



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Captación de Agua de Lluvia en la Ciudad de México

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

PRESENTA:
ADRIELLY NAHOMEE RAMOS ALVAREZ

TUTOR PRINCIPAL
M.I. FRANCISCA IRENE, SOLER, ANGUIANO, FACULTAD DE
INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Suárez Rocha Javier

Secretario: Dra. Flores De la Mota Idalia

1^{er}. Vocal: M. I. Soler Anguiano Francisca Irene

2^{do}. Vocal: Dra. Rodríguez Vázquez Katya

3^{er}. Vocal: Dra. Huerta Barrientos Aida

Ciudad Universitaria, CDMX

TUTOR DE TESIS:

M.I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO



FIRMA





Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Mecánica e Industrial
Departamento de Investigación de Operaciones
e Ingeniería Industrial

Tesis: Captación de agua de lluvia en la Ciudad de México

Para obtener el grado de Maestra en Ingeniería de Sistemas

Trabajo realizado por:

Ing. Adrielly Nahomeé Ramos Álvarez

Con la tutoría de:

M. en I. Francisca Irene Soler Anguiano

Hecho en México.

2021

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi alma máter por abrir un universo de posibilidades.

A la M.I. Francis Soler que con su apoyo y guía incondicional, su visión científica, humanitaria e ingenieril contribuyó a la realización de este proyecto.

A mis compañeros y “hermanos” académicos que han hecho esta etapa algo digno de contar a las siguientes generaciones.

A mis maestros que extendieron su conocimiento, experiencia y vocación para dotarnos de las herramientas que este mundo necesita.

A los miembros del jurado Dr. Juavier Suárez, Dra. Idalia Flores, Dra. Aida Huerta y Dra. Katya Rodríguez por su contribución a la mejora de este trabajo.

Dedicatoria

A Eliette y Jorge por sus desvelos, paciencia, amor y arroz con leche, vencimos.

A Lin por alimentarme el estómago y el alma.

A Francis por siempre confiar, escuchar y caminar conmigo.

A Carmen, Carlos P. por acompañarme en esta aventura.

A Carlos, David y Fer por hacer este viaje más emocionante.

And to our H.F. who has given me all.

Abstract

Water scarcity is increasing all over the world, according to the UN by 2050 half the population will suffer thirst. Governments, organizations, companies, and communities are fighting the problem, Singapore, Australia and China have created schemes that have changed their status in terms of water from survival to sustainability. Nonetheless, many countries have not been implementing enough actions towards a more sustainable resource management. Particularly Mexico's efforts are few and those that have been developed lack continuity, innovation and optimization tools to have a meaningful impact. For Mexico City's current hydric scenario it is urgent to take action to avoid a deeper environmental crisis. As a result, the present work describes 4 conceptual proposals for residential rainwater collection that by using Operations Research methodology and a User-Centered perspective, aim to reduce water well overexploitation and mitigate the effects of the current and future water crisis.

Resumen

La escasez de agua alrededor del mundo va en aumento, para 2050, la ONU estima que la mitad de la población sufrirá sed. Gobiernos, organizaciones, compañías y comunidades están tomando acciones para contrarrestar el problema. Singapur, Australia y China han creado esquemas que los han llevado de la sobrevivencia a la sustentabilidad en términos de agua. Sin embargo, muchos países no han implementado estrategias suficientes para un manejo sustentable del recurso. Particularmente, los esfuerzos de México son pocos y carecen de continuidad, innovación y herramientas de optimización que provean un impacto significativo. Con el escenario mexicano actual, las acciones son urgentes para evitar una crisis aún mayor. Por ello, el presente trabajo describe 4 propuestas conceptuales para la recolección de agua pluvial que al usar la metodología de Investigación de Operaciones y una perspectiva Centrada en el Usuario, se busca reducir la sobreexplotación de los acuíferos y mitigar los efectos de la crisis hídrica actual y futura.

Índice

Definición del proyecto	<u>13</u>
Introducción	<u>14</u>
Problemática	<u>14</u>
Objetivos y alcances	<u>15</u>
Capítulo 1. Antecedentes	
1.1 Panorama general del agua en el mundo	<u>17</u>
1.1.1 Acciones en el mundo (Sponge cities)	<u>19</u>
1.2 Problemática del agua en México	<u>23</u>
1.2.1 Acciones en México	<u>31</u>
1.2.2 El reto del agua en la CDMX	<u>35</u>
1.2.2.1 Acciones en Ciudad de Mexico	<u>37</u>
1.2.2.2 Captación de agua de lluvia en CDMX	<u>40</u>
1.3 Sistemas de captación de agua de lluvia en el mercado	<u>43</u>
1.3.1 Innovaciones tecnológicas	<u>44</u>
1.3.2 Empresas	<u>45</u>
1.3.3 Smart WATER	<u>49</u>
1.3.4 La brecha	<u>50</u>
1.4 Metodologías	<u>55</u>
	<u>56</u>

Capítulo 2. Sistema de agua de CDMX	<u>59</u>
2.1 Manejo/gobernanza del agua	<u>61</u>
2.2 Red de abastecimiento	<u>64</u>
2.2.2 Pozos	<u>70</u>
2.3 Urbanización// gobierno, empresas, usuario	<u>72</u>
2.3.1 Áreas verdes disminución con el tiempo	<u>73</u>
2.6 Nuevo enfoque de la CDMX respecto al agua	<u>74</u>
2.6.1 Captación de agua de lluvia	<u>75</u>
Capítulo 3. Caso de estudio	<u>79</u>
3.1 Villa Panamericana	<u>81</u>
3.2 Diagnóstico	<u>85</u>
3.2.1 Escenario actual	<u>90</u>
Capítulo 4. Propuesta	<u>103</u>
4.1 Consideraciones	<u>105</u>
4.2 Propuesta (sistemas)	<u>110</u>
4.2.1 Propuesta 1	<u>112</u>
4.2.2 Propuesta 2	<u>117</u>
4.2.3 Propuesta 3	<u>121</u>
4.2.4 Propuesta 4	<u>124</u>
Capítulo 5. Conclusiones, aprendizajes, trabajo a futuro	<u>127</u>
Referencias	<u>130</u>
Anexos	<u>140</u>

Índice de figuras

Figura 1. Gráfica de extracciones de agua	<u>20</u>
Figura 2. Mapa de estrés hídrico en el mundo	<u>21</u>
Figura 3. Gráfica de huella hídrica per cápita en diferentes países de 1997 a 2001	<u>22</u>
Figura 4. Circuito de agua en Singapur	<u>25</u>
Figura 5. Comparación entre WSUD y un sistema urbano común	<u>27</u>
Figura 6. Infiltración en un ambiente rural y uno urbano	<u>28</u>
Figura 7. Esquema del funcionamiento general de una Ciudad Esponja	<u>29</u>
Figura 8. Parque Yanweizhou en la ciudad de Jinhua, China	<u>30</u>
Figura 9. Valores medios anuales del volumen del agua	<u>32</u>
Figura 10. Mapas de explotación de acuíferos	<u>33</u>
Figura 11. Programa Nacional de Reforestación y Cosecha del Agua en México	<u>36</u>
Figura 12. Cuenca del Valle de México	<u>37</u>
Figura 13. Entre la inundación y la falta de agua	<u>38</u>
Figura 14. Aporte del Sistema Lerma a la Ciudad de México	<u>41</u>
Figura 15. Cosecha de agua	<u>42</u>
Figura 16. Alcaldías con sistemas de captación de agua de lluvia del gobierno	<u>43</u>
Figura 17. Sistema fotovoltaico de recolección y Sistema de colección de agua	<u>45</u>
Figura 18. Aparato para remover agua	<u>46</u>
Figura 19. Estructura de las nanoesponjas por la Universidad de Johannesburgo	<u>47</u>
Figura 20. Elementos que componen la síntesis de la nanoesponja	<u>48</u>

Figura 21. Sistema de captación Rotoplás en México	49
Figura 22. Sistema de captación NexLoop	50
Figura 23. Sensus y Valor Water, marcas de Xylem enfocadas en Smart Water	51
Figura 24. Satélite de Programa Copernicus	52
Figura 25. Mackenzie DataStream and CoCoRaHS	53
Figura 26. Järviwiki HUB	54
Figura 27. Aspectos de los sistemas de captación de agua	55
Figura 28. Diagramas de las metodologías utilizadas para el proyecto	56
Figura 29. Ciclos del proceso de diseño	57
Figura 30. Distritos del servicio hídrico en la Ciudad de México	62
Figura 31. Porcentaje de aguas residuales en CDMX	63
Figura 32. Caudal por fuente	64
Figura 33. Fuentes adicionales proyectadas	65
Figura 34. Recorrido del Sistema Cutzamala hasta la Ciudad de México	66
Figura 35. Flujo de agua residual por alcaldía	67
Figura 36. Flujo simplificado del Sistema de Aguas desde el Cutzamala hasta la Ciudad de México	68
Figura 37. Pozos actuales en la CDMX bajo la gobernanza de SACMEX	70
Figura 38. Infiltración de agua en el Valle de México	71
Figura 39. Urbanización de la CDMX entre 1952 y 2000	72
Figura 40. a) Áreas verdes en 2016 b) áreas verdes en 2020	73
Figura 41. a) Mancha urbana e hídrica 1800, b) mancha urbana e hídrica 1980 y 1995	74
Figura 42. Programa de Cosecha de Lluvia	75
Figura 43. Esquema simplificado del sistema de agua de la CDMX	77

Figura 44. Mapa de Unidad Habitacional Villa Panamericana, donde se observan las vialidades	<u>83</u>
Figura 45. Gráfica de porcentaje de unidades habitacionales construídos por década, desde 1940	<u>84</u>
Figura 46. Tubería con corrosión	<u>85</u>
Figura 47. Cuarto de bombas	<u>86</u>
Figura 48. a) tiempo de uso de regadera b) regaderas ahorradoras, c) regularidad agua, d) fugas de agua	<u>87</u>
Figura 49. Mapa indicando los pozos	<u>88</u>
Figura 50. Pozo Villa Panamericana	<u>89</u>
Figura 51. Diagrama de flujo para eventos discretos	<u>92</u>
Figura 52. Diagrama de flujo de dinámica de sistemas	<u>93</u>
Figura 53. Gráfica de consumo de agua con distribuciones ajustadas	<u>94</u>
Figura 54. Gráficas de consumo de agua con distribuciones ajustadas de las 8 secciones de la Villa P.	<u>95</u>
Figura 55. Esquema del método de eventos discretos	<u>96</u>
Figura 56. Representación 2D del modelo de simulación	<u>97</u>
Figura 57. Representación 3D del modelo de simulación	<u>98</u>
Figura 58. Gráficas de pozos y consumo	<u>99</u>
Figura 59. Gráfica de paros de válvula principal y tasa de corte de suministro de agua	<u>100</u>
Figura 60. Gráfica de número de paros de válvula principal y esquema del evento en funcionamiento	<u>101</u>
Figura 61. Fuga en cisterna principal	<u>102</u>
Figura 62. Mapa de estaciones de observación hidrológica	<u>105</u>
Figura 63. Localización de instalaciones de sistemas para Sección 1	<u>115</u>
Figura 64. Localización de instalaciones de sistemas para todas las secciones	<u>116</u>

Figura 65. Matriz de adyacencia	<u>119</u>
Figura 66. Árbol de expansión mínima de zonas de captación a cisterna principal.	<u>120</u>
Figura 67. Asignación de sitios de captación a pozos de infiltración	<u>123</u>
Figura 68. Ruta más corta para servicio de mantenimiento	<u>125</u>

Definición del proyecto

*E*l Valle de México siendo la quinta megalópolis más poblada del mundo enfrenta los retos de disponibilidad y gestión del agua más importantes. Un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México indica que dentro de 10 años la mega urbe habrá llegado al conocido Día Cero (UNAM, 2019) que experimentó Ciudad del Cabo, en el que el recurso hídrico no será suficiente para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes. Actualmente se estima que en México el 75% de las personas experimentan irregularidades en el servicio cotidiano de agua, que incluyen cortes de agua de períodos cortos o largos de tiempo, falta de abastecimiento regular por medio de pipas, saneamiento inadecuado, entre otros. También 100 de los 605 pozos principales de la ciudad son sobreexplotados con 18 l/s causando el hundimiento del suelo en 30 cm al año. Aunado a esto, el 20% de agua residual municipal pasa por algún proceso de potabilización para su reutilización (INEGI, 2017) y el resto regresa a los cuerpos de agua causando una contaminación severa en la mayoría de ellos. Sin dejar de lado que el 40% del agua potable se pierde debido a fugas en el sistema de abastecimiento.

Se espera que para el 2035 la ciudad tenga un aproximado de 24 millones de habitantes (FORBES, 2018) necesitando 7 mil millones de litros de agua por día y que el aumento de la demanda de agua sea del 55%. Por lo que, ante el manejo actual del agua, la ciudad se acerca aceleradamente a una crisis sin precedentes en materia económica, integridad ambiental, de salud pública, de dignidad y de derechos humanos para sus habitantes además de todos aquellos que dependan de los servicios y productos que provee, al ser ésta el centro económico e industrial de un país que tan sólo para 2001 exportaba más de 21 mil millones de metros cúbicos de agua al año en productos. A pesar de las acciones para salvaguardar el recurso, los esfuerzos siguen siendo mínimos en comparación al porvenir.

Esto es notable en el hecho de que el Valle de México colecta, en dos de 16 alcaldías y 59 municipios, tan sólo 1 de 100 litros de agua de lluvia a pesar de que la precipitación pluvial de la ciudad es una de las más altas. Si bien el problema del agua es mayúsculo, la captación de agua de lluvia podría suponer una solución factible para aumentar la disponibilidad y accesibilidad de agua aceptable, saludable para la vida digna de los habitantes, además de promover una mejor gestión del agua para no sólo contrarrestar los efectos de la crisis hídrica ya existente sino para crear un modelo de manejo de agua sustentable.

Objetivos y alcances

Considerando lo anterior el objetivo general del proyecto es proponer un sistema de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México para reducir la sobreexplotación de los acuíferos y mitigar los efectos de la crisis existente y futura.

Si bien esto representa un reto considerable, se plantearon objetivos específicos para su cumplimiento. Empezando por realizar un diagnóstico de los problemas más importantes, desde la perspectiva técnica como la social. Analizar los sistemas actuales a nivel local y general de captación de agua implementados en la ciudad. Identificar las zonas de lluvia y los lugares más apropiados para la captación de agua a fin de presentar propuestas de solución factibles que puedan ser implementadas de manera eficiente.

Debido a la vastedad del tema abordado, junto con los retos asociados a él, el alcance del presente trabajo se limita a obtener propuestas de solución conceptuales para la captación de agua pluvial de manera eficiente que tome en cuenta la parte técnica y social.

Al combinar las metodologías de Investigación de Operaciones con Diseño Centrado en el Usuario se tendrá un panorama más amplio de la problemática que ayudará a proponer una solución que vincule la parte técnica con la social. Dentro de ello se podrán identificar los elementos críticos para la captación de agua pluvial que no solo satisfaga las necesidades de los habitantes de la ciudad a corto, mediano y largo plazo sino que provea el entorno para el progreso en términos económicos y de derechos humanos.

Por lo que se requerirán las herramientas propias de la Investigación de Operaciones para abordar el tema desde una perspectiva sistémica al utilizar Simulación orientada a objetos, dinámica de sistemas, teoría de redes, teoría de la localización, programación lineal, métodos exactos para la obtención de árboles de expansión mínima y métodos heurísticos en la búsqueda de las rutas más cortas.

Al conjuntar estos conocimientos, el presente trabajo pretende ser un aliciente para tomar acciones para garantizar la seguridad hídrica de la población, desde la parte individual hasta la colectiva.

1.

Antecedentes

*L*a Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América tiene un interés especial por encontrar agua fuera del planeta Tierra por ser ésta el “elixir de la vida”. Si bien el agua es reconocida como parte fundamental de la vida desde el inicio de las civilizaciones, no fue sino hasta 1975 que la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) inició el Programa Internacional Hidrológico; 27 años después en 2002 el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales afirmó en el artículo I.1 de la Observación No. 15 que “El derecho humano al agua es indispensable para una vida humana digna” (ONU, 2002) pero pasaron 8 años más para que en 2010 se reconociera, a través de la Resolución 64/292 de la Organización de las Naciones Unidas “...el derecho humano al agua y saneamiento, reafirmando que el agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.” (ONU, 2010).

Considerando la cantidad de años que pasaron para declarar y reconocer el derecho humano al agua potable, no es de extrañar que la administración de la misma enfrentara deficiencias notables. Por ello, el panorama actual y futuro del recurso a nivel mundial es más que desalentador, tan solo al observar la estadística de 500 mil muertes al año causadas por la contaminación del agua (OMS, 2019), se puede tener una idea de la gravedad de la situación. Por tanto, este capítulo enmarca las circunstancias globales y locales junto con las acciones más importantes entorno a la disponibilidad, calidad y acceso al agua.

1.1 Panorama general del agua en el mundo

Actualmente el mundo enfrenta retos monumentales en relación a la disponibilidad y manejo de los recursos naturales esenciales para la vida ante un acelerado crecimiento de la población. La Organización de las Naciones Unidas estima que en los próximos 30 años el número de habitantes aumentará en 2,000 millones, lo que representa el 27% de la población global (ONU, 2019). De acuerdo con el esquema actual de administración de los recursos y las perspectivas de incremento poblacional, se estima que la cantidad de recursos requerida superará por mucho la disponible. Tan sólo para 2030 se espera tener un déficit de 40% del agua global (ONU Agua, 2020).

Si bien el aumento poblacional es una de las razones por las que hay escasez de recursos, particularmente de agua, existen factores importantes que influyen directamente en ella, tal como la degradación de los ecosistemas, el cambio climático, el manejo de aguas residuales, la gobernabilidad del agua, contaminación, entre otros más.

Las condiciones de disponibilidad, calidad y accesibilidad de agua hoy en día, son preocupantes. Considerando que el agua es indispensable para una vida digna, el que 2 mil millones de personas beban agua contaminada con heces, mientras 785 millones no tengan siquiera acceso directo a servicio de agua bebible y que el agua contaminada sea causante de 485 mil muertes al año por diarrea (ONU Agua, 2015), permite visualizar la crisis hidrológica que ha estado presente durante generaciones y que se intensifica con el paso de los años. Es una crisis que, de acuerdo con Edward B. Barbier en su libro *The Water Paradox*, "... es predominantemente ... del manejo pobre e inadecuado del agua" (Barbier, E., 2019), más allá de una crisis por falta de agua.

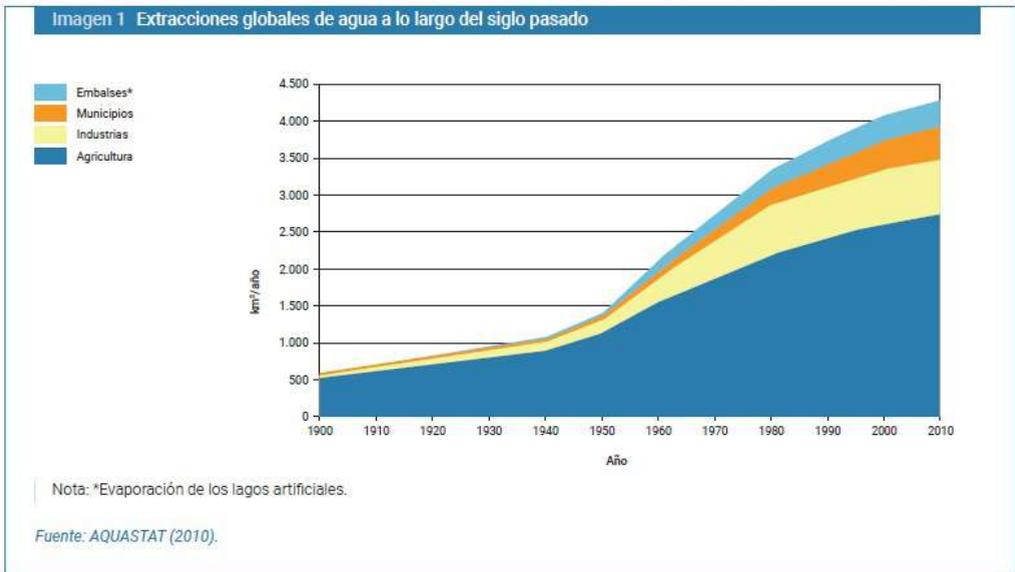


Figura 1. Gráfica de extracciones de agua (ONU Agua, 2020.)

Esto es notable en las estadísticas del agua en zonas urbanas donde generalmente se tiene una mejor cobertura de servicios hidrológicos de calidad. Desde 1990 hasta 2012 el número de personas carentes de servicios hidrológicos aumentó un 40%, pasando de 541 millones a 754 millones. Además el 75% de los hogares con conexión a alacantarillado puede no recibir tratamiento adecuado. De igual forma, la Organización Mundial de la Salud (OMS) prevee que la demanda de agua mundial crezca alrededor de 50%. Aunado a esto, la industrialización, el crecimiento de las ciudades, el desperdicio de recursos han provocado que el estado de salud de la biodiversidad disminuya en 30%, en un período de 42 años, desde 1970 hasta 2012 (ONU Agua, 2015). Con ello se pierden importantes procesos naturales de limpieza y saneamiento del agua que reducen significativamente su calidad y disponibilidad, además aumentan los riesgos asociados a desequilibrios ambientales.

Otro elemento importante en la crisis actual y futura del agua es la extracción desmedida del recurso que, como se observa en la figura 2, ha aumentado 9 veces en poco más de 100 años, respecto a una población mundial que ha crecido 4 veces en el mismo período.

Por ello, varias regiones en el mundo encaran niveles alarmantes del denominado *estrés hídrico*, el cual es definido por la ONU como “la confiabilidad del abastecimiento de agua en términos de disponibilidad (cantidad), calidad afectada por la contaminación y accesibilidad ...” (ONU Agua, 2020, p. 98). En otras palabras, el estrés hídrico se refiere precisamente a que la demanda de agua es mayor a la cantidad disponible. La figura 2.2 muestra las zonas con estrés hídrico severo, en gran parte de Asia, Europa, Norteamérica y parte de África.

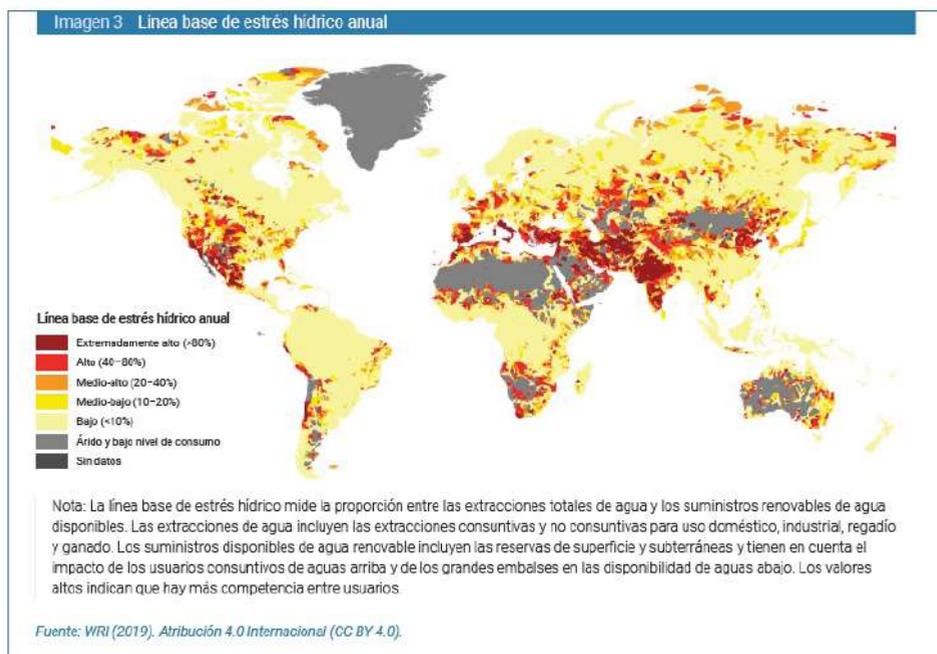


Figura 2. Mapa de estrés hídrico en el mundo (ONU Agua, 2020)

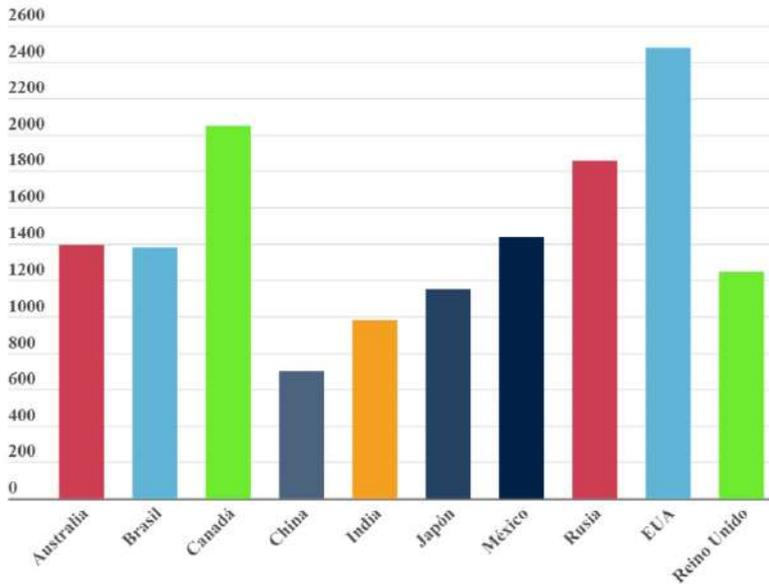


Figura 3. Gráfica de huella hídrica per cápita en diferentes países de 1997 a 2001 [Obtenida de tabla en (Hoekstra, 2009)]

El estrés hídrico en el contexto económico, llevaría al agua, según Hoekstra y Chapagain “...a adquirir valor”, por el simple hecho de ser un bien escaso (2009). Por lo que, al tener un valor estaría sujeta a las leyes de oferta y demanda haciéndola accesible sólo para quienes puedan pagarla, lo que iría contra el objetivo de hacerla universalmente asequible. Esto representa una amenaza seria en términos económicos, de salud pública y de derechos humanos en países cuya *huella hídrica* anual por persona, o sea el agua requerida por persona en relación con sus patrones de consumo (Hoekstra, 2009), es de más de 1,500 metros cúbicos, en el caso de Estados Unidos, Canadá, Rusia, por ejemplificar algunos. La figura 3 muestra la gráfica de la huella hídrica de algunas potencias mundiales y países en vías de desarrollo como Brasil y México de 1997 a 2001, algunas de las cuales han aumentado 400 metros cúbicos al año por persona (Caballero, 2018).

Debido a que estos países proveen al resto del mundo insumos importantes, no sólo ellos se ven afectados por el creciente riesgo a quedarse sin agua sino todos aquellos con quienes tengan cualquier vínculo comercial. De acuerdo con la OMS “De aquí a 2025 la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua” (OMS, 2019). Por ello, en un mundo que administra tan pobremente los recursos más esenciales para la vida y se encuentra entre el derroche y la escasez, es necesario frenar el, llamado por Barbier, “ciclo vicioso del uso excesivo del agua y la escasez” (Barbier, 2019) en caso de que el mundo quiera evitar la mayor crisis económica, social y de salud que ha enfrentado dentro de 5 años.

1.1.1 Acciones en el mundo

Teniendo todo ello en mente, diversos gobiernos, organizaciones, empresas, instituciones, universidades, individuos de la sociedad civil han puesto en marcha acciones para frenar los efectos de la crisis hídrica ante las fatídicas perspectivas a nivel mundial.

Algunas de las acciones propuestas por los expertos son: educar a la población para cambiar estilos de vida y de consumo, incentivar la investigación y la innovación para desarrollar tecnologías más eficientes de conservación y saneamiento de agua, mejorar las prácticas del sector agropecuario e industrial, centrar la gobernanza del agua en comunidades y asociaciones, desarrollar políticas más robustas y centradas en las necesidades entorno al agua, reciclar y reutilizar agua, promover un costeo justo del agua, construir modelos internacionales y de cooperación institucional, administrar los ecosistemas de manera holística, mitigar la huella hídrica de las corporaciones, mejorar la distribución de la infraestructura, asignar recursos públicos comunitarios para un acceso equitativo, transferir tecnología para proyectos hídricos en países en vías de desarrollo, mitigar el cambio climático, controlar el desmedido crecimiento poblacional y aumentar la captación de agua pluvial.

Uno de los países que implementó estas medidas fue Singapur al cambiar radicalmente su esquema hídrico convirtiéndose así en un líder mundial en el manejo del agua. Su énfasis equitativo entre distribución y la demanda, la planificación a largo plazo, los esquemas legales y regulatorios efectivos, la fuerza de trabajo experimentada y una administración centrada en la agencia nacional del agua, *Public Utilities Board* (PUB) ha permitido que se centre en los recursos para la distribución en su totalidad, tomando en cuenta otros aspectos tal como su calidad, producción y costos de manejo. En 1972 desarrollaron el *Water Master Plan* con el objetivo de diversificar las fuentes de agua para cubrir las necesidades futuras. Además de recolectar agua pluvial e importar agua de Malasia, ha desarrollado formas de obtener agua a partir de reciclar, desalinizar agua lo que ha resultado en un sistema de distribución robusto conocido como Los 4 grifos nacionales (*Four National Taps*). Estos son:

1. Captaciones locales de agua pluvial a través de drenajes especiales, canales, ríos y estanques que la almacenan en 17 depósitos para después tratarla. Se estima que 2/3 del agua en Singapur proviene de esta fuente.
2. Agua importada del Río Johor en el que el gobierno firmó con Malasia el tratado para extraer 250 millones de galones al día de 1962 hasta 2061.
3. Proceso NEWater el cual convierte el agua de desecho en agua de alta calidad, por lo que aún en sequías supone una fuente confiable de agua. Actualmente estas plantas satisfacen el 40% de las necesidades de Singapur, esperando que para 2060 sea el 55%.
4. Agua desalinizada, que a pesar del costo energético y monetario que representa, produce 100 millones de galones al día, o sea el 25% de las necesidades del país, para 2060 está contemplado la construcción de más plantas desalinizadoras que suplan en 30% las necesidades hídricas de sus habitantes. (PUB, 2018)

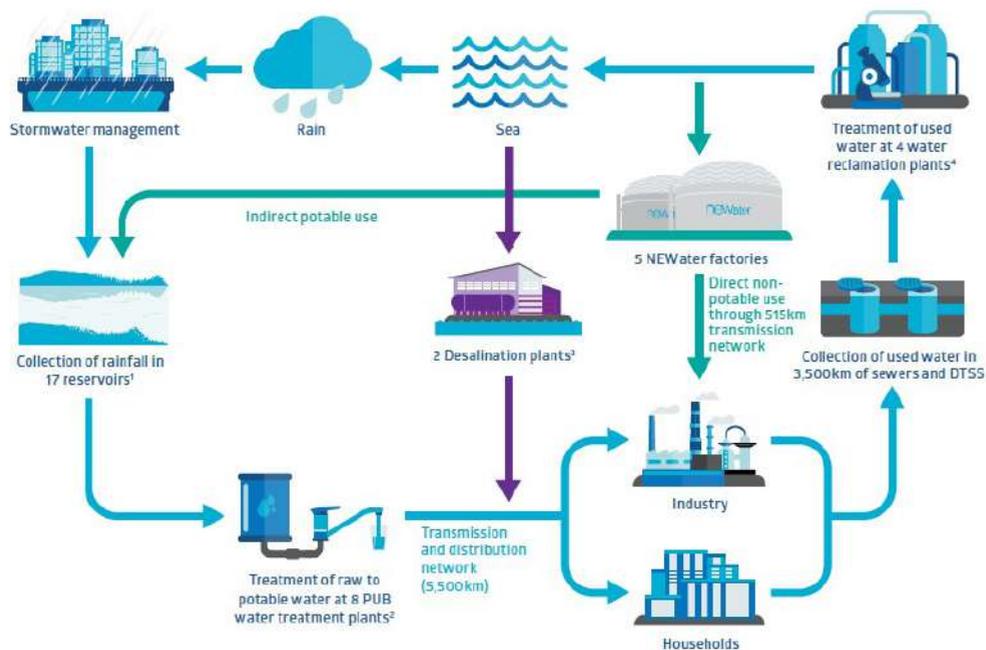


Figura 4. Circuito de agua en Singapur [Imagen de (PUB, 2018)]

La figura 4 presenta la dinámica del circuito del agua con los 4 tipos de fuentes, cada una aprovechada para minimizar el desperdicio. Debido a este cambio de esquema y una implementación diligente de las medidas el panorama “...pasó de la sobrevivencia a la sustentabilidad” (PUB, 2018). El énfasis en políticas y metas definidas como recolectar cada gota de agua, el reuso ilimitado del agua y la desalinización de una cantidad cada vez mayor de agua de mar, han permitido que a pesar de sus limitantes, Singapur haya desarrollado un manejo más equitativo y eficiente del agua. Optimizando los recursos disponibles, dependiendo menos de las fuentes no sustentables y garantizando la disponibilidad, acceso y calidad de agua para las generaciones futuras.

Si bien Singapur ha sentado precedente en el manejo sustentable del agua, algunos otros países han cambiado sus paradigmas para adoptar prácticas más sustentables en la administración del recurso. Estas prácticas se presentan en esquemas con diferentes nombres como *Best Management Practices* en Estados Unidos, *Water Sensitive Urban Design* en Australia, *Sustainable Urban Drainage System* en Reino Unido y *Sponge City* en China.

Todos ellos con sus particularidades pero con objetivos en común de integrar los elementos del sistema hídrico, implementar sistemas que puedan manejar instancias centralizadas y descentralizadas, además de crear servicios ecológicos múltiples en zonas urbanas (Nguyen et. al, 2020).

Estados Unidos de América con su programa Best Management Practices ha puesto en marcha diversas acciones para la conservación del agua. La labranza conservacional para reducir el escurrimiento de agua y la erosión de la tierra; la administración de las cosechas basada en el uso eficiente de los nutrientes, el manejo de los pesticidas y de sistemas de irrigación para aumentar su eficiencia reduciendo así una de las fuentes más grandes de contaminación de los cuerpos de agua superficiales, uso eficiente de torres de enfriamiento, inodoros ahorradores, sistemas de calentadores , regaderas, tinas para minimizar el desperdicio de agua, son algunos de los programas que el gobierno ha activado para el aprovechamiento del agua.

El programa federal busca fuentes alternativas de agua que representen una mejora considerable en términos de sustentabilidad. Las fuentes que destacan son: la recolección de agua pluvial, el agua de desecho tratada, agua gris, capturada por condensación, la generación de agua atmosférica, agua desechada por procesos de purificación y agua desalinizada. (Federal Energy, 2020).

Por su parte, Australia con el *Water Sensitive Urban Design* integra la administración del agua inspirado en los sistemas naturales con el objetivo de minimizar los impactos negativos en el ciclo del agua, además de aprovechar los cauces originales de ésta. A diferencia de algunos sistemas en el mundo, su sistema de captación de agua pluvial al tratar el agua en el sitio de su recolección reduciendo costos y haciendo un uso más eficiente del espacio disponible para el reuso del agua en el sitio, evitando también fuertes caudales en avenidas y removiendo contaminantes. Los beneficios asociados van desde proteger y mejorar los sistemas naturales en ambientes urbanos, mejorar la calidad del agua drenada, disminuir el riesgo de inundaciones, hasta minimizar los costos de infraestructura (Melbourne Water, 2013). La figura 5 muestra la diferencia entre el *Water Sensitive Urban Design* que promueve una mejora natural del sistema y un diseño urbano convencional que entre otras cosas aumenta la erosión de la tierra y la contaminación de los cuerpos de agua.

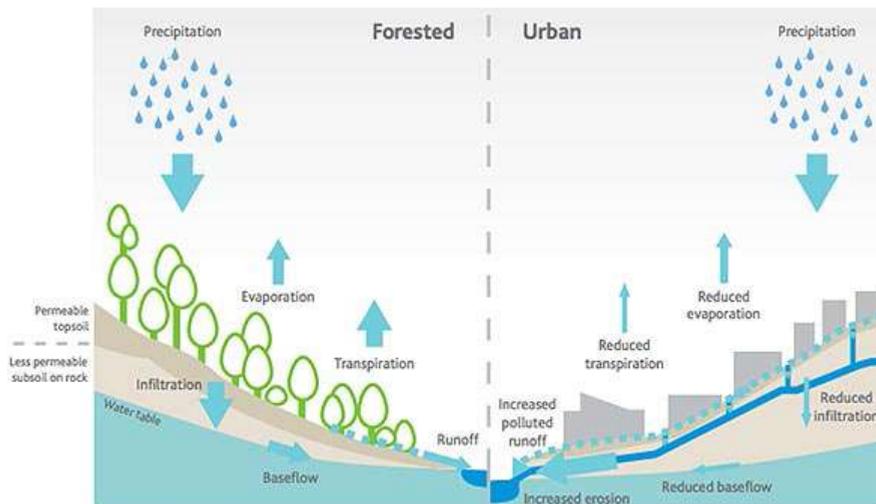


Figura 5. Comparación entre WSUD y un sistema urbano común [Imagen de (Melbourne Water, 2017)]

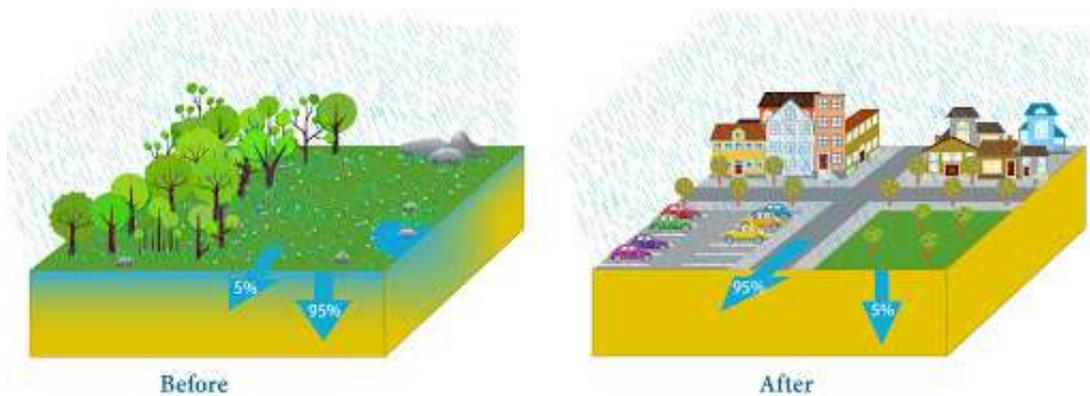


Figura 6. Infiltración en un ambiente rural y uno urbano
 [Imagen de (Sustainable Hydrology, n.a.)]

El Reino Unido mediante el programa Sustainable Urban Drainage System, ha puesto en práctica técnicas para administrar de forma eficiente la distribución y recuperación de agua mediante cuatro etapas. La primera el control de fuente en el que disminuyen el volumen de agua entrando a la red de drenaje o a los ríos al interceptar el agua en techos para su subsecuente uso, almacenamiento o evapotranspiración. La segunda con pasos de pre-tratamiento en ciénagas con vegetación o zanjas de filtrado para remover contaminantes de la superficie del agua antes de su descarga a los acuíferos. La tercera etapa consiste em sistemas de retención que retrasan la descarga al proveer almacenamiento en humedales, cuencas de retención y estanques. Finalmente los sistemas de infiltración que hacen alusión a la recarga natural permitiendo que el agua regrese a la tierra (BGS, n.a.). Esto con el objetivo de acercarse más al modelo natural en el que, como se observa en la figura 6, hay un mayor porcentaje de infiltración que permite la filtración y purificación del agua junto con una recarga sustentable de los cuerpos de agua.

Uno de los esquemas más prominentes y de mayor impacto en el mundo es la puesta en marcha de las *Sponge Cities* (Ciudades Esponja) en China. Ciudades como Shenzhen, Guangxi, Yinchuan, Yuelai, Liangshuihe y Foshan están cambiando radicalmente sus prácticas hídricas al desarrollar infraestructura, implementar tecnologías y procedimientos para el aprovechamiento holístico del agua. Se enfocan en modelar la administración hídrica entorno a las interacciones de los elementos del sistema en la dinámica urbana, considerando no sólo la infraestructura y la tecnología sino también la vulnerabilidad hídrica, el cambio climático, la factibilidad económica, social y ambiental (Nguyen et. al., 2020).

Es importante mencionar que las Ciudades Esponja a diferencia de otros esquemas entrelazan los modelos de tratamiento, distribución del agua junto con análisis multicriterio del estado de los cuerpos de agua para un manejo más integral y seguro.



Figura 7. Esquema del funcionamiento general de una Ciudad Esponja [Imagen de (Shun Chan, 2018)]



*Figura 8. Parque Yanweizhou en la ciudad de Jinhua, China
[Imagen de (Business Insider, 2017)]*

La implementación de este esquema requiere de inversiones importantes, por lo que el proceso requiere 4 fases esenciales:

1. Analizar el contexto regional para identificar los problemas, analizar la administración hídrica actual para trabajar con base en las necesidades del lugar.
2. Desarrollar escenarios basados en la densidad de población actual y futura de la ciudad, cambio climático y demanda de agua.
3. Seleccionar y desarrollar el modelado para simular el desempeño del programa.
4. Planear e implementar la Ciudad Esponja de acuerdo a la dinámica urbana y los resultados de las simulaciones.

El gobierno de la República Popular China ha empezado a implementar este programa en 30 ciudades diferentes con una inversión de más de \$12 mil millones de dólares (Garfield, 2017). Enfocándose no solo en la captación de agua pluvial sino en los desastres de inundación, la recuperación y la purificación de agua. Dicha esfuerzo promete beneficios económicos, sociales, de salud pública y naturales sin precedentes.

Los beneficios asociados a las ciudades esponja es que regulan el clima global y local, la calidad del aire, el flujo natural del agua en entornos urbanos, proveyendo un servicio más completo de purificación de agua. Por otro lado, se reducen riesgos de inundaciones, se regula la erosión del suelo, permitiendo que los nutrientes propios del ecosistema se restauren y puedan aprovecharse para restablecer el equilibrio natural.

Estas y otras soluciones han sido implementadas en todo el mundo para mitigar los efectos de la crisis hídrica con resultados favorables. No obstante, países en vías de desarrollo enfrentan realidades distintas en la administración del agua y están todavía lejos de realizar los cambios necesarios para mitigar los efectos de sus crisis nacionales de agua.

1.2 Problemática del agua en México

México es uno de los países que se ha caracterizado por los abundantes recursos naturales que posee; de hecho 12% de la biodiversidad del planeta se encuentra entre sus fronteras, por lo que se le considera un país megadiverso (PROMEX-ICO, 2016). La variedad de sus ecosistemas le ha provisto de 438 kilómetros cúbicos de agua dulce, lo cual representa el 0.1% de agua dulce del mundo, cada año tiene una precipitación normal de 740 mm, y 451 mil hectómetros cúbicos de agua renovable al año, convirtiéndolo en el vigésimo quinto país con mayores reservas de agua dulce (CONAGUA, 2018).

El promedio anual de precipitación pluvial en el país corresponde a un volumen de 1 millón 500 mil hectómetros cúbicos, un escurrimiento natural medio superficial interno de 300 mil hectómetros cúbicos, una evapotranspiración de más de 1 millón de hectómetros cúbicos, un escurrimiento natural medio superficial de más de 350 mil hectómetros cúbicos, una recarga de 92 mil hectómetros cúbicos. Los 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas “aportan el 39% del volumen de agua para usos consuntivos”, es decir el agua para consumo público, agricultura, industria autoabastecida y las termoeléctricas. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua en 2017, alrededor de 105 acuíferos estaban en condición de sobreexplotación, 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina (CONAGUA, 2018).

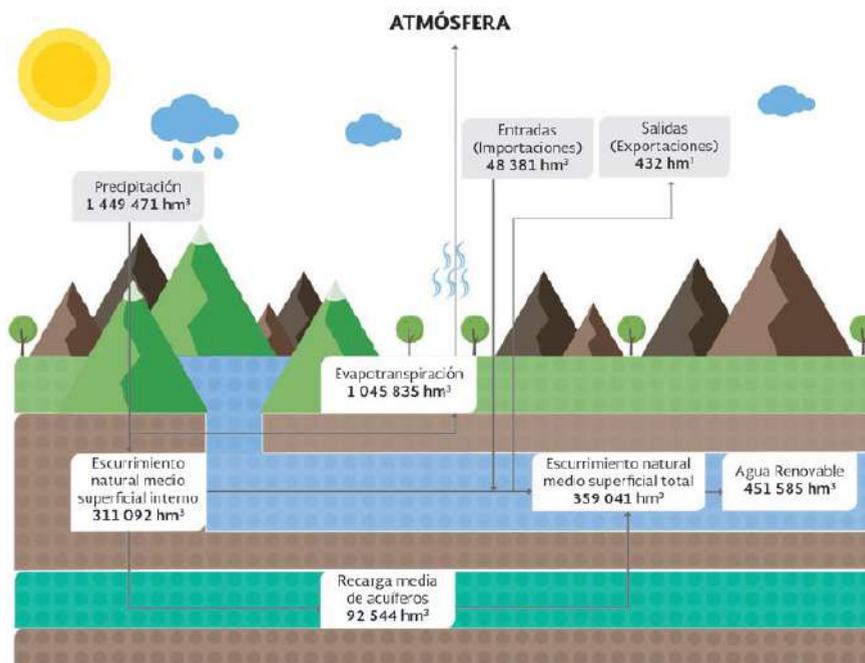


Figura 9. Valores medios anuales del volumen del agua (CONAGUA, 2018)]

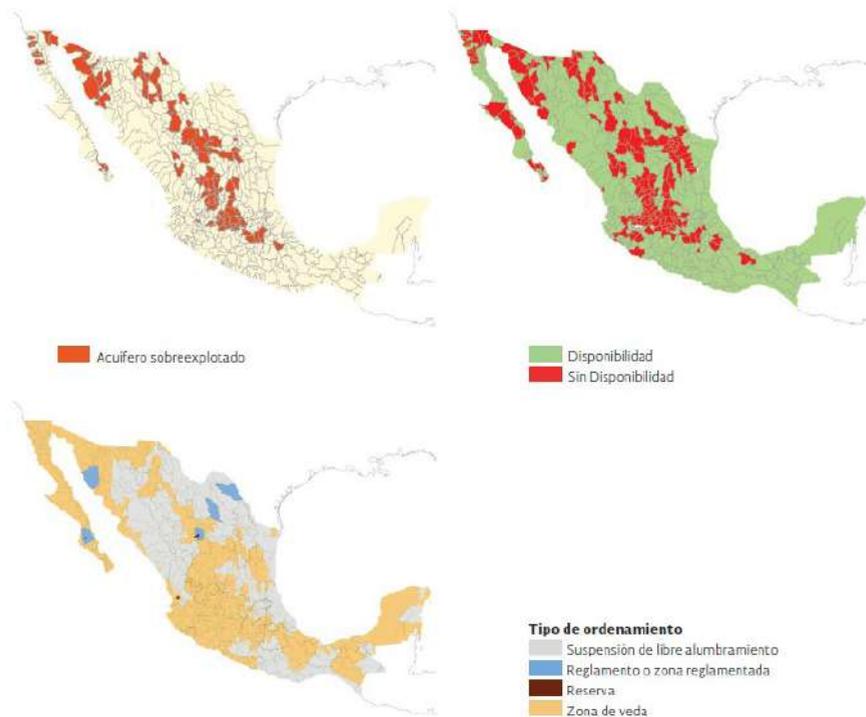


Figura 10. Mapas de explotación de acuíferos (CONAGUA, 2018)]

Si bien los recursos hídricos de México son abundantes en comparación con otras naciones, el grado de presión sobre ellos es altamente preocupante. Aunque el estrés hídrico promedio es del 19.5% y las aguas de Frontera Sur se mantienen sin estrés con un 1.7% de presión, las aguas del Valle de México tienen un porcentaje de estrés del 141.4%. Por lo que es notable que cuando menos 21 millones de habitantes no están esperando una crisis futura del agua sino que la han vivido a través de las consecuencias de un altísimo estrés hídrico (CONAGUA, 2018). La figura 10 muestra el grado de estrés hídrico en términos de acuíferos sobreexplotados.

A pesar de que desde 1910 se decretara la Ley sobre Aprovechamientos de Aguas de jurisdicción federal, en 1917 se dejara en claro la propiedad de las aguas y el papel rector del Estado, en 1926 se empezara a institucionalizar el manejo del agua, en 1972 se implementara la Ley Federal de Aguas (SEMARNAT, 2009), en 1989 se creara un organismo desconcentrado federal para diseñar la política de gestión del agua con la Comisión Nacional del Agua (Jímenez, et. al., 2010). La hidro-administración en México sigue teniendo carencias importantes en todos los aspectos, desde los censos de los acuíferos hasta el estado y la calidad del agua.

La modificación poco regulada de los caudales naturales por captaciones de agua y funcionamiento de las presas ha tornado el estrés ambiental por alteraciones del régimen de caudal en un asunto grave en gran parte del país. (ONU-Agua, 2015). Además, se ha dado un aumento alarmante en la sobreexplotación de los mantos acuíferos, 16 en 1975 a 102 en 2017. Sin mencionar que por falta de tratamiento suficiente y adecuado de las aguas residuales, la cual es menor al 20% en 2016, la mayoría de los cuerpos de agua dulce se contaminan considerablemente. El consumo de agua al día por cada persona en 1955 era de 40 litros al día; se calcula que en 2012 el consumo aumentó a 280 litros por persona al día. (FCEA, 2017) En México sólo 57 por ciento de las aguas residuales municipales colectadas son tratadas; 54 por ciento de las plantas menores a cien litros por segundo funcionan y 25 por ciento lo hacen de manera adecuada. (UNAM, 2018).

Así México enfrenta una de las mayores contradicciones al estar entre la abundancia y la escasez con 12 millones de personas que carecen de acceso a agua potable, 102 de los 653 acuíferos de la nación se encuentran sobreexplotados, 46% de pérdidas por fugas en las redes de abastecimiento, 80% de los cuerpos de agua del país presenta algún tipo de contaminación por descargas industriales y con una captación de agua pluvial de tan sólo 1 de cada 100 litros (López et al., 2017).

1.2.1 Acciones en México

La Comisión Nacional del Agua desde su creación hasta la actualidad, ha puesto en marcha diferentes programas para rescatar y mejorar la situación hídrica del país. Particularmente, en el período de 2007 al 2012, con algunos programas como Programa Cultura del Agua (PCA), Apertura y fortalecimiento de Espacios de Cultura del Agua, Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua, Fondo Sectorial CONAGUA-CONACYT y Programa Especial de Ciencia y Tecnología (PECyT), Fondo Sectorial CONAGUA-CONACYT y Programa Especial de Ciencia y Tecnología (PECyT), entre otras 115 acciones para aumentar la disponibilidad, el acceso y la calidad del agua en el país (CONAGUA, 2013).

Por otro lado, empresas como Danone, Nestlé y Coca-Cola han trabajado con ahínco para reducir la cantidad de agua que usan en sus procesos, reusarla, tratarla, potabilizarla de manera adecuada y de acercar agua de calidad a comunidades marginales. Desde 2014 Grupo Danone México se comprometió a mejorar el manejo del agua en sus procesos; para ello construyó humedales dentro de sus instalaciones para purificar el agua de manera natural a través de la absorción y transformación de contaminantes sin uso de químicos además de entregar a otras empresas sus aguas residuales con el fin de reutilizarlas y no expulsarlas a los cuerpos de agua naturales (Danone, 2015). Por otro lado, Nestlé México inauguró en 2014 la primera fábrica “Cero Agua” del mundo con el objetivo de disminuir en 15% su consumo de agua anual en el país y para producir la leche en polvo sin extraer agua del subsuelo en la planta de Lagos de Moreno, Jalisco; dentro de sus objetivos están: trabajar para conseguir la eficiencia hídrica en todas las actividades de la empresa, abogar por políticas hídricas efectivas y una administración responsable, tratar efectivamente sus agua residuales, concientizar a sus proveedores y fomentar la sensibilización respecto al acceso al agua y su conservación (Nestlé, 2014).

De igual forma Coca-Cola implementó el Programa Nacional de Reforestación y Cosecha del Agua en México, durante 2017 logró rehabilitar 4 ollas captadoras de agua de lluvia en Aguascalientes, Coahuila y Michoacán almacenando un volumen de 33,600 metros cúbicos y beneficiando a más de 20 mil personas, además construyó 26 cisternas comunitarias en Aguascalientes, Estado de México, Querétaro y Veracruz con un volumen anual de almacenamiento de 7,488 metros cúbicos para beneficio de 60,231 personas, con ello se alcanzaron 30 ollas y 389 cisternas comunitarias a lo largo del país (Fundación Coca-Cola, 2017). Es importante destacar que Grupo Bimbo no se queda atrás en sus esfuerzos por crear una cultura sustentable dentro de la firma, ya que actualmente reusa el 91% del agua tratada en sus procesos en México a través de la instalación de 36 plantas de tratamiento de agua, 229 recicladores de agua en agencias y talleres de vehículos; la operación 7 plantas de captación, almacenamiento y uso de agua de lluvia y 97 arcos de lavado y la renovación de 9 plantas de tratamiento. Estas medidas las ha replicado a nivel mundial logrando reusar el 74% del agua tratada en sus procesos globales, además de un ahorro del 2% del consumo total de agua por tonelada producida con respecto a 2017 (El Universal, 2019).



Figura 11. Programa Nacional de Reforestación y Cosecha del Agua en México (Coca-Cola, 2014)

1.2.2 El reto del agua en la Ciudad de México

Aunque según el World Resources Institute, México está en el lugar número 24 del ranking de países con mayor estrés hídrico (WRI, 2019), el corazón económico e industrial de la nación, la Ciudad de México y su área metropolitana es la segunda urbe con mayor riesgo de quedarse sin agua suficiente para suplir las necesidades básicas de su población (U.S. News, 2019).

La quinta megalópolis más grande del mundo (OCDE, 2015) construída sobre cuerpos de agua, recibe alrededor de 600 millones de metros cúbicos de lluvia al año (CONAGUA, 2018), posee 45 ríos, la mayoría de los cuales están actualmente entubados, además de cuatro grandes áreas lacustres: la primera y mayor está en la parte más baja de la cuenca, conocida como el valle de México, y se integró con los seis antiguos lagos cuyos nombres fueron:



Figura 12. Cuenca del Valle de México (MX City, 2016)]

Chalco, Xochimilco, Texcoco, San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango. De todos ellos sólo sobrevive el de Zumpango, una parte de Chalco y los canales y chinampas de Xochimilco. (Legorreta, 2013).

La figura 12 ilustra la ciudad en la antigüedad junto con los grandes cuerpos de agua que la rodeaban y que ahora están escondidos por grandes construcciones.



Figura 13. Entre la inundación y la falta de agua (Animal Político, 2020) y (Aristegui Noticias, 2020)]

Curiosa e irónicamente, la conocida en la antigüedad como la Ciudad de la Abundancia, Tenochtitlan, se disputa entre la demasía y la escasez. La figura 13 muestra por un lado la protesta de una Alcaldía ante la falta de agua por año y medio (Animal Político, 2020) y las grandes cantidades de agua que inundan las calles por una noche de lluvia.

La ciudad es abastecida por el sistema Cutzamala-Lerma en un 40% y en un 60% por sus propios acuíferos subterráneos, muchos de los cuales están en calidad de sobreexplotados o vedados (CONAGUA, 2018). Se estima que de las 47 plantas de tratamiento de agua con capacidad para limpiar 5000 litros por segundo, limpian en realidad 3270 litros por segundo (Merino, 2018) y sólo poco más del 20% del agua residual es tratada para su reuso. Es importante mencionar que alrededor del 95% del agua pluvial va directamente al drenaje, 4% se infiltra y 1% es recolectado (CONAGUA, 2015). Por lo que el sistema de drenaje está desbordado en capacidad. Además, la obsoleta red de tuberías tiene pérdidas de 40% de agua potable debido a fugas (SACMEX, 2019), lo que causa no sólo una pérdida de presión considerable, escasez, sino que experimenta contaminación cruzada que termina afectando a las agua subterráneas.

Se sabe que los 800 pozos que proveen agua a la metrópoli se ubican en su mayoría en el oriente de la ciudad y están sobreexplotados hasta en 18 litros por segundo, causando que los mantos descendan un metro y se provoque un hundimiento del subsuelo de 30 centímetros por año aumentando los riesgos asociados a los sismos. La red de agua potable capitalina abastece 32 mil litros por segundo, los cuales serían suficientes para abastecer 300 litros por habitante, sin embargo, llegan en promedio 177 litros, debido al desperdicio (Aristegui Noticias, 2020).

Las estadísticas muestran que el 75% de los ciudadanos experimentan irregularidades en el servicio de agua potable, entre falta de sanitización hasta escasez severa aún con acceso a infraestructura suficiente. Ante tal panorama, un estudio de la Universidad Nacional Autónoma de México prevee que dentro de 10 años la ciudad alcanzará el “Día Cero”, en el cual no habrá suficiente agua para satisfacer las necesidades básicas de la población (UNAM, 2019).

Actualmente, el gobierno envía pipas de agua a las zonas con mayor escasez de agua, muchas de las cuales no llegan a destino debido a secuestros. Además, muchos ciudadanos no tienen acceso al agua por haber construido sus viviendas en zonas ilegales, por lo que deben adquirir agua por medios clandestinos, pagar altos precios para obtener y guardar el agua (Aguilar, 2009).

Algo más preocupante aún son las fallas de regulación del acceso a aguas superficiales y subterráneas, esto es visible en que la CONAGUA realizó inspecciones de volúmenes extraídos en solo 1.7% de las 275 300 concesiones de aguas subterráneas y tan solo en 2015 otorgó 1 124 concesiones en 306 cuerpos de agua con déficit. Se estima que la extracción de agua subterránea equivale a 160% de la recarga, con una sobreextracción de 5 631 millones m³/año. A pesar de que a nivel residencial el costo por el agua ha incrementado de acuerdo al nivel socioeconómico medio de los habitantes de las colonias, el 71% del volumen concesionado no cuenta con medidor (Merino, 2018), por lo que las políticas no contribuyen a una solución real.

La complejidad del manejo del agua en la zona metropolitana del Valle de México es mayúscula ya que enfrenta retos políticos, sociales y técnicos que han sido poco atendidos a lo largo de los años. A pesar de que la literatura se refiere a una futura crisis del agua en la urbe, lo cierto es que la crisis está presente y afecta a habitantes e industria, prueba de ello fueron las pérdidas monetarias por 400 millones de pesos por el megacorte de agua en noviembre de 2018 (El Financiero, 2018).

1.2.2.1 Acciones en la Ciudad de México

La crisis hídrica ha incentivado una serie de acciones por parte del gobierno, las empresas y la sociedad civil desde la Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica publicada a finales de 2017 hasta el programa Tláloc de cosecha de agua de lluvia implementado en 2 de las 16 alcaldías de la ciudad.

El objetivo de la Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica es crear un modelo administrativo adecuado para la operación y funcionamiento eficaz del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, que requería una mayor capacidad de gestión técnica, financiera y administrativa para así proveer mayores eficiencias a la red hídrica y una mejor respuesta a la demanda de los usuarios (SACMEX, 2017). A pesar de sus buenas intenciones diversos expertos aseguran que dicha ley no evita el colapso hídrico de la ciudad.

Otra de las acciones del gobierno de la ciudad es el plan de Sectorización Hidrométrica el cual pretende dividir la red de agua en zonas aisladas hidráulicamente, lo que permitirá comparar la cantidad entregada cada día con el consumo dentro del sector. Estos sectores se delimitarán por válvulas de seccionamiento y tapas ciegas que los aislarán de otros sectores. Tendrán medidores de caudal y volumen en la entrada del agua, así como válvulas para control de presiones.

Así, en cada sector se tendrá un control de presiones y la comparación del suministro contra consumo de agua para reducción y reparación de fugas. Se tienen contemplados 466 sectores en siete alcaldías: Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Xochimilco, Tláhuac y Milpa Alta. Se iniciará con las alcaldías Álvaro Obregón y Benito Juárez por ser llegadas principales del Sistema Lerma y Cutzamala (Méndez, 2019).

Cada año el Sistema Lerma que provee agua a la ciudad disminuye su aporte en mil litros de agua por segundo debido al inicio de la temporada de riego para las cosechas, causando una severa escasez en las zonas a las cuales provee el recurso hídrico, para contrarrestar los efectos de la reducción significativa del aporte, el gobierno lanzó la campaña No la rieguen.

El propósito central de la campaña es racionar y disminuir el uso de agua potable en actividades que no son indispensables para la alimentación y la salud. Se estima que estas acciones permitirán ahorrar hasta dos mil litros por segundo de consumo de agua permitiendo un acceso al agua regular a las zonas centro y poniente durante la época de sequía (CDMX, 2019).



Figura 14. Aporte del Sistema Lerma a la Ciudad de México (CDMX, 2019)]

Ya que 40% de las pérdidas de agua en la urbe son las fugas, desde marzo de 2019 SACMEX destinó 150 cuadrillas encargadas de ubicar y reparar fugas en las 16 alcaldías. SACMEX indica que cada día se reportan al menos 150 fugas de agua en toda la ciudad por lo que se ha convertido en una prioridad el identificarlas a tiempo y repararlas. Se estima que de las 150 fugas, 88% provienen de tomas domiciliarias, 10% de la red secundaria y 2% de la red primaria (El Universal, 2019).

Uno de los problemas más importantes es la obsolescencia de la red hidráulica de la megalópolis, de acuerdo con Sacmex la red de drenaje y agua potable tiene un antigüedad de 70 años. Lo que provoca un desempeño desfavorable del sistema. Por tanto, el gobierno informó que sustituirá mil 72 metros de tubería de la red de agua potable y mil 182 de drenaje en la zona de la antigua Merced en el Centro Histórico. Dichas obras se realizarán con una inversión significativa de 15.6 millones de pesos. Estas obras buscan mejorar el abasto de agua potable y evitar inundaciones durante época de lluvias (Índigo, 2019).

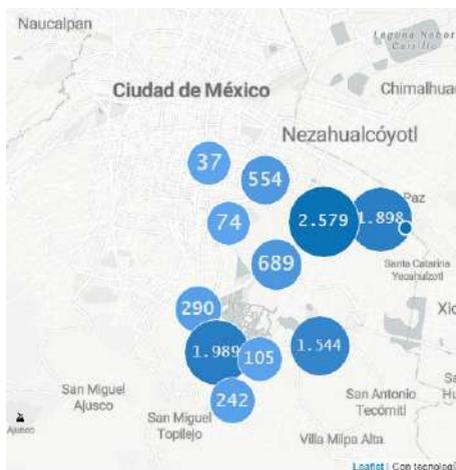


Figura 15. Cosecha de agua (CDMX, 2019)

Además de estas medidas, el gobierno implementó el programa de Cosecha de agua de lluvia, operado por la Secretaría del Medio Ambiente, que tiene como propósito mejorar el abasto de agua de personas que viven en colonias de bajos ingresos y poco acceso a agua con la instalación de sistemas de cosecha de lluvia. Entre los beneficios del programa está reducir el flujo de agua a los drenajes, y así evitar inundaciones, facilitar el acceso al agua en viviendas entre 5 y 8 meses del año, con ello se contribuye a la no sobreexplotación del acuífero y a su recuperación al reducir la demanda (SEDEMA, 2019).

1.2.2.2 Captación de agua de lluvia en la CDMX

La captación de agua de lluvia es usada como una alternativa segura y relativamente barata para obtener agua con una calidad aceptable para ciertos usos. El programa de Cosecha de agua de lluvia del gobierno de la Ciudad de México fue puesto en marcha inicialmente en las alcaldías de Iztapalapa en un 58% y Xochimilco en 42% en sus diferentes colonias. Se estima que en 2019 se captaron 1 de cada 100 litros de agua pluvial, dejando ver algunos beneficios importantes para las familias (CDMX, 2019), por ello, para 2020 la SEDEMA planea añadir las alcaldías de Tláhuac, Milpa Alta y Tlalpan al programa. Adicionalmente al gobierno, los habitantes de la ciudad pueden adquirir un sistema de captación de agua por medio de MiPymes como Isla Urbana, Neta Cero, Grupo Multidisciplinario Integral, LOGINSTA, entre algunas otras.

Es importante mencionar que la Ciudad de México tiene una precipitación media anual de 719 mm (SEMARNAT, 2019) y debido al tipo de clima, la temporada de lluvias abarca entre 4 y 5 meses. Tan sólo en septiembre de 2017 se registró que en la alcaldía de Coyoacán cayeron 11 mil millones de litros de agua pluvial en un día, por lo que la captación de agua de lluvia podría representar una solución importante en la urbe.

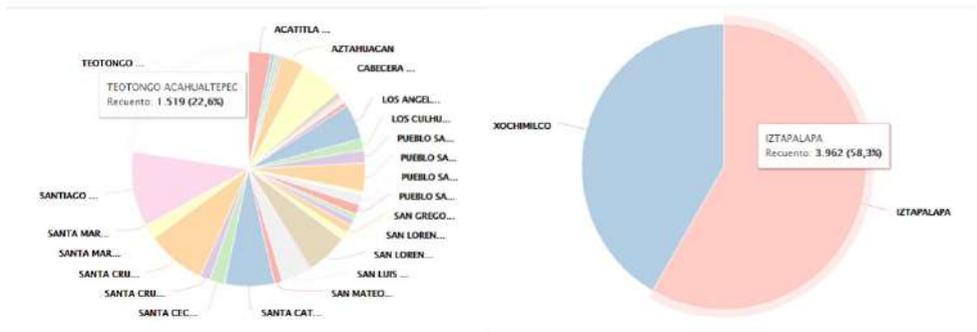


Figura 16. Alcaldías con sistemas de captación de agua de lluvia del gobierno (CDMX, 2019)

1.3 Sistemas de captación de agua de lluvia en el mercado

Los sistemas de captación son ampliamente usados alrededor del mundo por ser una fuente segura y de bajo costo de agua. Aunque en grandes urbes, su calidad es baja para consumo humano, se puede destinar a otros usos y así reducir la demanda de la red hídrica. Entre las ventajas de la captación de agua pluvial está el uso racional y responsable del agua, el establecimiento de prioridades de consumo, la reducción de contaminación de los acuíferos, la disminución del volumen de agua residual.

Aunque los beneficios de la captación de agua pluvial son considerables, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura advierte que para lograr que las estrategias, como la captación de agua de lluvia sean favorables es necesario involucrar todos los aspectos del sistema de forma que interactúen consecuentemente con los objetivos, por lo que se recomienda educar, concientizar y capacitar a los usuarios a nivel individual y colectivo, ya que “La adopción de una práctica aislada, aunque sea eficaz individualmente, no es suficiente.” (FAO, 2013). Debido a la gravedad de la crisis hídrica actual es necesario que las soluciones y prácticas tengan sean efectivas, sencillas, de fácil mantenimiento y poco costosas para tener una cobertura más amplia.

Existen diversas modalidades de captación de agua de lluvia: la microcaptación, la macrocaptación, la derivación de manantiales y cursos de agua, cosecha de agua de techos de vivienda y otras estructuras impermeables, captación de aguas subterráneas y freáticas y captación de agua atmosférica. Cada una utilizada para diferentes propósitos y adecuada a las necesidades de las actividades ejecutadas.

A continuación se presentan algunos de los sistemas que se utilizan alrededor del mundo para diferentes aplicaciones y escenarios, analizando ciertas características similares entre ellos.

1.3.1 Innovaciones tecnológicas

Las innovaciones en captación de agua presentadas en alguna de las figuras de propiedad intelectual son diversas y proveen solución a aspectos puntuales de los desafíos asociados a la cosecha de agua de lluvia.

La figura 17 muestra un sistema fotovoltaico de recolección de agua, compuesto por un panel fotovoltaico, un tanque de agua, una tubería, un mecanismo filtrante y una cubeta de recolección, con la particularidad de aprovechar el panel fotovoltaico como plataforma de recolección de agua de lluvia (Guohong, 2017).

Por otro lado, se presenta un sistema de suministro de agua de raíz de árbol autocebante con unidad de recolección de agua de lluvia, conectada a la unidad de suministro de agua del árbol a través de una tubería; la unidad de recolección de agua de lluvia incluye una canaleta y una tubería de recolección que está en comunicación con el sistema (He, 2018).

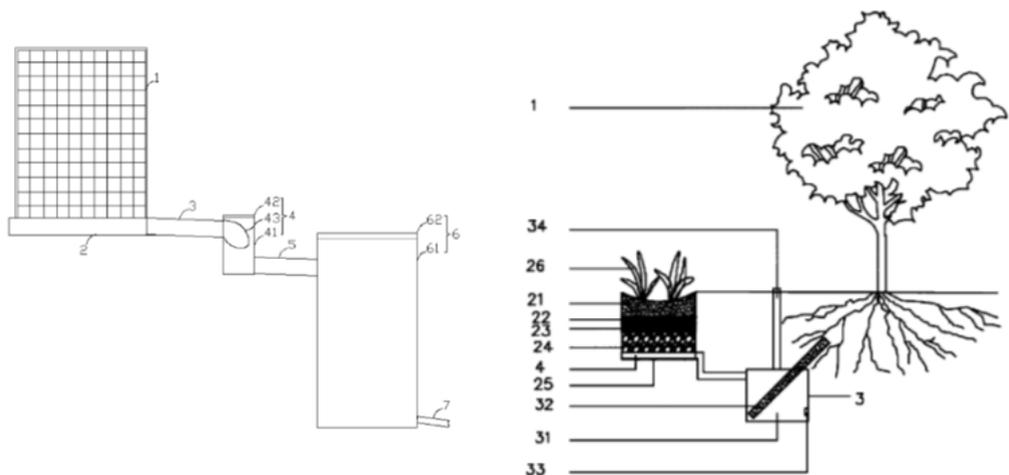
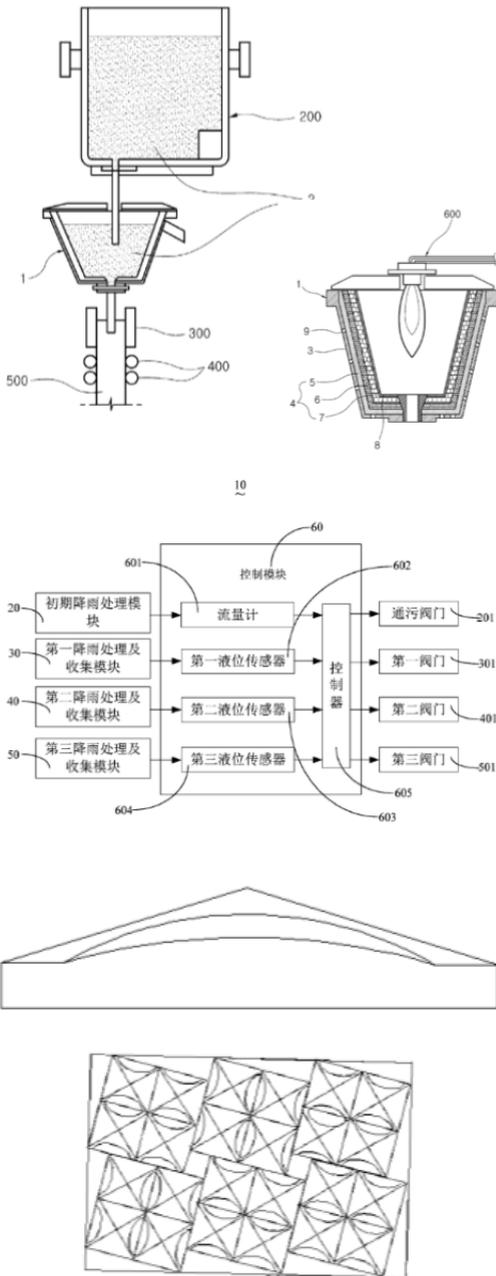


Figura 17. Sistema fotovoltaico de recolección de agua y Sistema de recolección de agua a través de raíces (Guohong, 2017)] y (He, 2018).



Se observa en la figura 18 un aparato para eliminar el agua de una pared a prueba de fuego el cual tiene una unidad de colección de humedad integrada en la pared, la pared al estar construida en zigzag permite una mejor retención del líquido (SOO DONG, 2010).

También se presenta un sistema de purificación y recolección de agua de lluvia particular del programa del gobierno chino “Sponge City”. En el que el agua de lluvia se clasifica para usarse de manera razonable, reduciendo el costo del tratamiento del agua de lluvia significativamente. El método de tratamiento del agua de lluvia urbana de la invención puede tratar puede evitar que la lluvia inicial se descargue en el sistema de agua natural para contaminar el medio ambiente.

Por último, algunos inventos tienen que ver con la forma, en esta patente lo interesante es la geometría del cono presentado a la izquierda, la cual permite que el agua de lluvia puede ser colectada de forma eficiente en las regiones que requieren más agua, su modularidad posibilita hacer arreglos para adaptarse a la superficie de captación disponible.

Figura 18. Aparato para remover agua (Soo Dong, 2010)

El Instituto Tecnológico de Massachusetts desarrolló una nanoesponja combinando polímeros con nanopartículas de vidrio que pueden ser embebidas en diferentes superficies para absorber el agua.

Se considera que es significativamente más eficiente que las redes atrapa nieblas que se utilizan en diferentes países. Por otro lado, la Universidad de Johannesburgo desarrolló una aplicación adicional con las nanoesponjas para remover contaminantes orgánicos del agua, como se muestra en la figura (Sabelo, et. al., 2007). La membrana de nanofiltrado está hecha con polímeros que llegan hasta los 10 nanómetros. Permitiendo mover las partículas contaminantes más pequeñas.

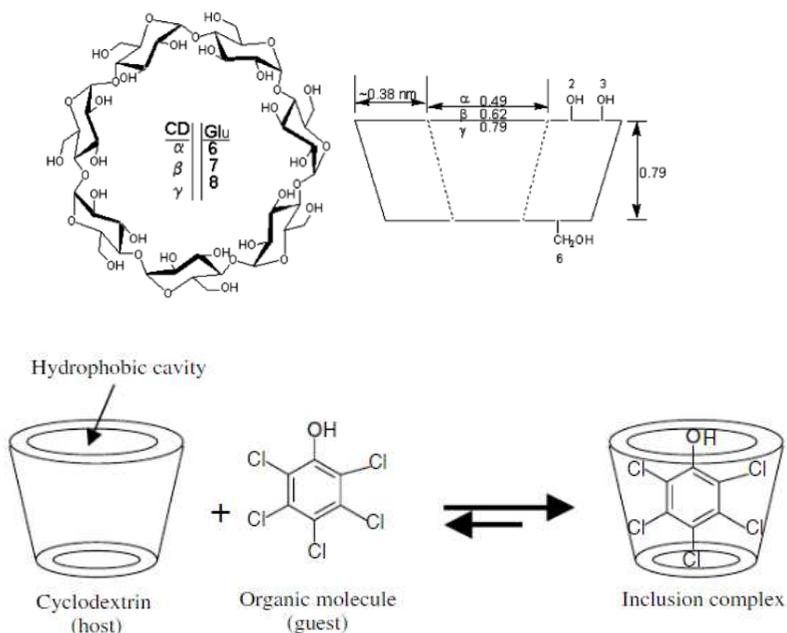
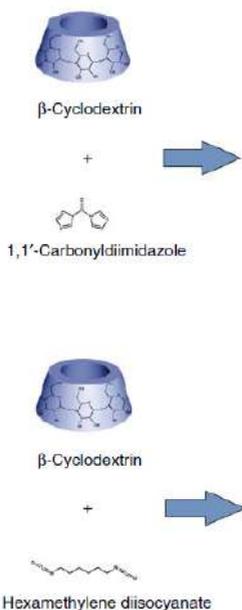


Figura 19. Estructura de las nanoesponjas por la Universidad de Johannesburgo (Sabelo, et. al, 2007)

Debido a que la membrana fue diseñada para la desalinización por ósmosis inversa, se pretende que la sal y otros contaminantes queden atrapados, mientras el agua pasa a través de los poros de la membrana a una alta presión. Ya que algunas membranas tradicionales requieren una limpieza constante por la acumulación de bacterias y sedimentos, la nueva membrana se construyó para actuar a semejanza de una esponja, absorbiendo así el agua y repeliendo los contaminantes, evitando; por tanto, los procesos adicionales de limpieza y el uso excesivo de energía (Sci Dev, 2006).



La membrana fue probada en China para tratar agua de desecho y en Irán para desalinizar agua, usando menos energía de la requerida para cualquier proceso convencional de ósmosis inversa. Por lo que, su uso representaría una ventaja importante para dichos procesos.

Además de la nanomembrana se acuñó el término “nanoesponja” en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en donde se realizó una síntesis para encontrar una alternativa a la purificación de agua por carbón activado. Sin embargo, sus aplicaciones fueron significativamente mayores. En la industria farmacéutica las nanoesponjas fueron capaces de desprender oxígeno, presentaron capacidades de retención de gases para un desprendimiento lento bajo estímulos externos de temperatura y energía (Trotta, et. al., 2019).

Figura 20. Elementos que componen la síntesis de la nanoesponja (Trotta, et. al., 2019)]

1.3.2 Empresas

Las soluciones provistas por las empresas reflejan practicidad y pragmatismo, ejemplo de ello es el producto FlushRain de una empresa británica con el mismo nombre, su sistema comprende una ligera modificación al techo donde se instala, con una serie de mecanismos sencillos para filtrar el agua y distribuirla por toda la casa a través de un registro que comunica todas las partes del sistema, como se puede observar en la figura 21.

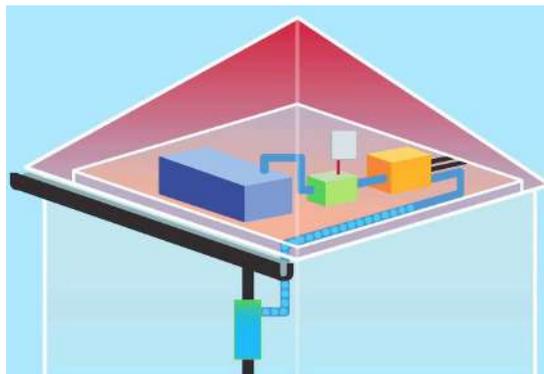


Figura 21 Sistema de captación FlushRain en Reino Unido (FlushRain, n.a.)]



Figura 21.1. Sistema de captación Rotoplás en México (Rotoplás, n.a.)]

Por otro lado, la empresa mexicana de tinacos Rotoplás México, diseñó un Sistema de Captación Pluvial Rural para proveer agua para consumo familiar de uso doméstico, constituido de una canaleta, tuberías de PVC y un tinaco, tiene el fin de aprovechar integralmente del agua de lluvia a través de la captación, almacenamiento y uso.

Ofreciendo así la posibilidad de tener agua lista para beber a las comunidades que rara vez pueden conectarse a la red municipal de abastecimiento de agua.

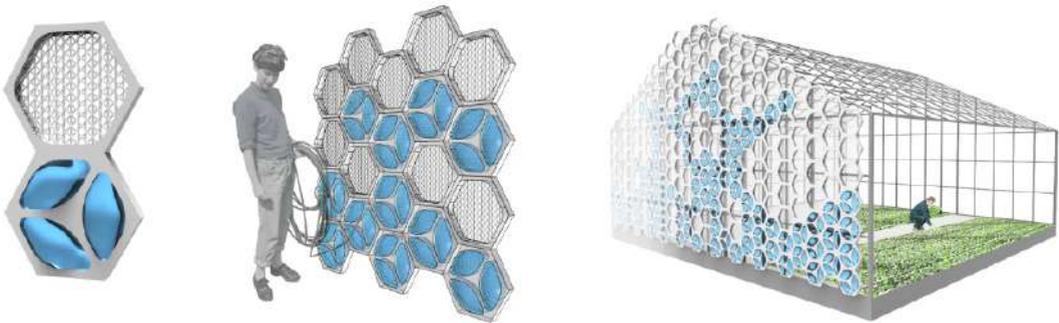


Figura 22. Sistema de captación NexLoop (NexLoop, n.a.)

Las soluciones inspiradas en la naturaleza también son parte importante de los productos de cosecha de agua de lluvia. La empresa NexLoop emplea estrategias propias de la naturaleza para encontrar soluciones eficientes. Sus estructuras con forma de panal de abeja contienen en su interior fibras semejantes a las telarañas, como una forma de captar la mayor cantidad de agua en el menor espacio posible y distribuyéndola a través de un ramal de tuberías que llevan a garrafones, además el sistema también puede almacenar el agua dentro de la propia estructura, haciéndolo ideal para lugares con espacio de almacenamiento limitado(NexLoop, n.a.).

1.3.3 Smart WATER

Debido a los grandes desafíos entorno a la problemática del agua, ha sido necesario desarrollar herramientas que identifiquen, analicen y controlen la disponibilidad, la calidad y el acceso al agua. Por los volúmenes y las localizaciones que deben ser muestreados, hacerlo de manera convencional es poco eficiente para

las necesidades actuales. Así surge *Smart Water* que busca mejorar la planeación de escenarios, aumentar las herramientas analíticas a nivel residencial, motivar un uso eficiente del agua y garantizar la seguridad hídrica. Utiliza herramientas del Internet de las Cosas (IoT), *Data Mining*, Inteligencia Artificial, teoría de redes. Se caracteriza por la toma de decisiones basadas en la información cuantitativa y cualitativa dentro del sistema, tanto de escenarios climáticos, estado de la calidad del agua, el uso de programas especializados en análisis de parámetros, escenarios climáticos y económicos, estructuras y niveles que influenciarán el comportamiento del manejo del agua, la implementación de sistemas de medición y cobro más avanzados y congruentes con la demanda real.(Raffensberger, et. al, 2017)

Empresas como Xylem enfocan sus marcas en sistemas de agua inteligentes, sus servicios van desde la implementación de infraestructura avanzada para contadores (AMI), de control de monitorización y adquisición rápida y eficaz de datos (SCADA), hasta el análisis de la información disponible para optimizar sus sistemas. El análisis de datos permite segmentar el mercado de acuerdo con el volumen de agua requerido, integrar las comunicaciones digitales necesarias para un mejor acceso al agua, *omers into distinct water usage groups*, determinar comportamientos y escenarios futuros, mapear redes, localizar recursos, identificar interacciones entre elementos del sistema y resolver problemas (Xylem, n. d.).



Figura 23. Sensus y Valor Water, marcas de Xylem enfocadas en *Smart Water* (Xylem, n.a.)]



Figura 24. Satélite de Programa Copernicus (IISD, 2018)]

El Programa Copernicus de Observación de la Unión Europea tiene el objetivo de recolectar una cantidad importante de datos provenientes de una red de satélites para examinar los patrones y tendencias del estado de la atmósfera, ambiente marino, tierra, cambio climático, emergencias y seguridad para tomar decisiones oportunas y preparar estrategias que permitan mitigar y hacer frente a los efectos de los problemas ambientales presentados (Copernicus EU, n.d.). El constante monitoreo permite un mejor manejo, planeación de los recursos.

La red satelital está compuesta por 6 familias de satélites principales llamados Centinelas y algunos satélites adicionales cuya función principal es contribuir a las misiones espaciales. Cada Centinela tiene varios objetivos de monitoreo, el Centinela 1 monitorea la respuesta de emergencia ante actividad volcánica, inundaciones, huracanes, el Centinela 2 se encarga de la tierra y la vegetación, el 3 y el 6 vigilan y mapean los océanos y los cuerpos de agua, mientras los Centinelas 4 y 5 revisan la atmósfera. La recolección de datos por parte de los satélites que combina aquella información obtenida directamente en sitio, de sensores terrestres y los satélites proporcionan macrodata que, al ser analizada, puede mejorar el entendimiento de la Tierra para una toma de decisiones más efectiva. La red genera análisis estadísticos, mapas, indicadores y tendencias de las condiciones presentes, pasadas y futuras. La información está disponible de manera gratuita para alentar soluciones basadas en el aprovechamiento de los datos. Una de las soluciones más prominentes es la administración de los sistemas de irrigación en la parte sur de Australia que lograron una reducción del 70% de uso de agua y costos operativos con los datos provistos por Copernicus (IISD, 2018).

Por otro lado, en Canadá la plataforma Mackenzie DataStream comparte información para permitir a científicos, comunidades y tomadores de decisiones resolver asuntos relacionados con las cuencas y los recursos naturales disponibles en la región. En esta plataforma se conjuntan las técnicas de recolección de datos y métodos permitiendo a los científicos y miembros de la comunidad acceder propiamente a los datos. Se caracteriza por el acceso abierto, la calidad de los datos, la interoperabilidad, la seguridad y sustentabilidad, así como los esfuerzos colaborativos entre los agentes, el acceso abierto promueve el uso de datos, la educación entorno a los recursos naturales y abre la posibilidad a obtener soluciones factibles en menor tiempo.

También dentro de las plataformas de acceso abierto para el manejo del agua está la Red Comunitaria Colaborativa para Lluvia, Granizo y Nieve(CoCoRaHS), la cual recolecta, mide y mapea los patrones de precipitación alrededor del mundo en un esfuerzo de llenar las brechas en este aspecto. Por lo general los datos concernientes a los fenómenos naturales relacionados con el agua son escasos por lo que representan una limitante al momento de plantear soluciones a los grandes problemas. El objetivo es mejorar la calidad de los datos obtenidos por otras estaciones, verificar las alertas de clima y crear compendios climáticos (IISD, 2018).

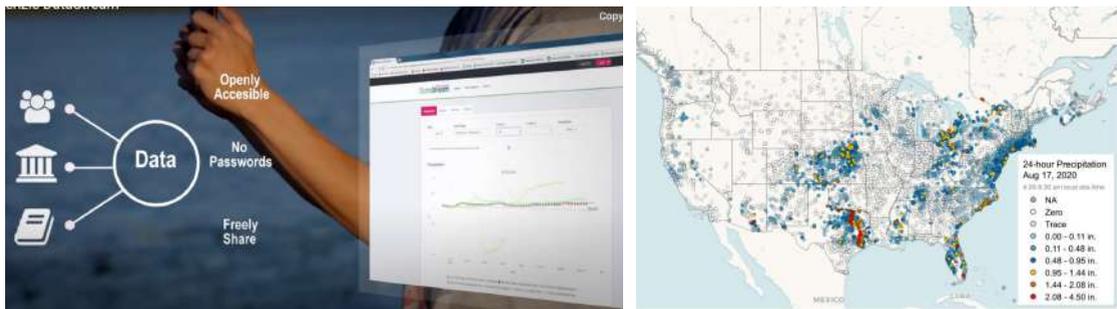
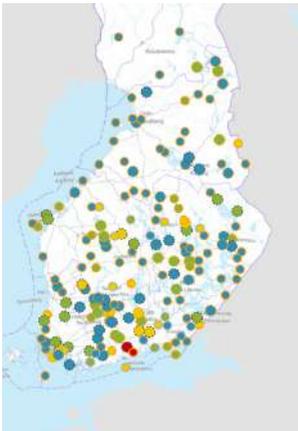


Figura 25. Mackenzie DataStream and CoCoRaHS (IISD, 2018)]

Diferentes programas de ciencia de la ciudadanía han crecido para generar una cantidad importante de datos, comprometiendo usuarios, llenando brechas de datos y construyendo un información robusta y válida en una red de datos que permitan a las personas encontrar soluciones efectivas.

Por su parte, la ciudad de Estocolmo desarrolló un sistema de monitoreo de calidad de agua para proveer alertas tempranas por calidad de agua, preparar estrategias de mitigación de efectos y minimizar costos operacionales. La plataforma recolecta información que posteriormente es analizada por medio de algoritmos de inteligencia artificial que informa a la ciudad sobre descarga de aguas residuales, presencia de algas o bacterias junto con su respectiva localización. El programa se divide en tres etapas, la primera se enfoca en la fuente de agua, monitoreando la calidad y la composición del agua potable, así como detectar contaminación en las fuentes de agua de la ciudad, la segunda vigila la calidad del agua en red de distribución y la tercera monitorea que la red de agua residual no sea fuente de contaminación cruzada en la red de agua potable. Uno de los retos principales es tener sensores confiables y robustos que permanezcan conectados a la red de Internet de las Cosas dentro del agua y bajo el subsuelo.



Finlandia implementó una plataforma pública llamada Järviwiki, que permite a los ciudadanos e investigadores subir información cualitativa y cuantitativa de los lagos y cuerpos de agua de todo el país, en diferentes formatos desde datos específicos hasta fotografías. Posteriormente, los datos pueden ser comunicados a través de mapas, gráficas en tiempo real de los diferentes cuerpos de agua. Esto ha permitido mejorar la toma de decisiones, validar modelos y entender más ampliamente el comportamiento de los cauces, integrando al mismo tiempo modelos económicos que permitan implementar las acciones de forma segura para mejorar el manejo y monitoreo de las cuencas.

Figura 26. Järviwiki HUB
(BSW, n.d.)

1.3.4 La brecha

Las soluciones a los problemas hídricos mencionados con anterioridad son vastas; sin embargo requieren de acciones adicionales para alcanzar los objetivos previstos y mitigar los efectos de la crisis hídrica global. Si bien los esquemas urbanos presentados con anterioridad han tenido resultados importantes, los diferentes sectores de la industria, la pesca y la agricultura que requieren grandes volúmenes de agua potable y cuyas descargas son significativamente mayores a los de la parte residencial, carecen de un esquema especializado. Las soluciones tecnológicas para la industria requieren de una inversión importante de recursos y son poco flexibles. A nivel residencial y en términos de agua municipal, las herramientas logísticas, metodológicas y tecnológicas no están al alcance de los usuarios o las empresas de servicios hídricos públicos y privados, por lo que las acciones emprendidas son ineficientes e insuficientes. Específicamente, en temas de captación de agua pluvial, los aspectos mostrados en la figura 27 requieren de soluciones innovadoras que surjan desde un enfoque sistémico para tener el impacto requerido para la magnitud de los problemas hídricos que se enfrentan.



Figura 27. Aspectos de los sistemas de captación de agua
(Elaboración propia)

1.4 Metodologías

Diversas metodologías han sido utilizadas para la resolución de problemas como el abordado en el presente trabajo, tal como la metodología propia de Investigación de Operaciones (Taha, 2012) o la del Diseño Centrado en el Usuario (Kelley, 2004).

Por un lado, la metodología de Investigación de Operaciones permite orientar el problema desde una perspectiva sistémica, siguiendo los pasos de orientar, definir, recolectar, solucionar, validar, analizar, implementar y monitorear con su respectiva etapa de retroalimentación, descritos en la figura 28. La Investigación de Operaciones tiene herramientas importantes que permiten la optimización de los sistemas de acuerdo con su comportamiento y objetivos .

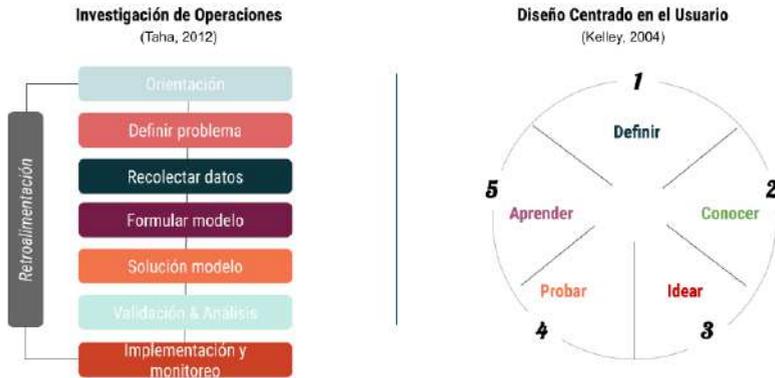


Figura 28. Diagramas de las metodologías utilizadas para el proyecto [Obtenidas a partir de la información en (Taha, 2012), (Kelley, 2004)].



Figura 29. Ciclos del proceso de diseño.

La teoría de redes, la teoría de la localización, la programación lineal y dinámica, la teoría de colas, la simulación, los métodos heurísticos, son algunas de estas herramientas, que mediante el uso de modelos matemáticos, algoritmos, permiten una toma de decisiones informada generando soluciones factibles que satisfagan las restricciones y óptimas al producir el mejor valor para la función objetivo (Taha, 2012).

Por otro lado, el Diseño Centrado en el Usuario dividido en 4 grandes etapas comprendidas por 5 pasos cada una. Las etapas de usuario, experiencia, producto y prototipo enfocan el problema desde la parte del usuario y su interacción con la solución.

El primer ciclo se centra en conocer al *usuario*, se definen los distintos tipos que hay según la manera en que interactúan con el producto y la relación que tienen con él. Se hacen observaciones generales para determinar las funciones que desempeña y se consultan sus opiniones. Se aprende sobre el contexto general pasado, presente y futuro del objeto de estudio. Se buscan soluciones actuales en el mercado a la problemática definida. Se hacen pruebas rápidas para identificar las preferencias de los usuarios. Y se conocen los factores críticos.

El segundo ciclo escudriña la *experiencia* del usuario, incluso desde antes que tenga una interacción directa con el elemento o servicio a diseñar. En esta parte del proceso se realizan mapas de empatía y mapas de viaje para ilustrar cada parte de la experiencia. Para comprenderla mejor se hacen observaciones más específicas de acuerdo con el tipo de usuario que esté realizando la acción, ya sea un usuario activo o uno de servicio. Las entrevistas también buscan obtener respuestas más concisas sobre lo que los usuarios piensan y sienten.

El tercer ciclo se enfoca en el *producto*. Su finalidad es generar una propuesta de valor para el producto teniendo en cuenta los descubrimientos de las etapas anteriores, se reevalúa el objetivo global del proyecto, se enlistan los requerimientos y especificaciones, se crea el modelo de negocio del producto, se analizan los factores críticos.

El último ciclo se enfoca en desarrollar el *prototipo*, usa, de la misma forma que los anteriores, las etapas de definir, conocer, generar, probar y aprender. Sin embargo, tiene la particularidad de que al desarrollar el producto o servicio en conjunto y en cada una de sus partes o componentes, verificar los aspectos de producción, así como otros aspectos importantes (Borja & Ramírez, 2006a) implementa la ingeniería de detalle con herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), ingeniería asistida por computadora (CAE), otras simulaciones y prototipos rápidos para entender el concepto, el movimiento y la función que realiza cada parte del sistema.

Parte esencial de la metodología consiste en probar, a través de simulaciones con programas computacionales y simuladores físicos el comportamiento de cada elemento como un proceso de aprendizaje y de evaluación de los conceptos para obtener un diseño más detallado y que permita obtener resultados que impacten más en el problema a resolver. Si bien, existe una gran variedad de metodologías de diseño y de resolución de problemas, éstas son algunas que se han tomado en consideración para el desarrollo del presente trabajo.

2.

Sistema
de agua en
CDMX

E

l sistema de agua de la Ciudad de México abarca diferentes aspectos que requieren ser visualizados en conjunto para tener una mejor comprensión de los retos que enfrenta. Debido a las particulares características de la ciudad, es importante mencionar que la descripción del sistema hídrico no estaría completo sin tomar en cuenta la zona metropolitana de la misma junto con todos los elementos internos y externos relevantes.

La Ciudad de México tiene una población fija de 9 millones de personas y flotante de 4 millones provenientes de los estados aledaños, en su mayoría del área metropolitana de la urbe (Navarrete, 2020). Por lo que cada día, las personas que utilizan los servicios básicos no se limita a los 9 millones que residen dentro de la metrópoli, sino que ascienden a más de 15 millones de personas que realizan alguna actividad.

La tarea titánica de proveer agua a una ciudad cuya población aumenta considerablemente de la noche a la mañana requiere una planeación e infraestructura importantes además de la interacción del gobierno con la sociedad, de diferentes agentes y elementos. Ya que el agua es el recurso esencial para cualquier actividad humana, es vital que, ante el panorama actual en materia del agua descrito en el capítulo anterior, se tomen medidas urgentes para garantizar la seguridad hídrica. Las cuales se podrán implementar a medida que se comprenda a cabalidad el funcionamiento, la gobernanza y la dinámica del sistema.

Así en este capítulo se mostrarán los aspectos más importantes de la red hídrica de la cual depende el bienestar, el desarrollo y la salud pública de los habitantes de la quinta megalópolis más grande del mundo y del núcleo económico del país (Forbes, 2018).

2.1 Gobernanza y manejo del agua

La administración del agua en México está dirigida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), siendo ésta un organismo descentralizado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Fue creada en 1983 para preservar, proteger, controlar y regular las aguas nacionales, con la visión de garantizar la seguridad hídrica de la población a través de una administración sustentable del recurso. Dentro de su rol está apoyar a las Direcciones Locales de los sistemas de agua y los Organismos de Cuenca, establecer programas de mejora en materia de disponibilidad, acceso, calidad de agua, educación hídrica (CONAGUA, n.d.).

Debido a la complejidad de los sistemas hídricos, CONAGUA trabaja junto con los Organismos de Cuenca y las Direcciones Locales para cumplir con sus objetivos. En el caso de la Ciudad de México es el Sistema de Aguas de la Ciudad de México en colaboración con el Organismo de Cuenca de las Aguas del Valle de México quienes se encargan de todos los aspectos relacionados con la seguridad hídrica dentro de la región.

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México, surgió de la fusión de la Comisión de Aguas del Distrito Federal y la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, con la finalidad de suministrar agua potable, drenaje, alcantarillado y saneamiento de aguas residuales. SACMEX formula, actualiza y controla los programas de operación hidráulica de la Ciudad de México, construyendo y conservando las obras de infraestructura (SACMEX, n.d.). A pesar de que SACMEX se encarga de los asuntos del agua dentro de la ciudad, es menester que trabaje con los organismos asociados a la Zona Metropolitana tal como la Comisión del Agua del Estado de México y la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales y el Organismo de Cuenca de las Aguas del Valle de México por su importante interconexión.

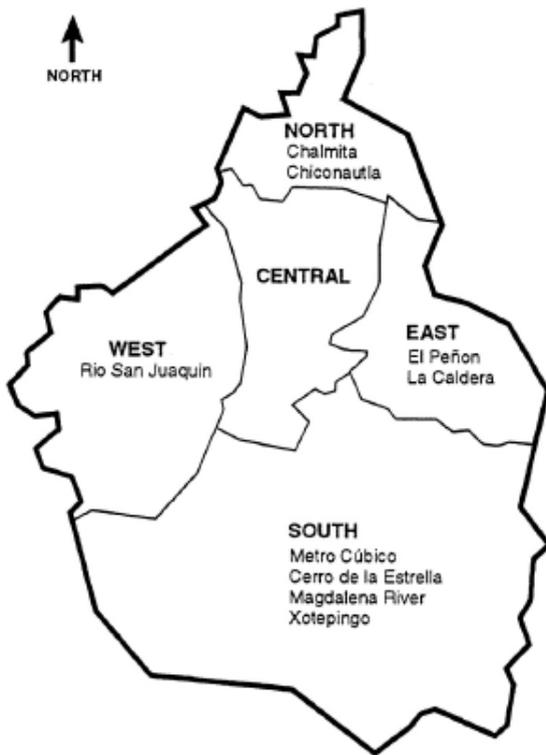


Figura 30. Distritos del servicio hídrico en la Ciudad de México (NRC, 1995)

Dada esta interconexión es que el sistema de agua de la Ciudad de México y su área metropolitana pertenece a la Región Hídrica Administrativa número XIII: Aguas del Valle de México. Dentro de ésta es que los organismos antes mencionados deben coordinar sus esfuerzos.

La figura 30 muestra los distritos del servicio de agua dentro del anterior Distrito Federal, ahora Ciudad de México, así como los nombres asociados a los puntos de entrada del sistema de distribución.

La zona Norte está comprendida por las alcaldías Azcapotzalco y Gustavo A. Madero, el sector Centro por las alcaldías Cuauhtémoc, Benito Juárez, Coyoacán, el Oeste por Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Este Iztacalco, Iztapalapa y Sur por Tlalpan, Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta.

Cada una de estas zonas tiene su propio sistema de drenaje, que convergen eventualmente en uno mismo que da servicio tanto a la Ciudad de México como al Estado de México. Es importante mencionar que dentro del sistema de drenaje se combina con el sistema de recolección de aguas pluviales (NRC, 1995).

Las descargas de agua también son clasificadas de acuerdo con el sector del que provengan. En el caso del abastecimiento público y rural se denominan aguas municipales, mientras que las aguas de la industria autoabastecida junto con otros sectores se les llama no municipales.

Esta diferencia es importante y determinante en términos de concesiones de la extracción del agua junto con los permisos de descarga. Por un lado las aguas municipales están monitoreadas, distribuidas, administradas y tratadas directamente por el gobierno, mientras que las aguas no municipales requieren concesiones para la explotación de los acuíferos siguiendo la reglamentación de la extracción y descarga (EAM, 2018).

La figura 31 muestra el porcentaje de aguas residuales en la Ciudad de México, 62% perteneciente al sector servicios, 17% comercio dentro de las aguas municipales y 21% a la industria en la mayoría de las aguas no municipales.

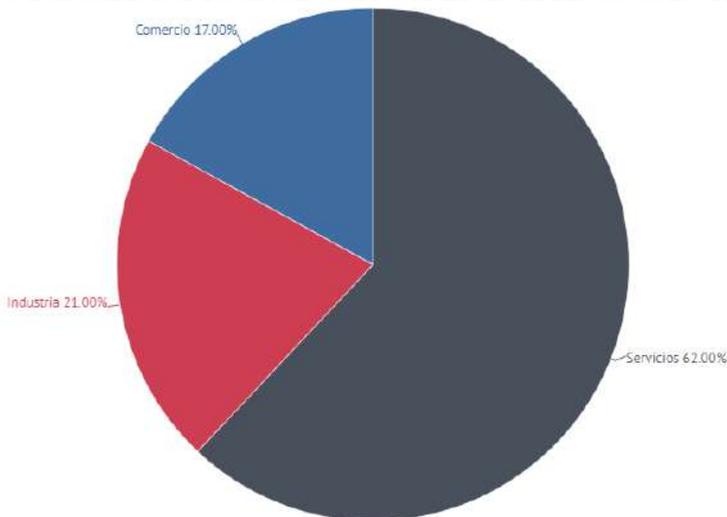


Figura 31. Porcentaje de aguas residuales en CDMX (SEDEMA, 2015)

2.2 Red de abastecimiento

El sistema de agua de la Ciudad de México ha cambiado significativamente a lo largo de los años debido a los cambios de infraestructura y al aumento de la demanda por la rápida urbanización.

Para 2008 la red de abastecimiento de agua estaba compuesta por diferentes fuentes, se abastecía en 25% por el Sistema Cutzamala, 8% del Sistema Lerma, un 53% del sistema de pozos y manantiales, mientras que el 14% restante se apoya en los sistemas Barrientos y Risco, Aguas del Sur y Chiconautla (SRM, 2013). La figura 32 muestra el caudal en metros cúbicos por segundo provista por las diferentes fuentes.

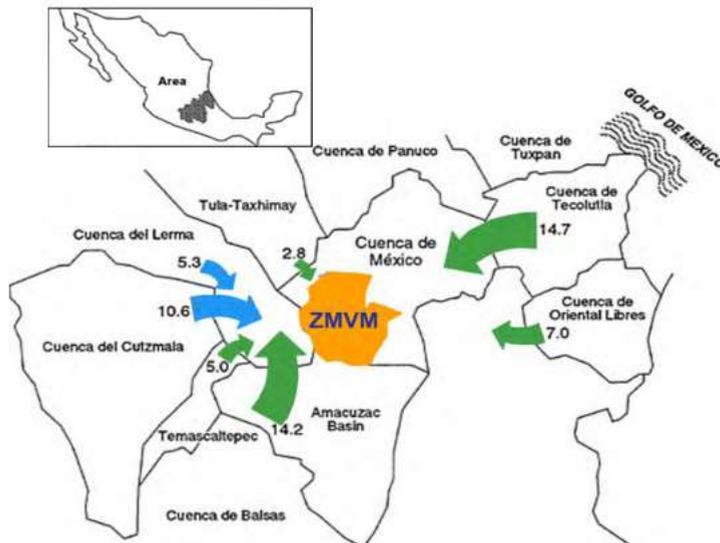
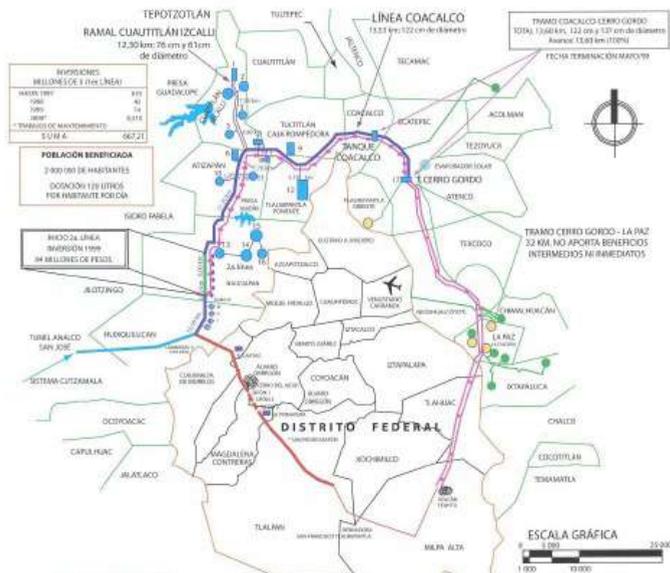


Figura 32. Caudal por fuente (SRM, 2013)



Así es como el Sistema Cutzamala actualmente abastece a 11 delegaciones de la Ciudad de México y 11 municipios del Estado de México, suministrando alrededor de 500 hectómetros cúbicos por año y llevando el recurso a través de un desnivel de 1 100 m. Aporta el 17% del abastecimiento para todos los usos de la Cuenca del Valle de México, calculado en 88 m³/s, que se complementa con el Sistema Lerma (5%), con la extracción de agua subterránea (68%), con ríos y manantiales (3%) y reúso del agua (7%) (CONAGUA, 2018).

El Sistema Cutzamala está integrado por siete presas derivadoras y de almacenamiento, seis estaciones de bombeo y una planta potabilizadora.

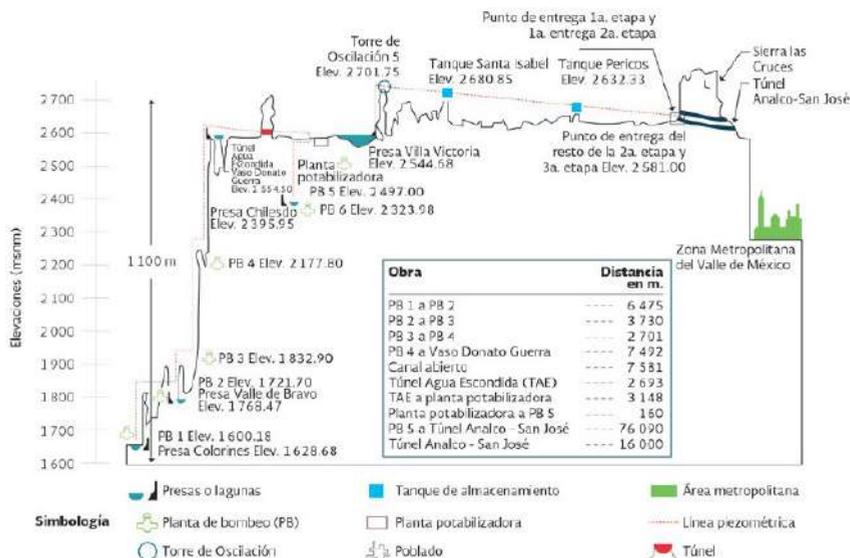


Figura 34. Recorrido del Sistema Cutzamala hasta la Ciudad de México. Fuente: (EAM, 2018).

Una parte crucial de la red hídrica de la urbe es el sistema de descargas de las aguas, como se mencionó anteriormente, éstas salen de cada una de las regiones conformadas por ciertas alcaldías y se unen a las del Estado de México. La figura 3.6 muestra el flujo de aguas residuales por alcaldía, en donde se puede observar que las alcaldías Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc tienen los flujos más altos entre las 16 (SEDEMA, 2015).

Debido a que el 50% de las plantas de tratamiento de agua y en funcionamiento tienen una calificación de pésimo y mal funcionamiento, el porcentaje de las aguas residuales tratadas antes de su retorno es bajo.

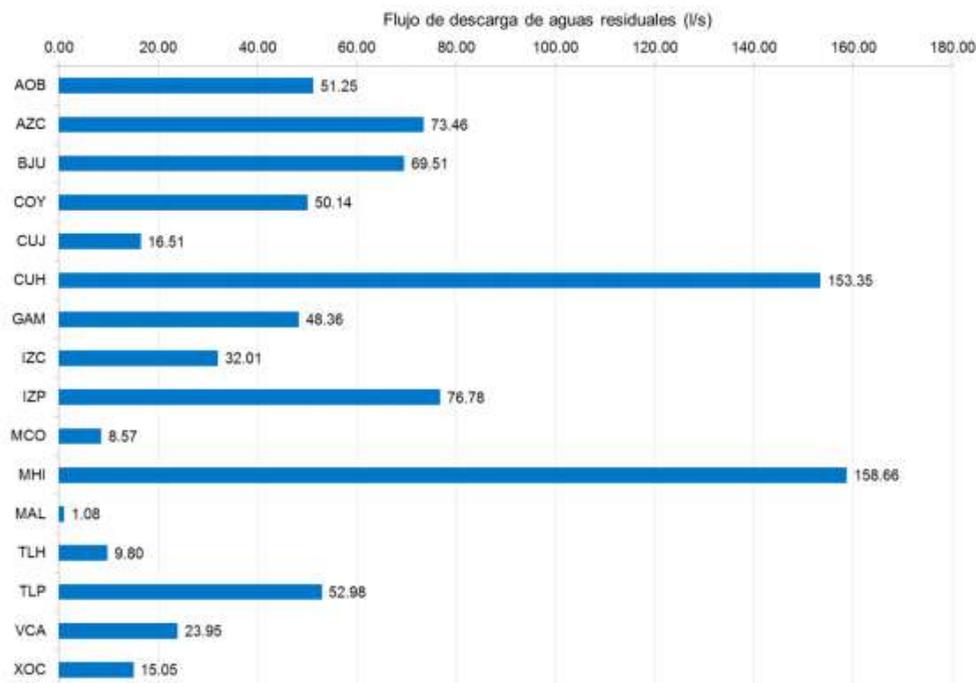
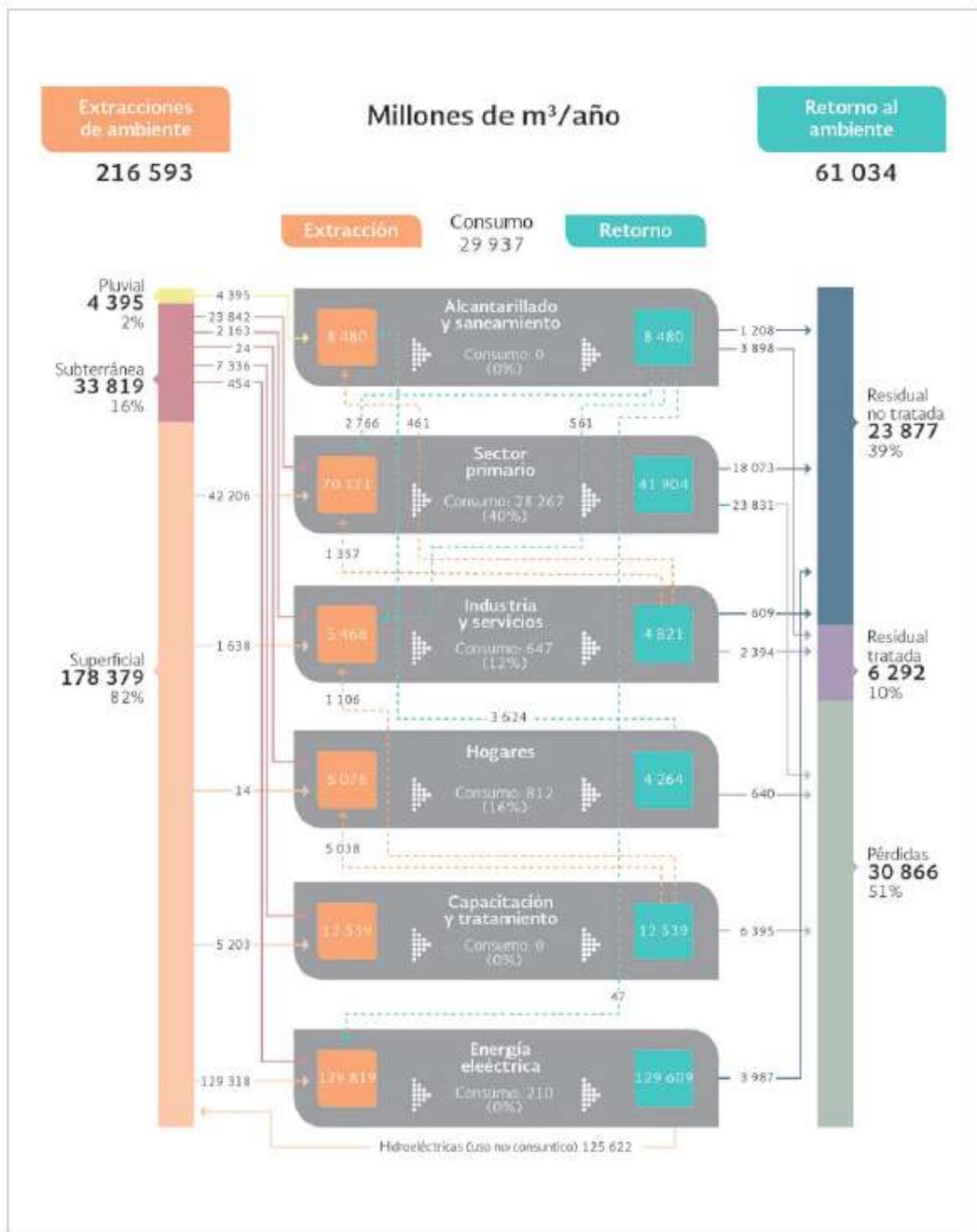


Figura 35. Flujo de agua residual por alcaldía Fuente: (SEDEMA, 2015).



Fuente: Elaborado con base en INEGI (2016k).

Figura 36. Flujo simplificado del Sistema de Aguas de la tzamala hasta la Ciudad de México. Fuente: (EAM, 2018).

Se puede visualizar, en la figura 36, el intercambio de agua en millones de metros cúbicos por año entre el medio ambiente y las actividades económicas en el país para 2016. Se observan las extracciones del ambiente de los diferentes tipos de agua, pluvial, subterránea y superficial del lado izquierdo, mientras que del lado opuesto están los retornos al ambiente de esa misma agua, dividida en aquella que es residual tratada, residual no tratada y las pérdidas.

El agua pluvial representa sólo el 2% de las extracciones de agua y es utilizada principalmente para usos industriales en pequeña medida y en gran medida termina regresando en forma de agua residual no tratada; el agua proveniente del alcantarillado sufre pérdidas significativas que promueven la contaminación cruzada. Se estima que las pérdidas totales representan un 51% del total del agua utilizada, sólo el 10% es tratada y el 39% restante retorna a los ecosistemas como agua sin tratar lo que provoca el deterioro del ambiente (INEGI, 2018).

El sector primario, el cual extrae el 40% del agua retorna ésta al ambiente en forma de pérdidas y de agua residual no tratada, mostrando que grandes volúmenes de agua no pueden ser reutilizados para otras actividades económicas; sin embargo, como es sabido, el sector primario utiliza aguas residuales de otras actividades económicas, no necesariamente después de algún proceso de tratamiento. De hecho México es el segundo país en el mundo que utiliza más agua residual para riego sin ser tratada previamente (F.UNAM, n.d.).

Alrededor del 76% del agua total es usada por el sector agropecuario, el 14.4% es para abastecimiento público, el 4.9% para la industria autoabastecida. Es importante resaltar que la mayor parte del agua tratada proviene del alcantarillado público y la industria. No obstante, la cantidad sin tratar es preocupante ya que provoca el deterioro y la contaminación de los cuerpos de agua tanto subterráneos como superficiales. Aunado a esto la sobreexplotación de los acuíferos por encima de su capacidad de recuperación aumenta significativamente el estrés hídrico.

2.2.1 Pozos

El abastecimiento de agua de las ciudades principales de México se cimienta en mayor parte por las aguas subterráneas y se apoya por las aguas superficiales. La Ciudad de México suple las necesidades hídricas de la población en un 60% por la red de 588 pozos de SACMEX situados dentro de la urbe y el Estado de México.

La profundidad media de los pozos actualmente es de aproximadamente 165 metros, algunos llegando a más de 1 kilómetro; muy alejado de las profundidades que oscilaba entre los 10 y 45 metros para la década de 1950. Se estima que los 700 pozos activos durante esos años provocaron el hundimiento del centro de la ciudad en 16 centímetros por año, con sus (Legorreta, 2004).

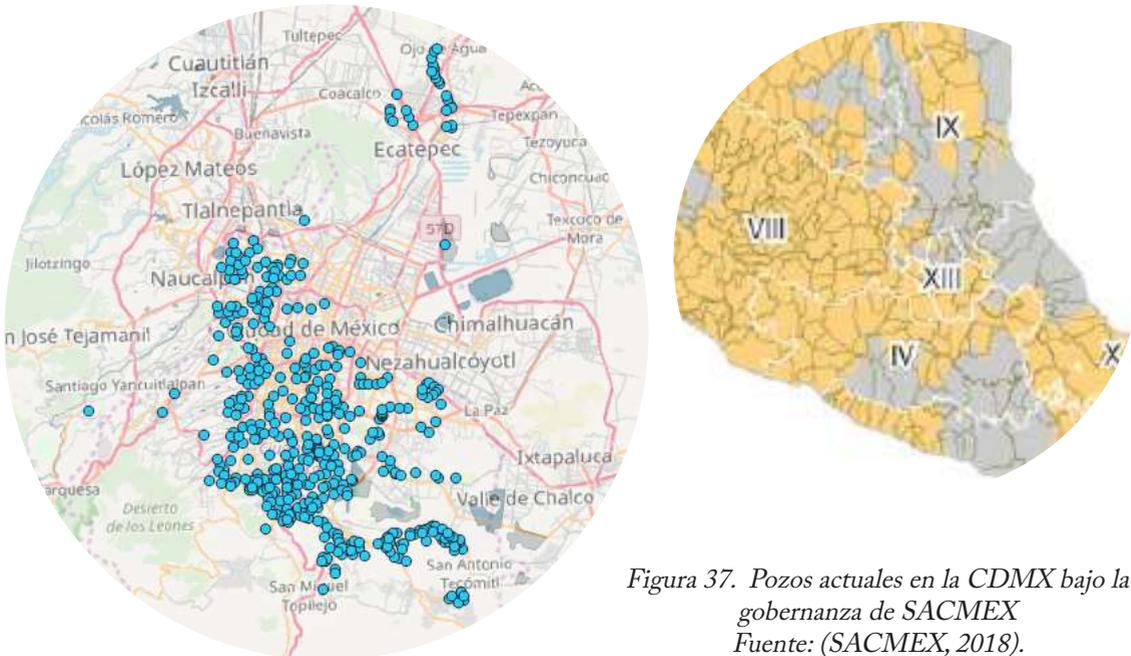


Figura 37. Pozos actuales en la CDMX bajo la gobernanza de SACMEX
Fuente: (SACMEX, 2018).

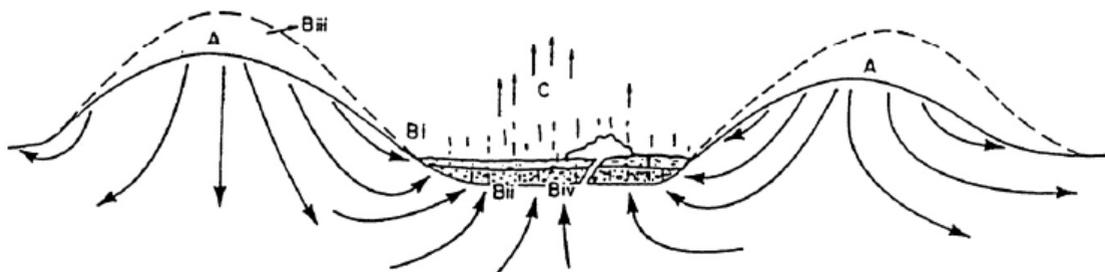


Figura 38. Infiltración de agua en el Valle de México
Fuente: (Durazo & Farvolden, 1989).

De acuerdo con Merino la mayoría de los pozos son sobreexplotados con más de 160% de su capacidad de recuperación (Merino, 2018). Mientras que el estrés hídrico dentro de la región de Aguas del Valle de México supera el 140% (INEGI, 2018). Debido a esto en octubre de 2020 SACMEX cerró 50 pozos de extracción, de los 400 que actualmente abastecen a la urbe buscando “una estrategia para suministrar sin sobreexplotar ni retirar más agua de que la que se infiltra en el acuífero”, con el objetivo de reducir la extracción de 2 mil litros por segundo de los 12 mil que se pierden (El Universal, 2020).

A pesar de las condiciones geológicas del Valle de México que promueven la recuperación natural de los acuíferos, mediante la infiltración de la precipitación de agua pluvial y nieve de las montañas aledañas y a las faldas de estas, así como el flujo de agua a través de las fracturas subterráneas, la acelerada y poco planeada urbanización y destrucción de las reservas naturales, ha provocado que la capacidad de reabastecimiento de los pozos sea cada vez menor. Más aún el aumento en la cantidad de agua requerida por la población y la industria se combinan para que el panorama sea cada vez más desalentador.

2.3 Urbanización y acciones

La desmedida urbanización de la Zona Metropolitana del Valle de México ha llevado al deterioro de los servicios hídricos provistos en ella, además el incremento previsto de los habitantes en la ciudad para las próximas décadas, la infraestructura actual, los elevados costos de renovación de la red, el manejo de los recursos y la falta de planeación urbana son factores que dan lugar a inundaciones y escasez de agua, poniendo en riesgo la seguridad hídrica de la urbe y de las zonas aledañas a ella.

La figura 39 muestra el crecimiento de la Ciudad de México y su zona metropolitana en 48 años, en 1952 se tenía una población de 2, 234, 795 de habitantes (SE, 1950) y para el 2000 eran más de 18 millones, alrededor de 9 veces de la década de los 50, sin embargo; la ONU estima que la superficie de la ciudad crece 3 veces más rápido que el número de sus habitantes (ONU, 2018).

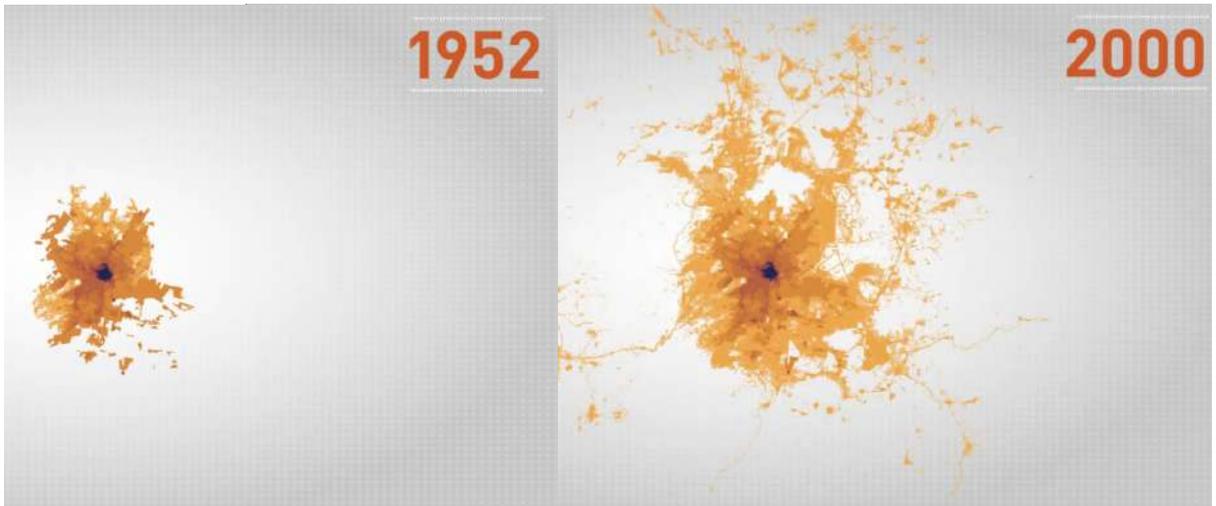


Figura 39. Urbanización de la CDMX entre 1952 y 2000 Fuente: (IMU, 2017).

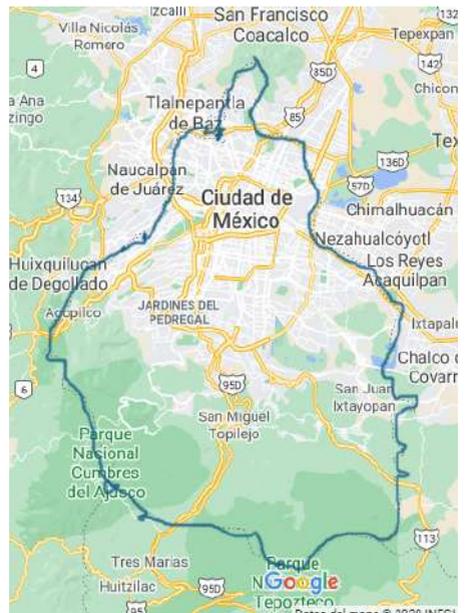
2.3.1 Disminución de las áreas verdes

Uno de los resultados del rápido crecimiento urbano sin un plan específico, es la disminución significativa de las áreas naturales, tan solo entre el año 2000 y 2008 la ciudad perdió en 1.25% de su superficie total de áreas naturales, lo que se traduce en 18.7 kilómetros cuadrados, la mayoría de los cuales tuvieron un uso habitacional (INFOBAE, 2020).

A pesar de los servicios hidrológicos que proveen las áreas verdes, los esfuerzos siguen siendo menores a los requeridos para su recuperación y conservación más aún, en una ciudad que se inunda y al mismo tiempo tiene a 70% de sus habitantes con un suministro irregular de agua (INEGI, 2018).

La figura 40 enseña en la parte superior las áreas verdes de la Ciudad de México para 2016, con aparentemente la misma cantidad en 2020. No obstante, en la figura 3.11 se observa un contraste significativo y alarmante en el que se compara la mancha urbana en rojo y los acuíferos superficiales en azul en 1800 con respecto a 1980 y 1995.

Figura 40. a) Áreas verdes en 2016 b) áreas verdes en 2020 (PAOT, 2016) & (GM,2020)



2.3.2 Nuevo enfoque de la CDMX respecto al agua



1800 - 137 mil habitantes



■ 1980- 13 millones 800 mil habitantes
■ 1995- 17 millones 100 mil habitantes

Figura 41. a) Mancha urbana e hídrica 1800, b) mancha urbana e hídrica 1980 y 1995. (Legorreta, 2006)

Durante el 2016 el gobierno de la Ciudad de México publicó el libro CDMX Sustentable para el desarrollo integral y sustentable de la megalópolis. Posteriormente, en 2019 se publicó el Programa Ambiental y de Cambio Climático para la Ciudad de México 2019-2024 el cual se basaría en 7 ejes: revegetación, rescate de ríos y cuerpos de agua, manejo sustentable del agua, cero basura, movilidad integrada y sustentable, calidad del aire y ciudad solar (Gobierno CDMX, 2019).

La revegetación busca recuperar bosques, humedales, zonas agrícolas, áreas verdes, las actividades económicas relacionadas, además de detener el crecimiento de la mancha urbana, reforestando 15 millones de árboles que proporcionarán mejores condiciones para la filtración del agua y la recuperación de los cuerpos de agua.

Así, los ejes de rescate de ríos y cuencas de agua, el manejo sustentable del agua tienen el objetivo de dotar a la población con agua potable de calidad, reducir la sobreexplotación con el cierre de 50 pozos, disminuir fugas, atender la distribución en las zonas más afectadas, sustituir agua potable por agua tratada para el riego de áreas verdes, y enfocarse en el saneamiento de los ríos, canales y cuencas de regulación (Gobierno CDMX, 2019). Además de las acciones establecidas en el plan sexenal, se han implementado programas como el de recolección de agua de lluvia Tláloc para proveer agua en zonas con suministro de agua insuficiente.

2.3.2.1 Programa de captación de agua de lluvia

La Secretaría del Medio Ambiente comenzó a implementar el programa “Cosecha de Lluvia” en la Ciudad de México desde 2018, con la finalidad de “...mejorar el abasto de agua de personas que viven en colonias de bajos ingresos...” (SEDEMA, 2019). Para el 2019 había más de 10 mil beneficiarios del programa en las alcaldías Xochimilco e Iztapalapa, planeando agregar las colonias de la alcaldía de Milpa Alta.

A finales del 2019 el programa mostró una mejora del 6.8% en el abasto de agua en zonas marginadas a partir del número de beneficiarios respecto a los hogares con escasez de agua de la zona. En Xochimilco se tuvo un 9.26% de viviendas beneficiadas, mientras que en Iztapalapa fue de un 3.3% (SEDEMA, 2019).

El gobierno provee capacitación, equipo tradicional de captación de agua pluvial e instalación para los beneficiarios. Las instalaciones y licitaciones están a cargo de empresas con licitaciones con el gobierno.



Figura 42. Programa de Cosecha de Lluvia Fuente:(SEDEMA, 2019)

2.4 Esquema simplificado del Sistema de Agua en la CDMX

A continuación se presenta un esquema simplificado del sistema de agua de la Ciudad de México con sus principales fuentes de agua y los porcentajes de agua que aportan estas a la urbe. Además se muestra en la figura 43 las diferentes elevaciones a las que están situadas. En el caso de los acuíferos subterráneos pueden alcanzar los dos kilómetros de profundidad para la extracción del líquido. Mientras que el Sistema Lerma Cutzamala requiere vencer más de 1 kilómetro de elevación más las barreras del terreno para alcanzarlo, la Presa Villa Victoria se coloca como una representación de estos cuerpos de agua, a pesar de ser parte del sistema Cutzamala.



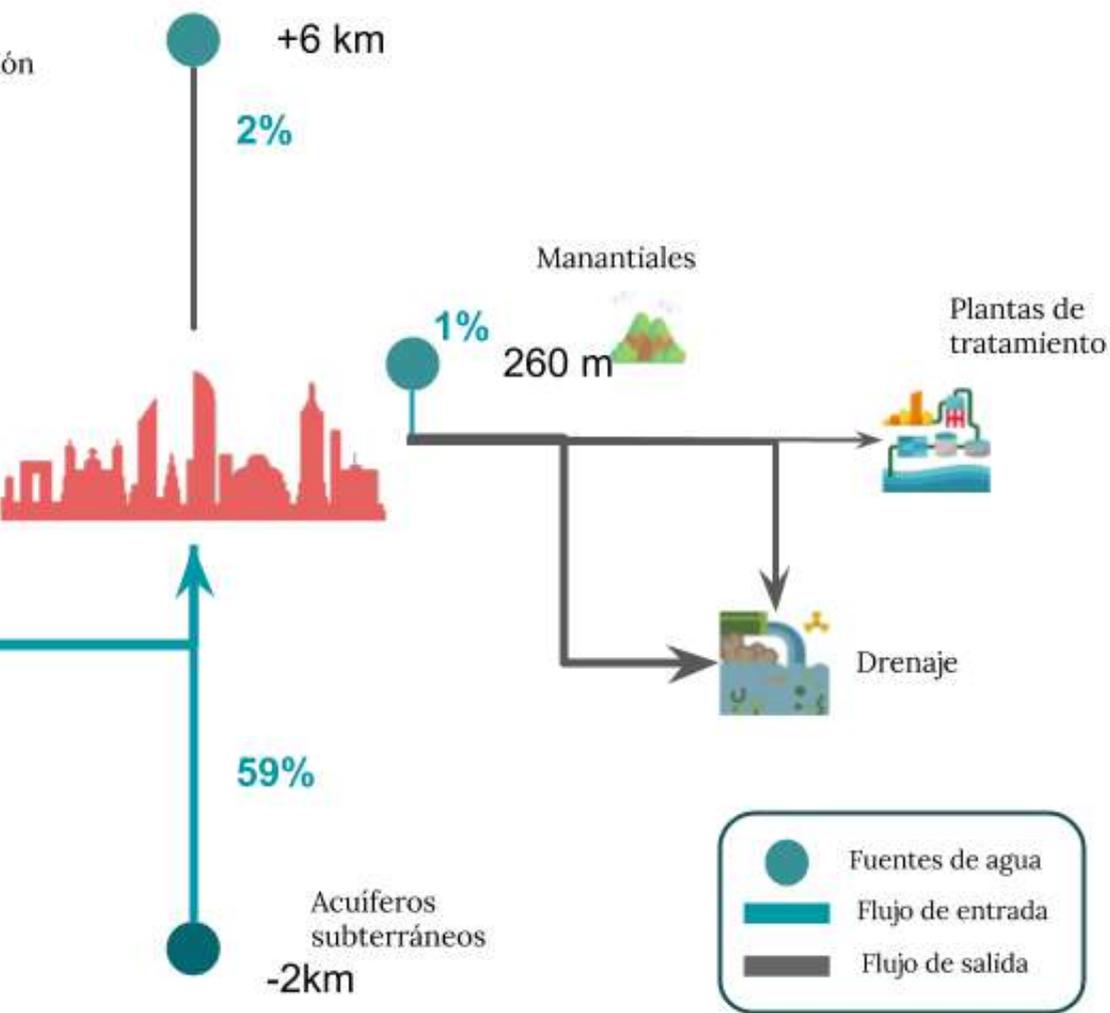


Figura 43. Esquema simplificado del sistema de agua de la CDMX (Elaboración propia)

El Sistema de Agua de la Ciudad de México enfrenta retos considerables para suplir las necesidades de sus habitantes. Al estar compuesto por uno de los sistemas de importación de agua más grandes del mundo que provee casi el 40% del agua de los ciudadanos, con una administración cuasi-centralizada del recurso, acuíferos sobreexplotados a una tasa alarmante, la pérdida de espacios para la filtración natural de agua para la recarga de los acuíferos, programas carentes de recursos, infraestructura y apoyo institucional equiparables a las condiciones críticas que se viven cada día en la ciudad, es pertinente generar soluciones a partir de una visión holística que mejore las condiciones del sistema en puntos claves.

Es importante destacar que en términos técnicos y administrativos en materia hídrica la ciudad tiene matices importantes que difieren no sólo entre alcaldías sino entre las propias colonias. Por ello, este trabajo se centrará en un caso particular de la Ciudad de México que debido a sus características puede impactar a diferentes niveles.

3.

Caso de estudio

E

l escenario hídrico de la Ciudad de México cambia en cada Alcaldía, incluso entre colonias vecinas se pueden encontrar diferencias significativas. Si bien las Alcaldías junto con SACMEX trabajan en conjunto para garantizar un abasto sostenido a los habitantes, se enfrentan retos importantes de acuerdo a las particularidades de las zonas y a la dinámica social y económica de las mismas. Por lo que, para que las soluciones tengan un efecto importante en el acceso, calidad y disponibilidad de agua en las comunidades, es necesario estudiar la pluralidad de características dentro de las alcaldías.

Así, este capítulo presenta el caso particular de estudio del proyecto donde se expondrán las razones por las que se eligió junto con sus características cualitativas que convierten a esta área en un ejemplo representativo de la ciudad en términos hídricos.

Se mostrarán las condiciones actuales y una breve descripción del sistema de agua dentro del objeto de estudio junto con un diagnóstico de los problemas más notables, considerando los aspectos técnicos, sociales, económicos, ambientales que afectan en alguna medida al sistema.

Con base en ello, se planteará conceptualmente una solución para la problemática local que pueda ser escalable y replicable a casos semejantes en la metrópoli. Partiendo desde la metodología de Investigación de Operaciones e involucrando a los usuarios en el desarrollo del trabajo.

3.1 Caso de estudio

Los retos de la gestión de recursos en las megalópolis distan importantemente de los de las ciudades pequeñas debido a la cantidad de interacciones entre sus instituciones, organizaciones, comunidades e individuos, además de la diversidad de condiciones a los que están sujetos estos mismos.

Es por ello, que dentro de esta diversidad, encontrar soluciones que satisfagan las necesidades de cada uno de los actores del sistema al mismo tiempo es complejo. Sin embargo, encontrar concordancias entre ellos permite proponer soluciones que ayuden a cierto sector de la población de estas ciudades.

El presente caso de estudio tiene la particularidad de potencialmente atender las necesidades hídricas de los habitantes de la urbe que vivan en una Unidad Habitacional con ciertas características. Para 2010, 2.2 millones de personas residían en las 7, 233 unidades habitacionales dentro del Padrón de unidades de la Procuraduría Social, así 25% de los habitantes de la Ciudad de México son parte de la dinámica de este tipo de vivienda (GobDF, 2011).

Considerando que la Ciudad de México aporta la mayor cantidad de Producto Interno Bruto del país, y que en 2018 produjera 17.7% del PIB nacional (INEGI, 2018), hace evidente que garantizar el acceso al agua a 25% de su población influiría en la productividad de la urbe y del país. Tan sólo la Alcaldía de Coyoacán proporcionó 2.34% de esa cantidad, el equivalente a la aportación del PIB de todo Nayarit que tiene el doble de los habitantes de la alcaldía (INEGI, 2013). Aunque Coyoacán está lejos de ser la alcaldía más productiva de la ciudad, sí presenta variedad en los niveles socioeconómicos de sus habitantes, con un grado de desigualdad y marginalidad moderado. Los niveles de pobreza extrema son reducidos y sólo llegan al 0.58%, se presenta pobreza moderada, vulnerables por carencias sociales, por ingresos y en su mayoría, alrededor del 45% son no vulnerables.

Además de los aspectos demográficos y económicos de la alcaldía, ésta es relevante por ser el centro geográfico de la ciudad, colindando con 5 alcaldías: Benito Juárez, Iztapalapa, Tlalpan, Álvaro Obregón y Xochimilco por lo que en términos de conectividad y movilidad, es un punto de interés.

Por el carácter del estudio, es pertinente tomar en cuenta las características físicas generales de la alcaldía. La mayor parte de ella se encuentra a 2440 m, con fluctuaciones de altura que llegan a los 2450 metros sobre el nivel del mar. Dos tipos de suelo son predominantes en la zona, roca volcánica en el sureste, denominada como basalto de alta compresión permeable 10 o más duro y el suelo propio de las zonas lacustres clasificado de transición, feozem, de buena compresión 9 o más duro (Gobierno Federal, n.d.). Sin embargo, con el paso del tiempo las características del suelo han cambiado significativamente por el rápido desarrollo urbano (INAFED, n.d.).

Dos ríos principales cruzan la región, el río Magdalena por el sureste y el río Mixcoac, que al juntarse se convierten en el río Churubusco. El canal Nacional también cruza dentro de los límites de la alcaldía y es parte de la Región del Pánuco, de la Cuenca Rey Moctezuma y la Subcuenca Lago Texcoco Zumpango (INAFED, n.d.). A pesar de que los cambios drásticos al paisaje han afectado el ecosistema en relativamente poco tiempo, es una zona de captación de agua por su naturaleza lacustre.

Debido a que la urbanización ha cambiado las características físicas de la alcaldía, no es de sorprenderse que la comunidad enfrente situaciones de inundaciones y escasez de agua. En septiembre de 2020 en dos días se registraron lluvias de 100 mm, hecho que ha sucedido 6 veces en 20 años, de acuerdo a registros de SAC-MEX, además de las inundaciones de más de 1 metro de altura en varias colonias de Coyoacán, el brote de aguas residuales causadas por la inundación de 1 sólo día, afectó el Hospital Xoco, que es uno de los hospitales más importantes de la ciudad (Infobae, 2020).

La Villa Panamericana fue construida para los atletas de los Juegos Panamericanos, por lo que es parte del 10% de las unidades que fueron terminadas en la década de 1970 y del 75% que se edificó antes del año 2000 (GobDF, 2010). La figura 45 muestra el porcentaje de las unidades habitacionales erigidas desde la década de 1940 hasta el 2000. Se observa que casi un 30% fue edificado en los años 80, 25% en la década de 1990, por lo que, la mayoría de las unidades habitacionales posee una infraestructura que al cumplir con las normas de los años en las que fueron construidas, no estén necesariamente actualizadas con las normas actuales y por tanto, presentan problemáticas similares. Debido a esto, el caso de estudio seleccionado conjunta una serie de elementos que pueden ser encontrados en un porcentaje significativo de viviendas de la urbe más importante del país.

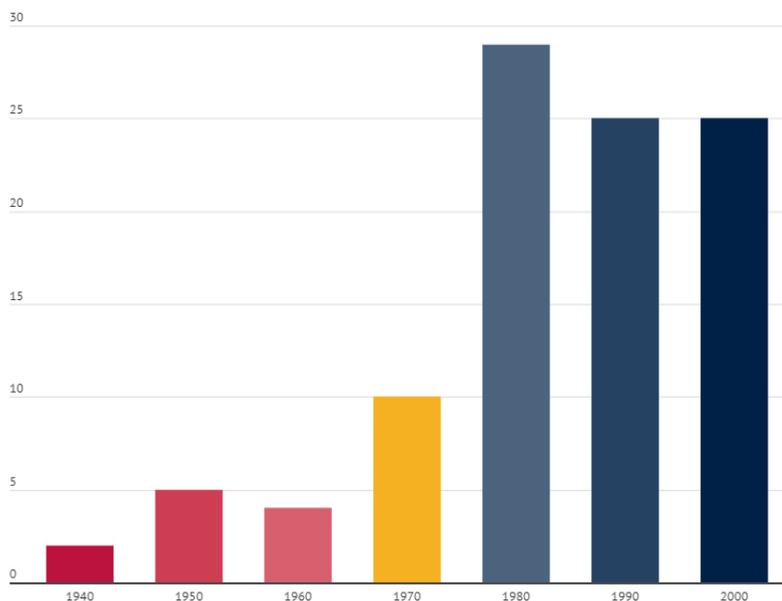


Figura 45. Gráfica de porcentaje de unidades habitacionales construidos por década, desde 1940 hasta 2010 en la CDMX (Elaboración propia con base en (GobDF, 2010)).

3.1 Diagnóstico

La U.H. Villa Panamericana enfrenta diversas problemáticas en cuanto a manejo de recursos y específicamente entorno al agua. Es bien sabido, entre los colonos que la escasez de agua en esta colonia no es reciente. Por un lado, al inicio de su construcción la falta de infraestructura era una de las causas principales de la falta de agua; el rápido crecimiento a medida que se terminaban de edificar las secciones, aumentó algunos de los problemas existentes.

Ya que el complejo fue terminado en los años 1974 y 1975, más del 85% de las tuberías son de asbesto cemento que cumplían normas anteriores a las establecidas por la Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial, las normas NMX-C-039-1981 que fueron publicadas en 1982 (SE, 1982). Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos junto con diversos gobiernos alrededor del mundo han prohibido su uso por ser causante de efectos adversos a la salud (ATSDR, n.d.). Las tuberías han tenido poco mantenimiento preventivo por parte del gobierno por lo que muchas de las tuberías simplemente son reemplazadas cuando han llegado al punto de ruptura. La corrosión además es significativa por la cantidad de minerales presentes en el agua, como se observa en la figura.



Figura 46. Tubería con corrosión.



Figura 47. Cuarto de bombas.

Se considera que el tiempo de vida útil de las tuberías de cemento está entre los 30 y 50 años (SIMEX, n.d), aunque las tuberías instaladas en las rinconadas llevan 45 años de uso, no hay un plan para renovar la red dentro de los planes y presupuestos gubernamentales, este es el caso de las unidades habitacionales construidas antes del 2000. Alrededor del 15% de las tuberías de la Villa Panamericana son de polietileno de alta densidad, que son instaladas sólo cuando alguna de las tuberías de asbesto cemento sufre ruptura. Éste también es un indicador de que la vida útil de las tuberías anteriores está llegando a su fin.

La cisterna principal tiene una capacidad aproximada de 3630 metros cúbicos, el equivalente a 3 millones 630 mil litros. De acuerdo con el personal de mantenimiento y operación de las bombas, la cisterna se llena 3 veces al día por lo que el consumo aproximado de la unidad habitacional, contando negocios es de 10 millones 890 mil litros cada día. La cisterna ha resistido a 4 terremotos; sin embargo, a pesar de su antigüedad y la de las bombas estas operan adecuadamente y el mantenimiento es regular.

Con el objetivo de conocer el consumo de las aproximadamente 4500 familias que habitan las rinconadas pertenecientes a la Unidad Habitacional se realizó una encuesta a una muestra 167 de esas familias, representando un nivel de confianza del 90%. En ella se preguntó sobre las actividades en las que se usa agua para estimar el volumen de agua utilizada cada día. El 46% de los hogares no tienen regadera ahorradora de agua, por lo que pueden consumir 18 litros de agua por minuto, 42% tarda entre 6 y 10 minutos en la regadera, 77% tiene un abastecimiento regular de agua y 19% ha tenido algún tipo de fugas.

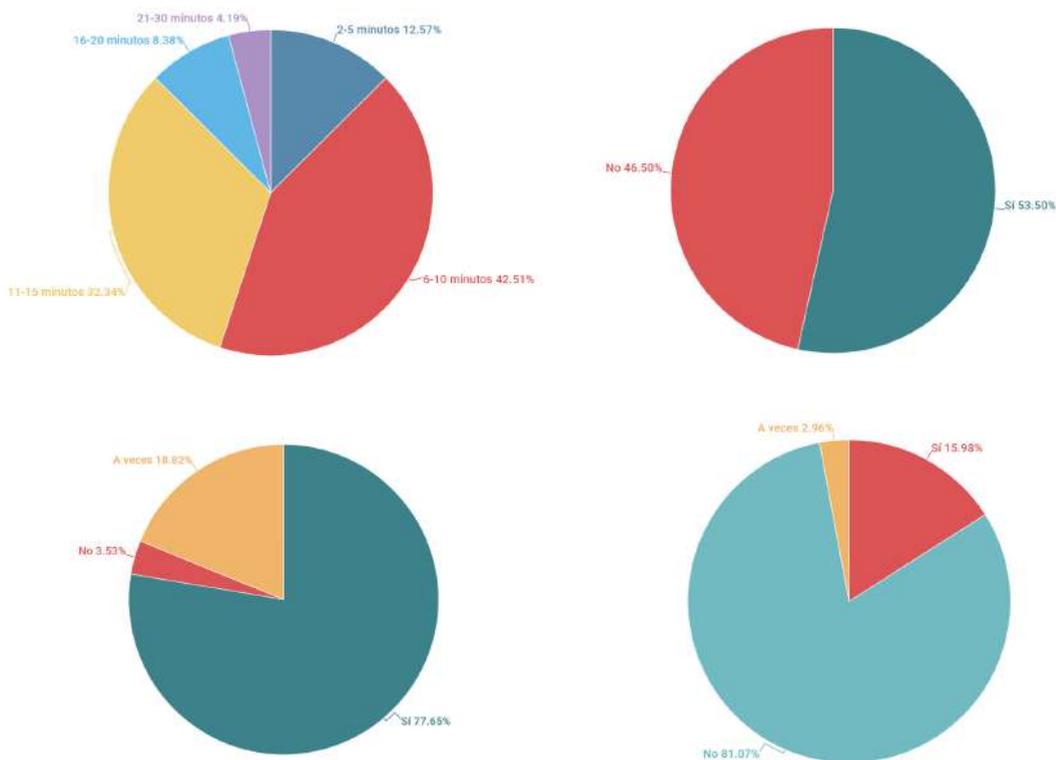


Figura 48. a) tiempo de uso de regadera b) regaderas ahorradoras, c) regularidad agua, d) fugas de agua.

A partir de ello y de acuerdo con las estimaciones de consumo de la U.S. Geological Survey, se calculó el uso promedio de los hogares de la Villa Panamericana, siendo este de 1303 litros por familia cada día, con una varianza de 800 litros. Así, la sobreexplotación de los acuíferos de la zona por parte de la U.H. Villa Panamericana es de aproximadamente 7,600 litros por minuto, de acuerdo al consumo de cada vivienda y el uso diario de la cisterna.

Una línea de pozos son los que surten el agua de la unidad, los pozos de Periférico No. 19, 20 y 21, los pozos de Villa Olímpica 1 y 2, y el pozo de los pedregales que actualmente se encuentra inactivo, son los que proporcionan el 90% del recurso a la viviendas de la unidad. Los pozos van desde los 50 hasta los 60 metros de profundidad (SACMEX, n.d.).

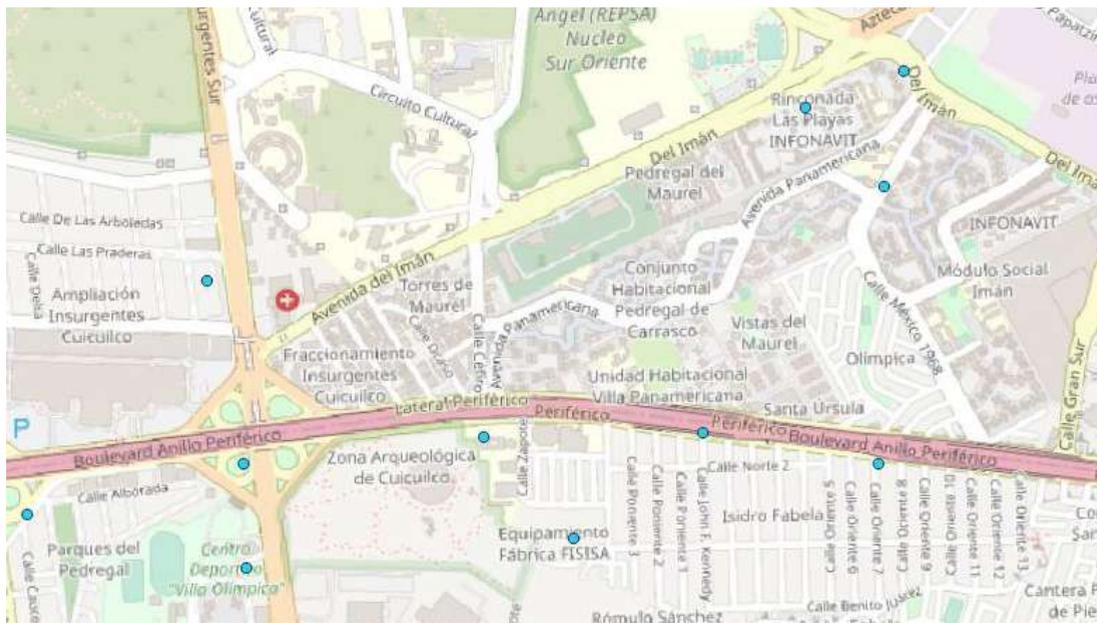


Figura 49. Mapa indicando los pozos (SACMEX, 2016).

Se estima que estos pozos abastecen a la cisterna principal con 4 a 6 centímetros cúbicos por segundo; sin embargo, estas cifras son variables y dependen del manejo de los acuíferos por parte de SACMEX, la demanda externa de estos y los trabajos de mantenimiento que se realicen. Además se ha reportado que los pozos llegan a tener fallas en la energía eléctrica, dejando sin suministro a las colonias que dependen de ellos, generalmente el mantenimiento realizado a los pozos es correctivo, incluso algunos de los pozos que antes proveían agua a la colonia fueron abandonados por el gobierno, el cual se encarga de la operación hídrica.



Figura 50. Pozo Villa Panamericana (foto propia).

Por otro lado, las fugas son un problema considerable, generado por diversos factores, entre ellos la edad de la red de tuberías. Estas fugas son reparadas por SACMEX, la alcaldía y la colonia en conjunto; no obstante el material de reparación ha sido deficiente desde la primera administración del PRD, además a partir de la creación de la brigada antifugas (Crónica, 2019) no hay material disponible para su arreglo, se tardan alrededor de 2 semanas en obtenerlo y es la colonia quien paga los materiales con ayuda de las actividades cooperativas que durante la pandemia se han visto restringidas por lo que no hay ingresos para la reparación de fugas y la administración general del agua dentro de la colonia.

Además el manejo del agua por parte de los habitantes es poco informado, ejemplo de ello es el agua utilizada para el riego de áreas verdes, el cual se realiza con agua potable tomada de la cisterna principal. Incluso en época de estiaje, se usan los recursos hídricos destinados a consumo humano.

La administración deficiente de los pozos, la falta de planos de la red hídrica de la colonia, la obsolescencia de las tuberías, el manejo insuficiente de las fugas y el consumo irresponsable del recurso la falta de acciones de concientización y de un plan integral para reducir la sobreexplotación de los acuíferos y contribuir a su recuperación , hacen que el panorama hídrico de la colonia sea desalentador.

3.2 Escenario actual

Los hallazgos obtenidos durante la fase del diagnóstico de la situación hídrica actual de la U.H. Villa Panamericana llevaron a la realización de un modelo de simulación para comprender y visualizar el comportamiento del estado actual del sistema en un año, determinar las necesidades reales de la colonia en este aspecto y plantear las especificaciones para la generación de propuestas de solución.

El diseño conceptual del escenario actual se presenta a continuación como punto de partida y diagnóstico de la situación del sistema real, plantéandose un método de simulación combinado de eventos discretos y dinámica de sistemas. Se consideraron los siguientes aspectos para la construcción del modelo de simulación:

- **Entradas:** agua potable proveniente de los pozos 19, 20 y 21 de la batería de Periférico Sur y el pozo de la Rinconada Las Playas.
- **Agentes:** SACMEX y Alcaldía para suministro de agua, colonia en la distribución, habitantes en consumo, agua.
- **Variables** dinámicas: fugas en tuberías, válvulas, almacenamiento, falta de agua por problemas externos o internos, ya sea de parte de SACMEX, la Alcaldía o por consumo excesivo; fallas en la energía eléctrica por falta de mantenimiento, sobrecargas, deficiencias en la red eléctrica. La reparación de fugas por parte del gobierno y la colonia, y la atención de CFE para resolver las fallas en el suministro de energía eléctrica.

- **Procesos:** Suministro agua de pozos, llenado de cisterna principal, decisión de suministrar agua (válvula abierta o cerrada), división de flujos de agua por sección, decisión procesamiento de agua (fuga o consumo), consumo de agua, desecho de agua. Evento de cortar agua asociado a la dinámica de sistemas.
- **Servidores:** tanques de mezclado para representar la cisterna principal y el drenaje, tanques de procesamiento para el consumo de las secciones de la unidad.
- **Salidas:** aguas residuales provenientes del consumo de los habitantes y de las fugas de agua.
- **Suposiciones:** se supone una red de tuberías simplificada por la falta de planos, también su probabilidad de fallo de acuerdo con los reportes de fuga en los canales de comunicación vecinal de la colonia y a su tiempo de vida útil; los pozos surten a otras colonias, la sobreexplotación de los acuíferos se atribuye sólo en cierto porcentaje a la Villa Panamericana, se desconoce ese porcentaje.
- **Simplificaciones:** el suministro de agua se da en un 90% por los pozos antes mencionados y en un 10% por el sistema Cutzamala; sin embargo, debido a la zona de la ciudad y al estado actual de algunos pozos, se simplificó el suministro a 4 pozos principales; por otro lado, se consideró una red simple para representar el suministro de la cisterna principal a cada una de las secciones, el consumo de agua por edificios, casas y rinconadas se representó a través de 8 secciones; los datos se ajustaron a distribuciones de probabilidad teóricas para demostrar el comportamiento del sistema dentro del modelo; aunque en la realidad, existen más variables dinámicas que contribuyen a corte de agua en la colonia, se consideraron únicamente las más comunes. Finalmente, debido al software considerado para el modelo computacional tiene capacidad para ser ejecutado durante una hora, se contempló que una hora fuera equivalente a un año.

Con las consideraciones anteriores se construyó el diagrama de flujo con la lógica del sistema para la parte del método de simulación por eventos discretos.

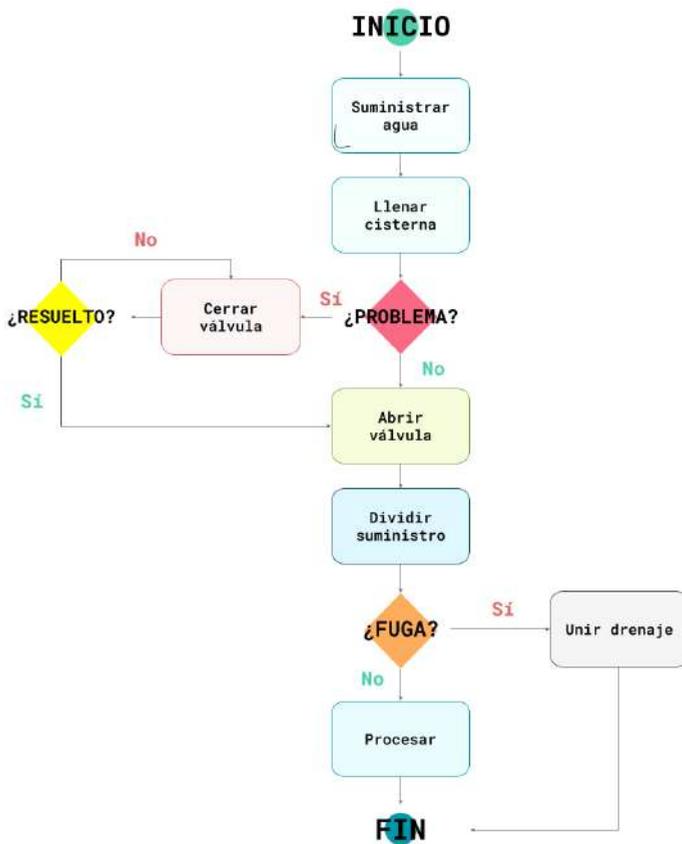


Figura 51. Diagrama de flujo del sistema para eventos discretos (Elaboración propia)

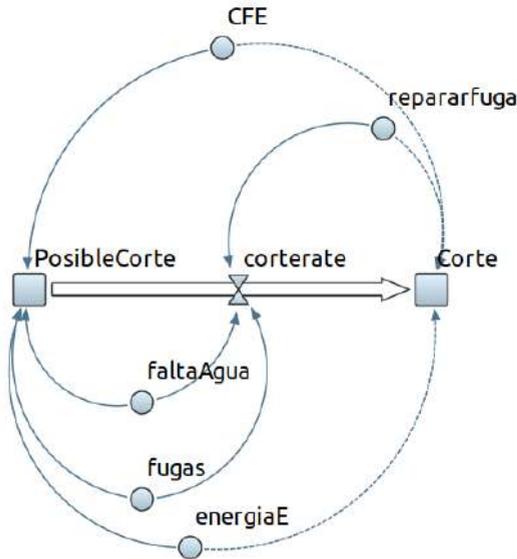


Figura 52. Diagrama de flujo de dinámica de sistemas
(Elaboración propia)

El método de dinámica de sistemas para el análisis del sistema actual permite tener una realimentación importante con base en el comportamiento de las variables dinámicas que afectan al sistema. Por un lado, están las variables que contribuyen a un posible corte en el suministro de agua tal como la falta de agua por consumo excesivo o por problemas relacionados con sequías o mantenimiento a los pozos por parte de SACMEX o la alcaldía. Las fugas en la red, tanto en tuberías como válvulas.

El corte en el suministro de energía eléctrica causada por variaciones de voltaje, falta de mantenimiento, tormentas o fallas de cualquier tipo.

Por otro lado, están las variables que evitan el corte o permiten que se reestablezca el servicio, tal como las reparaciones de fugas en la red principal o en los edificios, y el servicio de la Comisión Federal de Electricidad para componer los elementos dañados y restaurar el suministro de energía eléctrica para el funcionamiento estable de las bombas de agua. Parte de las simplificaciones del modelo, fue el considerar las variables más importantes que influyen en la tasa de corte provocando un corte inminente o evitándolo. La tasa de corte varía con el tiempo y el sistema se muestra como una planta de lazo cerrado.

Parte crucial de la simulación son los datos asociados a los procesos y variables, debido a la naturaleza estocástica del sistema real, estos datos se ajustan a distribuciones de probabilidad que reflejarán la conducta general del sistema. La siguiente figura muestra el histograma del consumo general de agua en la Villa Panamericana, siendo comparado con diferentes distribuciones de probabilidad teóricas. La distribución de probabilidad más cercana a los datos de acuerdo con las pruebas de bondad de ajuste realizadas por el software *MATLAB*, siendo la distribución lognormal con una media de 1295 litros y una varianza de 698 mil litros diarios la que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

Posteriormente, se dividieron los datos correspondientes a las 8 secciones, ajustándolos a las distribuciones teóricas, cuyo comportamiento será visible en los tanques de procesamiento dentro del modelo.

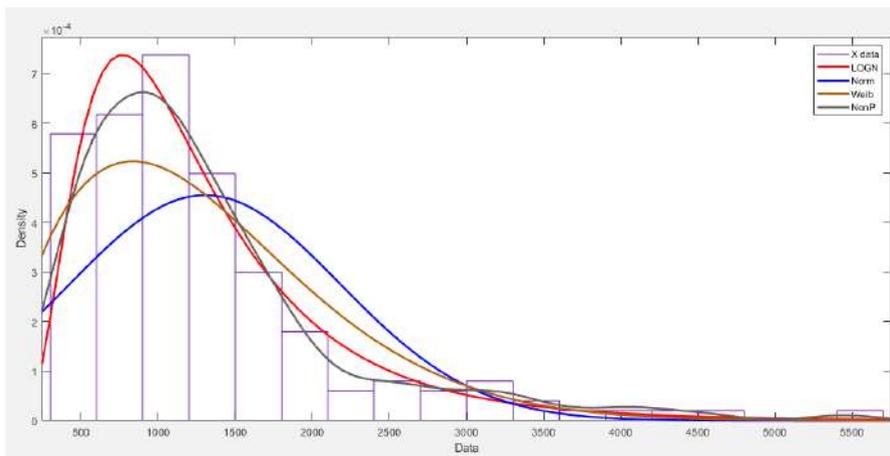


Figura 53. Gráfica de consumo de agua con distribuciones ajustadas (Elaboración propia)

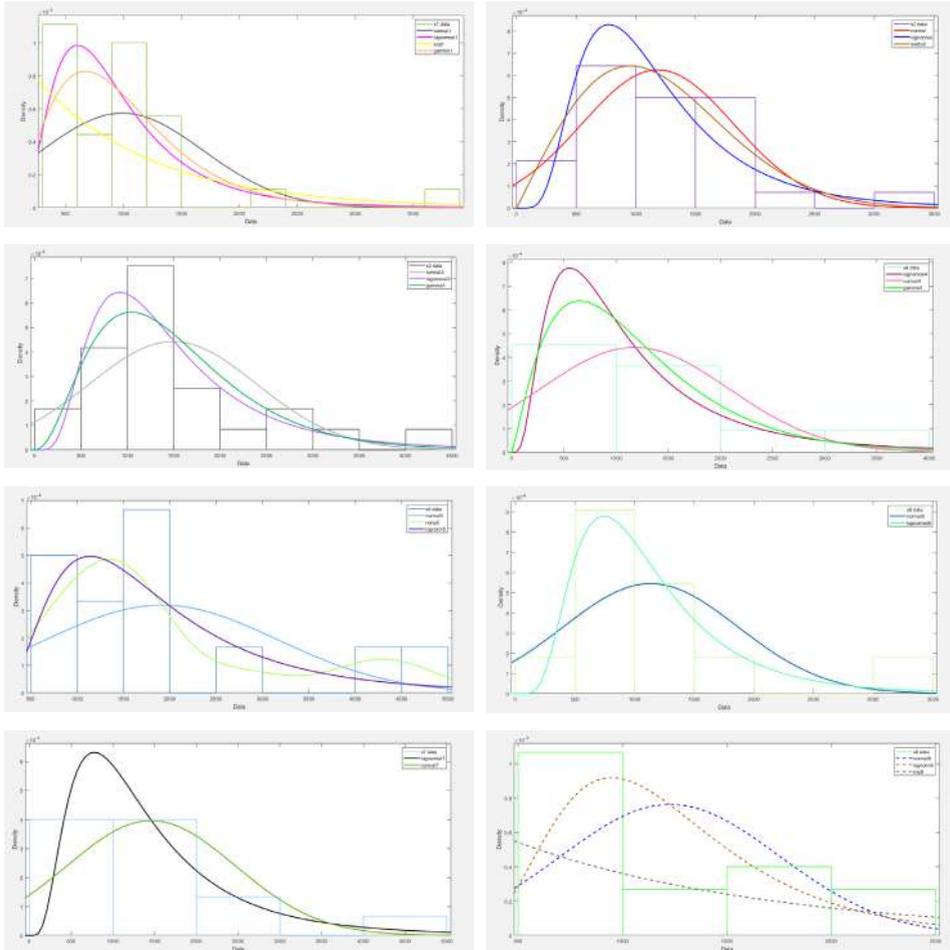
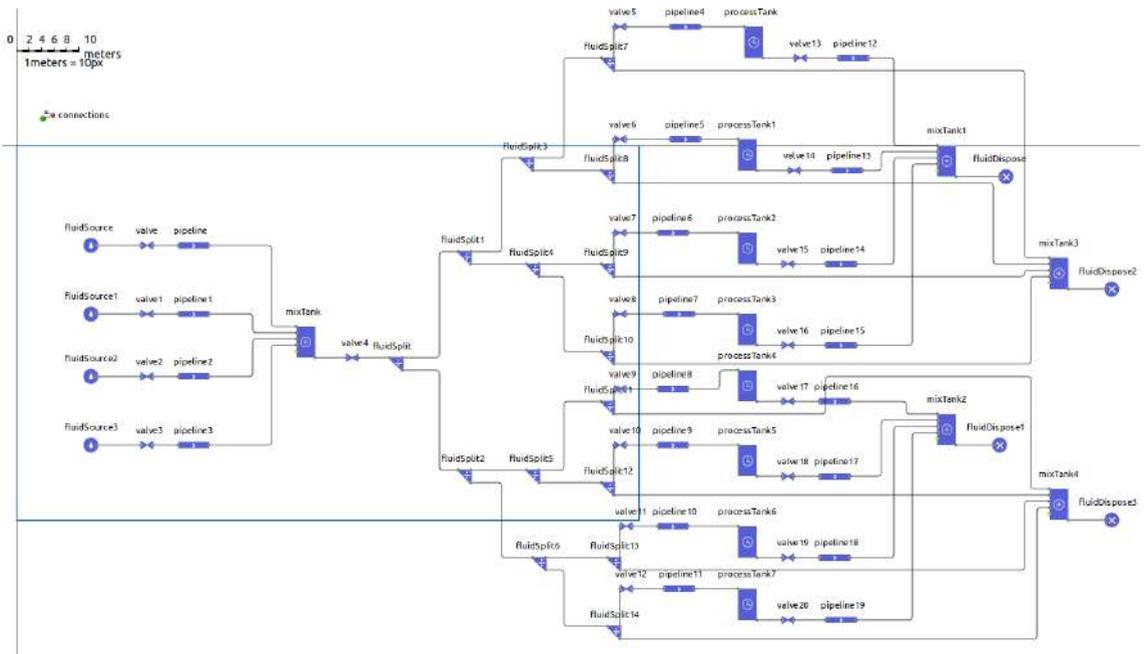
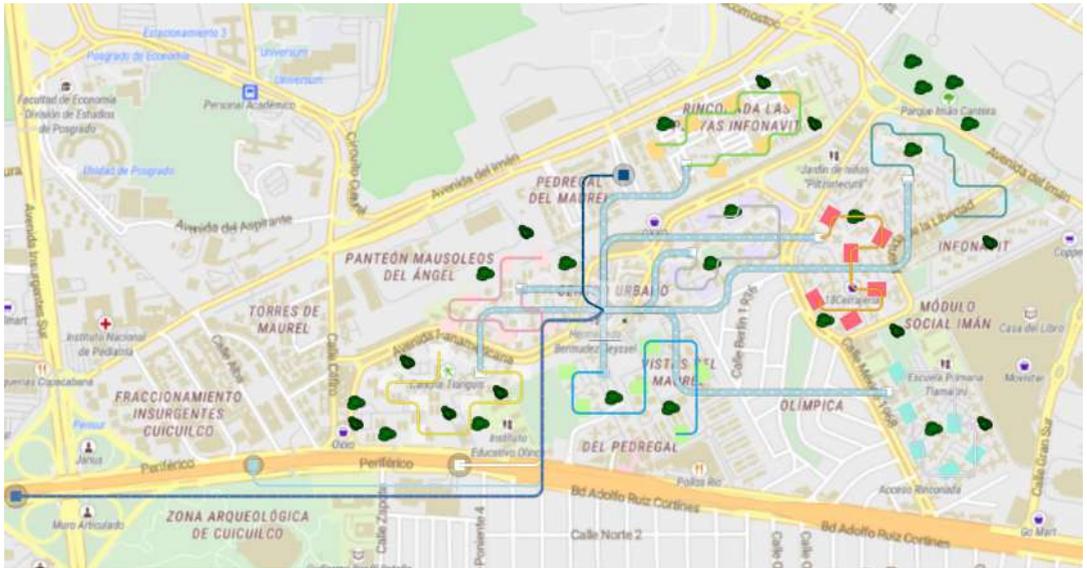


Figura 54. Gráficas de consumo de agua con distribuciones ajustadas de las 8 secciones de la Villa Panamericana (Elaboración propia)

Además se hicieron los cálculos correspondientes para escalar un año de la dinámica hídrica dentro de la colonia a los 60 minutos del modelo computacional. La siguiente figura muestra el esquema de los servidores de la parte de eventos discretos que están influenciados por la dinámica de sistemas de los cortes de agua, mediante el evento de corte de agua, el cual controla la válvula principal.



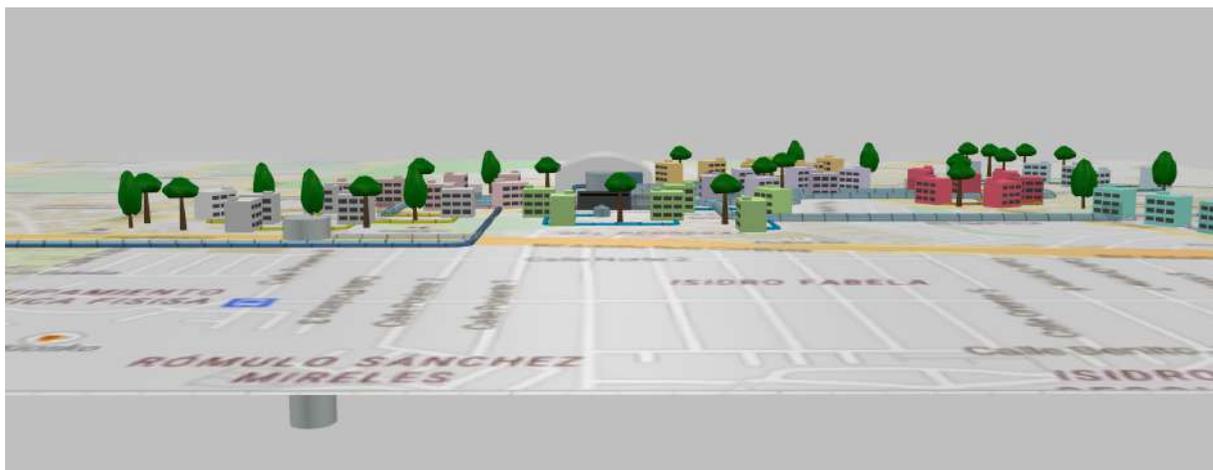
*Figura 55. Esquema del método de eventos discretos
(Elaboración propia)*



*Figura 56. Representación 2D del modelo de simulación
(Elaboración propia)*

La figura 56 muestra la representación en dos dimensiones del modelo de simulación, donde los 4 pozos principales llenan 3 veces al día, la cisterna principal a un caudal de entre 2 y 4 metros cúbicos por segundo en una escala de tiempo real. Cada hora del modelo computacional representa 365 días, por lo que cada día se visualizará en 9.86 segundos de simulación. La vista en dos dimensiones permite observar el consumo hídrico dentro de la región geográfica y ubica las distancias a las que se encuentran los pozos de la cisterna principal. Es importante mencionar que los pozos también proveen agua a las colonias aledañas, por lo que los 126 litros por segundo (en escala de tiempo real) que la U.H. Villa Panamericana extrae es sólo una parte de la sobreexplotación total de los acuíferos.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, la recarga media anual de los acuíferos subterráneos de la Ciudad de México es de 512 hectómetros cúbicos al año y la extracción es de 1020 hectómetros cúbicos anuales de los 454 pozos de extracción dentro de la urbe, además no existen salidas naturales del acuífero más que por extracción por bombeo (CONAGUA, 2020). Según el consumo diario de agua dentro de la colonia, los pozos aportan 3.97 hectómetros cúbicos al año, proporcionalmente (sin considerarse aspectos adicionales como la densidad poblacional de las zonas y la capacidad de los cuerpos de agua, entre otros) con el número de pozos totales de la ciudad, los 4 pozos tendrían una extracción anual de 4.5 hectómetros cúbicos, por lo que basados el consumo de agua de la colonia es significativo. Si bien se desconoce exactamente la capacidad de recarga y la extracción total de los pozos, se hace una aproximación para el presente estudio.



*Figura 57. Representación 3D del modelo de simulación
(Elaboración propia)*

Los pozos 18 y 19 de Periférico Sur, representados en la gráfica por Pozo 1 y 2 son los que proveen 70% del agua de la cisterna, mientras los pozos más lejanos, el pozo 20 de Periférico Sur y el pozo 16 de la Rinconada de las Playas proveen 20 y 10% respectivamente. Por lo que la extracción de los 3.97 hectómetros cúbicos anuales por parte de la Villa Panamericana se da en la misma proporción: 1.38 hectómetros cúbicos anuales para cada uno de los pozos principales, de 0.79 hectómetros cúbicos para el pozo 20 y de 0.39 metros cúbicos para el pozo interno de la Rinconada.

Además el uso del agua dentro de cada una de las secciones sigue una distribución uniforme, como se muestra en la figura; sin embargo el consumo se comporta de acuerdo a distribuciones normales y log-normales como se mencionó anteriormente, las medias de consumo por hogaren cada sección son de: 983, 1193, 1491, 1197, 1926, 1132, 1481, 1234 litros al día respectivamente.

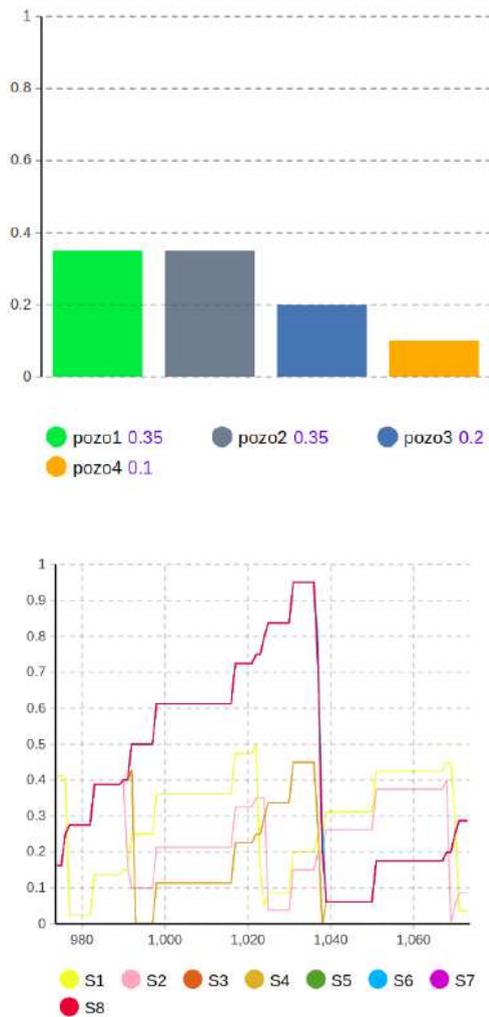


Figura 58. Gráficas de pozos y consumo (Elaboración propia)

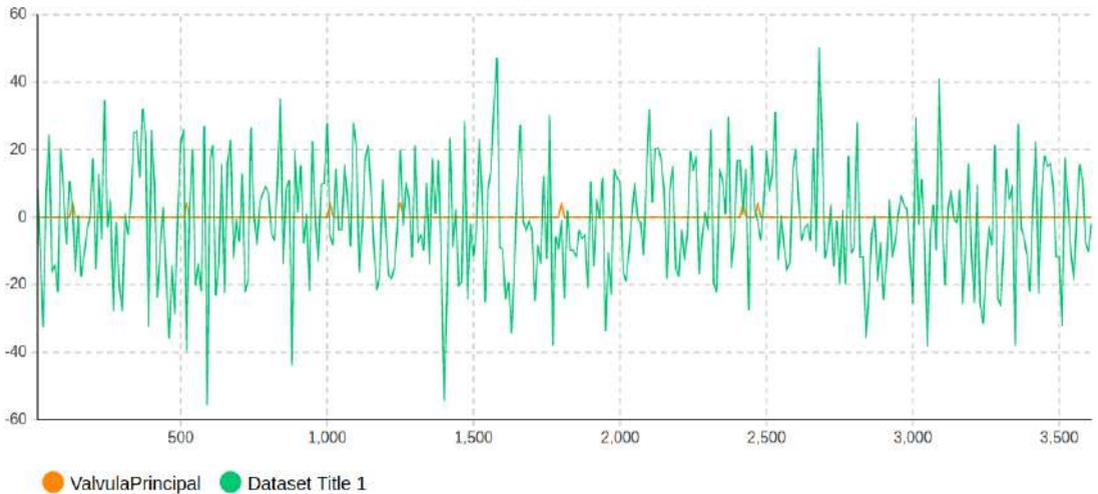


Figura 59. Gráfica de paros de válvula principal y tasa de corte de suministro de agua (Elaboración propia)

Una parte crucial del modelo es la respuesta de la parte de dinámica de sistemas donde se representan los cortes de agua en la colonia de acuerdo con las variables dinámicas dadas por las fugas, las fallas en la energía eléctrica y la falta de agua, contrarrestadas por la reparación de fugas y la reparación de la línea eléctrica. La figura 59 muestra en verde la gráfica correspondiente a las variaciones en el sistema que provocan los cierres de la válvula principal que se conecta con la cisterna general y el sistema de bombeo de la colonia.

El número de veces en que se da un corte general de agua en la U.H. al cerrar la válvula principal es de 36 veces al año, generando colapso como se observa en la figura 60. En el sistema real, también se dan cortes particulares en las secciones para la reparación de fugas en cada sección.

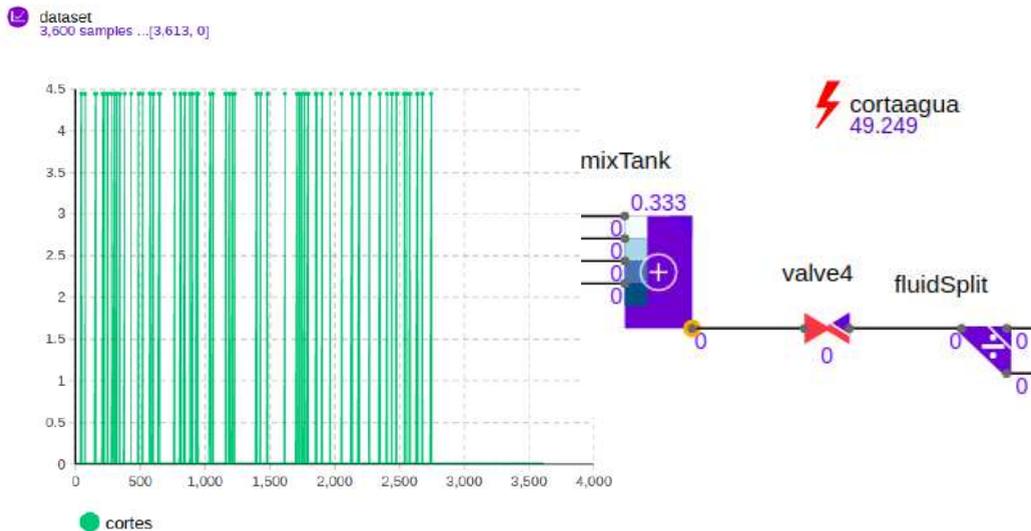


Figura 60. Gráfica de número de paros de válvula principal y esquema del evento en funcionamiento (Elaboración propia)

Los cortes de agua generales varían en duración, siendo el tiempo máximo de corte de 15 segundos, el equivalente a 36 horas y el mínimo de 2 segundos; es decir, 4 horas reales.

El consumo total de agua de la colonia al año es de aproximadamente 3 millones 974 mil 850 metros cúbicos. Lo que equivaldría a que toda la unidad de 2 kilómetros cuadrados de área, estuviera bajo 1.98 metros de agua.



*Figura 61. Fuga en cisterna principal
(Foto de Villa Panamericana)*

Este modelo de simulación destaca dos problemas importantes, el primero que al tener únicamente una forma de suministro de agua, las actividades se ven afectadas y el segundo es la cantidad de agua consumida y extraída al año de esa misma fuente, además de los problemas asociados a la red interna que se observan en la probabilidad de fugas, tanto a nivel general como en cada una de las secciones.

La realidad hídrica de la Villa Panamericana conjunta una serie de problemas sin resolver que se consideraría una crisis en aumento. Si bien, el suministro de agua es constante, abundante y con una calidad aceptable, la sobreexplotación de los acuíferos, la antigüedad de la infraestructura hídrica, el consumo excesivo, poco informado, las fugas, el deficiente manejo por parte del gobierno, son factores que afectan el acceso, la disponibilidad y el aprovechamiento del agua a corto, mediano y largo plazo.

4.

Propuesta

*L*a situación hídrica de la Ciudad de México y particularmente de la U.H. Villa Panamericana podría detonar crisis sociales, económicas y ambientales mayores a las que se experimentan actualmente. Por ello, es vital que se desarrollen soluciones que aporten mejoras consistentes y graduales desde un enfoque sistémico para lograr un impacto significativo.

Teniendo una visión que conjunta tanto la parte sistémica como el diseño centrado en el usuario, el presente capítulo muestra propuestas conceptuales de solución para la problemática local que puedan ser escalables y replicables a casos semejantes en la metrópoli.

A partir de las condiciones hidrológicas de la zona de la ciudad, el consumo de agua potable dentro de la colonia y las acciones que han sido implementadas con anterioridad en diferentes partes del mundo, se presentan las consideraciones contempladas para cada una de las propuestas junto con sus respectivos supuestos y simplificaciones.

Es importante destacar que las alternativas expuestas a continuación para la captación de agua de lluvia tienen el objetivo principal de reducir la sobreexplotación de los acuíferos para así mitigar los efectos de la crisis hídrica existente y futura.

Las propuestas consideran las soluciones óptimas factibles bajo las circunstancias contempladas; sin embargo, pueden presentarse factores externos en donde ajustes adicionales sean requeridos. Así, se toman en cuenta únicamente los aspectos más relevantes para el caso de estudio abordado y se hace énfasis en la pertinencia de la captación de agua pluvial en las urbes como alternativa para un manejo más adecuado del recurso.

4.1 Consideraciones

El reto de proveer agua potable a una población creciente con un consumo cada vez mayor por habitante es monumental, más aún cuando las reservas del recurso son sobreexplotadas a tasas exorbitantes.

Debido a esto, se requieren soluciones que contemplen aspectos clave en su desarrollo para satisfacer las necesidades reales del caso de estudio. Estos aspectos son considerados desde las condiciones técnicas, hidrológicas, climatológicas, sociales y de consumo de la zona.

Respecto a las condiciones hidrológicas de la U.H. Villa Panamericana se consideran aquellas medidas por el Observatorio Hidrológico en la estación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, señalada en la figura 62, ya que la colonia se encuentra en los límites de la Ciudad Universitaria y de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA). Compartiendo en gran medida las características del ecosistema de esta zona. Debido a su cercanía con la REPSA, tanto la flora como la fauna de la colonia son de vital importancia para la conservación de la Reserva por lo que su protección debe ser considerada en las propuestas.



Figura 62. Mapa de estaciones de observación hidrológica (OH-IIUNAM, 2021)

Adicionalmente, se consideran los aspectos claves de los sistemas de captación pluvial, de acuerdo con las etapas para la cosecha de agua que se contemplen.

- **Captación:** se centra en la recolección del agua en zonas específicas durante las precipitaciones.
- **Tratamiento:** busca mejorar la calidad del agua pluvial por diferentes métodos con el objetivo de que ésta pueda ser utilizada en diversas actividades.
- **Almacenamiento:** para su consumo posterior, representa una de las restricciones más importantes en la captación.
- **Distribución:** del lugar de almacenamiento a los lugares de consumo
- **Descarga:** después del consumo, cuando su calidad rebasa los parámetros de agua gris y se dirige al drenaje.

Con base en esto y en conjunto con el diagnóstico realizado en el capítulo anterior se establecieron los requerimientos necesarios para el diseño de las propuestas de solución.

1. El sistema captará la mayor cantidad de agua pluvial posible.
2. El sistema proveerá agua cuya calidad esté dentro de los parámetros del agua gris.
3. El sistema apoyará la recarga natural o artificial de los acuíferos.
4. El sistema distribuirá el agua de acuerdo al consumo y a la ruta más corta.
5. El sistema reducirá el agua pluvial que llegue al drenaje.
6. El sistema hará uso eficiente de los recursos.
7. El sistema mejorará las interacciones simples entre los elementos del sistema.

Una vez definidos los requerimientos, se establecen las especificaciones bajo las cuales se diseñará y optimizará el sistema.

Para requerimiento #1: La cantidad de agua pluvial se medirá en litros por metro cuadrado por hora (l/m^2h).

Para requerimiento #2: La calidad del agua cumplirá con los parámetros de Sólidos en Suspensión, DBO_5 , turbidez (AQUA España, 2018).

Para requerimiento #3: La recarga de los acuíferos se medirá en metros cúbicos por día (m^3/d).

Para requerimiento #4: El consumo se medirá en litros por día (l/d) y la distancia en metros (m).

Para requerimiento #5: El agua pluvial que llegue al drenaje se medirá en metros cúbicos por día (m^3/d).

Para requerimiento #6: El sistema optimizará los recursos, con distancias más cortas en metros, etc.

Para requerimiento #7: La calidad de interacciones entre los elementos del sistema, dado por las métricas anteriormente mencionadas litros de agua pluvial consumida por día, porcentaje de agua pluvial, etc.

La parte sustancial de cada una de las propuestas estará dada por la optimización del sistema en diferentes aspectos, de acuerdo con los requerimientos establecidos. Para ello se definen tanto las variables de decisión sobre las cuales se dará dicha optimización como los objetivos de esta.

Variables de decisión:

- Cantidad de agua de la red consumida en i
- Cantidad de agua pluvial consumida en i
- Cantidad de agua almacenada en i
- Cantidad de agua sin tratar en i
- Cantidad de agua usada del nodo i al nodo j / cantidad de nodos por las que pasa el agua
- Cantidad de horas de mantenimiento en i
- Cantidad de agua captada por metro cuadrado i
- Cantidad de agua distribuida del nodo i al nodo j
- Costo de ítem i
- Cantidad de agua pluvial del nodo i al nodo j
- Cantidad de agua infiltrada del nodo i al nodo j

Objetivos de optimización:

- Minimizar consumo directo de pozos
- Maximizar consumo agua pluvial
- Maximizar almacenamiento de agua de lluvia
- Minimizar aguas residuales
- Maximizar reuso de agua
- Maximizar calidad del agua

- Minimizar tiempo de mantenimiento
- Maximizar área de captación
- Maximizar distribución
- Minimizar costos * (no se tomará en cuenta en el presente trabajo)
- Maximizar tratamiento de agua pluvial
- Maximizar recarga de acuíferos (natural y artificial)

Es importante resaltar las suposiciones y simplificaciones contempladas en las propuestas de solución.

Suposiciones:

Se supone que la red de tuberías tanto para el agua proveniente de la red como el agua captada se pueda instalar sobre un terreno uniforme, además de fronteras establecidas en cada una de las secciones. También se supone que los pozos de extracción y de absorción de SACMEX operan de manera óptima y surten a colonias adicionales. Los sistemas hidráulicos trabajan adecuadamente.

Simplificaciones:

Se considera una red simplificada de tuberías, acceso directo a ellas y 20 departamentos por edificio. El área de captación en edificios se simplifica como libre de obstáculos. También se toman en cuenta las simplificaciones mencionadas en la parte del diagnóstico. Además debido a que algunos de los objetivos de optimización se apoyan mutuamente, se considerarán únicamente los objetivos más relevantes que impacten a la mayor cantidad de ellos. Las propuestas de solución se presentan de forma conceptual por lo que se requieren etapas adicionales para su implementación. No se toman en cuenta los costos monetarios.

4.2 Propuestas

Con base en las consideraciones mencionadas, al diagnóstico realizado y a la revisión de soluciones a nivel local y global que se efectuó, se desarrollaron propuestas conceptuales que contemplan las necesidades esenciales para la problemática actual. Las propuestas son las siguientes:

1. Captación residencial de uso directo:

El agua es captada y consumida directamente en actividades que permitan el uso de aguas grises, tal como WC, lavado de autos, riego de áreas verdes, limpieza del hogar y de áreas comunes. Incluye un sistema de monitoreo del porcentaje de agua pluvial y de agua de la red consumida. Se contempla el uso conjunto de agua pluvial por edificio, un sistema puede proveer agua a todos los departamentos. Al mismo tiempo, un solo sistema captador puede proveer agua a los edificios de la sección correspondiente. Se busca optimizar tanto el área de captación como la distancia entre edificios.

2. Captación comunitaria para uso directo

La captación se realiza tanto en edificios como zonas factibles para ello, se efectúa un tratamiento suficiente para aumentar su calidad y se recarga la cisterna principal para uso directo de todas las secciones en todas las actividades. Se requiere un sistema de monitoreo de la calidad del agua pluvial y de porcentaje de uso respecto al agua proveniente de los pozos. Se pretende optimizar la distancia entre área de captación, de tratamiento hacia cisterna principal. El objetivo es permitir una recuperación natural de los pozos durante la época de lluvia, al reducir su sobreexplotación.

3. Captación para recarga directa de acuíferos

La captación se realiza con el objetivo principal de recargar los acuíferos por medio de los pozos de absorción disponibles y la probable construcción de más. El tratamiento del agua se da a través del suelo. Se desea optimizar la cantidad de agua captada e infiltrada al subsuelo para una recarga gradual, además de la distancia del área de captación a las zonas de absorción. Parte de la solución analiza la posibilidad de la inyección de agua directa similares a los procesos IOR-EOR (CNH, 2012) de recuperación mejorada de pozos. Se considera el monitoreo de agua captada, absorbida e inyectada en época de lluvias para ser utilizada posteriormente en época de estiaje. Esta propuesta es para uso indirecto, contemplando una disminución importante de las aguas residuales al evitar que el agua de lluvia llegue al drenaje. Esta propuesta es gradual y podría ser la de mayor costo pero un probable mayor beneficio a futuro.

4. Sistema no tradicional de captación

El agua es captada por diferentes medios y almacenada de forma no tradicional, se contempla un uso mixto de acuerdo con la capacidad y velocidad de tratamiento por medio de humedales verticales. Puede ser usado tanto a nivel residencial como comunitario, considerando un sistema de monitoreo de calidad y cantidad. El sistema se adapta de acuerdo con los datos de intensidad de la precipitación obtenidos por el Observatorio Hidrológico IIUNAM. Esto con el objetivo de optimizar la captación, el almacenamiento, la distribución entre edificios y el tratamiento de aguas grises, además de la reducción de peso sobre los techos. Se consideraría una plataforma de revisión del sistema para involucrar al usuario final en su uso y mantenimiento.

4.2.1 Captación residencial de uso directo

El volumen de agua pluvial anual que recibe la Ciudad de México es de aproximadamente 600 millones de metros cúbicos, que de acuerdo con el Instituto Mexicano para la Competitividad, equivale a dos veces la cantidad de agua suministrada por el Sistema Cutzamala y estima que una casa con un techo de 120 metros cuadrados, en una zona de precipitación alta, tal como la zona a la que pertenece la Villa Panamericana, podría captar alrededor de 128 mil litros al año (IMCO, 2017).

Debido a que los edificios de las secciones de la colonia tienen techos de 400 metros cuadrados, un sólo sistema podría captar hasta 426 mil litros, que sin recibir un tratamiento especial podrían ser utilizados para actividades tales como lavado de automóviles, riego de áreas verdes, jardines interiores, descarga de WC, limpieza del hogar. Según datos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos tan sólo las descargas de WC representan el 30% de todo el consumo de agua interior a nivel residencial (EPA, 2015). Por lo tanto, aún destinando el agua pluvial captada para su uso en el WC, la sobreexplotación de los acuíferos se reduciría significativamente en época de lluvia.

El aspecto crucial para la propuesta de uso directo es la captación de agua pluvial en ubicaciones estratégicas que permitan proveer el recurso a los edificios de la sección. Ya que el agua es captada para actividades que no requieren agua de alta calidad, no es necesario el uso adicional de sistemas de saneamiento especializados.

Además esta propuesta contempla la localización de los sistemas con base en la distancia entre los edificios y el almacenamiento disponible en las instalaciones para su ubicación óptima. Es importante destacar, que en esta propuesta, la demanda de agua sólo se considerará para un trabajo futuro.

Así los lugares potenciales para instalar los sistemas de captación y el almacenamiento, junto con los clientes a los que se les debe suministrar el servicio se definen, en este caso particular con las variables de decisión dadas por x_i para las instalaciones y y_{ij} para los clientes a los que se atiende.

Sean:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{si se utiliza la instalación } i \\ 0 & \text{si no es requerida} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si existe suministro del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El modelo matemático para la localización (Ivanov et. al., 2019) del sistema de captación y almacenamiento considerando únicamente las distancias entre edificios y el almacenamiento de las instalaciones.

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I} f_i \cdot x_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \cdot y_{ij}$$

- f_i mantenimiento de las instalaciones en nodo i
- x_i variable de decisión para indicar instalación en nodo i
- c_{ij} distancia entre nodos i y j
- y_{ij} variable de decisión para indicar si existe suministro entre i y j

*Ecuación 1. Modelo de función objetivo
(Ivanov et. al., 2019)*

Con sus respectivas restricciones, donde:

$$\sum_{i \in I} y_{ij} = 1, \text{ para todo } j \in J$$

$$y_{ij} \leq x_i, \text{ para todo } i \in I, \text{ para todo } j \in J$$

$$x_i \in \{0;1\} \text{ para toda } i \in I, y_{ij} \in \{0;1\} \text{ toda } (i,j) \in T$$

*Ecuación 2. Restricciones de localización
(Ivanov et. al., 2019)*

Es importante mencionar que tanto la captación como el almacenamiento se contemplarán en la misma ubicación. Cada sección considera 20 edificios a suministrar como parte de las suposiciones.

La función objetivo para 10 edificios de la Sección 1, bajo las restricciones mencionadas anteriormente, sería:

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & 100x_1 + 100x_2 + 100x_3 + 100x_4 + 100x_5 + 100x_6 + 100x_7 + 100x_8 + 100x_9 + 100x_{10} \\ & + 1y_{11} + 46y_{12} + 33y_{13} + 76y_{14} + 111y_{15} + 124y_{16} + 103y_{17} + 105y_{18} + 145y_{19} + 169y_{20} \\ & + 46y_{21} + 1y_{22} + 35y_{23} + 48y_{24} + 78y_{25} + 90y_{26} + 69y_{27} + 64y_{28} + 104y_{29} + 129y_{30} \\ & + 33y_{31} + 35y_{32} + 1y_{33} + 44y_{34} + 80y_{35} + 126y_{36} + 98y_{37} + 87y_{38} + 127y_{39} + 143y_{40} \\ & + 76y_{41} + 48y_{42} + 44y_{43} + 1y_{44} + 36y_{45} + 115y_{46} + 90y_{47} + 61y_{48} + 102y_{49} + 101y_{50} \\ & + 111y_{51} + 78y_{52} + 80y_{53} + 36y_{54} + 1y_{55} + 127y_{56} + 102y_{57} + 64y_{58} + 96y_{59} + 72y_{60} \\ & + 124y_{61} + 90y_{62} + 126y_{63} + 115y_{64} + 127y_{65} + 1y_{66} + 27y_{67} + 63y_{68} + 56y_{69} + 117y_{70} \\ & + 103y_{71} + 69y_{72} + 98y_{73} + 90y_{74} + 102y_{75} + 27y_{76} + 1y_{77} + 37y_{78} + 52y_{79} + 108y_{80} \\ & + 105y_{81} + 64y_{82} + 87y_{83} + 61y_{84} + 64y_{85} + 63y_{86} + 52y_{87} + 1y_{88} + 43y_{89} + 74y_{90} \\ & + 145y_{91} + 104y_{92} + 127y_{93} + 102y_{94} + 96y_{95} + 86y_{96} + 108y_{97} + 43y_{98} + 1y_{99} + 67y_{100} \\ & + 169y_{101} + 129y_{102} + 143y_{103} + 101y_{104} + 72y_{105} + 123y_{106} + 108y_{107} + 74y_{108} + 67y_{109} + 1y_{1010} \end{aligned}$$

*Ecuación 3. Función objetivo de 10 nodos de Sección 1
(Elaboración propia)*

Sin embargo, para la localización de las instalaciones en cada sección se consideraron los 20 edificios. Fue debido a la cantidad de nodos y arcos que formaban la red a optimizar se utilizó el software *Anylogistix*, con el método de centros de gravedad, el cual contempla el costo del transporte del agua a suministrar a través de las distancias a los clientes, por medio de Análisis *Greenfield* (GPA) (Ivanov, 2021). Similar a lo planteado anteriormente por medio de la programación lineal.

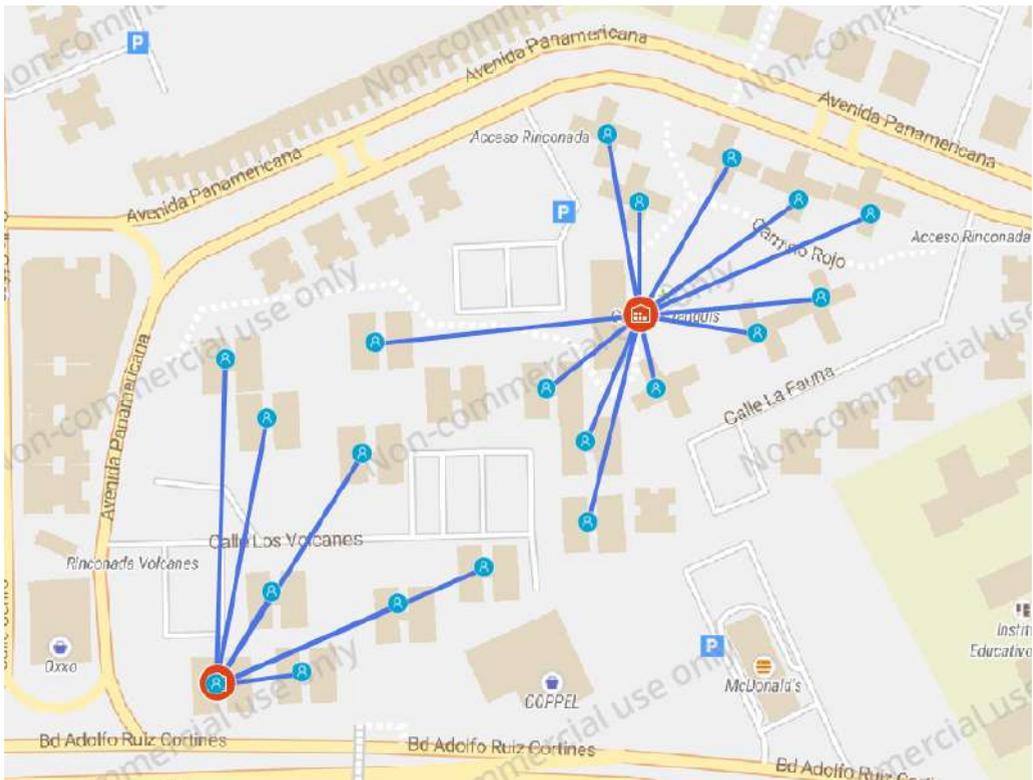


Figura 63. Localización de instalaciones de sistemas para Sección 1 (Elaboración propia con software Anylogistix)

La figura 64 muestra la localización de las instalaciones para la Sección 1 y los edificios a los cuales provee el servicio, 8 nodos para la primera instalación y 12 para la segunda. Mientras que en la figura 5.3 se observan las localizaciones de los sistemas de captación y almacenamiento para el agua pluvial de las 8 secciones de la Villa Panamericana, 2 instalaciones por sección, numeradas. Los edificios a los que se dedica cada instalación pueden observarse en las figuras de los anexos del presente escrito (véase ANEXO).

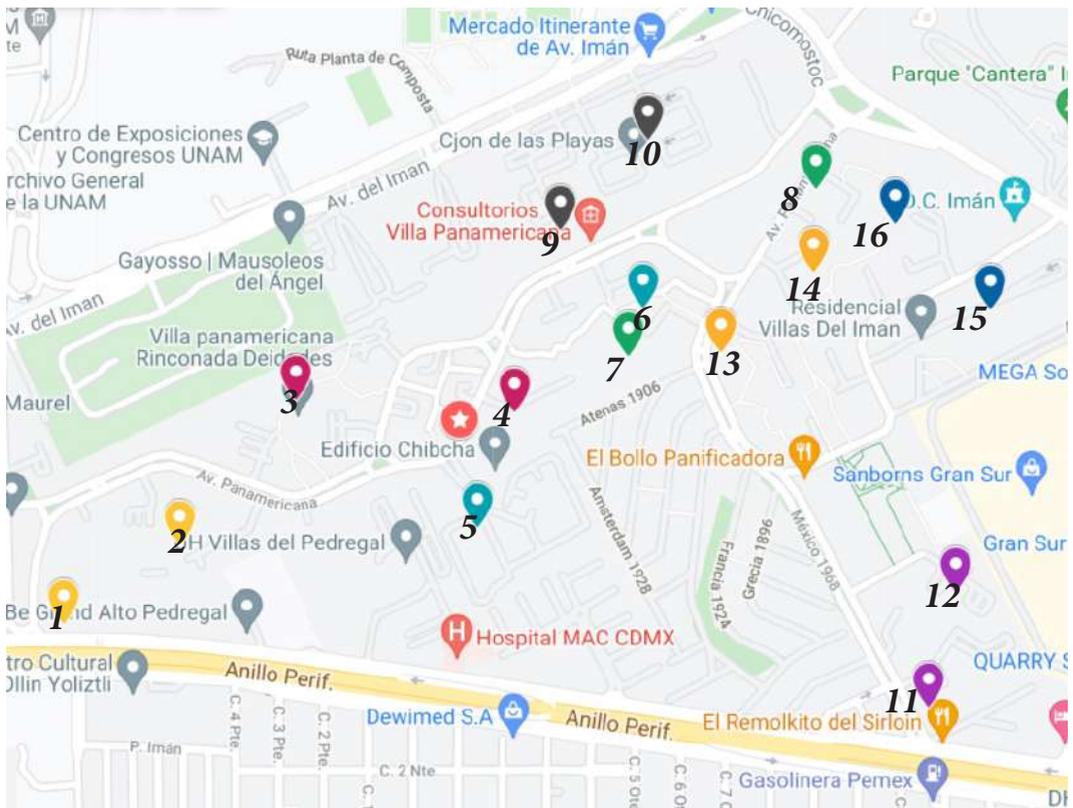


Figura 64. Localización de instalaciones de sistemas para todas las secciones. (Elaboración propia)

4.2.2 Captación comunitaria para uso directo

La distribución de agua dentro de la U.H. Villa Panamericana, como se ha mencionado con anterioridad, se da a través de los pozos que surten a una cisterna principal. El agua es bombeada a cada edificio perteneciente a la colonia a través de su red hidráulica.

Debido a esto, la propuesta de captación comunitaria para uso directo, pretende aprovechar el sistema hidráulico actual, al utilizar la cisterna principal como almacenamiento para el agua pluvial captada y la red existente para su distribución. Además, de asignar áreas de captación, localizadas en edificios o espacios comunes, que envíen el agua a un área de tratamiento para posteriormente ser bombeada hasta la cisterna principal.

Así, el agua suministrada a la cisterna principal provendrá tanto de los acuíferos como de la captación realizada en toda la colonia. De acuerdo con el Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, la intensidad de precipitación del miércoles 8 de septiembre de 2021, registró 98.7 milímetros de agua por hora, dicha intensidad teniendo una duración de 2 horas con 59 minutos (OH -IIUNAM, 2021), lo cual significaría que por cada metro cuadrado se habrían captado 296 litros de agua. Con 12 mil 264 metros cuadrados de captación, el equivalente a 30 edificios captadores (considerando 400 metros cuadrados de área para la captación) de los 160, la cisterna principal con capacidad de 3 millones 630 mil litros se habría llenado. Reduciendo en una tercera parte, la explotación de los pozos para un día en particular.

Si bien este registro ha sido el máximo entre los meses de agosto y septiembre de 2021, y uno de los más altos en la temporada de lluvias del presente año, es importante para visualizar el potencial de la captación de agua pluvial.

Al considerar 20 áreas de captación en cada sección y 2 sistemas de tratamiento y bombeo de agua hacia la cisterna principal, con base en las ubicaciones obtenidas para la propuesta anterior, se utilizó el algoritmo de Prim para obtener el árbol de expansión mínima, permitiendo minimizar la distancia entre los sitios de tratamiento y la cisterna principal.

El algoritmo genera los arcos de menor peso, en este caso, la menor distancia entre los nodos, que dará como resultado la ruta más corta hacia la cisterna principal. Debido a que todos los nodos necesitan converger en la cisterna, se toma ésta como elemento de N y $k=0$ (x_0). Posteriormente, se selecciona el arco de peso mínimo, o sea de menor distancia, al que esté conectado a x_0 , denominándose j_k , y se agrega a la ruta A_k . Se contempla:

$$N_{k+1} = N_k \cup \{x_k\}$$

$$A_{k+1} = A_k \cup \{j_k\}$$

Ecuación 4. Ec. para algoritmo de Prim (Flores, 1999).

Se hace $k=k+1$, si k es menor al número de nodos menos 1, se debe regresar al paso anterior (Flores,1999).

De esta manera se puede obtener la red de peso mínimo, en este caso de distancia mínima, para la captación y tratamiento del agua pluvial. Es importante mencionar que esta red generada es diferente a la red de suministro de los pozos a la cisterna principal y de la red de distribución que parte de este punto hasta cada uno de los edificios de la Unidad Habitacional.

Se contemplaron las distancias entre cada nodo en metros y debido a la característica del algoritmo donde sus arcos no son dirigidos, la matriz de distancias es simétrica.

Se obtuvo así la matriz de adyacencia, la cual muestra las interacciones existentes entre los nodos.

0	652	449	240	82	163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
652	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
449	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
82	0	0	0	0	0	239	182	0	0	0	0	0	0	0	0
163	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	239	0	0	0	318	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	182	0	0	0	0	208	0	675	588	135	0	0
0	0	0	0	0	0	318	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	208	0	0	172	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	172	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	675	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	588	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	135	0	0	0	0	0	0	178	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	178	0	265	140
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	265	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	140	0	0

Figura 65. Matriz de adyacencia (Elaboración propia).

Con esto, la secuencia del árbol de expansión mínima es la siguiente:

- C-1,2,3,4,5
- 4-6,7
- 6-8
- 7-9,11,12,13
- 9-10
- 13-14
- 14-15,16

Donde su distancia total es de 4,508 metros. En la figura 66 se observa la gráfica del árbol de expansión mínima, con las ubicaciones propuestas del área de tratamiento y bombeo a la cisterna principal.

Es así como se podría dar la recuperación natural de los acuíferos al reducir su sobreexplotación durante la temporada de lluvias.

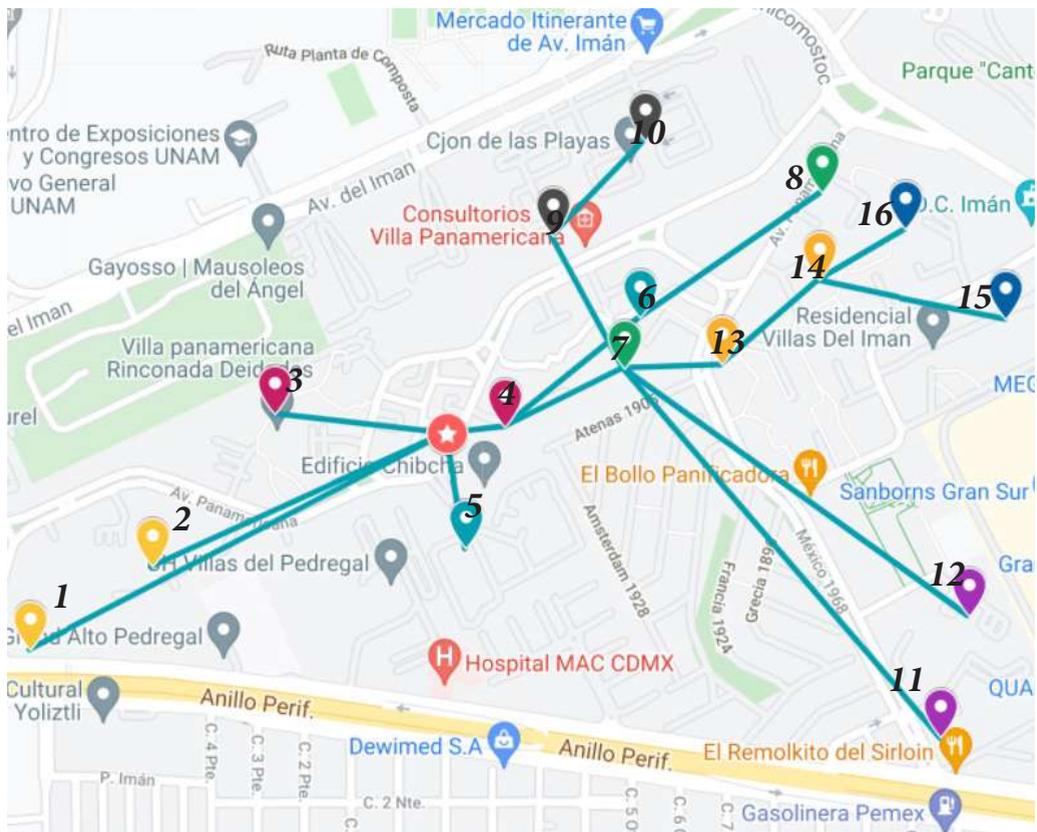


Figura 66. Árbol de expansión mínima de zonas de captación a cisterna principal. (Elaboración propia)

4.2.3. Captación para recarga directa de acuíferos

Se estima que el 95% del agua pluvial en ambientes urbanos se dirige al drenaje combinándose con las aguas residuales, mientras el 5% de ésta se infiltra al subsuelo (Melbourne Water, 2017). Por lo que, bajo estas condiciones, la falta de captación de agua pluvial representa un problema silente y preocupante: si el agua no es captada, es altamente probable que termine en el drenaje, además de que la recuperación de los acuíferos por medio de la infiltración del subsuelo es improbable.

Si bien la captación, el tratamiento y uso del agua pluvial supone ventajas importantes, enfrenta también retos concernientes al almacenamiento, la distribución y el saneamiento. Particularmente, la captación de agua para la recarga de acuíferos es una alternativa que ha reducido las inundaciones, la tasa de erosión, aumentado la conservación del suelo y la disponibilidad de agua subterránea (KOEN, 2012).

Según la Comisión Nacional del Agua, desde la década de 1940 se han realizado recargas artificiales de los acuíferos subterráneos, por medio de desviaciones altas y bajas del río Magdalena, construcciones de canales del Río Eslava en la década de 1950, así como un pozo de absorción de 61 metros de profundidad en el Centro de la Ciudad de México, además de otros proyectos similares. En la década de 1970 el gobierno del Distrito Federal, “debido a los altos costos de la infraestructura y de las características geológicas favorables de la zona de los pedregales del sur ... de la Ciudad de México, se recurrió a la construcción de pozos de absorción...” (CONAGUA, 2017). Se registró la construcción de 56 pozos de 35 metros de profundidad en la zona; sin embargo, por la falta de soporte técnico y la presunta reducida capacidad de infiltración, el proyecto no tuvo el éxito esperado (CONAGUA, 2017) y actualmente, tampoco se tiene información al respecto.

No obstante la supuesta reducida capacidad de infiltración de la zona de los pedregales a la cual pertenece la U.H. Villa Panamericana del Pedregal de Carrasco, las técnicas propias de la Ingeniería Petrolera para la recuperación de yacimientos de aceite por medio de Aumento de Recuperación de Aceite (*Enhanced Oil Recovery*) o los Métodos de Recuperación de Aceite Mejorados (*Improved Oil Recovery Methods*), pueden proveer las herramientas necesarias para la infiltración o inyección de agua en suelos poco porosos o con una capacidad de infiltración reducida (CNH, 2012). Los avances en esta área han sido importantes en las últimas décadas por lo que podría significar una solución factible.

Esta propuesta parte de la idea de un almacenamiento infinito o sea, el suelo, los pozos de absorción y las técnicas de inyección de agua en los yacimientos de aceite para proponer la construcción de pozos de infiltración aledaños a los pozos de extracción, captando el agua de lluvia en diferentes puntos de la colonia y luego transportándola hasta los pozos de absorción para la recarga artificial de los acuíferos.

De acuerdo con las distancias de los sitios de captación hasta los pozos de infiltración, se plantea un problema de asignación a ser resuelto para esta propuesta en particular. Donde la variable de decisión x_{ij} estará dada por:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si al pozo } i \text{ se le asigna el sitio } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Se buscará entonces la distancia más corta desde el área de captación hasta el pozo de infiltración mediante la función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in I, j \in J} d_{ij} \cdot x_{ij}$$

d_{ij} distancia entre nodo i y nodo j

x_{ij} variable de decisión para indicar asignación de sitio i a pozo j

Ecuación 5. Función objetivo para problema de asignación (Flores, 1999).

Con sus respectivas restricciones, la solución para este problema se observa en la figura 67, donde a los pozos existentes les son asignados los sitios de captación más cercanos, añadiendo un pozo adicional, en la longitud y latitud 19.30602, -99.16856, entre las secciones 6, 7 y 8. Siendo la ubicación con mayor cantidad de sitios de captación asignados.

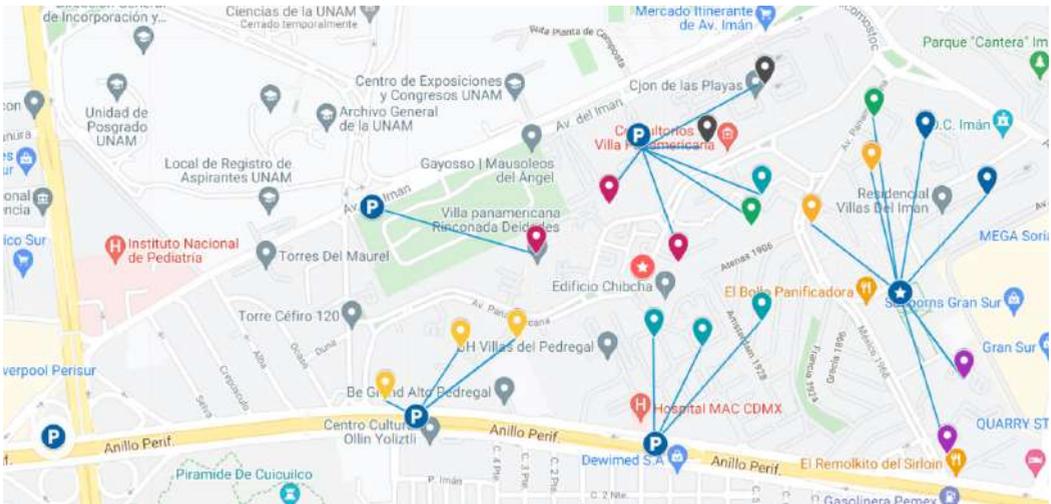


Figura 67. Asignación de sitios de captación a pozos de infiltración (Elaboración propia con base en resultados de Anylogistix)

4.2.4 Sistema no tradicional de captación

La mayoría de los sistemas actuales de captación de agua pluvial, constan de elementos básicos como canaletas, filtros y almacenamiento, comunmente, tinacos, cisternas o cubetas. Aunque estos sistemas requieren bajo mantenimiento, están limitados en área de captación, almacenamiento y saneamiento.

El sistema no tradicional propone la captación de agua pluvial por diferentes medios, tal como la captación y el almacenamiento conjunto en techos a través del uso de materiales con una capacidad de absorción considerable, que permitan almacenar de manera horizontal a lo largo de toda la superficie, contrario a los tinacos que mantienen la carga en un espacio reducido. También visualiza sistemas de saneamiento verticales e independientes de la estructura de los edificios para el uso directo del agua para cualquier actividad.

Por otro lado, el sistema elige el tipo de consumo de acuerdo a la intensidad de la precipitación, obtenida en tiempo real por el Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, considerando modelos de Programación Dinámica para la distribución de excedentes hacia pozos de absorción cuando la intensidad sobrepase un valor determinado.

Finalmente, se pretende visitar cada sistema para su mantenimiento recurrente y debido a la cantidad de nodos se buscará la ruta más corta, tomando en cuenta la variable de decisión x_{ij} :

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si se viaja del nodo } i \text{ al } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Y la matriz de distancias entre nodos, en el caso de la sección 1, de 20 instalaciones a visitar, por el número de elementos de dicha matriz se utilizó el método heurístico de Recocido Simulado. Resultando en una distancia de 1,038 metros, visitando los nodos en el siguiente orden:

[8, 4, 1, 3, 12, 7, 2, 10, 6, 13, 5, 11, 14, 17, 16, 15, 18, 19, 9, 20]

Visualizándose en la figura 68 la gráfica de la red.

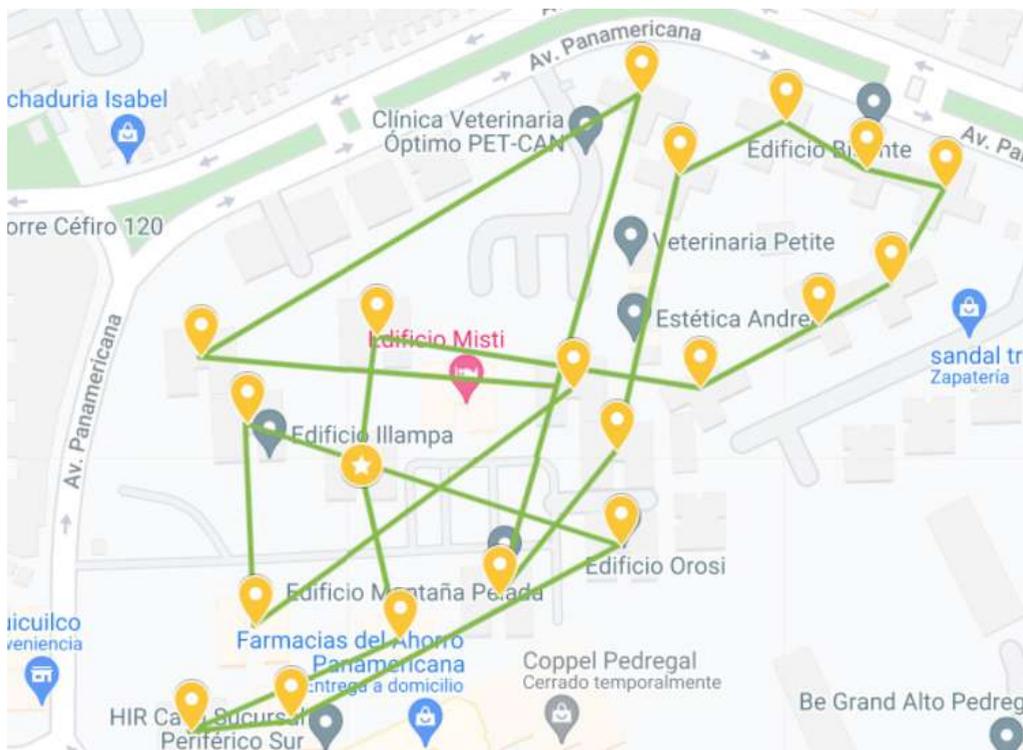


Figura 68. Ruta más corta para servicio de mantenimiento
(Elaboración propia)

Si bien la figura anterior muestra una ruta determinada que de acuerdo con las condiciones establecidas, brinda una distancia más corta en comparación a una ruta aleatoria, la solución mostrada continúa siendo un óptimo local debido a la naturaleza del método utilizado. Por lo que es probable encontrar rutas más cortas a la mostrada anteriormente. Sin embargo, como primera aproximación garantiza el uso adecuado de los recursos.

Las propuestas de solución conceptuales presentadas en el presente capítulo abordan diferentes problemáticas de la captación de agua pluvial en las zonas urbanas y particularmente en el sur de la Ciudad de México en un escenario en que representa en diversas maneras a un 25% de la población de la metrópoli (GobDF, 2011).

Es importante mencionar que al realizarse una optimización inicial de los modelos en las propuestas descritas y contemplarse un número equitativo de edificios por sección, se requerirá de iteraciones adicionales que consideren a mayor profundidad las condiciones del sistema real para su implementación. Sin embargo, como primera aproximación puede proveer las bases para estudios más detallados y dar una idea de los lugares estratégicos para la logística de una captación de esta magnitud.

5.

Conclusiones

*E*l deficiente manejo de los recursos naturales a lo largo de los años ha provocado crisis globales profundas, que deben ser afrontadas desde una perspectiva sistémica y cuyas soluciones requieren de la participación conjunta de los gobiernos, empresas, organizaciones, comunidades e individuos para ser implementadas con éxito.

Particularmente, la realidad hídrica global es desalentadora para la mayoría de las naciones, quienes por diversas razones han tardado en ejecutar acciones para garantizar la disponibilidad, accesibilidad y calidad del agua dentro de sus territorios. Mientras países como Singapur, Australia y China han creado esquemas particulares para cambiar sus prácticas e infraestructura hídrica hacia una administración cabal del agua, presentado resultados favorables en períodos cortos de tiempo.

Por un lado, se puede afirmar que las acciones llevadas a cabo con un enfoque sistémico como en el caso del esquema de los 4 Grifos o las Ciudades Esponja, promueven la administración conciente y la autosuficiencia hídrica.

El presente trabajo propone soluciones conceptuales de sistemas de captación que al optimizar las distancias y el uso de los recursos, permitan reducir la sobreexplotación de los acuíferos y mitigar los efectos de la crisis existente. Sin embargo, es necesario destacar que no sólo es urgente disminuir la sobreexplotación del agua superficial y subterránea, sino que es crucial su recarga natural y artificial para frenar la escasez extrema por venir, y en lugares como la Ciudad de México, cuyo subuselo es debilitado por la extracción excesiva de agua, dar soporte para evitar colapsos.

A partir del diagnóstico realizado, es evidente que la sobreexplotación de los acuíferos a nivel residencial se debe a la falta de información, educación hídrica, mantenimiento, planeación, registros, regulaciones, materiales, transparencia, por parte de todos los actores involucrados.

El combinar las metodologías de Investigación de Operaciones con el Diseño Centrado en el Usuario, se abrió el panorama para encontrar los aspectos críticos de la problemática, definir las necesidades reales de los usuarios y proponer soluciones conceptuales escalables.

Debido a la vastedad del tema abordado y los retos presentados, el alcance del proyecto se limitó al planteamiento de propuestas conceptuales de solución. Dejando como trabajo a futuro el análisis de costos, la validación de las propuestas mediante simulaciones, pruebas con usuarios, construcción de prototipos rápidos, modelos conceptuales con más detalle, implementación de algoritmos de optimización especializados para cada tipo de problema. Además de la implementación de las propuestas en diferentes escalas.

Finalmente, es importante recordar el papel central del agua en toda actividad humana y en la vida misma. No es posible alcanzar la sustentabilidad o una calidad de vida aceptable con un manejo deficiente del agua. Al mejorar y resolver las interacciones simples del agua con el resto de los elementos del sistema, uno a la vez, es posible hacer frente a los retos actuales. Pasar de la supervivencia a la suficiencia y sostenibilidad.

Un paso a la vez. Una acción a la vez.

Referencias

- [1] A. Guillermo Aguilar (2009). Water insecurity among the urban poor in the peri-urban zone of xochimilco, mexico city. *Journal of Latin American Geography*, 8(2):98–120, 2009. URL: <https://www.jstor.org/stable/25765264>.
- [2] Animal Político (21 marzo 2020). ‘¿Cómo enfrentamos el COVID-19 sin agua para lavarnos las manos?’, denuncian pobladores de CDMX. <https://www.animalpolitico.com/2020/03/covid19-agua-manos-pobladores-cdmx-desabasto/>. Consultado en junio 2020.
- [3] Aristegui Noticias (Noviembre 2019). Se desperdicia 40% de agua por fugas en la cdmx: Sacmex. URL: <https://aristeguinoticias.com/0411/mexico/se-desperdicia-40-de-agua-por-fugas-en-la-cdmx-sacmex/>. Consultado en junio 2020.
- [4] Aristegui Noticias(8 junio 2020). Lluvia con granizo viste de blanco las calles de la Ciudad de México, provoca inundaciones y desborda río. <https://aristeguinoticias.com/0806/mexico/lluvia-con-granizo-viste-de-blanco-las-calles-de-la-cdmx-provoca-inundaciones-y-desborda-rio-videos-y-fotos/>. Consultado en junio 2020.
- [5] Barbier Edward B. (2019). *The Water Paradox*. EUA. Yale University.
- [6] Baltic Smart Water HUB.(n.d.) <https://www.balticwaterhub.net/tool/jarviwiki>. Consultado en agosto 2020.
- [7] British Geological Survey (n.d.) What are SUDS and how do they work? Obtenido de: <https://www.bgs.ac.uk/research/engineeringGeology/urbanGeoscience/suds/what.html>. Consultado en mayo
- [8] Comisión Nacional del Agua (2018) Datos abiertos, obtenido de: <https://datos.gob.mx/busca/dataset?organization=conagua&page=3>. Consultado en noviembre 2019.
- [9] Comisión Nacional del Agua, n.d. <https://www.gob.mx/conagua/que-hacemos>. Consultado en noviembre 2020.

- [10] Comisión Nacional del Agua (2013). Catálogo de Acciones en Agua y Cambio Climático en México 2007-2012. Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua. Obtenido de: http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/Cat%C3%A1logo_de%20acciones_de_agua_y_cambio_clim%C3%A1tico.pdf. Consultado en junio 2020.
- [11] Comisión Nacional del Agua. Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. diciembre 2015, 2015. URL: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf. Consultado en junio 2020.
- [12] Chapman, Wilson (21 junio 2019) 10 cities most at risk of running out of water. U.S. News <https://www.usnews.com/news/cities/slideshows/10-cities-most-at-risk-of-running-out-of-water?slide=12> Consultado en junio 2020.
- [13] El Universal (22 marzo 2019). Ésta es la receta de Bimbo para cuidar el agua. Recuperado de: <https://www.eluniversal.com.mx/cartera/negocios/esta-es-la-receta-de-bimbo-para-cuidar-el-agua> (consultado en mayo 2020).
- [14] FORBES (2018) CDMX, la quinta ciudad más habitada del mundo. <https://www.forbes.com.mx/cdmx-la-quinta-ciudad-mas-habitada-en-el-mundo-onu/>. Consultado en octubre 2020.
- [15] Fundación Coca-Cola (2017). Informe Anual 2017 del Programa Nacional de Reforestación y Cosecha de Agua. Recuperado de: <https://www.coca-colamexico.com.mx/content/dam/journey/mx/es/private/2017-Informe-Nacional-de-Reforestacion-y-Cosecha-de-Agua.pdf> (consultado en mayo 2020).
- [16] Grupo Danone México (22 abril 2015). Grupo Danone México a la vanguardia en el manejo de aguas residuales. Recuperado de: <http://grupodanone.com.mx/noticias/noticias-de-grupo/vanguardiaaguasresiduales.aspx> (consultado en mayo 2020).
- [17] Gaceta UNAM (2019). Apocalipsis del agua, la crisis que viene, 2019. URL: <https://www.gaceta.unam.mx/especial-agua-crisis/>. Consultado en diciembre 2019.

- [18] Jiménez Ramón, Arturo (2012). Infraestructura para el aprovechamiento integral del agua. Abasto, Inundaciones y Reúso del Agua en el Valle de México. Senado de la República. http://comisiones.senado.gob.mx/cienciaytecnologia/docs/eventos/310119_3.pdf. Consultado en octubre 2020.
- [19] González de León, María (n.d.) 3 Cuerpos de agua simbólicos y desconocidos de la ciudad. <https://mxcity.mx/2016/05/3-cuerpos-de-agua-simbolicos-y-desconocidos-en-la-ciudad/> Consultado en junio 2020.
- [20] Comisión Nacional del Agua (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México (0901), Ciudad de México. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/cdmx/cdmx.html>. Consultado en junio 2021.
- [21] AQUA España (2018). Aguas grises: origen, composición y tecnologías para su reciclaje. https://aquaespana.org/sites/default/files/documents/files/Pildora_08-Grisas_origen.pdf. Consultado en julio 2021. Asociación Española de Empresas del Sector Agua.
- [22] Comisión Nacional de Hidrocarburos (2012). El Futuro de la Producción de Aceite en México: Recuperación Avanzada y Mejorada IOR-EOR. México.
- [23] Instituto Mexicano para la Competitividad (2017). La Ciudad de México, entre la inundación y la escasez. <https://imco.org.mx/la-ciudad-mexico-la-inundacion-la-escasez/>. Consultado en julio 2021.
- [24] Environmental Protection Agency (2015) Residential Toilets. <https://www.epa.gov/watersense/residential-toilets>. Consultado en julio 2021.
- [25] Ivanov, Dimitry, et. al. (2019). Global Supply Chain and Operations Management. Suiza. Springer.
- [26] Ivanov Dimitry (2021). Supply Chain Simulation and Optimization with anyLogistix. AnyLogic.
- [27] INEGI (2018). Aportación al Producto Interno Bruto (PIB) nacional. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/economia/pib.aspx?tema=>. Consultado en febrero 2021.
- [28] Flores de la Mota, Idalia (1999). Apuntes teoría de redes. México. UNAM, Facultad de Ingeniería. División de Estudios de Posgrado.

- [29] Garfield, Leanna (2017). China is building 30 'sponge cities' that aim to soak up floodwater and prevent disaster. Business Insider. <https://www.businessinsider.com/china-is-building-sponge-cities-that-absorb-water-2017-11?r=MX-&IR=T>. Consultado en mayo 2020.
- [30] Gobierno del Distrito Federal (31 enero 2011). LINEAMIENTOS Y MECANISMOS DE OPERACIÓN DEL PROGRAMA SOCIAL PARA LAS UNIDADES HABITACIONALES DE INTERÉS SOCIAL OLLIN CALLAN CON UNIDAD EN MOVIMIENTO EJERCICIO 2011. Gaceta Oficial del Distrito Federal. <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/4014.htm>. Consultado en febrero 2021.
- [31] Gobierno de la Ciudad de México (2019). No la riegues. <https://www.jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/blog/post/no-la-riegues-cuida-el-agua>. Consultado en junio 2020.
- [32] Hernández Leticia (8 noviembre 2018). COPARMEX CDMX estima impacto de 400 mdp por 'megacorte' de agua. El Financiero. <https://elfinanciero.com.mx/economia/coparmex-cdmx-estima-impacto-de-400-mdp-por-megarrecorte-de-agua>. Consultado en junio 2020.
- [33] Hernández Sandra (marzo 2019). Sacmex da banderazo de salida a 150 cuadrillas que repararán fugas de agua. El Universal. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/sacmex-da-banderazo-de-salida-150-cuadrillas-que-repararan-fugas-de-agua>. Consultado en junio 2020.
- [34] Hoekstra Arjen and Ashok K. Chapagain (2009). Globalization of Water. UK. Blackwell Publishing.
- [35] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018) Estadísticas del Agua en México 2018. México.
- [36] INFOBAE (2020). La Ciudad de México ha perdido 18.7 kilómetros de áreas verdes en 8 años. <https://www.infobae.com/america/mexico/2020/10/01/la-ciudad-de-mexico-perdio-187-kilometros-de-areas-verdes-en-ocho-anos/#:~:text=Entre%20los%20a%C3%B1os%202000%20a,kil%C3%B3metros%20cuadrados%20de%20a%C3%A1reas%20verdes.&text=El%2063.1%25%20de%20los%2018.7,para%20uso%20de%20suelo%20habitacional>. Consultado en diciembre 2020.

- [37] Comisión Nacional del Agua (2017). Nota Informativa Relativa a los Pozos de Absorción para la Captación Pluvial para Áreas Urbanas. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- [38] El Universal (2020) Se busca reducir la extracción de agua: Rafael Carmona. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/se-busca-reducir-la-extraccion-de-agua-rafael-carmona>. Consultado en noviembre 2020.
- [39] Fundación UNAM (n.d.) México, segundo país en utilizar agua residual para riego. <https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/mexico-segundo-pais-en-utilizar-agua-residual-cruda-para-el-riego/#:~:text=M%C3%A9xico%2C%20segundo%20pa%C3%ADs%20en%20utilizar%20agua%20residual%20cruda%20para%20el%20riego,-Fundaci%C3%B3n%20UNAM&text=Investigadores%20de%20la%20UNAM%20advirtieron,residual%20cruda%20para%20el%20riego>. Consultado en noviembre 2020.
- [40] Data México (2015). Coyoacán. <https://datamexico.org/es/profile/geo/9003#equidad> Consultado en febrero 2021.
- [41] INAFED (n.d.). Coyoacán. Enciclopedia de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM09DF/delegaciones/09003a.html> Consultado en febrero 2021.
- [42] Infobae (2020). CDMX bajo el agua. <https://www.infobae.com/america/mexico/2020/09/17/cdmx-bajo-el-agua-las-imagenes-de-las-graves-inundaciones-que-dejaron-las-lluvias-mas-fuertes-en-20-anos/>. Consultado en febrero 2021.
- [43] Editors: Trotta Francesco & Andrea Mele (2019). Nanosponges: Synthesis and Applications. Wiley. Italy.
- [44] Keep Our Earth Now (2012). The benefits of infiltration wells. <http://keepourearthnow.blogspot.com/2012/03/benefits-of-infiltration-wells.html>. Consultado en agosto 2021.
- [45] Legorreta Gutiérrez, Jorge (2006) El Agua y la Ciudad de México: De Tenochtitlan a la megalópolis. Universidad Autónoma Metropolitana.

- [46] Legorreta, Jorge (2004). Imperceptible para los capitalinos, la ciudad se ha hundido 10 metros. <https://www.jornada.com.mx/2004/07/08/02an1cul.php?origen=cultura.php&fly=#:~:text=Para%201930%2C%20ya%20se%20hab%C3%ADan,situaci%C3%B3n%20ileg%C3%B3a%20l%C3%ADmites%20preocupantes>. Consultado en noviembre 2020.
- [47] Méndez Luis (abril 2019). Así funciona la estrategia de sectorización de agua en Ciudad de México. Capital. <https://www.capitalmexico.com.mx/metropolitano/asi-funciona-la-estrategia-de-sectorizacion-de-agua-en-cdmx/>. Consultado en junio 2020.
- [48] Najar, Alberto (2016). Iztapalapa la zona de la CDMX donde la gente llega a pelearse a golpes para conseguir agua. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/03/160220_iztapalapa_mexico_zona_sedienta_agua_an. BBC Mundo.
- [49] National Research Council (1995) Mexico City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability, <https://www.nap.edu/read/4937/chapter/17>. Consultado en noviembre 2019.
- [50] OCDE (2015). Estudios territoriales de la OCDE, Valle de México, México. Obtenido de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/56213/valle-de-mexico-OCDE.pdf>. Consultado en noviembre 2019.
- [51] Instituto Mexicano de Urbanismo (2017). Urbanización de la Ciudad de México en 1 minuto. <https://www.imu.org.mx/urbanizacion-ciudad-mexico-minuto/>. Consultado en diciembre 2020.
- [52] Colín, Braulio (2019). Brigada antifugas de agua recorren la CDMX. Crónica. <https://www.cronica.com.mx/notas/2019/1114047.html>. Consultado en junio 2021.
- [53] López, C. A., Zambrano, L., Ruiz, R., Guzmán, M. A., Pérez, R., Sandoval, R., . . . Caldera, A. (2017). El agua en México (Ed. rev.). Ciudad de México, Ciudad de México: Fundación Friedrich-Ebert Stiftung (FES).
- [54] Legorreta, Jorge. (2013). Los ríos de la ciudad de México: pasado, presente y futuro. Ciencias 107-108, julio 2012-febrero 2013, 18-32. [En línea] <https://www.revistaciencias.unam.mx/es/145-revistas/revista-ciencias-107-108/1169-los-r%C3%ADos-de-la-ciudad-de-m%C3%A9xico-pasado,-presente-y-futuro.html>. Consultado en junio 2020.

- [55] Melbourne Water (2013) Water Sensitive Urban Design Guidelines. Australia.
- [56] MHLANGA, Sabelo D, MAMBA, Bhekie B, KRAUSE, Rui W MALEFETSE, Tshepo J (2007). Removal of organic contaminants from water using nanosponge cyclodextrin polyurethanes. *Journal of chemical technology and biotechnology* (1986). 82(4):382-388. Chichester: Wiley, 2007.
- [57] Navarrete Shelma (2020) La CDMX y el Edomex buscan coordinar acciones contra el coronavirus. *Expansión*. <https://politica.expansion.mx/cdmx/2020/03/19/la-cdmx-y-el-edomex-buscan-coordinar-acciones-contra-el-coronavirus#:~:text=Con%209%20millones%20de%20habitantes,podr%C3%ADan%20tener%20un%20impacto%20econ%C3%B3mico>. Consultado en octubre 2020.
- [58] National Research Council (1995). *Mexico's City's Water Supply: Improving the Outlook for Sustainability*.
- [59] Nestlé (22 octubre 2014). Inaugura Nestlé primera fábrica CERO AGUA en el mundo, para disminuir en 15% su consumo anual de agua en México. Recuperado de: <https://www.nestle.com.mx/media/pressreleases/inaugura-nestl-primer-fabrica-cero-agua-en-el-mundo-para-disminuir-en-15-su-consumo-anual-de-agua-en-mxico> (consultado en mayo 2020).
- [60] Nguyen Thu Thuy, Ngo Huu Hao, Guo Wenshan y Xiaochang C. Wang (2020). A new model framework for sponge city implementation: Emerging challenges and future developments. In *Journal of Environmental Management*, Vol 253. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109689>. Consultado en mayo 2020.
- [61] Paniagua Saucedo María Patricia (2019). La falta de agua potable de la U. H. Pedregal de Carrasco, Alcaldía de Coyoacán, Ciudad de México, entre marzo y octubre del 2019. <http://www.repositorio.unadmexico.mx:8080/jspui/bitstream/123456789/288/1/Paniagua%20Saucedo%20Mar%C3%ADa%20Patricia%20Regina.pdf>. Consultado en febrero 2021.

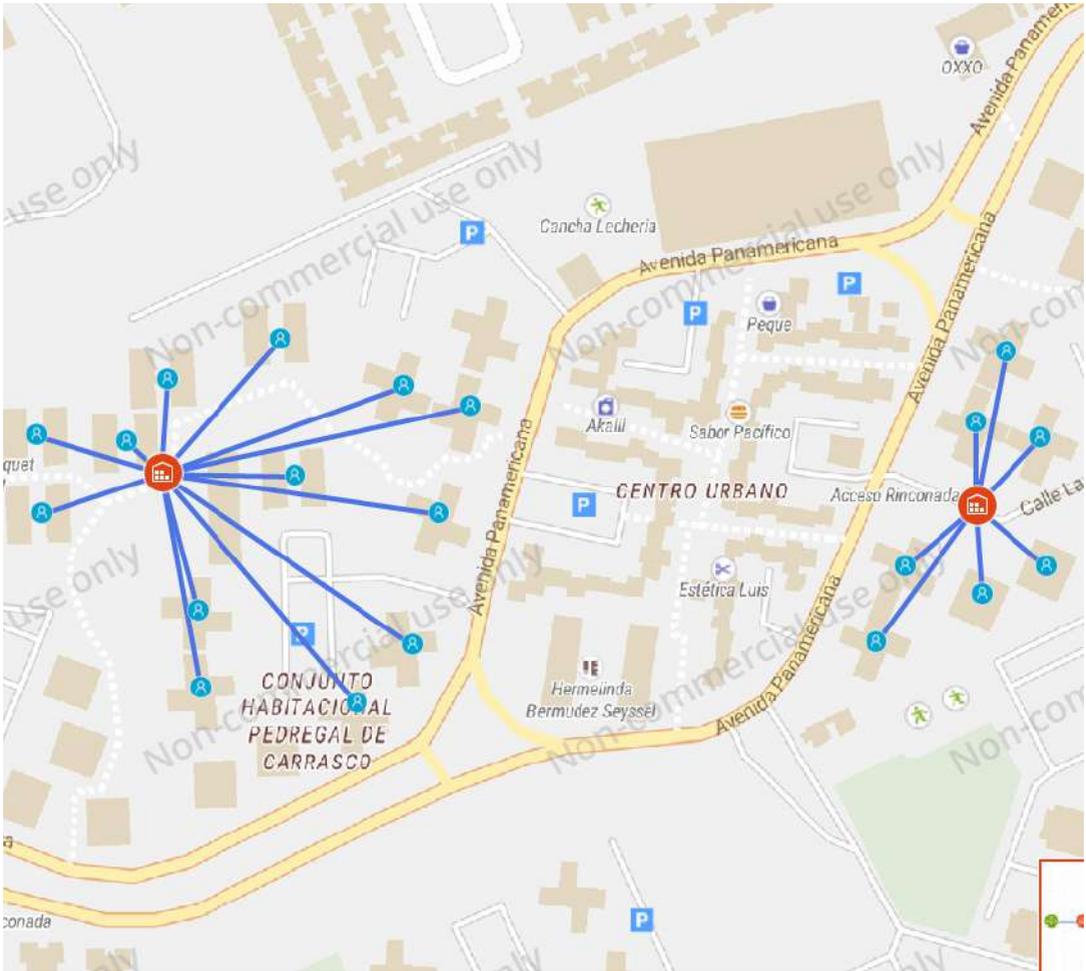
- [62] Organización de las Naciones Unidas- Habitat (2018). Superficie de CDMX crece a ritmo 3 veces superior a su población. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>. Consultado en diciembre 2020.
- [63] Office Efficiency and Renewable Energy (2020). Best Management Practices for Water Efficiency. Federal Energy Management Program. Obtenido de: <https://www.energy.gov/eere/femp/best-management-practices-water-efficiency>. Consultado en mayo 2020.
- (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe. <http://www.fao.org/3/i3247s/i3247s.pdf>. Consultado en junio 2020.
- [64] Reporte Índigo (mayo 2019). Sustituirán red hidráulica del Centro Histórico. <https://www.reporteindigo.com/reporte/sustituiran-red-hidraulica-del-centro-historico/>. Consultado en junio 2020.
- [65] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. 2015. Estudios Territoriales de la OCDE: Valle de México, México.
- [66] Observatorio Hidrológico Instituto de Ingeniería UNAM (2021). Mapa de estaciones hidrológicas. <https://www.oh-iiunam.mx/index.html>. Consultado en junio 2021.
- [67] Portal de Datos de la Ciudad de México (2019). Sistemas de Captación de Agua de Lluvia. datos.cdmx.gob.mx/explore/dataset/. Consultado en junio 2020
- [68] Public Utilities Board (2018). PUB Our Water, Our Future Report. Singapur. Obtenido de: <https://www.pub.gov.sg/watersupply/fournationaltaps>. Consultado en mayo 2019.
- [69] Raffenberger John & Mark Milke (2017). Smart Markets for Water Resources: A Manual for Implementation. USA. Springer.
- [70] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

- [71] Guía del viajero (2011). Las 5 Unidades habitacionales emblemáticas del DF. <https://cokiemoster3.blogspot.com/2011/01/5-unidades-habitacionales-emblematicas.html#:~:text=El%20Rosario,con%20el%20Eje%205%20Norte>. Consultado en febrero 2021.
- [72] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (n.d.). Resúmenes de Salud Pública- Asbesto. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs61.html#:~:text=Debido%20a%20que%20las%20fibras,del%20asbesto%20en%20Estados%20Unidos. Consultado en febrero 2021.
- [73] Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2017). Proyecto Final de Ley de Agua y Sustentabilidad Hídrica. CDMX.
- [74] Secretaría de Medio Ambiente (2019). Cosecha de agua de lluvia. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/programa-de-sistemas-de-captacion-de-agua-de-lluvia-en-viviendas-de-la-ciudad-de-mexico#:~:text=La%20cosecha%20de%20lluvia%20tiene,y%208%20meses%20del%20a%C3%B1o>. Consultado en junio 2020.
- [75] SIMEX (n.d.). Información técnica de tuberías. <http://sigmaflow.mx/wp-content/uploads/07-Info-de-Tuberia.pdf>
- [76] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2019). Precipitación media histórica de las entidades federativas. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*. Consultado en junio 2020.
- [77] Sistema de Aguas de la Ciudad de México, n.d. Pozos SACMEX. Geocomunes. http://132.248.14.102/layers/CapaBase:iii_1_2_pozos_sacmex. Consultado en octubre 2020.
- [78] U.S. Geological Survey (n.d.) How much water do I use at home? https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/water-qa-how-much-water-do-i-use-home-each-day?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Consultado en marzo 2021.

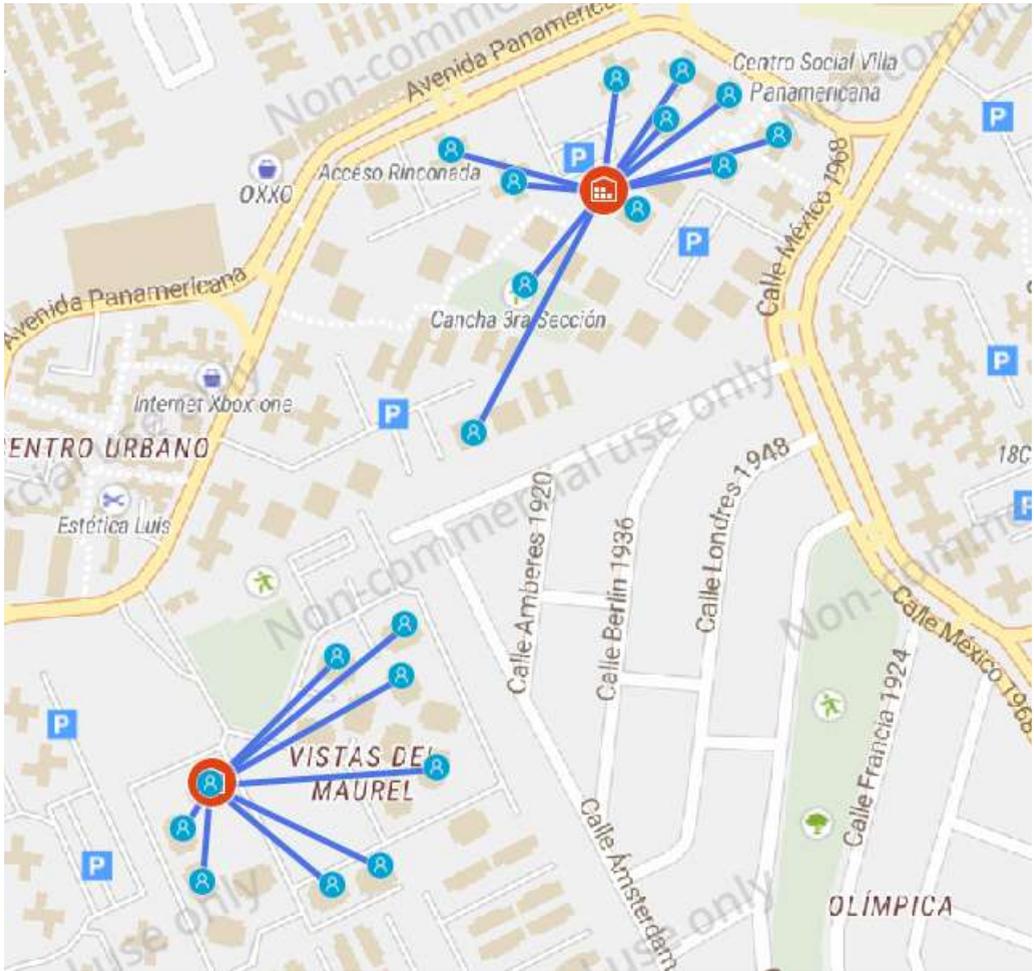
- [79] Sustainable Hydrology(n.a.). Sustainable Urban Drainage System. Consultado en: <http://hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>
- [80] Shun Chan Faith Ka, James A.GriffithsdDavidHiggittefShuyangXuaFangfangZhugYu-TingTangaYuyaoXuhColin R.Thorneh (2018). “Sponge City” in China- A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.03.005>. Consultado en mayo 2020.
- [81] Secretaria del Medio Ambiente (2019). Cosecha de lluvia. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/programa-de-sistemas-de-captacion-de-agua-de-lluvia-en-viviendas-de-la-ciudad-de-mexico>. Consultado en diciembre 2020.
- [82] Secretaría de Economía (1950). Séptimo censo general de población, 6 de junio 1950. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/1950/df/SCGP6J50DFI.pdf . Consultado en diciembre 2020.
- [83] Tallaksen, Eva (2006) Nanomebrana reduce costo de tratamiento de aguas. Science Dev Net. <https://www.scidev.net/america-latina/agua/noticias/nanomebrana-reduce-costo-de-tratamiento-de-aguas.html>. Consultado en septiembre 2020.
- [84] UN Water (2015) Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos del mundo 2015. Agua para un mundo sostenible: datos y cifras. UNESCO. Italia.
- [85] United Nations (2010). The human right to wáter and sanitation. Obtenido de: https://www.un.org/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml . Consultado en noviembre 2019.
- [86] Water Aid (2011). Rainwater Harvesting for Recharging Shallow Groundwater Report. Nepal.
- [87]Water FootPrint Network (2011) <https://waterfootprint.org/en/> Consultado en mayo 2019.
- [88] Xylem Inc. Sensus. Servicios. <https://sensus.com/es/>. Consultado en agosto 2020.

Anexos

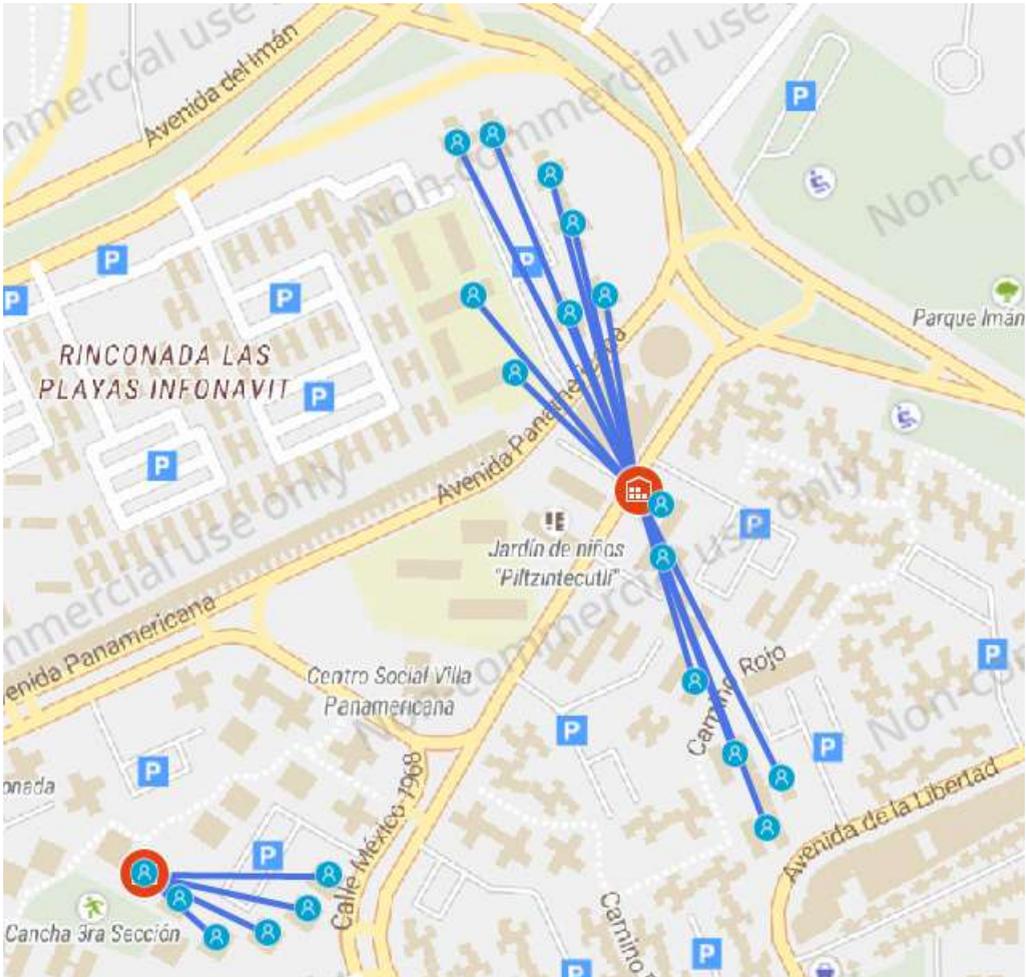
El presente Anexo conjunta las soluciones de cada una de las secciones del caso de estudio, excepto las que se muestran en el documento.



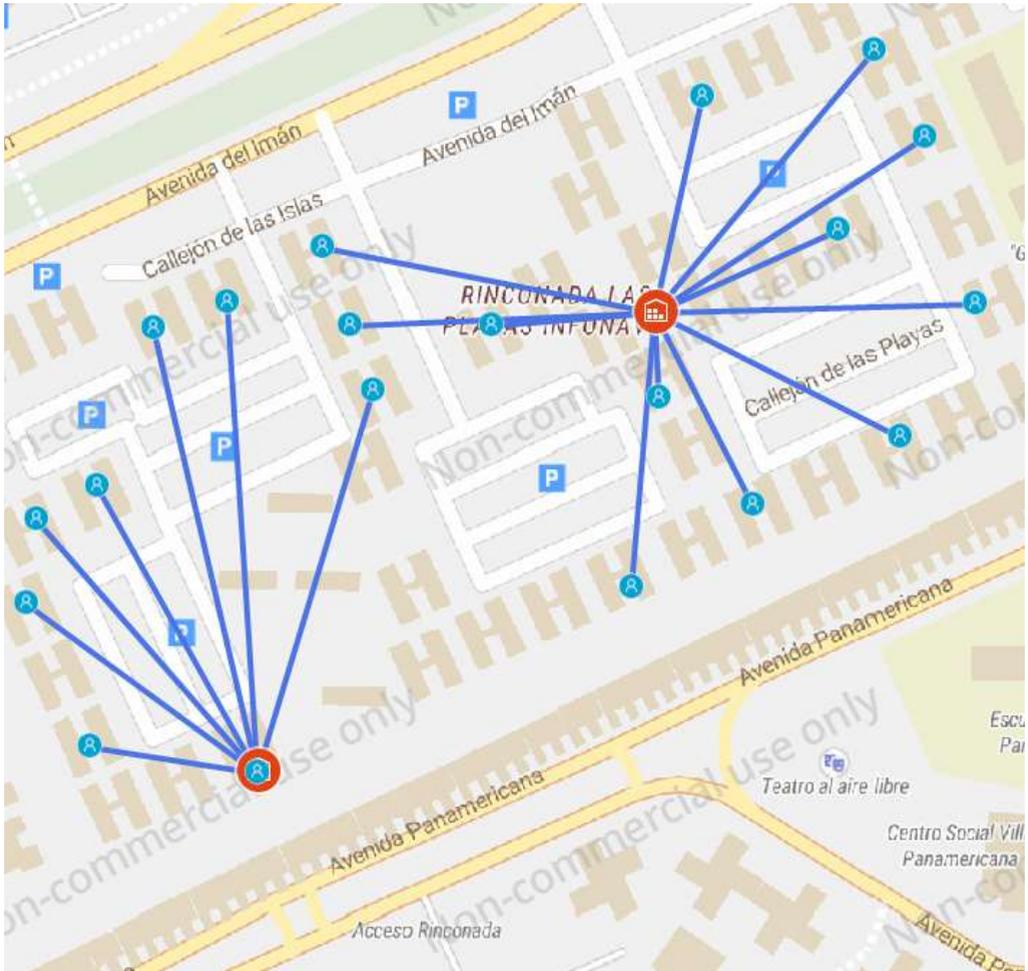
Solución de propuesta 1 para Sección 2



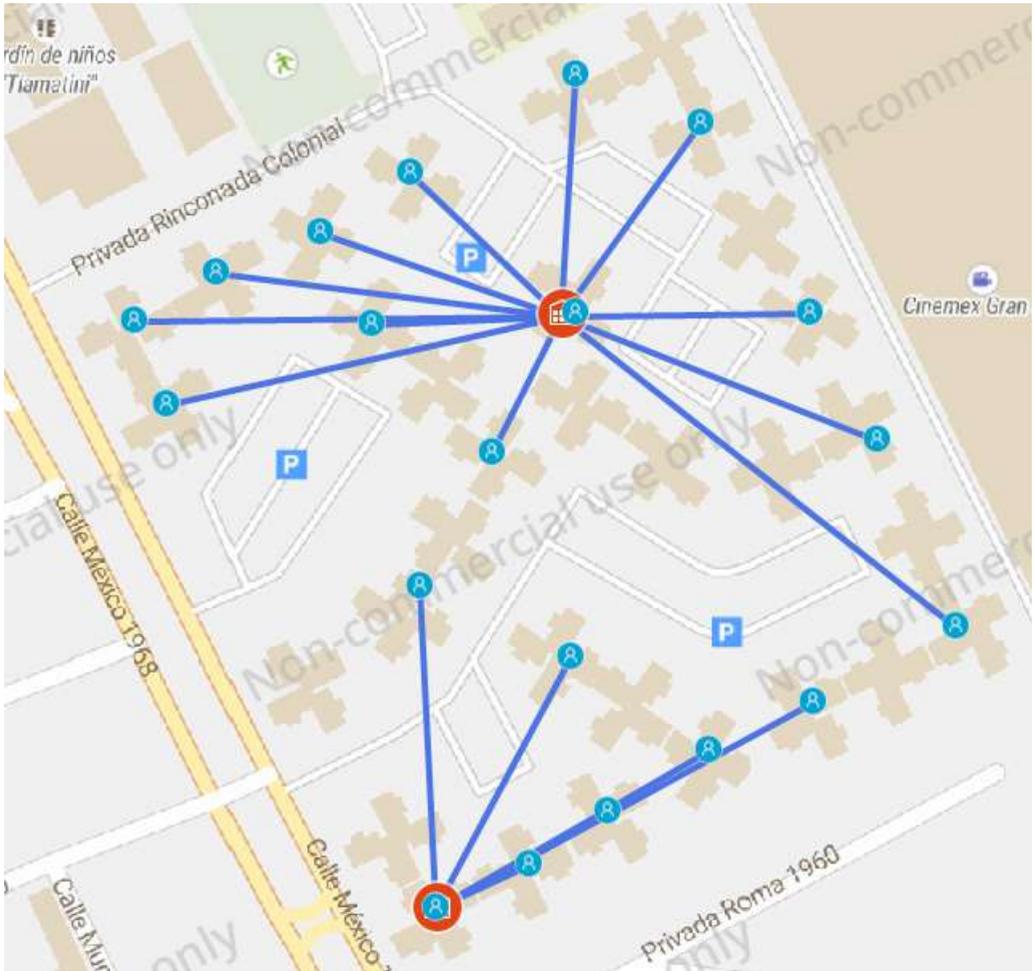
Solución de propuesta 1 para Sección 3



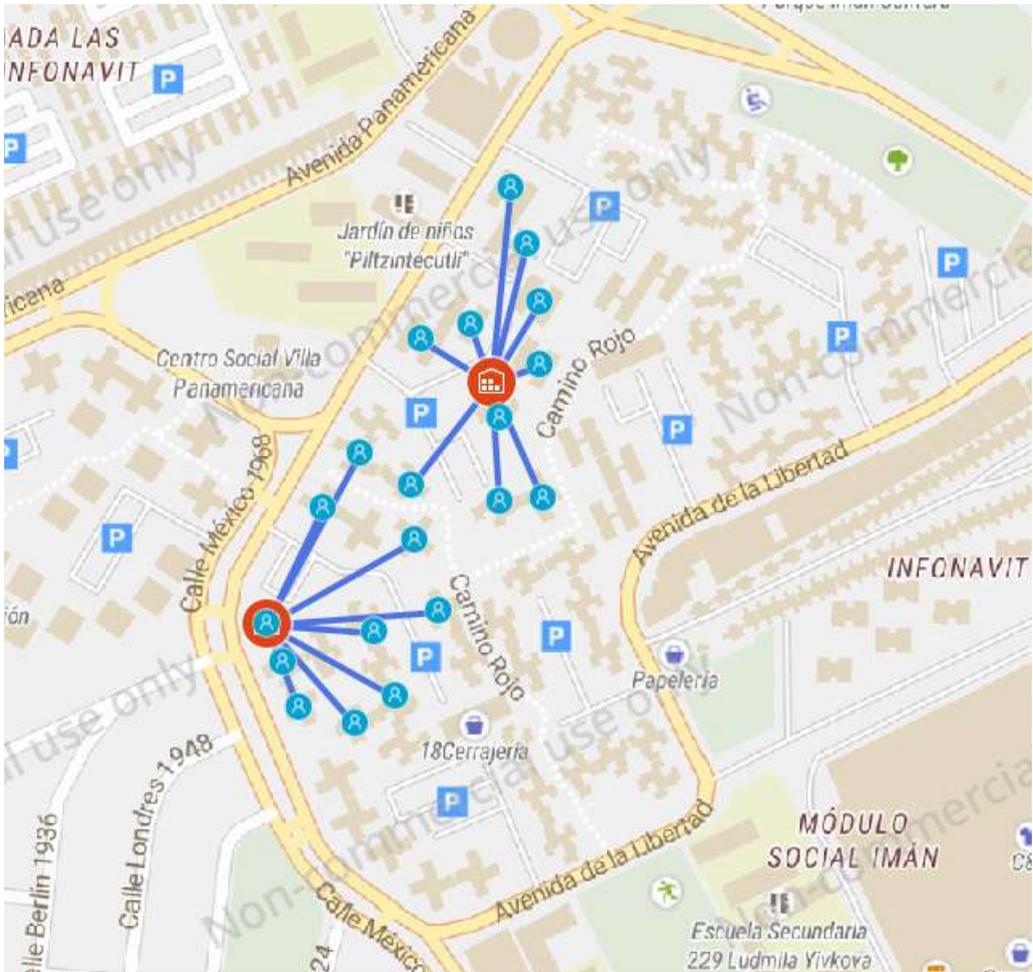
Solución de propuesta 1 para Sección 4



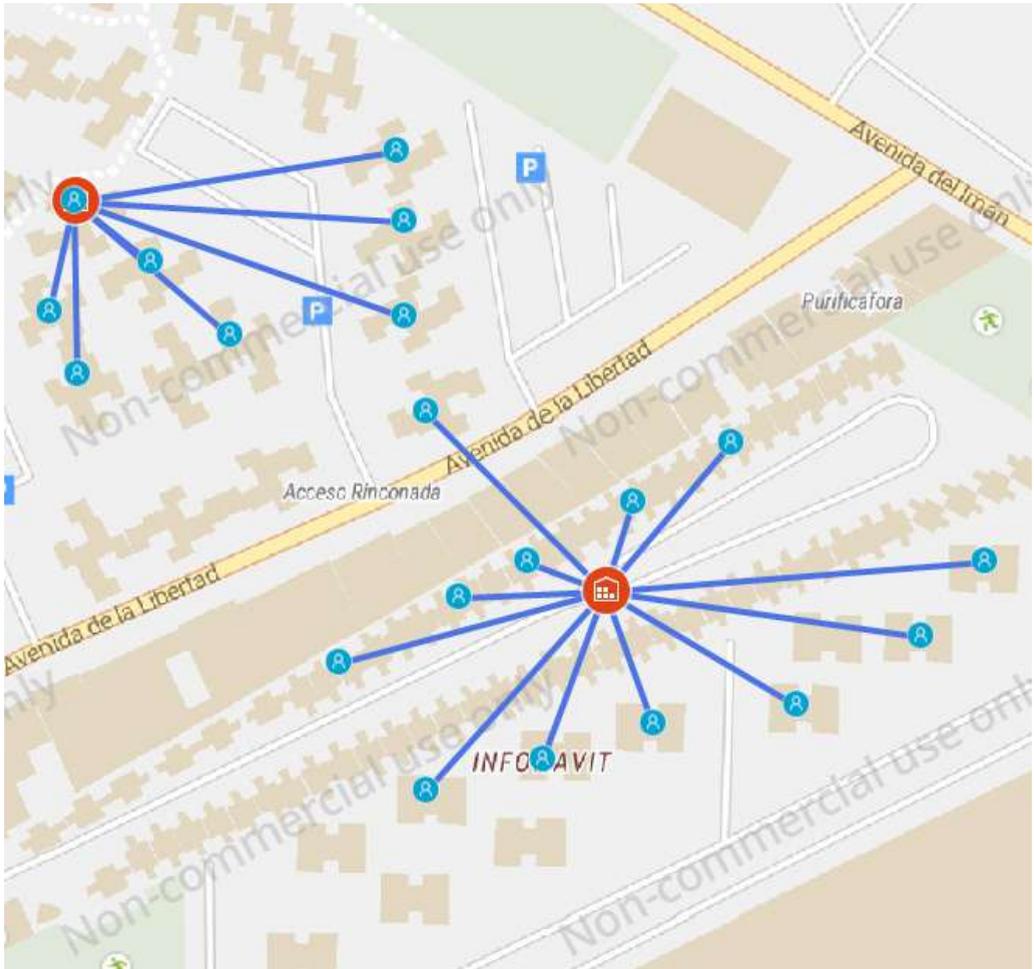
Solución de propuesta 1 para Sección 5



Solución de propuesta 1 para Sección 6



Solución de propuesta 1 para Sección 7



Solución de propuesta 1 para Sección 8