la captación de lluvia -y que ha pasado por el DISPLU- y otro que almacena el agua a la salida del tren de tratamiento. Si bien dichos dispositivos de almacenamiento están contemplados como tinacos de 1100 litros, éstos podrían ser sustituidos por el usuario por tinacos de diferentes capacidades u otros dispositivos similares. Su función se limita a confinar el recurso, ya sea a tratar o tratado.

Antes de la operación:

- Realizar una inspección visual del dispositivo de almacenamiento, verificando que no se presenten fugas.
- Abrir la llave de paso con la que, usualmente, se cuenta en los tinacos comerciales.

Procedimiento de operación:

Estos dispositivos están destinados a confinar el agua de manera hermética.

Mantenimiento:

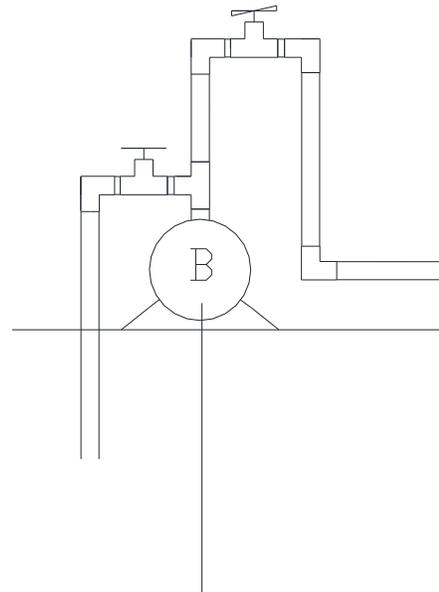
Éste se limita a conservar el interior del tanque en buen estado, por lo cual se recomienda lavar el tanque con jabón neutro cada 3 meses.

Preguntas frecuentes:

- ¿Puedo colocar un tanque, cualquiera de los dos, más pequeño o más grande que el de 1100 litros?
Sí, sin embargo, esto podría estresar el sistema, puesto que en un caso extraordinario la capacidad del filtro podría verse rebasada. Colocar un tanque diferente para el almacenamiento final no representa ningún peligro.
- ¿El lavado del tanque debe ser solamente cada tres meses?
Tres meses es el periodo máximo que puede transcurrir entre lavados, pero puede ser realizado antes si el usuario lo considera necesario.

Sistema de bombeo y bypass

El sistema de tratamiento cuenta con una bomba periférica de 0.5 HP de la marca Múnich® modelo BA-1208HD la cual se conecta al tanque de aguas crudas y a la salida se le dota con dos válvulas, una de esfera y la otra, preferentemente, de compuerta. Esto se realiza para poder regular el gasto que se bombea, pues una parte se retorna al tanque de aguas crudas en caso de que el filtro dual no sea capaz de trabajar con todo el caudal proveniente de la bomba. En general, se trata de un sistema auxiliar al tren de tratamiento, ya que, si bien es el responsable de llevar el recurso tratado hasta su destino en el tanque colocado en la azotea, no representa ningún tratamiento para el agua de lluvia.



Esquema de bomba y bypass

Antes de la operación:

- Verificar que la bomba se encuentre adecuadamente conectada, tanto en la succión como en la descarga.
- Si se cuenta con electronivel, verificar que este se encuentre en condiciones para iniciar la operación. En caso de conectar la bomba manualmente, corroborar que está todo listo para enchufar el dispositivo a la corriente del sitio de instalación.
- Realizar una prueba para comprobar que la bomba esté cebada correctamente, en caso contrario, realizar el cebado del equipo removiendo el tornillo que se encuentra a un costado del orificio de descarga.
- Abrir ambas válvulas. Esto es muy importante, de lo contrario el sistema puede sufrir daños debido a las altas presiones ocasionadas por el bombeo.

Procedimiento de operación:

El bombeo se realiza siempre y cuando haya recurso por tratar en el primer tanque, de lo contrario, la bomba trabajaría en seco, hecho que, invariablemente, provocaría una vida útil sumamente corta. Para la operación pueden colocarse electroniveles o realizarse de manera manual.

Mantenimiento:

Siempre y cuando no se opere en seco, el mantenimiento es mínimo. Se recomienda poner en marcha el equipo de bombeo al menos cada semana para evitar que diversos elementos sufran consecuencias por desuso.

Preguntas frecuentes:

- ¿Cómo se ceba la bomba?
El cebado de la bomba -o purgado- consiste en llenar con agua el tubo de succión, lo cual resulta innecesario si se trabaja por debajo del nivel del agua en el tanque, aunque pudieran presentarse burbujas de aire. Para realizarlo sólo se necesita quitar el tornillo que se encuentra a un costado del orificio de descarga y llenar con agua. Puede hacerse uso de una pichancha en el tubo de succión.

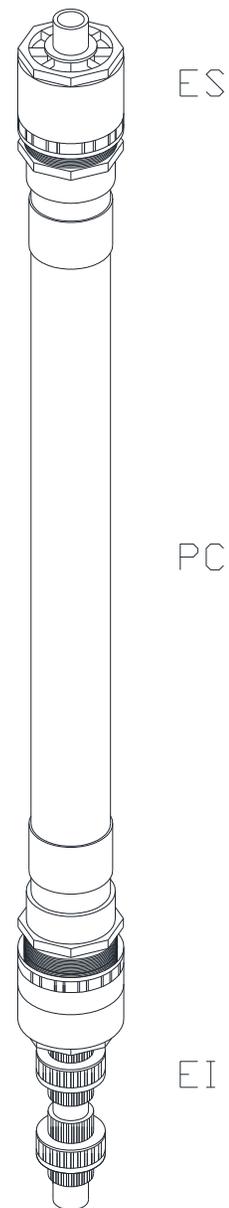
- Si opero el sistema de manera manual, ¿cuándo debo terminar la operación?
Cuando no haya más agua o ésta esté a punto de terminarse en el tanque de aguas crudas.
- ¿Puedo colocar otra bomba?
Sí, sin embargo, esto puede hacer más difícil la manipulación correcta de las válvulas del bypass.
- ¿Para que sirven las dos válvulas y el retorno conectados?
Para regular el gasto que llega al filtro dual.

Filtro dual

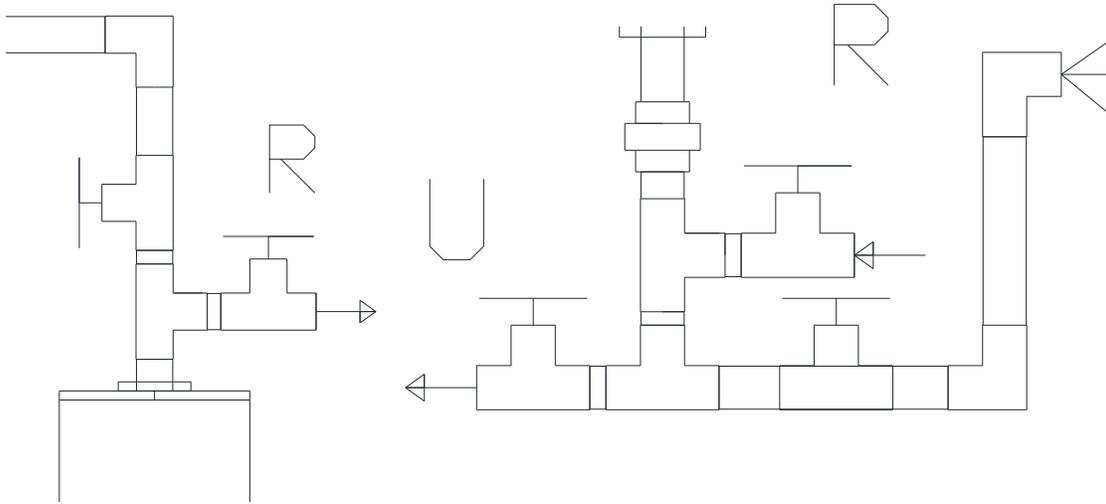
El filtro dual se encuentra de la remoción de olor, color y sabor desagradables para el ser humano, además de eliminar partículas causantes de la turbiedad del agua de lluvia. Éste está compuesto por carbón activado, arena sílica y grava, elementos que se encuentran colocados en diversas capas que varían según el tamaño que posean. A su vez, el filtro dual requiere de un soporte o base para ser colocado; éste ha sido desarrollado pero el usuario decide si lo desea incorporar o desea hacer uso de otro mecanismo para sostener el filtro. Además, el filtro diseñado puede desmontarse fácilmente, puesto que se compone de tres partes roscables (ES, PC y EI) entre sí, una (EI) de las cuales está dotada con dos tuercas unión para hacer más cómodo el mantenimiento. El dispositivo también cuenta con diversas válvulas de salida y entrada para realizar retrolavados.

Antes de la operación:

- Lo primero que se realiza es regular el caudal que pasa a través del filtro. Para esto se trabaja en conjunto con el sistema de bypass. Una vez puesto en marcha el bombeo, se regula mediante las válvulas de manera que el gasto que sale por el filtro no sea mayor a 3.8 litros por minuto. Las únicas dos llaves abiertas del filtro son la de paso para filtrado y la de purga (U), por ésta última es por donde sale el recurso filtrado.
- Si se trata de la primera operación, llenar el tanque de aguas crudas con agua limpia, conectar una manguera a través de la llave de purga y hacer que descargue en el mismo tanque. Trabajar de esta manera por al menos 6 horas y cambiar el agua periódicamente.
- En operación normal, verificar que solo estén abiertas las llaves de paso del dosificador al filtro y del filtro al segundo tanque. Todas las demás (R y U) -que se encuentran conectadas el filtro- deben estar cerradas.
- Verificar que no haya fugas. En caso de haberlas, apretar las piezas desmontables.



Filtro dual armado



Válvulas de retrolavado (R) y purga (U). A la izquierda, la parte superior del filtro (Entrada). A la derecha, parte inferior del filtro (Salida)

Procedimiento de operación:

- Cerrar la llave de paso al segundo tanque (marcada con tres líneas de descarga en la imagen) y abrir la válvula de purgado (U). Operar de esta manera los primeros 20 segundos.
- Invertir la posición de las llaves mencionadas en el paso anterior y operar de esta manera el resto del tiempo.

Mantenimiento:

Con el fin de alargar lo más posible la vida útil de los agregados, deben realizarse retrolavados cuando se detecte que la tasa de filtrado de 3.8 litros por minuto ha disminuido a menos de medio litro, lo cual se puede verificar con ayuda de la válvula de purgado. El procedimiento para llevar a cabo un retrolavado es el siguiente.

- Cerrar las llaves de operación y de purgado (U) y abrir las dos llaves de retrolavado (R).
- Conectar la llave de retrolavado que se encuentra en la parte inferior (aquella marcada con la flecha que entra) ya sea a la red de abastecimiento municipal o a otra fuente de agua potable.
- Hacer pasar un gasto de entre 1.5 y 2 litros de agua a través del filtro. Puede verse que éste circula en dirección contraria a la operación.
- La llave de salida del retrolavado puede estar conectada al drenaje -lo cual es lo óptimo- o puede vaciarse el desperdicio en un recipiente grande.
- Una vez que se observe que el recurso que sale, tiene características parecidas al agua potable terminar el retrolavado.

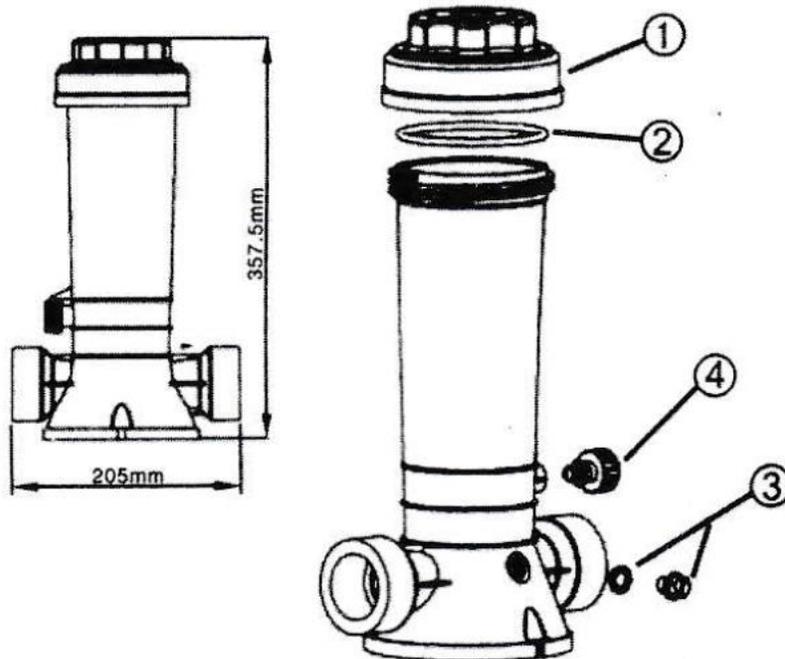
Para labores de mantenimiento mayores, es posible desensamblar el dispositivo. Esto se realiza desde abajo hacia arriba, comenzando con las dos tuercas unión de la parte EI.

Preguntas frecuentes:

- ¿Por qué es necesario operar con agua limpia cuando es la primera vez que se usa el filtro?
Para llevar a cabo la limpieza de los agregados al interior del filtro, principalmente el carbón activado.
- ¿Qué ocurre si se excede el gasto de 3.8 litros por minuto a la salida del filtro?
Dos cosas: pérdida de arena y el agua no será tratada de manera adecuada, es decir la remoción de partículas en el agua cruda no se llevará a cabo.
- ¿Por qué se deben realizar retrolavados?
Para limpiar el interior del filtro y así poder seguir trabajando a la mayor tasa posible y evitar el riesgo de contaminar de nueva cuenta el recurso tratado con los lodos que se encuentran a lo largo del lecho filtrante.
- ¿Se puede realizar un retrolavado antes de que la tasa de filtrado sea menor a medio litro?
Sí. La tasa de 0.5 litros es el límite.
- ¿Cómo se conecta el filtro para realizar un retrolavado?
Se puede conectar de manera fija (con tubería) o desmontable (con manguera) a cualquier fuente de agua potable. Sólo se debe regular el gasto como se indica.

Dosificador de pastillas de tricloro

La desinfección del agua de lluvia se lleva a cabo con ayuda del dosificador Fibropool® FC 200, el cual está diseñado originalmente para trabajar con albercas. Al interior del dispositivo se colocan tabletas de tricloro estabilizado al 89% de 3" de diámetro, mismas que son de baja disolución. De esta manera se crea una solución cloradora que se regula a través de la válvula con la que cuenta el dosificador. Una vez conectado el FC 200, sólo resta añadir las tabletas de tricloro y regular el paso de la solución cloradora para así añadir cloro y generar un residual de protección.



Esquema del dosificador FC 200 elaborado por el proveedor

Antes de la operación:

- Abrir la tapa y colocar tres tabletas de tricloro estabilizado de 3" de diámetro de lenta disolución. Si se ha operado anteriormente, usar guantes, cubrebocas y lentes de seguridad.
- Cerrar la tapa perfectamente.
- Ajustar la válvula dosificadora en "FULL".
- Operar el sistema de tratamiento por un minuto, sólo para que haya agua al interior del dispositivo.
- Esperar dos horas para que la solución se concentre lo suficiente.

Procedimiento de operación:

Dada la naturaleza automatizada del dispositivo, durante la operación no se realiza otra acción. Tras finalizar la operación, ajustar la válvula en "0". Es altamente recomendable contar con un equipo de medición de cloro residual libre para albercas para así monitorear el nivel de éste en el agua a la salida del tren de tratamiento.

Mantenimiento:

No se requiere mayor mantenimiento bajo condiciones de operación normales. Sólo es recomendable drenar el excedente de la solución cloradora al interior si no se accionará el sistema de tratamiento en un tiempo mayor a dos días.

Preguntas frecuentes:

- ¿Puedo colocar más de tres tabletas de tricloro?
Sí, pero deberá buscarse una posición de la válvula de dosificación y tiempo de contacto que permitan llevar a cabo la cloración dentro del rango establecido para un consumo sin riesgos. Por esta razón, no es recomendable. La misma respuesta aplica para otra posición de la válvula al inicio de la operación.
- ¿Puedo colocar al interior tabletas de hipoclorito de calcio?
Sí, pero nunca debe colocarse una combinación de tabletas de tricloro con tabletas de hipoclorito de calcio u otros agentes desinfectantes. Se recomienda siempre usar tricloro estabilizado.
- ¿Por qué se debe drenar el excedente si el sistema se encuentra en paro de más de dos días?
Debido a la alta concentración que puede alcanzar la solución cloradora, misma que puede ser peligrosa al momento de reanudar la operación en caso de no drenar.
- ¿Cómo se drena el dosificador?
El dispositivo cuenta con un tornillo de drenado, por lo cual sólo es necesario un desarmador plano. Esto se debe realizar con precaución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, D. (1 de Septiembre de 2017). *Dirección General de Comunicación Social (DGCS) UNAM*. Obtenido de http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2017_567.html
- American Society of Civil Engineers; American Water Works Association. (1990). *Water treatment plant design*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- American Water Works Association; American Society of Civil Engineers. (2012). *Water Treatment Plant Design*. United States of America: McGraw-Hill.
- Australian Bureau of Statistics. (14 de Mayo de 2016). *Australian Bureau of Statistics*. Obtenido de <http://www.abs.gov.au/ausstats/abs@.nsf/Latestproducts/4610.0Main%20Features22013-14?opendocument&tabname=Summary&prodno=4610.0&issue=2013-14&num=&view=>
- Australian Government. (27 de Agosto de 2019). *Your Home*. Obtenido de <http://www.yourhome.gov.au/water>
- Ball, S. (1929). *A Topographical Dictionary of Ancient Rome*. Londres: Oxford University Press.
- Banco de México. (24 de Febrero de 2019). *BANXICO*. Obtenido de <http://www.anterior.banxico.org.mx/divulgacion/glosario/glosario.html>
- Banco Mundial. (2013). *Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?* México, D.F.: Banco Mundial.
- Banco Mundial. (24 de Febrero de 2019). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?end=2017&start=1960&view=chart>
- Bard, K., & Blake, S. (1999). *Encyclopedia of the archaeology of ancient Egypt*. Boston: Routledge.
- Botton Beja, F. (2008). *China: su historia y cultura hasta 1800*. México, D.F.: El Colegio de México, Centro de Estudios de Asia y África.
- Burns, E. (2009). *Repensar la Cuenca: La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (24 de Marzo de 2016). Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (6 de Junio de 2019). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. *Diario Oficial de la Federación*.
- Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M., Friedler, E., DeBusk, K., . . . Han, M. (2017). *Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives*. Catania: Elsevier Ltd.
- Ceja, D. M. (2018). *Análisis del comportamiento de las características más representativas de calidad del agua de lluvia durante una tormenta: Caso de estudio VIS CASA UNAM*.

- Ciudad de México: Tesis para obtener el grado de Especialista en Ingeniería Sanitaria. UNAM.
- Chick, H., & Watson, H. (1908). An investigation of the laws of disinfection/A note of the variation of the rate of disinfection with change in the concentration of the disinfectant. *Journal of Hygiene Vol. 8*, 92, 536.
- Chinchilla, R. (2020). *Planeación y diseño conceptual de un sistema domiciliario para tratamiento de agua de lluvia en la CDMX. Caso de estudio: VIS CASA UNAM*. Ciudad de México: Tesis para obtener el grado de Ingeniero Civil. UNAM.
- Clark, M., & Smith, F. (1988). Wet and dry deposition of Chernobyl releases. *Nature* 332, 245 - 249.
- CONAGUA. (2016). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. Ciudad de México: CONAGUA.
- CONAGUA. (2018). *Atlas del agua en México*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Numeragua*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (25 de Marzo de 2019). *Gobierno de México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-para-captacion-de-agua-de-lluvia-y-ecotecnicas-en-zonas-rurales-procaptar>
- CONAPO. (13 de Agosto de 2019). *CONAPO*. Obtenido de http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Glosario_CONAPO
- CONEVAL. (2016). *Índice de Rezago Social 2015*. Ciudad de México: CONEVAL.
- CONEVAL. (19 de Febrero de 2019). *CONEVAL*. Obtenido de <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Glosario.aspx>
- Congreso de la Ciudad de México. (29 de Marzo de 2019). Ley del Derecho a los Servicios Públicos de Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado y Tecnología Hídrica de la Ciudad de México. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*.
- Consejo Nacional de Investigación. (1995). *El agua y la Ciudad de México*. México, D.F.: Consejo Nacional de Investigación.
- Craun, G. F. (1988). *Surface water supplies and health*. EE.UU.: American Water Works Association (AWWA).
- De Moraes, A. F., & Rocha, C. (2013). *Gendered waters: the participation of women in the 'One Million Cisterns' rainwater harvesting program in the Brazilian Semi-Arid region*. Toronto: Elsevier Ltd.
- Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Facultad de Ingeniería UNAM. (2017). *Manual de prácticas para el laboratorio de Tratamiento de Agua para Consumo Humano*. CDMX: FI UNAM.
- Dillon, P. (2005). *Future management of aquifer recharge*. Adelaide: Springer-Verlag.

- Dobrowksy, P., Mannel, D., Kwaadsteniet, M., Prozesky, H., Khan, W., & Cloete, T. (2014). *Quality assessment and primary uses of harvested rainwater in Kleinmond, South Africa*. Johannesburg: WaterSA.
- Droste, R. (1997). *Theory and practice of water and wastewater treatment*. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- El Economista. (18 de Enero de 2019). Gobierno de la CDMX presenta programa para captar agua pluvial en viviendas. *El Economista*.
- El Sol de México. (16 de Octubre de 2018). ¿El agua de lluvia es apta para el consumo humano? Aquí te lo explicamos. *El Sol de México*.
- Fisher-Jeffes, L. (2015). *The Viability of Rainwater and Stormwater Harvesting in the Residential Areas of the Liesbeek River Catchment, Cape Town (PhD Thesis)*. Cape Town: University of Cape Town.
- Furamai, H. (2008). *Rainwater and reclaimed wastewater for sustainable urban water use*. Tokio: Elsevier.
- GAPMINDER. (24 de Febrero de 2019). *GAPMINDER*. Obtenido de [https://www.gapminder.org/tools/#\\$state\\$time\\$value=2100&startOrigin=1980&endOrigin=2100&showForecast:true&endBeforeForecast=2019&delay:149;&entities\\$show\\$country\\$/\\$in@=rus&=chn&=bgd&=bra&=ind&=mex;;;&marker\\$axis_x\\$zoomedMin=1980&zoomedMax=2100;&axis_y\\$wh](https://www.gapminder.org/tools/#$state$time$value=2100&startOrigin=1980&endOrigin=2100&showForecast:true&endBeforeForecast=2019&delay:149;&entities$show$country$/$in@=rus&=chn&=bgd&=bra&=ind&=mex;;;&marker$axis_x$zoomedMin=1980&zoomedMax=2100;&axis_y$wh)
- GAPMINDER. (24 de Febrero de 2019). *GAPMINDER*. Obtenido de [https://www.gapminder.org/tools/#\\$state\\$time\\$value=2019;;&chart-type=barrank](https://www.gapminder.org/tools/#$state$time$value=2019;;&chart-type=barrank)
- García, B. (2013). *Caracterización del agua de lluvia captada en una edificación para su aprovechamiento con fines de sustentabilidad hídrica*. México D.F.: Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental. UNAM.
- García, H. (2012). *Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la Cd. de México*. México D.F.: Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental. UNAM.
- Garden Design Ideas. (27 de Agosto de 2019). *Garden Design IDEas*. Obtenido de <https://www.stpaulsgarwood.com/water-usage-uk.html>
- Gomes, U., Heller, L., & Pena, J. (2012). *A national program for large scale rainwater harvesting: an individual or public responsibility?* Brazil: Water Resource Management.
- Grandjean, A., & Campbell, S. (2004). *Hydration: Fluids for life*. Washington, D.C.: ILSI North America.
- Gutiérrez, A. (2017). *El Agua. Recurso natural de gran trascendencia para la vida*. Ciudad de México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX).
- H. Asamblea Legislativa del Distrito Federal. (16 de Junio de 2011). Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*.

- Han, M., & Mun, J. S. (2011). *Operational data of the Star City rainwater harvesting system and its role as a climate change adaptation and a social influence*. 서울특별시: IWA Publishing.
- Han, M., Kim, Y., Kabubi, J., Sohn, H.-G., & Nguyen, D.-C. (2016). *Community-based rainwater harvesting (CB-RWH) to supply drinking water in developing countries: lessons learned from case studies in Africa and Asia*. 서울특별시: IWA Publishing.
- Handia, L., Tembo, J., & Mwiindwa, C. (2003). *Potential of rainwater harvesting in urban Zambia*. Lusaka: Phys. Chem. Earth.
- HarperCollins Publishers. (2 de Marzo de 2019). *Collins Dictionary*. Obtenido de <https://www.collinsdictionary.com/dictionary/english/megacity>
- INEGI. (2015). *Cuestionario para viviendas particulares habitadas y población*. México: INEGI.
- INEGI. (2016). *Censos Económicos 2014: Ciudad de México*. México: INEGI.
- INEGI. (2016). *Encuesta Intercensal 2015. Principales Resultados*. México: INEGI.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de la Ciudad de México 2017*. Ciudad de México: INEGI.
- INEGI. (26 de Febrero de 2019). *Cuéntame... INEGI*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/default.aspx?tema=me&e=09>
- INEGI. (22 de Agosto de 2019). *INEGI*. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/glosario/default.html?p=eic2015>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (26 de Agosto de 2019). *Cuéntame... INEGI*. Obtenido de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>
- Isla Urbana. (25 de Marzo de 2019). *Isla Urbana*. Obtenido de <http://islaurbana.org/>
- Kaushik, R., Balasubramanian, R., & De la Cruz, A. (2012). *Influence of Air Quality on the Composition of Microbial Pathogens in Fresh Rainwater*. Ohio: American Society for Microbiology.
- Legorreta, J. (2006). *El Agua y la Ciudad de México. De Tenochtitlán a la Megalópolis del Siglo XXI*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
- Lye, D. (2002). *Health risks associated with consumption of untreated water from household roof catchment systems*. EE.UU.: Journal of the American Water Resource Association.
- Martin, A. (2000). *Apports nutritionnels conseillés pour la population française*. Paris: Tec & Doc Lavoisier.
- Masters, G., & Ela, W. (2008). *Introducción a la ingeniería medioambiental*. Madrid: Pearson Prentice Hall.

- Mati, B., Bock, T., Malesu, M., Khaka, E., Oduor, A., Nyabenge, M., & Oduor, V. (5 de Febrero de 2017). *World Agroforestry Centre*. Obtenido de <http://worldagroforestrycentre.net/downloads/publications/PDFs/MN15297.PDF>
- Mendez, C., Klenzendorf, B., Afshar, B., Simmons, M., Barret, M., Kinney, K., & Jo, K. M. (2010). *The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater*. Austin, TX: Elsevier.
- Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Turism. (27 de Agosto de 2019). *MLIT Japan*. Obtenido de https://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/water_resources/contents/current_state.html
- MLIT Japan. (7 de Febrero de 2017). *MLIT. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourims*. Obtenido de http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_fr2_000012.html
- Morris, C. (1975). Aspects of the quatitative assessment of germicidal efficiency. *Disinfection in Water and Wastewater*.
- Nichols, G., Williams, E., & Paola, C. (2007). *Sedimentary Processes, Environments and Basins: A Tribute to Peter Friend*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.
- OMS. (16 de Febrero de 2019). *Organización de Naciones Unidas*. Obtenido de <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/water/index.html>
- OMS. (17 de Febrero de 2019). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de https://www.who.int/features/factfiles/water/water_facts/es/index2.html
- Organización Meteorológica Mundial. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial (OMM).
- Piranesi. (23 de Febrero de 2019). *Roman Aqueducts*. Obtenido de <http://www.romanaqueducts.info/aquasite/>
- Real Academia Española. (6 de Marzo de 2019). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/?id=78yFVD7>
- Real Academia Española. (6 de Marzo de 2019). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/?id=NWgRXUA>
- Reséndiz Martínez, W. A. (2019). *Diseño y construcción de un dispositivo inteligente para la separación de primeras lluvias con fines de aprovechamiento en casa habitación*. Ciudad de México: Tesis que presenta para obtener el grado de Ingeniero Civil. UNAM.
- Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1995). *Unit operations and processes in environmental engineering*. Estados Unidos: PWS Publishing Company.
- Ruíz Priego, F. D. (2015). *Modelo y manual de operación para la prueba de tratabilidad de filtración*. México D.F.: Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil. UNAM.
- Samchully Co. (2 de Mayo de 2019). *삼천리*. Obtenido de <http://www.samchully.co.kr/customer/electricity/info/fee/charge1.do>

- Schuetze, T. (2013). *Rainwater harvesting and management – policy and regulations in Germany*. Berlin: IWA Publishing.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (7 de Agosto de 2009). NORMA Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría de Salud. (20 de Octubre de 2000). MODIFICACIÓN a la NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que debe Someterse el Agua para su Potabilización. *Diario Oficial de la Federación*.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. (2018). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017*. CDMX: Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.
- Silva Vieira, A., Weeber, M., & Ghisi, E. (2013). *Self-cleaning filtration: A novel concept for rainwater harvesting systems*. Florianópolis: Elsevier.
- Sincero, A., & Sincero, G. (2002). *Physical-chemical treatment of water and wastewater*. Baltimore: IWA Publishing/CRC Press.
- The Home Depot. (9 de Noviembre de 2019). *The Home Depot México*. Obtenido de <https://www.homedepot.com.mx/plomeria/bombas-y-equipo-hidroneumatico/bombas/motobomba-periferica-100211>
- UNESCO. (27 de Agosto de 2019). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el mundo*. Obtenido de <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf>
- United States Environmental Protection Agency. (2001). *Potential Contamination Due to Cross-Connections and Backflow and the Associated Health Risks*. Washington DC: United States Environmental Protection Agency (EPA).
- United States Environmental Protection Agency. (1 de Mayo de 2019). *EPA*. Obtenido de <https://www.epa.gov/heat-islands>
- United States Environmental Protection Agency. (27 de Agosto de 2019). *EPA WaterSense*. Obtenido de <https://www.epa.gov/watersense/how-we-use-water>
- United States Environmental Protection Agency. (4 de Agosto de 2019). *US EPA*. Obtenido de <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gases-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Zhu, Q., Gould, J., & Yuanhong, L. (2014). *Using every last drop: rainwater harvesting and utilization in Gansu Province, China*. Beijing: Waterlines.