

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

Sustentabilidad y Tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Programa de Desarrollo Tecnológico para la Sustentabilidad Ambiental, Energética y Alimentaria II



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

Modelación Hidrológica de una Microcuenca para Prevenir Inundaciones en el AMG

Grupo de Investigación en Ingeniería de las Ciencias Hidrológicas.

PRESENTAN

Lic. en Ingeniería Ambiental.	Carlos Ignacio López Villanueva
Lic. en Ingeniería Ambiental.	Héctor Manuel Almaraz Andrade
Lic. en Ingeniería Ambiental.	Perla Adriana Hernández Hernández
Lic. en Ingeniería Ambiental.	Paulina Carlón Martínez

Profesores PAP: Dr. José Manuel Ramírez León, Dr. David Vargas del Río, Dr. David Rizo Decelis, Dr. Gil Humberto Ochoa González, Dr. Hugo de Alba Martínez.

Tlaquepaque, Jalisco, 16 mayo de 2022.

Índice

Índice.....	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	8
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional.....	10
1. Introducción	11
1.1 Problemática.....	11
1.2 Justificación	13
1.3 Antecedentes de otros semestres	18
1.3.1 Primavera 2020	18
1.3.2 Otoño 2020	21
1.3.3 Primavera 2021	25
1.3.4 Verano 2021	31
1.3.5 Otoño 2021	35
1.4 Objetivos del proyecto.....	41
1.5 Descripción de los equipos de trabajo.....	42
2. Marco Teórico.....	43
2.1 Ciclo Hidrológico.....	43
2.2 Aguas Subterráneas.....	45
2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos.....	57
2.4 Calidad del agua.....	60
2.4.1 Calidad del agua superficial	64
2.4.2 Calidad del agua subterránea	65
2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS).....	67

2.6 Métodos de Recarga Artificial	82
2.6.1 Recarga superficial.....	84
2.6.2 Recarga profunda.....	85
2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano.....	89
2.7.1 Gestión informada del agua	90
2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional.....	96
2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro	99
3. Marco Contextual	101
3.1 Experiencias de recarga artificial en México	101
3.2 Antecedentes hidrológicos en la zona de intervención.....	103
3.3 Descripción de la zona de estudio.....	110
3.4 Antecedentes geohidrológicos en la zona de intervención.....	114
3.5 Marco institucional para el monitoreo y la gestión integral del agua en México y el AMG	124
3.6 Contaminantes de escorrentías superficiales urbanas de México	126
3.7 Calidad del agua subterránea en México	131
4. Metodología.....	133
4.1 Hidrología	133
4.1.1 Modelación del sistema hidrológico.....	135
4.1.2 Diseño de soluciones sobre los modelos hidrológicos.....	144
4.2 Hidrogeología	146
4.3 Caracterización del sistema hidrológico y estimación del balance hídrico	150
5. Resultados y discusiones.....	151
5.1 Simulaciones hidrológicas en la zona de estudio	151
5.1.1 Definición de escenarios	151

5.1.2 Resultados de hidrogramas	157
5.1.3 Mapas de calado máximo de la zona de estudio	161
5.2 Resultados del modelo hidrogeológico.....	170
5.3 Caracterización del sistema hidrológico y estimación del balance hídrico	173
6. Conclusiones	177
6.1 Próximos retos del proyecto	179
6.2 Reflexiones.....	180
Paulina Carlón	180
Héctor Almaraz	181
Perla Hernández.....	182
Carlos Ignacio López.....	182
Bibliografía.....	183

Índice de Figuras

Figura 1. Baches en temporadas de lluvia en el AMG (Tráfico ZMG, 2016).	16
Figura 2. Consecuencias en temporadas de lluvia en AMG (El Informador, 2019).....	17
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.	19
Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.	19
Figura 5. Pluviómetros terminados en aspecto mecánico.	20
Figura 6. Mapa de áreas de captación de “El Chicalote”.....	21
Figura 7. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Santa Catalina... ..	22
Figura 8. Resultados de calado del modelo hidrológico de cuenca de plaza del sol.....	22
Figura 9. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Tchaikovsky.	23
Figura 10. Mapa de puntos de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial en la microcuenca “El Chicalote”.	24
Figura 11. Perfil de suelos sur.	24
Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.....	25
Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.	26
Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.	26
Figura 15. Represa Arroyo Seco.	27
Figura 16. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.....	28
Figura 17. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.....	28
Figura 18. Proceso de la creación de la plataforma de monitoreo.	29
Figura 19. Descarga y decodificación de datos de SEMADET.	29
Figura 20. Creación de tabla (dataframe).....	30
Figura 21, Conversión a archivo csv.	30
Figura 22. Publicación de capa en ArcGIS Online®.	30
Figura 23. Rutina de actualización de la capa.	30
Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.	31

Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.....	32
Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.....	32
Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.	33
Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.	33
Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.	34
Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.	34
Figura 31. Captura de pantalla del Model Space del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.....	35
Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.....	39
Figura 33. Prototipo funcional para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG.	40
Figura 34. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.).	45
Figura 35. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).....	49
Figura 36. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).....	50
Figura 37. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	51
Figura 38. Acuífero libre (Sánchez San Román).....	53
Figura 39. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).....	54
Figura 40. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).....	55
Figura 41. Acuífero colgado (Sánchez San Román).....	55
Figura 42. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).	56
Figura 43. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).....	57
Figura 44. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).....	58
Figura 45. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).	58

Figura 46. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).	70
Figura 47. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).....	72
Figura 48. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).	72
Figura 49. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).	73
Figura 50. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).....	74
Figura 51. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014).....	75
Figura 52. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al., 2013).....	77
Figura 53. Sección transversal de jardín de lluvia.....	79
Figura 54. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).	81
Figura 55. Método de infiltración de Bourguet, 1971	85
Figura 56. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971	88
Figura 57. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).	95
Figura 58. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).	97
Figura 59. Ubicación geográfica del acuífero de Atemajac y Toluquilla (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022).....	105
Figura 60. Características pozo de absorción (Taller botánico, 2020).....	109
Figura 61. Mapa de pozos en la microcuenca de estudio	112
Figura 62.Contexto geotécnico del bloque Jalisco (Weigand, 2012)	114
Figura 63. Perfil estratigráfico del pozo PR-9 (GEOEX & SIAPA, 2004)	117
Figura 64. Profundidad a la roca en el Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio Zavala et al., 2019).....	119
Figura 65. Sección esquemática hidrogeológica del acuífero (adaptación de Rizo, 2017).	123
Figura 66. Comparación de los estados de un acuífero (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022)	124
Figura 67. Actividades económicas con posibles fuentes de contaminación en la zona de estudio	128
Figura 68. Mapa de la microcuenca El Chicalote.....	134

Figura 69. Mapa del área de captación del Arroyo Seco delimitada por la zona urbana.	135
Figura 70. Serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER.....	136
Figura 71. Subactividades del manejo de datos en SIG previo al modelo numérico computacional.....	137
Figura 72. Subactividades del proceso del modelo computacional IBER.....	140
Figura 73. Hietograma con tiempo de retorno de 5 años y duración de 60 minutos... 142	
Figura 74. Hietograma con tiempo de retorno de 10 años y duración de 60 minutos. 142	
Figura 75. Hietograma con tiempo de retorno de 15 años y duración de 60 minutos. 142	
Figura 76. Hietograma con tiempo de retorno de 20 años y duración de 60 minutos. 142	
Figura 77. Hietograma con tiempo de retorno de 25 años y duración de 60 minutos. 142	
Figura 78. Mapa de escorrentías seleccionadas para la localización de represas en Arroyo Seco.....	145
Figura 79. Mapa de represas en dos cauces secundarios en Arroyo Grande (escenario1).	152
Figura 80. Mapa de represas en cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Grande (escenario 2).	153
Figura 81. Mapa de represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande (escenario 3).	154
Figura 82. Mapa de represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande con pozo de infiltración profunda en Arroyo Grande (escenario 4) 155	
Figura 83. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años. 158	
Figura 84. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años. ... 158	
Figura 85. Mapa de calado máximo con represas en dos cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.....	162
Figura 86. Mapa de calado máximo con represas en todos los cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.....	163
Figura 87. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios y cauce principal en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.....	164

Figura 88. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios, cauce principal y un pozo de infiltración en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.	165
Figura 89. Mapa de calado máximo con represas en dos cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.....	166
Figura 90. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.....	167
Figura 91. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios y cauce principal en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.....	168
Figura 92. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).	171
Figura 93. Volumen acumulado de agua infiltrada según modelo propio	171
Figura 94. Resultados del modelo de (Vanegas L. , 2017).....	172
Figura 95. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.....	173
Figura 96. Ubicación sugerida de estación hidrométrica en el ITESO.....	176
Figura 97. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto “Campus Hidrológico”.	177

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición.	36
Tabla 2. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).....	46
Tabla 3. Propiedades de acuíferos.....	52
Tabla 4. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).....	74
Tabla 5. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).	79
Tabla 6. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).	91
Tabla 7. Proyectos de recarga artificial de acuíferos en México (Palma et al., 2014).	102
Tabla 8. Valores típicos de permeabilidad para los materiales pumíticos (Toba Tala) del Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio et al., 2016).....	121
Tabla 9. Porcentaje de cobertura de actividades económicas.	128

Tabla 10. Contaminantes presentes en la escorrentía de las superficies de rodadura (Zafra et al., 2007).	129
Tabla 11. Coeficientes de rugosidad de Manning para cada uso de suelo en IBER (INECC, 2014).	138
Tabla 12. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo – cobertura – manejo (INECC, 2014).	139
Tabla 13. Tiempos de concentración para cada área de captación.....	143
Tabla 14. Propuestas de intervención (descripción de escenarios).....	155
Tabla 15. Caudal máximo de descarga y área bajo la curva para un periodo de retorno de 5 años.	159
Tabla 16. Caudal máximo de descarga y área bajo la curva para un periodo de retorno de 15 años.	159
Tabla 17. Costos aproximados para cada escenario con un tiempo de retorno de 5 años.	169

Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional

Los Proyectos de Aplicación Profesional (PAP) son una modalidad educativa del ITESO en la que el estudiante aplica sus saberes y competencias socio-profesionales para el desarrollo de un proyecto que plantea soluciones a problemas de entornos reales. Su espíritu está dirigido para que el estudiante ejerza su profesión mediante una perspectiva ética y socialmente responsable.

A través de las actividades realizadas en el PAP, se acreditan el servicio social y la opción terminal. Así, en este reporte se documentan las actividades que tuvieron lugar durante el desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno, y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló en el transcurso de su labor.

1. Introducción

1.1 Problemática

El agua es el líquido vital que hace posible la vida en la Tierra. La falta o la mala calidad de este líquido supone distintas problemáticas en la salud humana, el comercio y la producción de alimentos, por mencionar algunos ejemplos. En el año 2025 más de 3,000 millones de personas podrían estar viviendo en países que sufren estrés de agua, y 14 países pasarán de padecer estrés de agua a sufrir falta de agua (Marcia, 2010)

Según investigadores, la deficiente gestión hídrica de los países en vías de desarrollo como México agrava aún más esta situación (Alcamo, Henrichs, & Rösch, 2000). En México el desarrollo poblacional e industrial ha ocurrido mayormente en la zona centro y norte del territorio, mientras que el recurso hídrico se concentra en el sur. Esta disparidad espacial entre la oferta y la demanda fomenta sistemas de gestión que generan estrés hídrico a los acuíferos y cuerpos de agua que sirven para abastecer a la población. Una de las formas más usadas para tratar de subsanar estos problemas ha sido la construcción de represas a lo largo de todo el país, las cuales son soluciones temporales, costosas y que no son fáciles de aprobar debido a la poca información que usualmente se les otorga a las comunidades involucradas en las zonas donde son construidas, lo que causa movimientos sociales de oposición a estos proyectos.

El panorama de la gestión hídrica en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) también muestra diversas fallas y oportunidades de mejora. Esta ciudad concentra una población de 4.8 millones de personas en un área de 2,734 km². Padece escasez hídrica durante el estiaje y sobreexplota sus acuíferos a pesar de contar con precipitaciones anuales promedio de 942 mm. Esta cantidad de agua sería más que suficiente para abastecer la ciudad, sin embargo, las lluvias son enviadas directamente a los colectores donde después de inundar la ciudad se mezclan con las aguas residuales. Por lo tanto, la ciudad debe hacer uso de otras fuentes de abastecimiento, como es el lago de Chapala, la presa Calderón y pozos profundo (Comisión Estatal del Agua, 2009). Los

cuales solo son capaces de aportar 9.5 m³/s, es decir 73 % de lo que se necesita (SIAPA, 2014).

Recientemente se señaló que la presa de Calderón (la cual abastece 14% del agua de Jalisco) se encontraba a tan solo 17% de su capacidad. Debido a esto, se presentó un grave desabasto de agua que obligó al Gobierno del Estado a llevar a cabo “medidas de ajuste de distribución”; es decir, un plan de tandeos que incluyó a 213 colonias de la ciudad (El Informador, 2021). Por otro lado, unas semanas después, durante el temporal de lluvias del año 2021 ocurrieron múltiples desbordamientos de “ El Arroyo Seco”, en la parte sur-poniente de la ciudad, lo cual provocó fuertes inundaciones en el municipio de Zapopan, que afectaron a 52 viviendas (Gómez, 2021)

En este contexto de escasez derivado de un mal manejo, se plantean megaproyectos de infraestructura hidráulica para abastecer de agua a la ciudad, mientras los colectores no dan abasto a los eventos de precipitación que ocurren durante el temporal de lluvias en esta región. Las tormentas severas y sus consecuencias son algunas de las amenazas más frecuentes en el Área Metropolitana de Guadalajara y presentan un peligro para sus habitantes, al desencadenar fuertes inundaciones. Son tormentas de más de 25 mm/h, que al combinarse con altos valores de impermeabilización del suelo, sistemas hidrográficos severamente transformados (cauces intervenidos o desaparecidos) y redes artificiales (colectores e imbornales) con capacidades limitadas de conducción o que funcionan deficientemente, tienen como consecuencia inundaciones con una creciente peligrosidad, particularmente en las últimas dos décadas. En efecto, la ciudad crece físicamente y también lo hacen los anegamientos, su altura, la superficie afectada y los daños cada vez es más severos. El número de habitantes se multiplicó por tres desde la década de 1970, pero la red de colectores se mantuvo prácticamente igual. El excedente de agua no es captado por los colectores y canales, por lo tanto, un gran flujo de agua se desplaza por las calles, potenciando el viento, arrastre de viviendas, accidentes en vehículos motorizadas y no motorizados, además de inundaciones de pasos a desnivel. La continua transformación de los rasgos hidrográficos y el aumento de la infraestructura mal diseñada empeoran las condiciones de conducción, acentuando

la insuficiencia, y generando más puntos de desborde, tránsito de mayor volumen, alterando radicalmente el ciclo del agua.

En medio de esta deficiente gestión, los acuíferos están siendo explotados y contaminados. En 2004 se sabía que en el acuífero de Atemajac existía una sobreexplotación acumulada de 3.65 Mm³. Por su parte, en otro acuífero principal, el de Toluquilla, este valor era de 1.91 Mm³ (GEOEX & SIAPA, 2004). El agua de estos acuíferos es una de las fuentes principales de abastecimiento del AMG.

Todo lo anterior, muestra las consecuencias de una gestión dejada en segundo plano: una urbanización insustentable que consume agua de mala calidad, que sobreexplota sus acuíferos y cuencas en medio de conflictos y que es incapaz de aprovechar las grandes cantidades de agua pluvial que recibe. Estos problemas no son nuevos y se considera fundamental su solución para el progreso de la sociedad. El objeto de estudio del presente proyecto va en esa dirección.

1.2 Justificación

En los últimos años la AMG ha tenido un incremento exponencial de la población, que ha conllevado a la impermeabilización del suelo, la cual provoca una pérdida de capacidad de retención y filtración del agua de lluvia, y genera un aumento en el volumen y la velocidad de agua retenida hacia las zonas más bajas (López, 2015).

Una de las soluciones para resolver esta problemática es la implementación de los SUDS. El objetivo principal de esta tecnología es la gestión del agua pluvial sin alterar a gran magnitud el ciclo hidrológico, ya que se busca instalar nuevas tecnologías que siguen la misma estructura de una cuenca; por lo cual reproducen procesos hidrológicos como infiltración, filtración, almacenamiento y evapotranspiración. Asimismo, promueve la recarga de aguas subterráneas y conservación de flujos superficiales (Rodríguez, Rodríguez, Ballester, & Castro, 2005). Todo esto tiende a disminuir el volumen y velocidad de agua pluvial en zonas de alto riesgo.

Otra alternativa que puede disminuir la problemática son los métodos de recarga artificial del acuífero. Son técnicas para el abastecimiento de agua, mediante obras que favorecen la recarga del acuífero. Existen dos métodos de recarga, los superficiales (canales, estanques, modificación del lecho de un río, etc.) y subsuperficiales (aperturas naturales, hoyos, redes de drenaje, pozos de recarga, etc.) (Serieys, 2004).

Por lo cual, para la restauración del ciclo hidrológico podrían desarrollarse los SUDS, que muchos de ellos son técnicas de recarga artificial, junto con otros métodos a mayor escala. Algunos ejemplos pueden ser las áreas de biorretención, desconexión de la escorrentía, superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, techos verdes y humedales (Fletcher, y otros, 2014). Las condiciones geohidrológicas del AMG son suelos de origen volcánico de alta permeabilidad, permiten una rápida infiltración en el subsuelo y dan viabilidad a estas tecnologías (Zamudio, Vargas, & Ochoa, 2016).

Se ha buscado implementar algunas estrategias para el aprovechamiento del agua de lluvia, el ingeniero José Arturo Gleason Espíndola planteó la implementación de un plan de captación, el cual consiste en la instalación de cisternas de almacenamiento como medio de aprovechamiento de agua de lluvia, y el agua excedente se enviaría a los mantos acuíferos (De la Cruz & Gleason, 2018). Sin embargo, esta solución significa readaptar la infraestructura de la ciudad y por tal motivo no ha prosperado (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). Es necesario seguir buscando soluciones que ayuden a restaurar el ciclo hidrológico.

Asimismo, se han implementado algunas estrategias de recarga en el AMG. Por ejemplo, el sistema interceptor del poniente que se componía de una serie de canales sin pendiente que recibían los excedentes pluviales de la zona oeste de la ciudad y favorecían la infiltración. El canal de Santa Catalina y el canal de Tchaikovsky forman parte de ese sistema (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). Cabe mencionar que el objetivo principal de estos canales es retener los flujos de escorrentía durante eventos de precipitación intensa. Los cuales se planearon para evitar inundaciones y no para ser sistemas de recarga en superficie.

De la misma manera, también se han implementado las “cámaras horizontales de infiltración” las cuales se han construido en algunas zonas inundables del AMG y forman parte del programa denominado Sistema Acuífero de Regulación e Infiltración (Gobierno de Zapopan, 2020). Además, otra tecnología utilizada son los “pozos de infiltración”, los cuales son perforaciones circulares de entre 3 a 8 metros de profundidad, que se conectan con las bocas de tormenta de los nuevos desarrollos urbanos para intentar mitigar las inundaciones (SIAPA, 2014).

Sin embargo, las cámaras horizontales de infiltración y los pozos de infiltración quedan limitados porque el agua queda retenida en las primeras capas del subsuelo; pues el subsuelo se compone de una sucesión estratigráfica de suelos de alta y baja permeabilidad. Más aún, como se trata de una recarga superficial, la infiltración a veces se lleva a cabo sobre terraplenes. La infiltración genera corrientes subterráneas que arrastra los finos del suelo y deriva en cavidades en el subsuelo que crean socavones, hundimientos y deterioro de las construcciones en superficie (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022). En las siguientes imágenes se muestran las consecuencias de la erosión del subsuelo, a causa de una recarga realizada en zonas de relleno.

Problema de cada temporal; El negocio de los baches

04 de Julio del 2016



Figura 1. Baches en temporadas de lluvia en el AMG (Tráfico ZMG, 2016).



Figura 2. Consecuencias en temporadas de lluvia en AMG (El Informador, 2019).

Es importante mencionar que para implementar correctamente estas tecnologías es necesario conocer el comportamiento del agua superficial y subterránea del área de interés. Es decir, llevar a cabo estudios de hidrología de superficie y estudios geohidrológicos sobre los cuales pueda simularse el flujo del agua por la ciudad y así estar en condiciones de evaluar la capacidad de las soluciones que se busca implementar. Estos estudios preliminares deben incluir estaciones y redes de monitoreo, que proporcionan datos ambientales que permiten validar las simulaciones (Tobias, 2013). Esto último, puede favorecer la participación ciudadana cuando se da a conocer de manera abierta, libre y en tiempo real. Estos son los objetivos de este Proyecto de Aplicación Profesional: generar un estudio interdisciplinario que sirva como base para la instrumentación de tecnologías que ayuden a restaurar el ciclo hidrológico y favorecer la participación ciudadana.

1.3 Antecedentes de otros semestres

1.3.1 Primavera 2020

A principios del año 2020 se integró este proyecto de investigación del Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano (DHDU) a los PAPs. Se creó un equipo multidisciplinario de académicos, asesores externos y alumnos para que se abordara la problemática desde diferentes enfoques, con la finalidad de llegar a un resultado satisfactorio. Para esto, el ITESO aportó un grupo de profesores e investigadores, quienes tomaron la responsabilidad del proyecto, acompañados de un equipo de trabajo con profesionistas del área de ingeniería civil y ambiental.

En el primer semestre que se integró el proyecto a la modalidad PAP, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Validación del mejor sitio de intervención (la microcuenca del Chicalote, así como las zonas de Arroyo Seco y los canales de Tchaikovski y Santa Catalina)
- Generación de información geográfica para alimentar el modelo hidrológico
- Creación del modelo digital de elevaciones
- Elaboración de un primer modelo dinámico de los escurrimientos superficiales del área de aportación al embalse, ubicado dentro de las instalaciones del Parque Metropolitano, y hietogramas de precipitación para varios periodos de retorno.

El modelo de escurrimientos superficiales mostró resultados como variación del tirante, con respecto al tiempo y velocidades, por mencionar algunos. Gracias a esto, se logró un mejor entendimiento de la hidrología superficial de la zona de interés y se identificaron los puntos más conflictivos de la misma, en cuanto a inundaciones.

En las imágenes a continuación se muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para determinar el hidrograma unitario y el producto resultante, respectivamente.

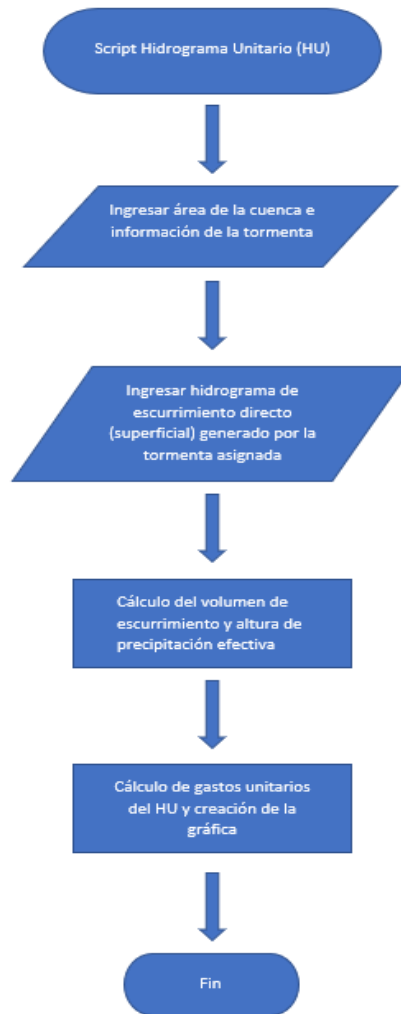


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.

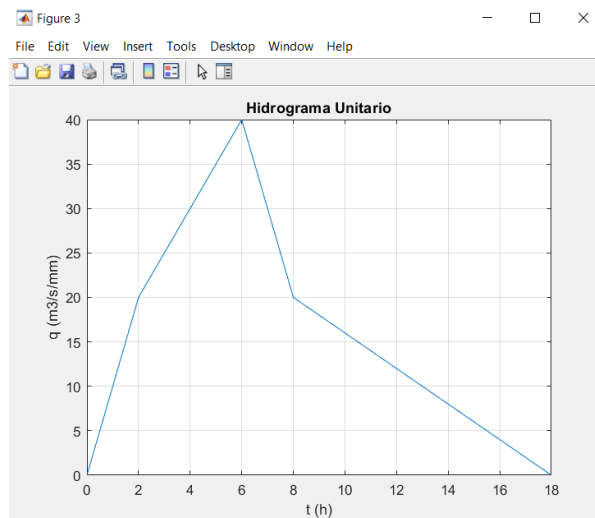


Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.

Durante este periodo también se obtuvieron avances importantes en cuanto a la red de monitoreo, necesaria para obtener información hidrológica de la zona de estudio. Dicha red planeaba estar compuesta de puntos de muestreo de agua superficial a lo largo de la ciudad, así como de varios pluviómetros, que ayudarían a obtener información meteorológica de la zona de estudio; para ello, se diseñó y manufacturó un modelo de pluviómetro de bajo costo y se propuso una ubicación preliminar para ellos, dentro de la microcuenca “El Chicalote”.

Los pluviómetros tienen un diseño cilíndrico de PVC, con área transversal constante, y se incluyó un sensor de presión (eTape) para medir la altura del agua dentro del dispositivo. De este modo, el volumen de agua dentro del recipiente se puede determinar fácilmente. El sensor reporta la información en tiempo real por medio de internet, con ayuda de un sistema electrónico instalado en una parte aislada del pluviómetro.

Los pluviómetros fueron terminados en su aspecto mecánico, mas no en su totalidad, debido a la falta la instalación de los componentes electrónicos. Se logró armar un total de doce pluviómetros, de los cuales uno sirvió como prototipo (Figura 5).



Figura 5. Pluviómetros terminados en aspecto mecánico.

1.3.2 Otoño 2020

En el periodo de Otoño 2021, se desarrollaron tres partidas de trabajo. La primera se enfocó en hidrología superficial. Otra se adentró en la creación de una red de monitoreo hidrogeológico. Por último, la tercera se concentró en la identificación de contaminantes principales en los perfiles de escurrimientos superficiales dentro del acuífero.

La microcuenca “El Chicalote” se dividió en cuatro áreas de captación, gracias a que el software Iber requiere mucho tiempo de cálculo al momento de correr las simulaciones. Por lo tanto, el programa trabaja mejor con proyectos pequeños. En la Figura 6 se muestra un mapa de las divisiones de estas áreas de captación.

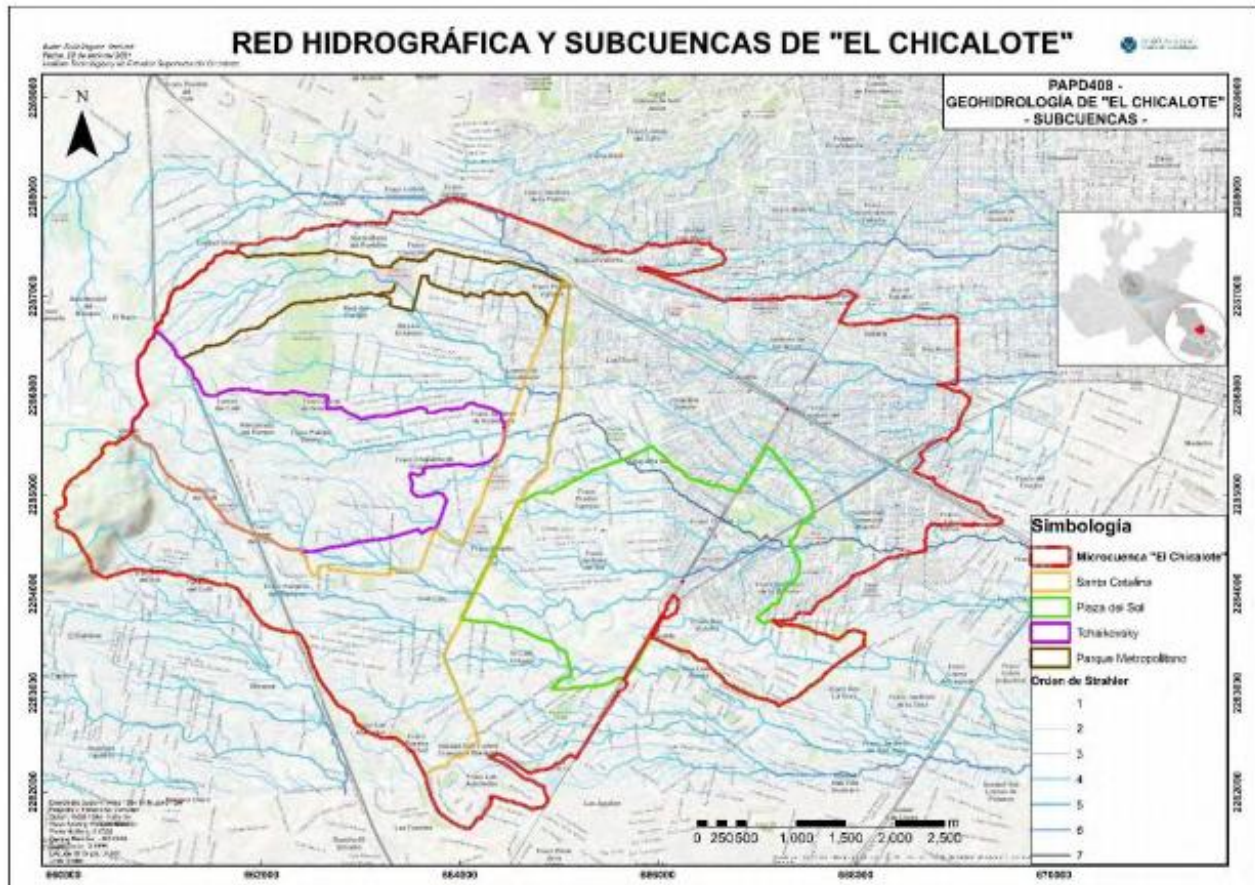


Figura 6. Mapa de áreas de captación de “El Chicalote”.

Al final del semestre se obtuvieron tres nuevos modelos hidrológicos de los canales de Santa Catalina, Tchaikovsky y la zona de inundaciones de Plaza del Sol. Por su parte, el

modelo del Parque Metropolitano continuó mejorándose. En las siguientes ilustraciones se muestran algunos de los modelos realizados con la herramienta Iber, en las distintas áreas de captación.



Figura 7. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Santa Catalina.

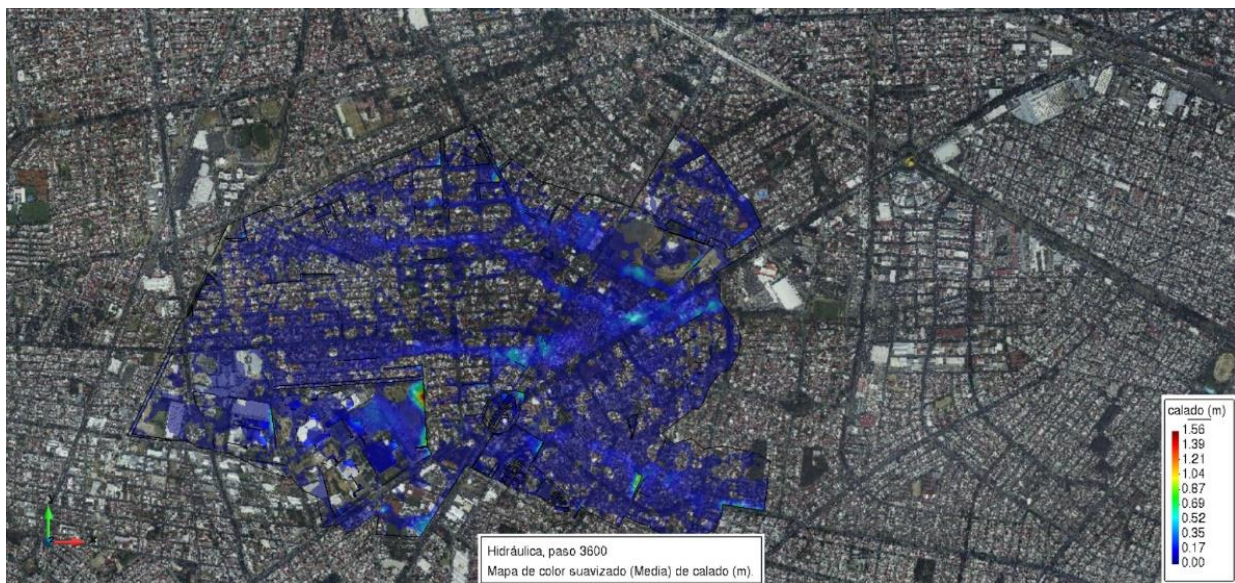


Figura 8. Resultados de calado del modelo hidrológico de cuenca de plaza del sol.



Figura 9. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Tchaikovsky.

Con los resultados obtenidos se creó un *Dashboard* para mostrar los resultados en internet (i.e., acceso libre). Un *Dashboard* es una herramienta para monitorear, analizar y representar de manera visual los indicadores clave y datos fundamentales para un seguimiento de un proceso en específico, mostrando datos en tiempo real. Por lo tanto, es una síntesis que recopila varios datos y los representa de manera digerible.

Por otra parte, para la calidad del agua, se realizó una caracterización de la cuenca con base en una investigación sobre su localización, geología, topografía, hidrología, cobertura y uso de suelo, las actividades económicas que se presentan en la zona, entre otras. Por medio de los software ArcGIS® y QGIS® se representaron mapas con la información de las características de la cuenca. Después, se elaboró una propuesta para el seguimiento de plan de muestreo. Se sugirió señalar los contaminantes, utilizando técnicas de recolección de muestras, justificación de los sitios de toma de muestras y el control de calidad. Esta propuesta se muestra enseguida.

1.3.3 Primavera 2021

En el periodo de Primavera 2021, se dio seguimiento a las simulaciones de las áreas de captación con la herramienta IBER, de las cuales se obtuvieron resultados de tirantes máximos, velocidades y peligrosidad máximas para lluvias con periodos de retorno de 5, 10, 15 y 25 años de la microcuenca “El Chicalote”. De este modo se comparó la respuesta de cada área de captación con lluvias de diferente intensidad (Figura 12 a Figura 14).

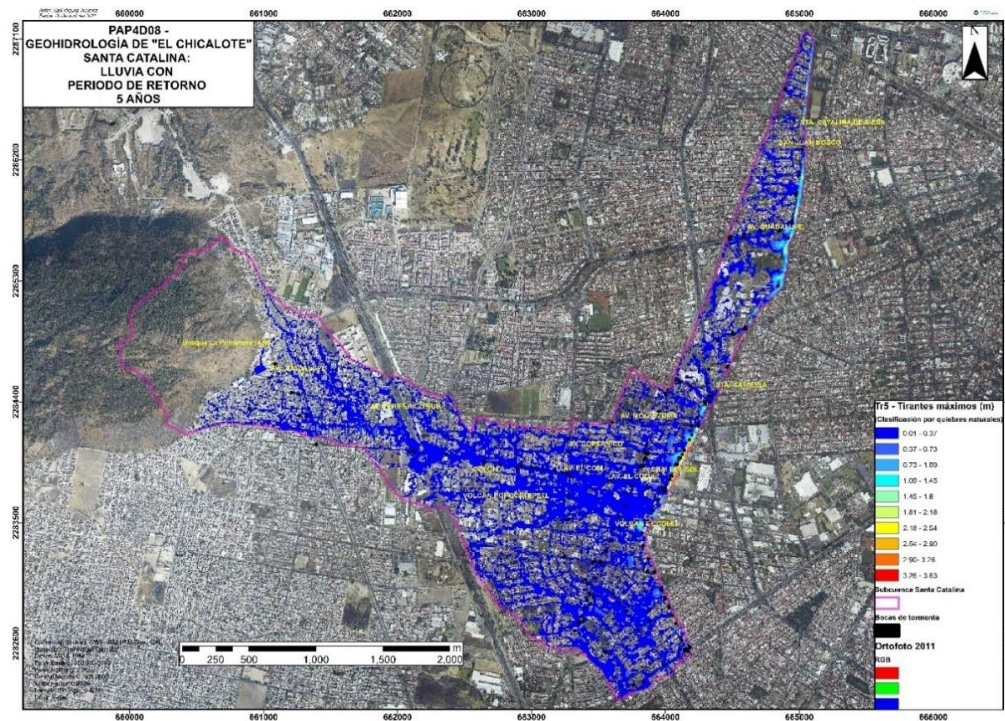


Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

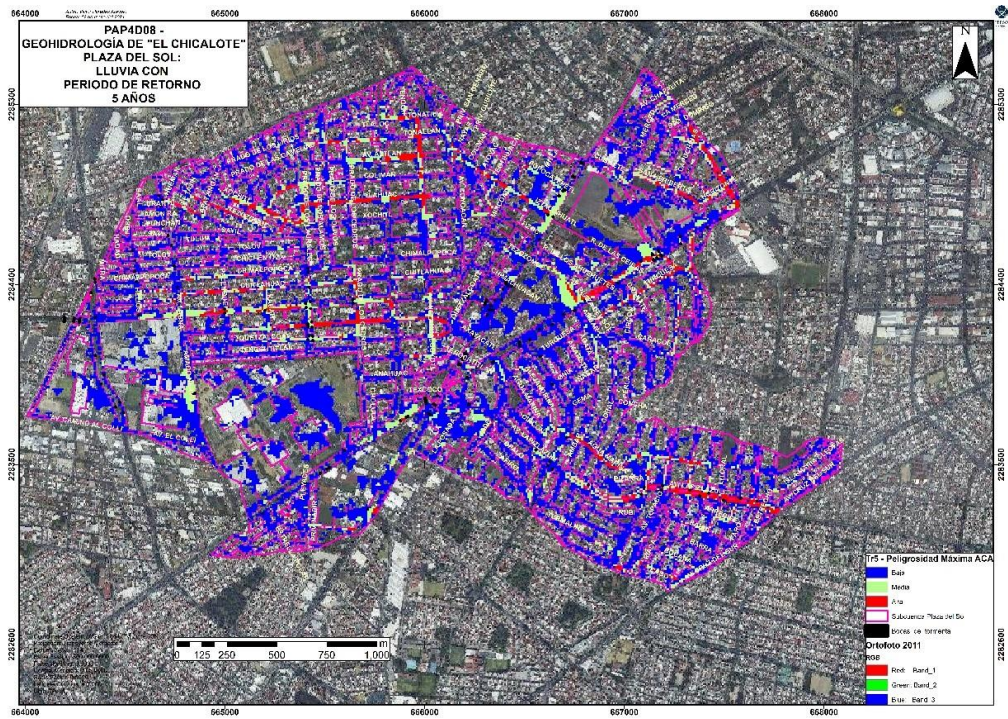


Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.

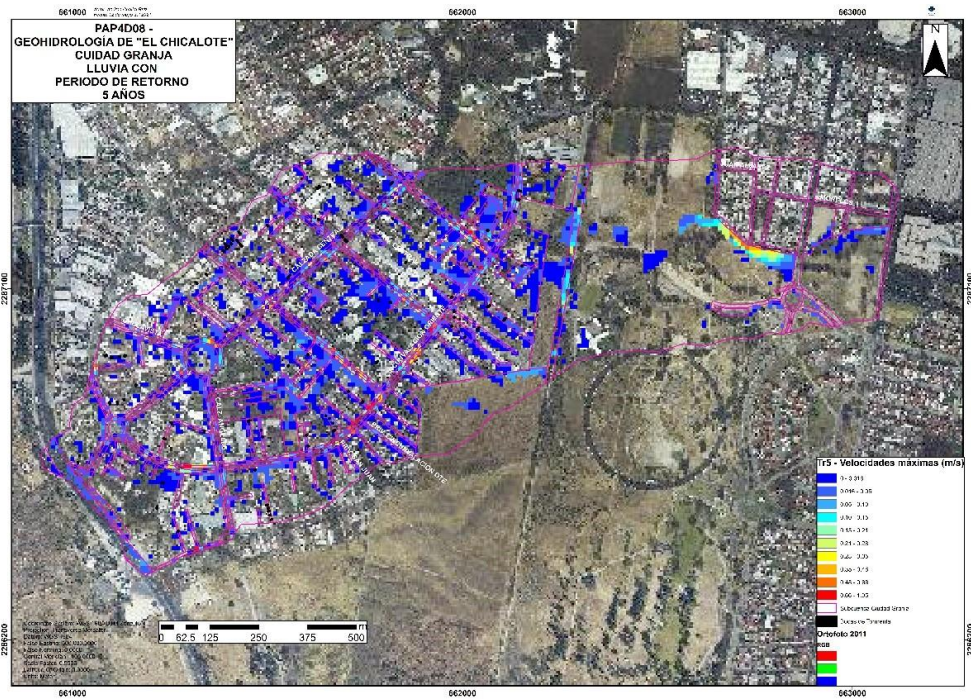


Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.

Se realizaron levantamientos en el vaso de Arroyo Seco, desde la barda de la represa (Figura 15) hasta aproximadamente 150 metros aguas arriba. Esto con la finalidad de crear un *Model Space*, curvas de nivel con la mayor exactitud posible e incorporarlas en un modelo digital de elevación. Sin embargo, no fue posible completar el modelo, debido a que se requerían más de dos puntos posicionados (con coordenadas UTM) para georreferenciar el modelo completo (i.e., nube de puntos). Pese a esto, se lograron empalmar los 22 levantamientos hechos en Arroyo Seco, generando así un *Model Space* en el software Cyclone (Figura 16 y Figura 17).



Figura 15. Represa Arroyo Seco.

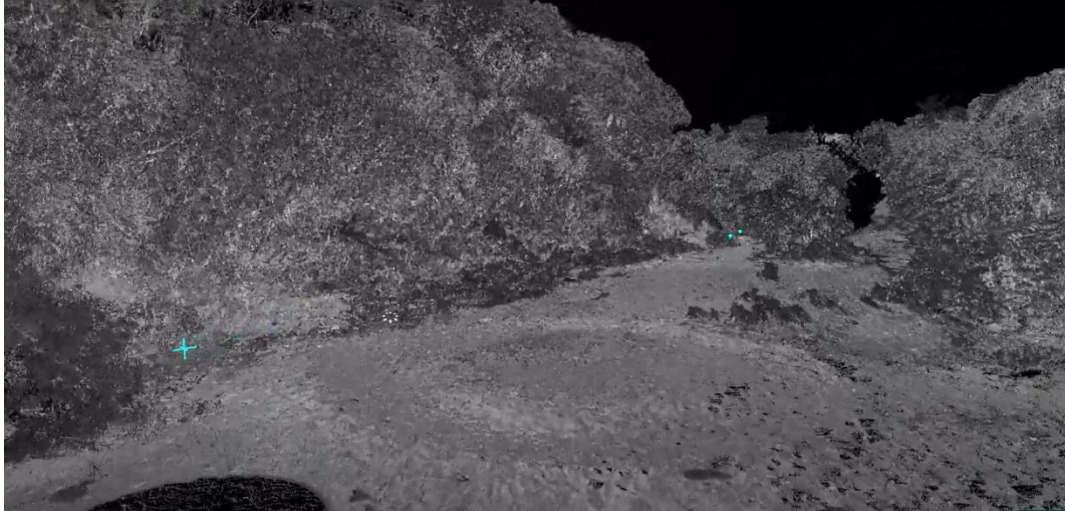


Figura 16. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.



Figura 17. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.

Posteriormente, se continuó con el desarrollo del sistema de monitoreo colaborativo para la gestión del agua en ArcGIS®. Aquí se utilizó un código de programación de Python. Se trabajó con datos de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET) de las estaciones de monitoreo de calidad del aire en el AMG, debido a que en la zona de estudio no se tienen pluviómetros instalados. De este modo, se elaboró un código, el

cual muestra un tablero dinámico con una base de datos amigable y de fácil interpretación. El proceso que siguió el código generado se muestra en la Figura 18.

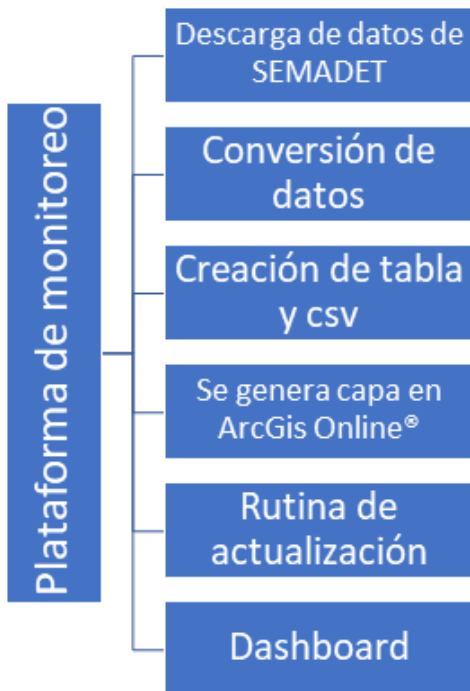


Figura 18. Proceso de la creación de la plataforma de monitoreo.

En las siguientes figuras se muestran las líneas de código que se utilizaron para los datos de concentración de contaminantes del aire. Por su parte, en la Figura 24, se presenta el producto final de la plataforma de monitoreo que es un tablero digital (i.e., *Dashboard*) que facilitará el monitoreo.

```
import urllib
from urllib import request
import json, sys
import ast, csv
import time

pm10 = "http://siga.jalisco.gob.mx/calidadaire/imecashoras2.svc/particulas/"

resp = request.urlopen(pm10)
data = resp.read()
res = data.decode("utf-8")

result = ast.literal_eval(res)
RU8 = result['ParticulasHorarioResult'].encode("utf-8")

datos = RU8.decode("utf-8")
lista = json.loads(datos)
```

Figura 19. Descarga y decodificación de datos de SEMADET.

```

Headers = ["Est", "Clave", "longitud", "latitud", "O3", "NO2", "CO", "SO2", "PM10", "Fecha", "Hora"]
dataframe = pd.DataFrame(columns=Headers)

#index_col='id'
#ignore_index=True

for elemento in lista:
    s = elemento['CASETA']
    s = s[0:3]

    dataframe = dataframe.append({"Est": elemento['CASETA'][0:3], "Clave": dic[s][2], "longitud": dic[s][0], "latitud":
        "SO2": elemento['SO2'], "PM10": elemento['PM10'], "Fecha": elemento['Fecha'], "Hora":

```

Figura 20. Creación de tabla (dataframe).

```

]: #Crea un archivo .csv y lo guarda en una carpeta temporal
dataframe
import os, tempfile

# El argumento "index = False" evita la primera columna
temp_dir = tempfile.mkdtemp()
dataframe.to_csv( temp_dir + '/' + 'estaciones_bot' + '.csv', index=False)

```

Figura 21, Conversión a archivo csv.

```

#Publicar por primera vez el csv

def publicar_primera_vez():
    item_prop = {'title': 'Bot Calidad de Aire en la ZMG'}
    csv_item = gis.content.add(item_properties=item_prop, data=csv_file)
    #Publicar el csv
    csv_item = csv_item.publish(overwrite=True)
    csv_item
    print("Elemento publicado correctamente")

```

Figura 22. Publicación de capa en ArcGIS Online®.

```

def publicar_overwrite():
    source = GIS("https://universidaditeso.maps.arcgis.com/home/index.html",
        "bot_universidaditeso", "B0t12345B0t", verify_cert=False)
    csv = source.content.get('52d7830a17ce45fc99513c4ba22f0292')
    csv.update({}, csv_file)
    csv.publish(overwrite=True)
    publicar_overwrite()

```

Figura 23. Rutina de actualización de la capa.

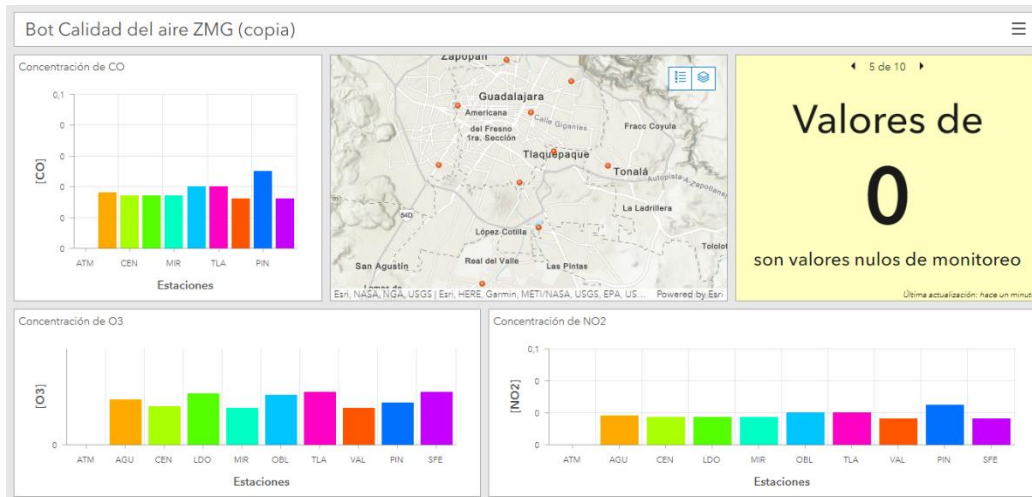


Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.

Finalmente, en el área de monitoreo de calidad del agua, se continuó con el trabajo previo de otoño 2020. Se corrigió, sintetizó y complementó el reporte de “Estudio preliminar y programa de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial de la subcuenca “El Chicalote”. Paralelo a las propuestas de infiltración, se trabajó en el estudio de los principales contaminantes que pudieran estar presentes en los escurrimientos, de acuerdo con las actividades económicas de cada zona y la dirección de la escorrentía superficial. Esto con el objetivo de determinar la calidad del agua del escurrimiento urbano de la cuenca de estudio.

1.3.4 Verano 2021

En el periodo de Verano 2021, se dio seguimiento a las simulaciones hidrológicas de las cuatro áreas de captación: Parque Metropolitano, Santa Catalina, Plaza del Sol y Tchaikovsky, con la herramienta Iber. Además, se agregaron dos áreas de interés: Viejo Chicalote (en el año 1970) y Arroyo Seco. Se obtuvieron resultados de tirantes, velocidades y peligrosidad máximas, para lluvias con periodos de retorno de 5 años, para cada una de las áreas previamente nombradas.

Una de las áreas de interés fue la de Arroyo Seco, localizada en las faldas del bosque de La Primavera, detrás del cerro del Colli. Se estudió esta zona por su potencial de infiltración de agua limpia hacia los acuíferos. Además, se estudió el Viejo Chicalote, con

el fin de tener un punto de comparación con el escenario actual de la microcuenca. Todas las áreas, cuya hidrología superficial fue modelada, se muestran a continuación.

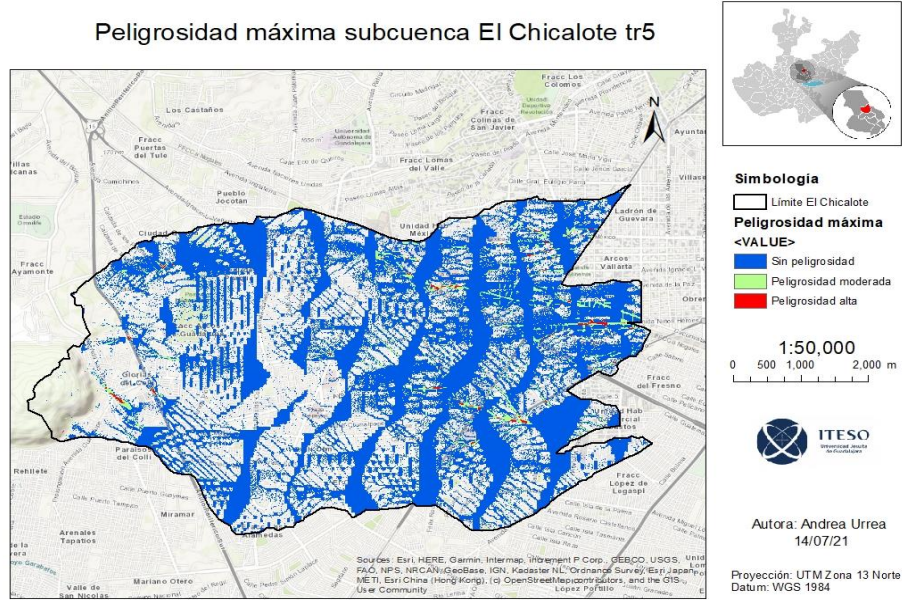


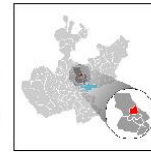
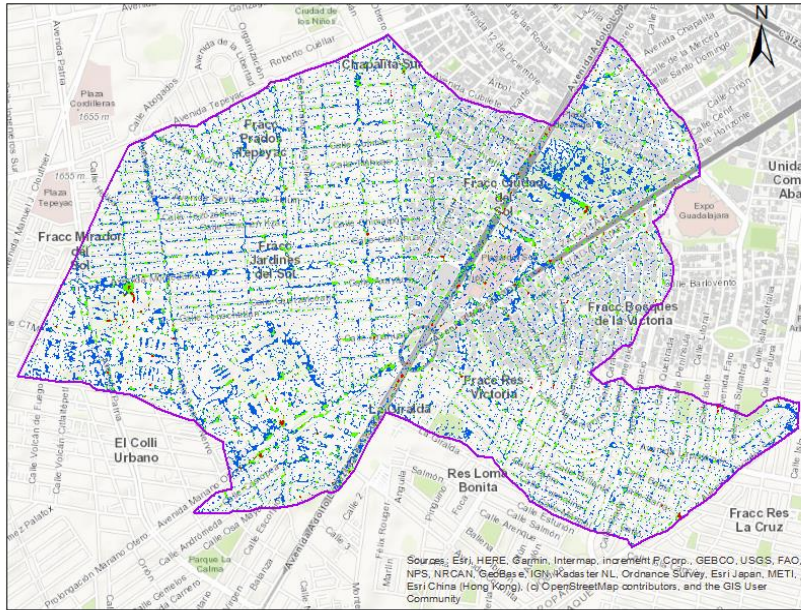
Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.

Máxima peligrosidad ACA área de captación

“C...C...”

Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

Máxima Peligrosidad ACA área de captación Plaza del Sol tr5



Simbología

- Sin Peligrosidad
- Peligr. Moderada
- Peligr. Alta
- Subcuenca

1:20,000

0 100 200 400 m

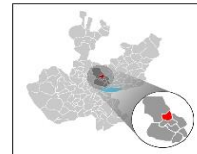
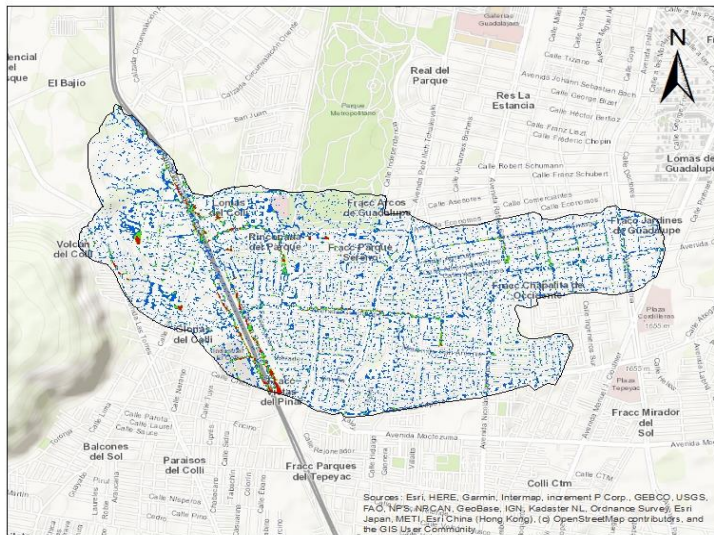


Autor: Mariana Monroy
14/07/21

Proyección: UTM, Zona 13 N
Datum: WGS1984

Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.

Máxima Peligrosidad ACA Área de captación Tchaikovsky - Tr 5 años



Simbología

- Subcuenca Tchaikovsky
- Máxima Peligrosidad <VALUE>**
- Sin Peligrosidad
- Peligrosidad Moderada
- Peligrosidad Alta

1:20,000

0 100 200 400 m



Autor: Leslie Sacramento Omelas
14/07/2021

Proyección: UTM Zona 13N
Datum: WGS1984

Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.

Peligrosidades Máximas en Área de Captación de Parque Metropolitano
para una Tormenta con $tr = 5$ Años

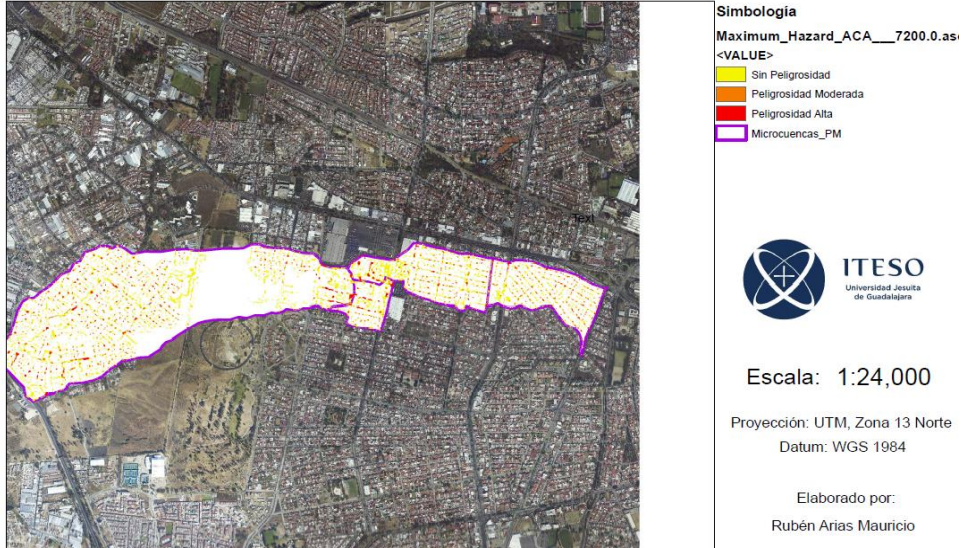


Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.

Peligrosidades Máximas en Área de Captación del Arroyo
Seco para una Tormenta con $tr = 5$ Años

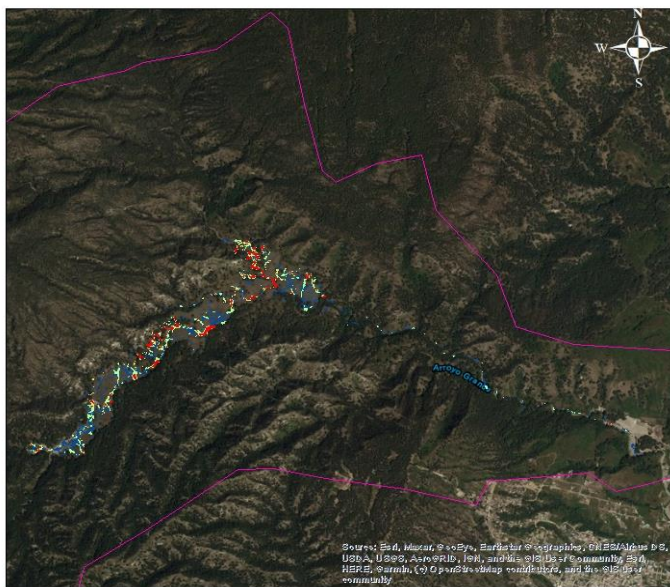


Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.

En este periodo se realizaron algunos levantamientos a lo largo del canal de Av. Santa Catalina de Siena, desde Av. Tepeyac hasta el cruce con Av. Guadalupe; así como sus cruces con las calles más relevantes. También, se realizaron escaneos en distintos cruces de Av. Tchaikovsky, ya que este es otro canal importante dentro de la microcuenca. Una vez obtenidas las nubes de puntos a partir de los escaneos, en el Software Cyclone se generaron los *Model Space*, tanto del Canal de Santa Catalina unido al cruce con Av. Guadalupe, como de los cruces de Av. Tchaikovsky con Av. Ecónomos, Av. Guadalupe y Av. Tepeyac. En la Figura 31 se muestra una captura de pantalla del *Model Space* preliminar del Canal de Santa Catalina, desde su inicio en Av. Tepeyac hasta su cruce con Av. Guadalupe.

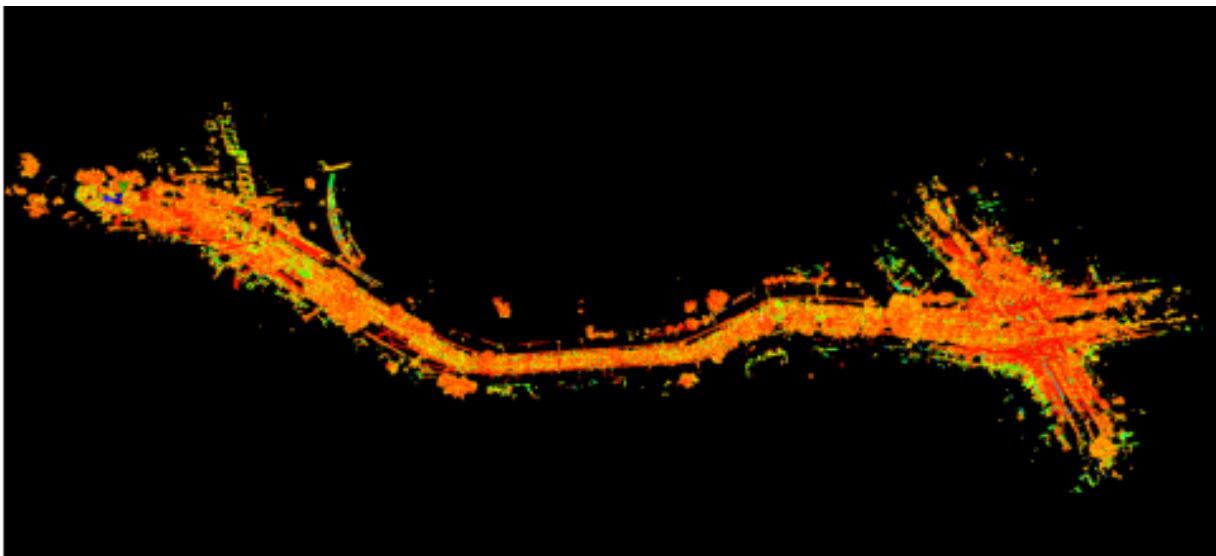


Figura 31. Captura de pantalla del *Model Space* del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.

1.3.5 Otoño 2021

Con respecto al modelado hidrodinámico que se ha ido trabajando a lo largo del tiempo en este proyecto, en el semestre de otoño 2021 se realizó el modelo de elevación digital de la cuenca de Arroyo Seco y de la cuenca del Chicalote. Posteriormente, con la determinación de dichas cuencas, se logró señalar los distintos usos de suelos y determinar la rugosidad de cada suelo. De igual manera se estableció el número de curva de cada uso de suelo lo cual indica el potencial de escorrentía de cada grupo hidrológico

de suelo. Por otro lado, se añadieron 19 puentes en la zona urbana de la cuenca del Arroyo Seco para representar la realidad, de lo contrario, al correr el programa IBER toma obstáculos que producen desbordamientos.

En lo que a calidad del agua respecta, se desarrollaron dos frentes principales: mejora del plan de muestreo de calidad del agua superficial y análisis de la atenuación natural de contaminantes en el acuífero.

El plan de muestreo de calidad del agua superficial fue mejorado en el ámbito de las sustancias analizadas, ya que se amplió la descripción de contaminantes como los plaguicidas y los contaminantes emergentes, que se consideran relevantes para el estudio. Dichas sustancias se muestran a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición.

Tabla 8. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición						
Categoría	Variable	Parámetro	Normativa mexicana	Necesidad de muestreo	Materiales o método de medición	Procedimiento
Variables físicas	DBO5 [mg/l]	150	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-026-SCTI-2001	Se toma un mínimo de 1 L, en un frasco de vidrio o envase de polietileno y debe mantenerse a 4°C hasta su análisis en el laboratorio, con un tiempo de almacenamiento máximo de 24 horas antes de analizar.
	DQO [mg/l]	150	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-030-SCTI-2012	Transferir 10 mL de la muestra a un matraz, añadir 0.4 gramos de sulfato de mercurio (II) y 5 mL de la disolución de dicromato de potasio. Añadir lentamente 15 mL de mezcla de sulfato de péta-ácido e inmediatamente poner el matraz al condensador, titular con dicromato de potasio con sulfato ferroso amoniacal.
	SST [mg/l]	50	Ley Federal de Derechos de Descargas.	Imprescindible	NMX-AA-014-SCTI-2015	Recolectar un mínimo de 600 mL de muestra en envase de plástico o vidrio. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días a una temperatura de entre 2°C a 4°C
	SDT [mg/l]	1000.00	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-034-SCTI-2015	Determinación de la temperatura mediante método visual con termómetro.
	Temperatura [°C]	15-25	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-007-Aguas.	
	pH	6.5- 8.5	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	pH metro.	Se introduce el electrodo a la muestra y se espera a que la lectura se mantenga estable para registrar los datos. Muestreo en el lugar, de no ser posible tomar muestra en envase de polietileno limpio, llenar por completo y sellar herméticamente para evitar interacción con gases de la atmósfera.
	Oxígeno disuelto [mg/l] O2	4	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	Medidor de oxígeno.	
	Conductividad eléctrica	-	-	Imprescindible	NMX-AA-091-SCTI-2000 Conductímetro	Deben tomarse un mínimo de 2.0 litros para el muestreo macro-Kjeldahl y 500 ml para el muestreo micro Kjeldahl en muestras simples o compuestas en un envase de polietileno. Se almacena por un máximo de 30 días en condiciones de oscuridad y se preserva con ácido sulfúrico (1:1), un pH de 1.0 a 2.0 y temperatura de 4°C +/-2°C.
	Nitrógeno Total [mg/l]	40	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-026-SCTI-2010	Tomar un mínimo de 500 ml de muestra simple o compleja en recipientes de plástico, conservar en refrigeración a 4°C por un máximo de 28 días.
	Fósforo Total [mg/l]	0.1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	NMX-AA-029-SCTI-2001	Medición con turbidímetro en el lugar o en laboratorio, en caso de ser en laboratorio coleccionar la muestra mínimo de 100 ml en recipiente plástico o de vidrio boca ancha y hermético. Conservar en refrigeración y analizar en un máximo de 24 h.
	Turbidez [NTU]	5	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-038-SCTI-2001	Medición en laboratorio, tomar muestra simple de mínimo 1.0 litro en recipiente de vidrio de boca ancha, en caso de haber grasas y aceites emulsionadas tomar muestra a 20-30 cm de profundidad. Conservar con ácido clorhídrico o sulfúrico 1:1 a una T de 4°C +/-2°C por un máximo de 30 días.
	Grasas y aceites [mg/l]	10	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	NMX-AA-005-SCTI-2013	Recolectar un mínimo de 500 ml en frascos de vidrio, polietileno o polipropileno. Llenar por completo y tapar herméticamente, almacenar a una T de 0-4°C. Realizar el análisis antes de 24 h.
	Alcalinidad [mg CaCO3]	400	Ley Federal de Descargas	Descable	NMX-AA-036-SCTI-2001	

Variables inorgánicas	Cloruros como Cl ⁻	250	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Se coloca una tira indicadora diferente para cada muestra, dejándola reposar por cinco segundos, sin sacudir la tira, ni tocar la parte del indicador, se espera por 45 segundos para posteriormente tomar el dato. También se pueden identificar la presencia de variables mediante el uso de espectrofotometría en laboratorio.	
	Fluoruros como F ⁻	1.5	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	Nitratos como NO3 ⁻	10	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	Nitritos como NO2 ⁻	1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
	Sulfatos como SO4 ²⁻	400	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	Sulfuros como S ²⁻	0.2	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
	Al [mg/l]	0.02	NOM-SSAI-1994	Imprescindible		
	As [mg/l]	0.05	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
	Ba [mg/l]	0.7	NOM-127-SSAI-1994	Descable		
	Cd [mg/l]	0.005	NOM-127-SSAI-1994	Descable		
	Cu [mg/l]	2	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	P [mg/l]	0.1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
	Cr [mg/l]	0.05	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	Fe [mg/l]	0.3	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
	Mn [mg/l]	0.15	NOM-127-SSAI-1994	Descable		
	Ni [mg/l]	0.01	Ley Federal de Descargas	Descable		
	Pb [mg/l]	0.01	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
Zn [mg/l]	5	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible			
Hg [mg/l]	0.001	NOM-127-SSAI-1994	Descable			
Na ⁺ [mg/l]	200	NOM-127-SSAI-1994	Descable			
Be ⁺ [mg/l]	-	-	Descable			
Mg ⁺² [mg/l]	-	-	Descable			
Ca ⁺² [mg/l]	-	-	Descable			
Variable biológica.	E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	no detectables	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Recolectación de 100 ml de muestra en bolsas o frascos estériles con tiosulfato de sodio (10 mg/ envase de 100 ml). Preservar muestras a T de 4°C +/-2°C sin exceder en todo el proceso las 24 h.	
Plaguicidas	Hexaclorobenceno [mg/l]	1	NOM-127-SSAI-1994	Descable	Se toma la muestra de la superficie en un frasco de vidrio, se cierra con tapón con contratapa de teflón, se conserva la muestra a 4°C y se analiza en laboratorio mediante cromatografía de gases.	
	DDT, ametrina, dimetoato, diazinón.	-	-	-	-	
Emergentes	Hidrocarburos	Benceno	10	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Se identifican cada una de las variables mediante la técnica de espectroscopia infrarrojo. (Robledo et al., 2017)
		Tolueno	700	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	
		Naftaleno	0.02	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	
	Farmacéuticos	F. tilbenceno	300	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Utilización de la técnica de microextracción en fase sólida, cromatografía de gases y espectrofotometría de masas. (Peña-Alvarez, A. y Castillo-Alamís, A. 2015)
		Ibuprofeno	-	-	Descable	
		Paracetamol	-	-	Descable	
		Clonazepam	-	-	Descable	
		Antibióticos	-	-	Descable	
		Inhibidores de bomba de protones. (omeprazol, pantoprazol, etc.)	-	-	Descable	
		IECAS.	-	-	Descable	
		Carbamazepinas	-	-	Descable	
		Bisphenol A	-	-	Descable	
		Triclosan	-	-	Descable	
Cuidado personal	-	-	-	Descable	Utilización de la técnica de cromatografía de gas. (Durán-Alvarez et al. 2012)	
Drogas legales e ilegales	-	-	-	Descable	Utilización de la técnica de cromatografía de líquidos acoplada a cromatografía de masas con HPLC. (Damiá Barceló, L. y López de Adas, M. J. 2008)	

La calidad del agua superficial era de interés, ya que se deseaba infiltrarla en el subsuelo para reducir la evaporación e inundaciones, así como para recargar al acuífero. No obstante, el agua infiltrada tendría que contar con la calidad adecuada para su infiltración. Por ello, se realizó un prototipo, cuyo objetivo era el análisis de la capacidad de atenuación natural de contaminantes que el sistema hidrogeológico tiene por sí solo.

El propósito del prototipo experimental era determinar el funcionamiento que tienen los distintos tipos de subsuelo del AMG, así como su interacción con los distintos contaminantes. La idea era que se le pudiera cambiar el tipo de sedimento, para comprender adecuadamente cómo varía dicho funcionamiento. El diseño del prototipo se explica en la Figura 32. El prototipo final, por su parte, se muestra en la Figura 33.

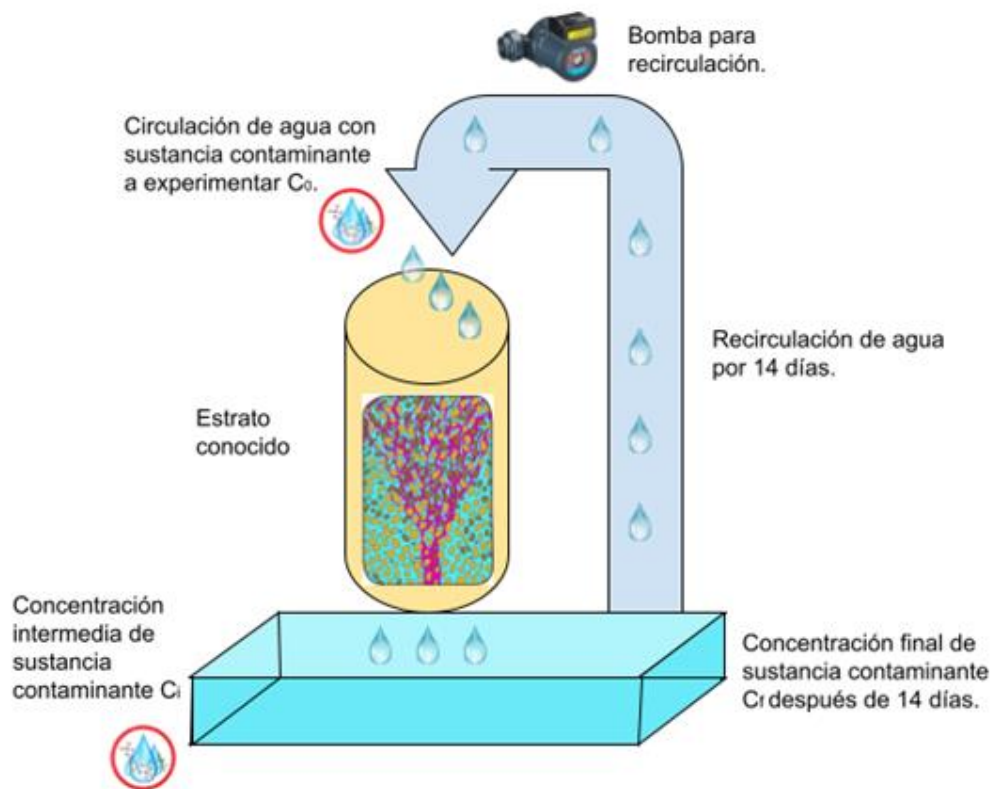


Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.



Figura 33. Prototipo funcional para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG.

En cuestión de hidrogeología se elaboró un modelo preliminar del acuífero en el área de la microcuenca del Chicalote. Esto fue logrado utilizando software libre (Modflow y ModelMuse), llegando a integrar las siguientes características al modelo:

- Topografía del área modelada con una cuadrícula de celdas de 100 x 100 metros

- Capa de grosor de la toba tala elaborada a con datos estratigráficos de pozos existentes
- Capa de la profundidad de la roca basáltica en el área del modelo.
- Condiciones de frontera del modelo a partir de datos del nivel estático del agua en 2018 de pozos existentes
- Propuesta de un pozo de infiltración de 45 metros de profundidad en el Parque Metropolitano
- Tiempos de funcionamiento del pozo de infiltración teórico basados en un estudio anterior (Vanegas, 2017) con el fin de comparar los resultados de ambos modelos

Se llevaron a cabo distintas simulaciones del funcionamiento del pozo de infiltración y se analizó el comportamiento del flujo del agua subterránea a causa de este. Se analizó también la cantidad de agua que sería posible infiltrar con dicho pozo en el Parque Metropolitano, llegando a un aproximado de 6 millones de metros cúbicos de agua en el transcurso de 14 días con un nivel de agua constante en el pozo, hasta la superficie del suelo.

1.4 Objetivos del proyecto

En el presente proyecto se propone aportar soluciones tecnológicas, que contribuyan a restaurar el ciclo hidrológico en el Área Metropolitana de Guadalajara. Las propuestas específicas de este semestre van por siete frentes:

1. Plantear intervenciones que contribuyan a reducir el volumen de agua que llegará a zonas urbanas cerca de las faldas del bosque de la primavera en temporada de lluvias.
2. Analizar posibles afectaciones a los patrones de flujo de agua subterránea al infiltrar por medio de pozos profundos en el área de la microcuenca del Chicalote
3. Estimar un caudal o un total de agua que se pueda infiltrar por medio de uno o varios pozos propuestos
4. Plantear la metodología a seguir para realizar una caracterización científica preliminar del balance hidrológico que se tiene en el ITESO, de modo que los

resultados puedan ser repetibles y escalables a la región sur-poniente del AMG, o incluso a toda la metrópoli.

5. Desarrollar una propuesta experimental para determinar las propiedades hidrogeológicas del acuífero que abastece a la universidad.

1.5 Descripción de los equipos de trabajo

Durante el semestre de Primavera 2022, el equipo multidisciplinario conformado de académicos, asesores externos y alumnos se dedicó a trabajar en distintas partidas de trabajo para avanzar en varios aspectos del proyecto mencionados previamente en los objetivos.

El primer frente se dedicó a la propuesta de represas en Arroyo Grande para disminuir el caudal de escurrimiento que pueda llegar a la zona urbana en las faldas del Bosque de la Primavera, asesorados por el Dr. José Manuel Ramírez León. En la cual se trabajó la zona sur del arroyo. Se creó una red hidrológica de la cuenca de Arroyo Grande donde se obtuvieron distintos cauces, se seleccionaron los cauces que tuvieron longitud mayor a 300 metros. Después, se crearon varias represas para reducir la velocidad de escorrentía en el suelo desnudo de la zona sur del Bosque de la primavera. Por último, sobre el cauce principal se modeló un pozo con caudal de descarga de $1\text{m}^3/\text{s}$.

Otro frente se dedicó a modelar el comportamiento del acuífero en la zona poniente del AMG y la afectación que pozos de infiltración profunda tendrían en los flujos de agua subterránea; esto bajo la asesoría del Dr. Gil Humberto Ochoa. Se utilizó el modelo preliminar construido en el semestre de Otoño 2021, agregándole los pozos de extracción existentes en la zona de estudio para ver su influencia en el modelo y después de esto se hicieron iteraciones cambiando los parámetros hidrogeológicos con el fin de ver que tan importante es la exactitud de estos para el buen funcionamiento del modelo.

Por último, se conformó un frente, integrado por un ingeniero ambiental, dirigido por el Dr. David Rizo. Este frente de trabajo se enfocó en establecer una metodología a corto y mediano plazo, con el fin de caracterizar preliminarmente el sistema hidrogeológico del

que se sustenta el ITESO. Además, dicha metodología busca obtener un balance hidrológico preliminar, considerando los procesos de precipitación, evapotranspiración e infiltración, así como los cauces de escorrentías naturales que corren a través del campus. Todas estas partidas realizaron labor de interdisciplina en reuniones semanales dirigidas por el Dr. David Vargas.

2. Marco Teórico

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico del agua es un proceso natural y complejo que recorre el recurso hídrico desde su precipitación en forma de lluvia, hasta su reincorporación a la atmósfera en forma de vapor; ya sea por medio de su evaporación desde cuerpos de agua superficial, o bien, a través de la transpiración realizada por la vegetación (Rascón & Jiménez, 2001). En el ciclo hidrológico se ve involucrada la transformación del agua en sus diferentes estados físicos, absorbiendo y liberando energía en el proceso para llevar a cabo sus cambios de fase y lograr su movimiento por los océanos, la atmósfera y la tierra (Auge, 2022). Con las temperaturas encontradas en la superficie terrestre el agua es capaz de cambiar entre sus tres fases: sólido, líquido y gas de manera que se forma el ciclo hidrológico (Fernández & Du Mortier, s.f).

De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USDG, por sus siglas en inglés), las fases del ciclo del agua ocurren de forma seguida o simultánea a lo largo y ancho de toda la biósfera, las cuales se categorizan como: almacenamiento de agua en los océanos, evaporación, agua atmosférica, condensación, precipitación, agua almacenada en hielos y nieve, agua de deshielo, escorrentías superficiales, corrientes de agua, almacenamiento de agua dulce, infiltración, descarga de agua subterránea, manantiales, transpiración, agua subterránea almacenada y distribución global del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.). El ciclo hidrológico puede ser apreciado en sus múltiples etapas, donde todas y cada una de ellas juegan un papel vital en la infinidad de características que presenta dicho proceso (Figura 34). Por lo cual, algunos componentes importantes son los siguiente:

- Precipitación, fenómeno también llamado condensación, que consiste en caída de agua líquida o sólida en la atmósfera (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020).
- Evaporación, es la transformación del agua líquida a vapor, desde la superficie del agua (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020).
- Evapotranspiración, es la absorción directa del agua, por parte de la vegetación (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020).
- Infiltración, acción en la cual el agua pasa de la superficie al subsuelo dependiendo del volumen de agua recibido, puede alcanzar a recargar los acuíferos si se encuentra en exceso o, de lo contrario, puede retenerse en la zona vadosa (i.e. no saturada) para luego ser transpirada por las plantas o, en su defecto, evaporada directamente desde el suelo (Campos, 1998).
- Escorrentías, agua que se escurre sobre superficies naturales o artificiales, que desembocan en pequeños arroyos o ríos para su posterior culminación en cuerpos lénticos (e.g. lagos, lagunas y océanos) (Auge, 2022).



Figura 34. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.).

Sin embargo, la actividad humana ha comenzado a tener una interferencia gigantesca en el ciclo hidrológico, teniendo efectos negativos adversos tanto para la población como para la infraestructura de las ciudades y la naturaleza, por causas como las que se muestran a continuación (Press & Siever, 2001):

- Desviación del agua hacia zonas áridas con los propósitos de regar cultivos y abastecer poblaciones.
- Pavimentación de suelos con autopistas, carreteras, calles, edificios estacionamientos, etc. En consecuencia, disminuye la capacidad de infiltración del suelo.
- Contribución al cambio climático por parte del hombre, que provoca aumento en el derretimiento del hielo polar y altera directamente el balance de agua en el ciclo hidrológico.

A causa de esta ruptura del equilibrio en el ciclo hidrológico, ocurren problemas de inundaciones en algunas zonas y escasez del recurso hídrico, entre otras (Vörösmarty & Sahagian, 2000). Esto afecta los niveles del agua subterránea, ya que en lugar de poder infiltrarse a los acuíferos es drenada por los colectores y demás infraestructura de colección de agua de las ciudades (Press & Siever, 2001).

2.2 Aguas Subterráneas

El agua se encuentra en constante movimiento con el ciclo hidrológico, pasando en sus tres estados físicos por la atmósfera, la superficie terrestre y también el subsuelo. Los volúmenes y tiempos de residencia que tiene el agua en cada lugar (atmósfera, superficie terrestre y subsuelo) son distintos. La Tabla 2, muestra la distribución del agua en el mundo según el Servicio Geológico de los Estados Unidos.

Analizando la información desde el punto de vista del recurso hídrico como insumo para el uso humano se excluye la posibilidad de uso del agua oceánica (97.2% del agua total),

por su carácter salino, y también de los casquetes y glaciares (2.15% del agua total) por su inaccesibilidad. Dado lo anterior, sólo queda un 0.65% de agua dulce potencialmente aprovechable por el hombre, que se mueve por el ciclo hidrológico.

Aunadas al ciclo hidrológico, las oscilaciones temporales como los fenómenos el niño y la niña son fluctuaciones climáticas de ciclo largo que hacen impredecible la renovación del recurso hídrico en una determinada zona, por lo que resulta de suma importancia una gestión del recurso que prevea su disponibilidad a largo plazo para poder abastecer las necesidades de la sociedad.

Tabla 2. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).

	Localización	Volumen de agua (km ³)	Porcentaje de agua total
Agua superficial	Lagos de agua dulce	125 x 10 ³	0.009
	Lagos salinos y mares interiores	104 x 10 ³	0.008
	Media en canales de corrientes	1 x 10 ³	0.0001
Agua subsuperficial	Agua vadosa (incluida la humedad del suelo)	67 x 10 ³	0.005
	Aguas subterráneas hasta una profundidad de media milla	4.2 x 10 ⁶	0.31
	Aguas subterráneas profundas	4.2 x 10 ⁶	0.31

Otras localizaciones	Casquetes y otros glaciares	29×10^6	2.15
	Atmósfera	1.3×10^3	0.001
	Océano	1.320×10^6	97.2

Las aguas subterráneas son un elemento fundamental del ciclo hidrológico. Es el agua de lluvia y de los cuerpos de agua que se infiltra en el suelo, y se acumula debajo de la superficie. El agua de lluvia puede ser atrapada por las plantas cerca de la superficie, o avanzar hacia abajo y recargar los acuíferos donde fluye constantemente entre los poros del suelo y las fracturas de la roca. Algunas veces alcanza la superficie en forma de manantiales y humedales, otras, fluye hacia los océanos, y otras alcanza acuíferos muy profundos y se queda ahí por mucho tiempo (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2019).

Como se puede observar en la Tabla 2, el agua subterránea representa el 0.31% del agua total, casi la mitad del agua disponible para el uso humano. Además, se estima que el agua subterránea tiene un volumen 35 veces mayor al volumen de todos los lagos y mares interiores en el planeta. Razones por las cuales existe gran interés en trabajar en su conservación.

Las aguas subterráneas fluyen por los acuíferos, formaciones geológicas que constan de incontables poros diminutos entre los granos de suelo y de sedimento, así como por estrechas diaclasas y fracturas practicadas en el lecho de roca y que además cuentan con las características dadas para permitir el movimiento del agua contenida en ellos. Dicho contenido de agua llega al subsuelo por medio de la infiltración, que depende de varios factores: la pendiente de la superficie del terreno, la vegetación, la profundidad del suelo y el tipo de roca (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007). En los acuíferos el agua se renueva muy lentamente en comparación a otros cuerpos de agua superficiales, puede tomar años o décadas, sin embargo, dependiendo de las características geológicas, en algunos su explotación implica su agotamiento definitivo. (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua , 2019)

Los principales factores que determinan el movimiento del agua subsuperficial son la porosidad, permeabilidad y transmisividad. Existen dos tipos de porosidad, la porosidad total (m_t) se define como el porcentaje del volumen total de roca o de sedimento formado por poros, este el principal factor para que el agua subterránea pueda almacenarse. Se expresa en porcentaje y se calcula a partir de la siguiente ecuación (Sánchez San Román):

$$m_t = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen total}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Cuando se mezclan sedimentos de diversos tamaños, la porosidad se reduce pues las partículas más finas tienden a llenar las aperturas entre los granos más grandes.

La segunda porosidad es la eficaz (m_e), también se expresa en % y su ecuación se presenta a continuación.

$$(m_e) = \frac{\text{Volumen de agua dreanada por gravedad}}{\text{Volumen total}} \quad \text{Ecuación 2.}$$

El concepto de porosidad eficaz implica una diferencia con la porosidad total, pues indica que existe una porción del agua contenida en una porción de muestra dada que se quedará atrapada en los poros como se observa en la Figura 35. Esta porción de agua que no drena por gravedad se calcula restando la porosidad eficaz de la total y se le llama retención específica.

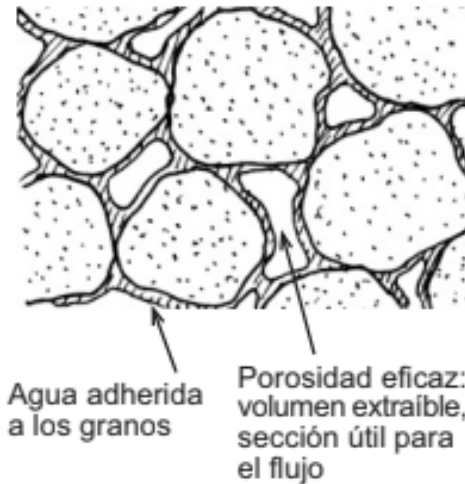


Figura 35. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).

Por otro lado, la permeabilidad de un material se traduce como su capacidad para transmitir un fluido. Esta tiene un papel igual de importante que la porosidad en la formación de acuíferos, ya que, la roca o el sedimento pueden ser muy porosos y no permitir el movimiento del agua a través de ellos. Lo anterior depende de la conexión que presenten los poros.

Se puede utilizar a la arcilla como ejemplo. Su capacidad para almacenar agua es grande debido a su gran porosidad, pero sus espacios porosos son tan pequeños que el agua es incapaz de moverse a través de ellos. Por tanto, la porosidad de la arcilla es grande, pero, debido a su baja permeabilidad, tiene una porosidad eficaz muy baja y se considera como un estrato impermeable.

En hidrogeología, la permeabilidad es también conocida como conductividad hidráulica (K), sus unidades son de (L/T), entre las más comunes se encuentran m/d y cm/s. K es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico como lo indica la Ley de Darcy, que describe el movimiento de aguas subterráneas (Sánchez San Román, s.f.):

$$\frac{Q}{A} = K * i$$

Ecuación 3.

Donde:

$Q = \text{Caudal [=} L^3/T$

$A = \text{Área transversal [=} L^2$

$K = \text{Conductividad hidráulica [=} L/T$

$i = \left(\frac{\Delta h}{\Delta l}\right) = \text{Gradiente hidráulico [=} \text{adimensional}$

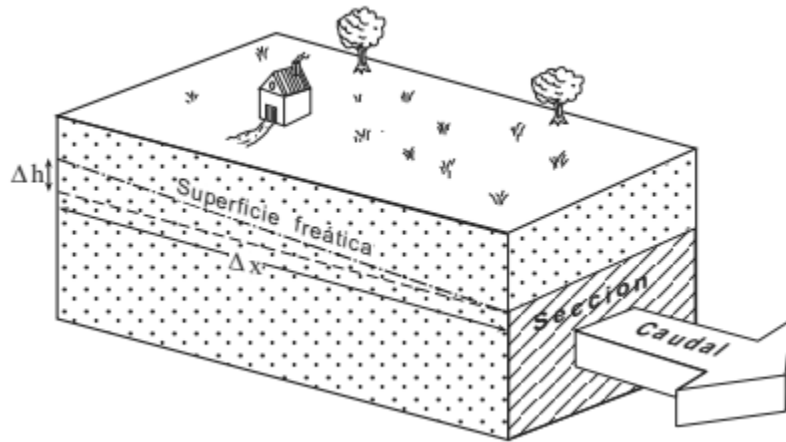


Figura 36. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).

El gradiente hidráulico es la pendiente del nivel freático y tiene que ver con la velocidad del flujo en las aguas subterráneas, ya que cuanto más inclinada es la pendiente, más rápido es el movimiento del agua, debido a que es mayor la diferencia de presión entre dos puntos.

Finalmente, la transmisividad es un parámetro que indica la facilidad del agua de circular horizontalmente por una formación geológica, por lo que depende del espesor, como se aprecia en su ecuación (Sánchez San Román):

$$\text{Transmisividad} = K * \text{espesor} \qquad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

$\text{Transmisividad [=} L^2/T$

$K [=} L/T$

$\text{espesor [=} L$

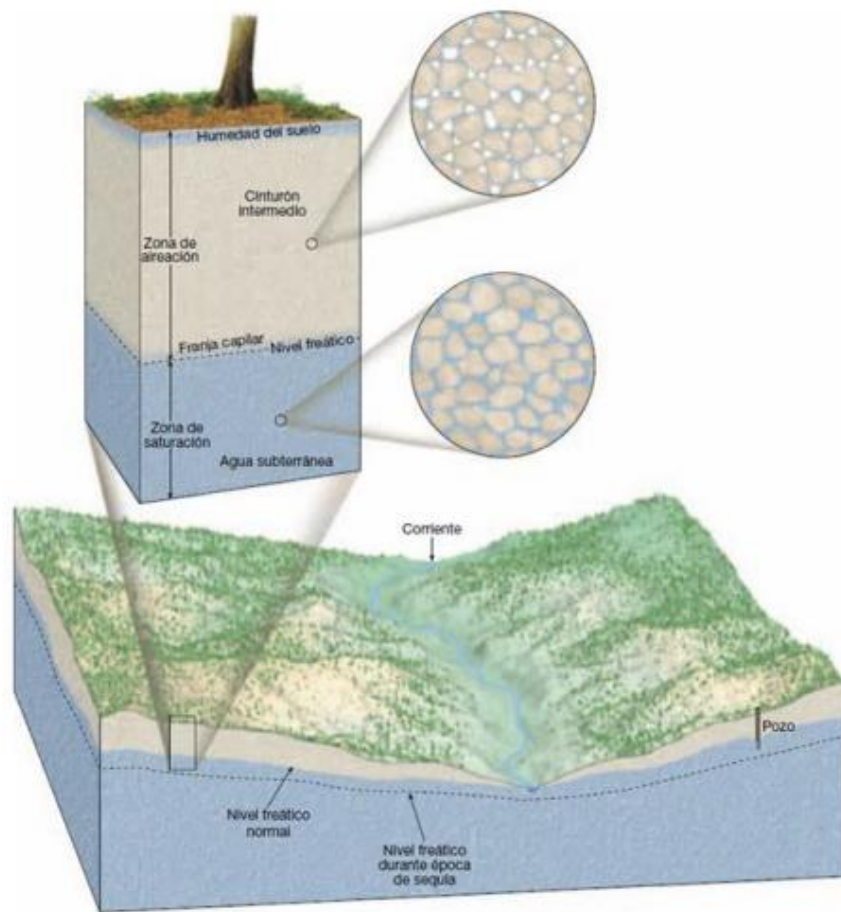


Figura 37. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Otro concepto importante al estudiar las aguas subterráneas es el de nivel freático, que refiere a la superficie por debajo de la cual los poros y fracturas se encuentran saturados de agua, como se muestra en la Figura 37. Encima de dicho nivel, está la franja capilar, y es una sección que, como su nombre lo dice, contiene el agua que sube por capilaridad por los poros disponibles. Por encima del nivel freático también se encuentra la zona vadosa, la cual no se encuentra saturada y en tiempo de lluvias fluye agua a través de ella. Esta pequeña porción suele ser el principal suministro de agua para las plantas (Sánchez San Román).

Estrechamente relacionado con el concepto anterior está el de nivel piezométrico, que se define como la cota que alcanza el agua respecto a un plano de referencia cuando se

deja ésta a la presión atmosférica (González de Vallejo, 2002), y representa la capacidad que tiene una gota de agua del subsuelo para hacer un trabajo. No debe confundirse con el nivel freático, aunque en un acuífero libre coinciden. La diferencia radica en que en acuíferos a presión mayor a la atmosférica el nivel piezométrico se encuentra a menor profundidad que el freático.

La mayoría de los ríos y lagos en equilibrio con su entorno, presentes en el periodo de estiaje indican la intersección entre el nivel freático y la superficie topográfica, es decir que dicha agua es el resultado del afloramiento lateral del agua subterránea almacenada previamente (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).

Enseguida se presentan conceptos geológicos de importancia para la comprensión del agua subterránea:

- Acuífero: estrato o formación geológica que permite la circulación de agua por sus poros o grietas. El agua contenida aquí es la que puede ser extraída y aprovechada (Custodio & Llamas, 2001).
- Acuicludo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero no permite que circule a través de ella.
- Acuitardo: formación geológica semipermeable que contiene agua en cantidad apreciable, pero circula lentamente y con dificultad, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas.
- Acuífugo: formación geológica subterránea que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Son materiales no porosos ni fisurados e impermeables.

La Tabla 3 expone las características de porosidad y permeabilidad de cada uno de estos conceptos previamente descritos.

Tabla 3. Propiedades de acuíferos.

	Porosidad total	Permeabilidad
--	-----------------	---------------

Acuíferos	Alta o moderada	Alta
Acuitardos	Alta o moderada	Baja
Acuicludos	Alta	Nula
Acuífugos	Nula o muy baja	Nula

Existen varias clasificaciones de acuíferos según sus características. Los tipos de acuíferos según la presión a la que se encuentra el agua son: libres, confinados, semiconfinados y colgados. Los acuíferos libres (Figura 38) son aquellos que su límite superior es el nivel freático por lo que está a presión atmosférica. Cuando se perfora un pozo, a esta altura es a la cual se presentará agua, o nivel freático. Este tipo de acuífero tiene un espesor variable, conocido como espesor saturado.

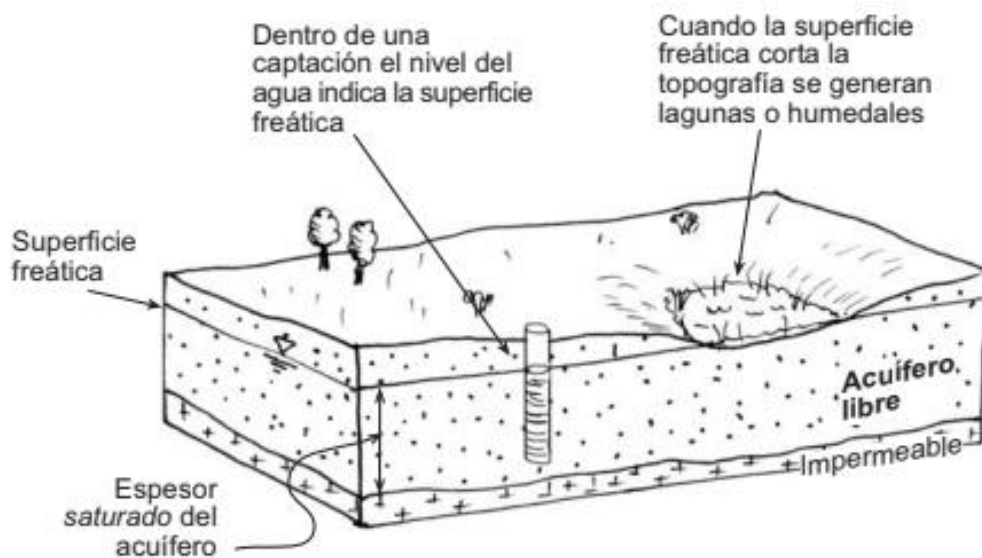


Figura 38. Acuífero libre (Sánchez San Román).

En cambio, los acuíferos confinados (Figura 39) tienen como límite superior una capa impermeable, lo que genera que en ese punto la presión sea mayor a la atmosférica y que su espesor sea fijo. En el caso de tener un pozo en un acuífero confinado el agua sube por las diferencias de presión a un nivel posiblemente más alto que el límite superior

del acuífero. A este nivel se le llama nivel piezométrico. Cuando el nivel piezométrico de un pozo se encuentra sobre la superficie topográfica se le llama pozo surgente.

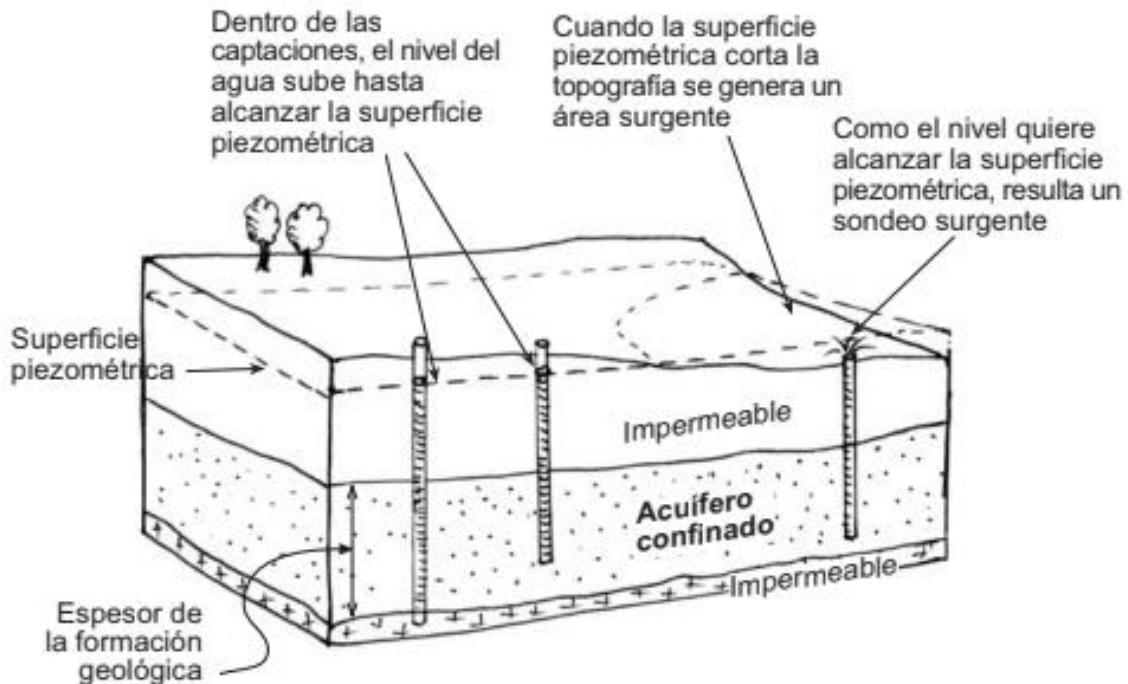


Figura 39. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).

Los acuíferos semiconfinados (Figura 40) son acuíferos a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables; permiten pequeñas filtraciones. Y los colgados (Figura 41) son reducidos en tamaño, y se generan cuando la superficie freática se encuentra a cierta profundidad y existe un nivel impermeable que lo sustenta (Sánchez San Román).

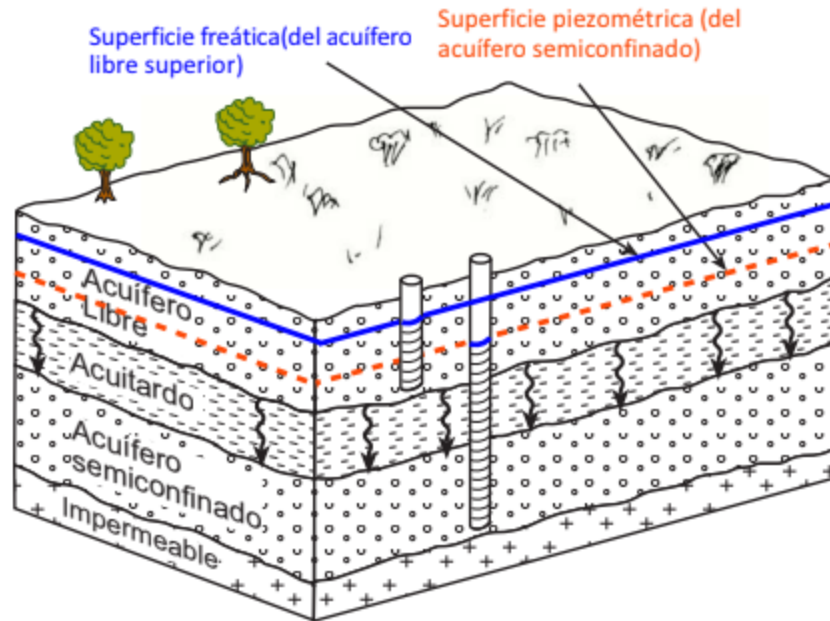


Figura 40. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).



Figura 41. Acuífero colgado (Sánchez San Román).

El proceso de infiltración del agua es el único método natural de recarga de acuíferos. Cuando llueve, parte del agua escurre por la superficie, parte se evapora, y el resto se infiltra en el terreno. La fracción de agua infiltrada, que no se queda en la zona vadosa, llega al nivel freático. Dicho proceso es extremadamente lento, puede durar hasta cientos de años. Un ejemplo se presenta en los Estados Unidos donde se estima que, si se extrajera toda el agua subterránea del país hasta una profundidad de 750 metros, tardaría 150 años en realizarse una recarga completa. Los acuíferos son considerados

recursos no renovables ya que usualmente la velocidad de extracción supera la velocidad de infiltración, otra razón por la cual se hace énfasis en el cuidado del recurso.

El rápido descenso de los niveles freáticos a nivel mundial es un hecho, y, además de representar un problema para la disponibilidad del agua, también genera otras problemáticas como peligro para los asentamientos humanos. La extracción de grandes volúmenes de agua reduce la presión existente en el subsuelo, lo cual hace que el suelo ceda ante el peso de construcciones sobre él, generando subsidencias en el terreno y grandes derrumbes de edificaciones y accidentes en su camino (Figura 42).



Figura 42. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).

Además del problema de la escasez de agua subterránea, se tiene el problema de la contaminación del mismo recurso. Los acuíferos tienen la capacidad de limpiar naturalmente el agua de contaminantes biodegradables gracias a las bacterias presentes, sin embargo, es difícil disolver o eliminar productos y/o contaminantes químicos, los cuales llegan por medio de la infiltración de agua contaminada por aguas residuales de fábricas, aceites de vehículos, etc.

2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos

Se conoce como impermeabilización urbana de una cuenca hidrográfica al cambio de uso de suelo de condiciones rurales a condiciones urbanas (Tobias, 2013). Esta situación se complejiza debido al crecimiento exponencial de la población, es decir, el desarrollo urbano trae consecuencias como contaminación de los suelos y pérdida de ecosistemas (Salas, Coy, Acuña, Páez, & Upegui, 2019).

Estos cambios en las superficies disminuyen la capacidad de infiltración del agua y limitan las coberturas vegetales que interceptan la lluvia. La magnitud de estos efectos está en función del porcentaje del terreno que está cubierto por superficies impermeables (Tarbuck & Lutgens, 2000). Como resultado del incremento de la cubierta impermeable se suelen observar escorrentías superficiales más elevadas y rápidas durante el temporal de lluvias. A continuación, en la (Figura 43) se muestra una comparación gráfica del uso de suelo forestal, donde se infiltra la mayor parte del agua pluvial, y aquel correspondiente al uso urbano, donde la mayoría del agua se pierde en forma de escorrentías superficiales (Artmann, 2014).

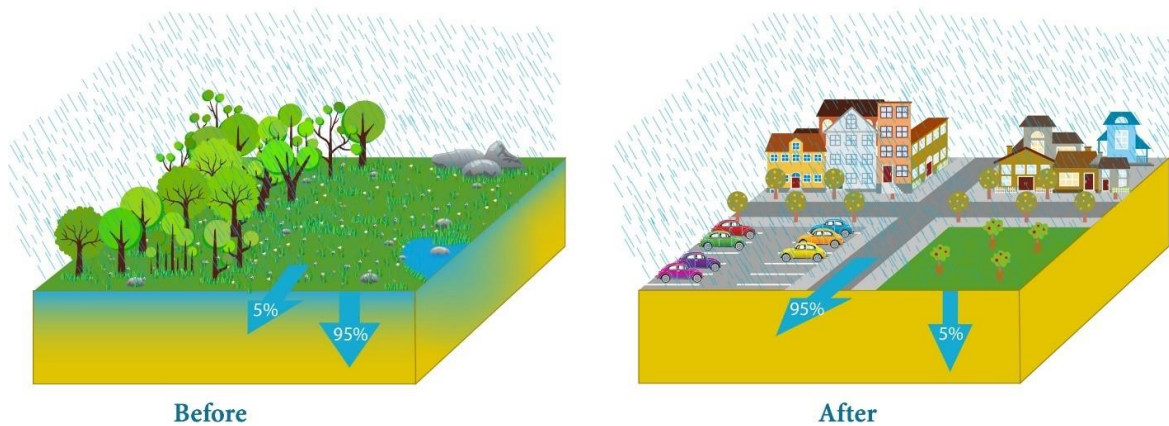


Figura 43. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).

Existen consecuencias por la impermeabilización urbana de suelos como el colapso de infraestructuras (Figura 44) y peligrosas inundaciones (Figura 45). Esto se debe al crecimiento exponencial de la población y las malas costumbres de arrojar residuos

sólidos urbanos a corrientes de agua, los cuales son arrastrados y terminan afectando a la calidad y cantidad de aguas receptoras (Science for Environment Policy, 2012).



Figura 44. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).



Figura 45. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).

También existen otras consecuencias como una reducción en la infiltración del agua al subsuelo y el flujo base de las cuencas (Ungaro, Calzolari, Pistocchi, & Malucelli, 2014). Esto ocurre a causa de la impermeabilización de la superficie, cuando el suelo natural se sella con superficies artificiales impenetrables debido al desarrollo residencial, comercial e industrial (Science for Environment Policy, 2012). Asimismo, se le anuda la extracción de aguas subterráneas que trae consecuencias como el descenso del nivel freático, de manera que se tiene que desviar el agua de lugares lejanos para abastecer a grandes ciudades (Castillo & Carrasco, 2019). Además, al caer una intensa lluvia, la escorrentía superficial aumenta y las superficies impermeables eliminan rápidamente el agua de lluvia sin dejar el suficiente tiempo para que se absorba el agua al suelo, lo que se traduce en menos agua disponible para la evapotranspiración y el enfriamiento (Science for Environment Policy, 2012).

Se debe tener presente las posibles repercusiones del cambio climático, ante el aumento de la población. Ya que se espera que se agraven los problemas del flujo de agua en las zonas urbanas a causa de temperaturas potencialmente más altas y al aumento o disminución de las precipitaciones. Además, las superficies impermeables afectan al balance hídrico y la regulación del agua a escala local y de cuenca. Debido a que, en el ciclo hidrológico recae el diseño y aplicación de estrategias para mitigar los impactos que se pueden provocar a causa de la alteración de los flujos de agua (Science for Environment Policy, 2012).

De acuerdo con la investigación realizada por (Miao, Chen, Li, Fan, & S., 2011) en Beijing, se demostró que la ciudad juega un papel importante en la determinación del movimiento de las tormentas y la cantidad de lluvia. Debido a que los usos urbanos del suelo tienden a hacer que las lluvias se concentren en las mismas ciudades y pueden aumentar el porcentaje del área de fuertes lluvias.

Los cuerpos de agua deben gestionarse para obtener el máximo beneficio, ahora y en el futuro (Sachs, 2015). Por lo cual, el objetivo de analizar la impermeabilización urbana de

suelos es determinar cuáles son las zonas con mayores riesgos ambientales como el colapso de infraestructuras y peligrosas inundaciones (Henríquez & Azócar, 2006). De forma que una herramienta indispensable es el análisis espacial, el cual consiste en estudiar el territorio desde el espacio, determina los límites en los asentamientos, genera planificaciones integrales y detecta zonas con mayores riesgos (Tobias, 2013).

Las grandes metrópolis tienen una urgente necesidad de implementar planes de gestión hídrica para resolver las problemáticas causadas por la impermeabilización urbana. Ejemplos de métodos para mejorar dicha gestión son los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS, por sus siglas en inglés). Están diseñados para maximizar las oportunidades y los beneficios que se pueden obtener de la gestión de las aguas superficiales (Woods Ballard, y otros, 2015). Estos sistemas tienen el objetivo de integrar el ciclo del agua en el diseño urbano para mejorar el comportamiento medioambiental en la urbanización de las ciudades y se describen a fondo más adelante (Fletcher, y otros, 2014).

2.4 Calidad del agua

El agua es fundamental para el ser humano; no solo para beber, sino para cocinar, el saneamiento personal y diversas actividades industriales. Para satisfacer estas necesidades, la calidad del agua utilizada no debe representar ningún riesgo para la salud humana. Sin embargo, el aumento de la población mundial provoca un incremento en la demanda de los recursos naturales. Por lo tanto, es imperativo comprender que la calidad del agua en la naturaleza afecta la condición de los ecosistemas, repercutiendo directamente en la vida de los seres vivos (Sachs, 2015).

En lo que al ciclo hidrológico respecta, el recurso hídrico también sufre de algunas alteraciones naturales, además de las antropogénicas mencionadas con anterioridad. Este es el caso del agua de lluvia que, al tocar la superficie de la Tierra, disuelve los compuestos que hay en ella, causando procesos de alteración y agregando sustancias reactivas. Además, se genera mayor cantidad de sólidos disueltos totales en los ríos y aguas subterráneas, en comparación con lo que se presenta en el agua que escurre en la superficie. Cuando los iones o elementos se combinan, forman compuestos orgánicos

e inorgánicos. Estos últimos incluyen los metales y no metales que originan los minerales que forman rocas que, a su vez, constituyen la corteza terrestre y, al tener contacto con el agua, producen reacción por los iones presentes (Agrawal, Pandey, & Sharma, 2010).

Un punto relevante para la protección del agua es el impacto sobre la salud pública, que se da a través de los sistemas de abastecimiento de agua, provenientes de distintas fuentes. Por causas que pueden ser naturales, pero más frecuentemente creadas por la actividad industrial, se alteran las características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de dichas fuentes. Esto incrementa el nivel de riesgo sanitario presente en el agua; es decir, la susceptibilidad de transportar agentes contaminantes que puedan causar enfermedades de origen hídrico al hombre y los animales, o alterar el normal desempeño de las labores dentro del hogar o la industria (Palansooriya *et al.*, 2019).

Las aportaciones de contaminantes pueden ser de origen natural. Una vez precipitada, el agua permanece en la corteza desde unos días hasta miles de años después, causando que el medio en el que se aloja se disuelva y se altere la composición de la misma. En su trayectoria por el ciclo hidrológico, el agua libera o acepta iones y minerales que alteran su constitución, lo cual es muy importante que se entienda y se considere para poder determinar el uso que se le dará al agua en su lugar de captación (Agrawal, Pandey, & Sharma, 2010).

Una aportación de contaminantes más preocupante es la que resulta de las actividades humanas. Los seres humanos utilizan cuerpos de agua como medios convenientes para la eliminación de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas, degradando la calidad de los mismos. Sin embargo, su uso significa la adición de sustancias contaminantes que poseen consecuencias directas para la salud humana y, a su vez, modifica su disponibilidad (Zaporozec, 1981).

El riesgo sanitario presente en el agua es el resultado de comparar la vulnerabilidad de la población frente a una amenaza o factores de riesgo (Tinoco, 2019). Dichos riesgos pueden clasificarse como agudos o crónicos. Se denominan como riesgos agudos a

aquellos relacionados con la posibilidad de contraer una enfermedad a corto plazo con dosis bajas de contaminantes que puedan resultar infecciosas, como lo es la contaminación microbiológica. Por su parte, los riesgos crónicos hacen referencia a la presencia de contaminantes químicos naturalmente, como compuestos orgánicos e inorgánicos, que puedan afectar la salud humana tras largos periodos de exposición. Es prioritario tratar los riesgos agudos, gracias al gran impacto que pueden generar sobre la población y su salud (Torres, Cruz, & Patiño, 2009).

Por ello, para evaluar la calidad del agua de los cuerpos se han creado índices de calidad del agua (ICA). Estos representan un componente fundamental en el manejo integrado de los recursos hídricos. No obstante, los principales esfuerzos y costos involucrados en la gestión del agua están dedicados a su protección y gestión de su calidad (Lekshmi Prasad & Mophin, 2017).

En adición, de acuerdo con la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial, los parámetros que caracterizan la calidad de agua se pueden clasificar en propiedades físicas, componentes del agua, componentes químicos inorgánicos, componentes químicos orgánicos y componentes biológicos (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

En la categoría de propiedades físicas se encuentran los parámetros de temperatura, siendo un indicador de la velocidad de reacción; la conductividad eléctrica, que indica la concentración de iones de sales, ácidos y bases inorgánicas disueltas; el color, que determina la presencia de iones metálicos, humus, turba, plantas y desechos; la turbidez, un indicador óptico de los sedimentos que se encuentran en suspensión en el agua, como por ejemplo lodos, arcillas, materia orgánica, plancton y organismos microscópicos. Por último, la transparencia del agua, la cual es determinada por los parámetros de color y la turbidez (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Otra categoría es la de componentes del agua, en ella se miden los parámetros de pH, dureza del agua, entre otros. El parámetro de pH indica la acidez o alcalinidad del agua.

En aguas no contaminadas, el pH está controlado principalmente por el equilibrio entre los iones de HCO_3^- . Los cambios de pH se pueden ocasionar por lluvias ácidas, desechos industriales, drenaje de minas o lixiviación de minerales (Organización Meteorológica Mundial, 1994). En cambio, la dureza del agua mide la concentración de iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , así como de HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- ; que se encuentran presentes en el agua (Soto, 2010).

Entre la categoría de componentes químicos inorgánicos se encuentran el oxígeno (i.e., O_2) disuelto y los metales pesados. El oxígeno disuelto en el agua indica presencia de materia orgánica, siendo importante para evaluar y controlar el tratamiento de las aguas de desecho. Por otro lado, la medición de metales pesados es importante, ya que su extrema abundancia resulta peligrosa por su carácter no biodegradable y la toxicidad que ejercen, tanto en el uso del agua para riego agrícola, como para uso doméstico (Mancilla-Villa *et al.*, 2012). Otros componentes inorgánicos son alcalinidad, Cl^- , F^- , P^- (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

Los componentes químicos orgánicos son parte de otra categoría y se conforman por enlaces largos, generalmente de carbono. Algunos ejemplos son los hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fenoles, PCB, plaguicidas y detergentes (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

La última categoría es la de los componentes biológicos, en la cual se presentan organismos microbiológicos como las bacterias, que pueden estar asociadas con coliformes fecales; así como los patógenos y macrobióticos (e.g., plancton, gusanos, peces y vegetación). En los análisis bacteriológicos es importante conocer de manera cuantitativa y cualitativa los organismos coliformes presentes, determinando el número más probable por unidad de volumen en el agua (i.e., NMP) (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

2.4.1 Calidad del agua superficial

Las fuentes de agua superficial son el eje de desarrollo de los seres humanos, permitiendo el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales. No obstante, de forma paradójica, muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de las mismas. En general, las aguas superficiales están sometidas a contaminación natural (e.g., arrastre de material particulado y disuelto, y presencia de materia orgánica natural) y de origen antrópico (e.g., descargas de aguas residuales domésticas, escorrentía agrícola, efluentes de procesos industriales, entre otros) (Narváez, 2021).

Las actividades socioeconómicas humanas, derivadas de la urbanización, producen numerosos contaminantes físicos, químicos y biológicos, que son transportados por medio de aguas residuales, o bien, del Agua de Escorrentía Urbana (i.e., AEU). El agua residual arrastre compuestos orgánicos que demandan oxígeno, varias formas de nitrógeno y bacterias de origen fecal, entre otros contaminantes. Por otro lado, el AEU transporta menores concentraciones de estos contaminantes, pero se relaciona con mayores concentraciones de otros, asociados al uso de vehículos, como lo son los hidrocarburos y los metales pesados (Vázquez *et al.*, 2020).

Los depósitos de sólidos y sustancias, a lo largo de las cuencas urbanas durante periodos secos, pueden conllevar importantes problemas medioambientales. Durante los episodios lluviosos, las primeras aguas de escorrentía superficial provocan el lavado de las superficies impermeables de las cuencas urbanas (i.e., fenómeno de primer lavado o *first flush*), de modo que los alivios de los sistemas unitarios de alcantarillado (i.e., DSUs) pueden provocar el flujo de significativas cantidades de contaminación al medio (Espín *et al.*, 2016).

Los contaminantes asociados al *first flush* en las áreas urbanas se deben a las diferentes actividades humanas que, por el lavado atmosférico y las superficies impermeables (e.g., calles, avenidas, parques, cubiertas, etc.), son introducidos al agua por diferentes procesos físicos y químicos. Por consiguiente, los usos del suelo generan diversos

contaminantes con magnitudes distintas; por ejemplo, los residenciales, industriales, comerciales y vías de transporte generan sedimentos, nutrientes, materia orgánica y aceites y grasas. Análisis fisicoquímicos y bacteriológicos de escorrentías, realizados por diferentes autores y en distintas áreas urbanas, han mostrado la existencia de sólidos suspendidos, coliformes fecales, materia orgánica, metales pesados y otros constituyentes como aceites, grasas e hidrocarburos (Peña & Lara, 2012).

Estas son las razones por las cuales, las aguas de lluvia son vertidas finalmente a los cuerpos hídricos y, al empeorar sus condiciones naturales, se convierten en puntos de contaminación difusa en las fuentes receptoras. Dichos puntos de contaminación pueden clasificarse como difusos o puntuales, según su origen. Aquellos difusos corresponden a los contaminantes arrastrados por escorrentías desde su generación hasta los cuerpos receptores; a diferencia de los puntuales, que abarcan aquellas descargas directas en los cuerpos de agua (Mijangos *et al.*, 2015).

La contribución de los puntos de contaminación puntuales y difusos es relevante a escala mundial. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA) estima que las fuentes no puntuales representan el 65% de las cargas totales de contaminación. Por su parte, la Administración de Protección Ambiental de Taiwán le atribuye poco más del 20% de las cargas contaminantes, a las fuentes hídricas superficiales (Peña & Lara, 2012). Claro que los contextos políticos y sociales en ambas naciones son muy diferentes entre sí. Sin embargo, a groso modo, se estima que en los países desarrollados son mucho más relevantes las fuentes de contaminación difusa que las puntuales, mas no significa que estos últimos puedan considerarse como insignificantes (Mijangos *et al.*, 2015).

2.4.2 Calidad del agua subterránea

Como se mencionó previamente, el agua subterránea es indispensable para el desarrollo humano, representando casi la mitad del agua disponible para consumo (Piguave-Reyes *et al.*, 2019).

El crecimiento urbano y la infraestructura pública han ocasionado transformaciones en las fuentes de agua subterráneas, pues las han reducido a ríos de aguas negras o, en el peor de los casos, desaparecido por la infraestructura. Todas las actividades que interfieren en los procesos hídricos, como la eliminación de la cobertura vegetal, provocan la compactación del suelo e impermeabilizan los espacios. Por ello se modifican los patrones de escorrentía, limitando la capacidad de recarga de los acuíferos y poniendo en riesgo el abastecimiento hídrico a largo plazo. La progresiva urbanización afecta la disponibilidad del agua, así como su calidad, lo cual tiene importantes implicaciones sociales, ambientales, económicas y políticas (Dávila & de León, 2011).

Una de las principales fuentes de contaminación a la que están expuestos los acuíferos son las descargas de aguas residuales. Se le denomina así a las aguas de composición variada, provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (ECOL, 1997). Además, los acuíferos también pueden verse afectados por la infiltración de agua residual utilizada para el riego agrícola, que puede traer altas concentraciones de pesticidas (e.g., fertilizantes químicos, nitratos, fosfatos, insecticidas, fungicidas, entre otros). Otra fuente preocupante es la infiltración de los lixiviados procedentes de los sitios de disposición final o de los vertederos de residuos sólidos, situados sin tener en cuenta ningún criterio hidrogeológico (UNAM, 2018).

Los estratos del subsuelo atenúan muchos contaminantes activamente, y han sido considerados potencialmente efectivos para la disposición segura de aguas residuales domésticas. La degradación de estos contaminantes en la zona vadosa (i.e., no saturada) es producto de la degradación bioquímica, reacciones químicas y procesos de adsorción. Existen en el subsuelo ciertos microorganismos que residen en el subsuelo, que favorecen la degradación bioquímica. Por su parte, las distintas reacciones químicas son generadas por los materiales geológicos existentes. Por último, los fenómenos de adsorción son producidos en la roca, principalmente tras un largo trayecto a través de ella. Sin embargo, la eficacia para eliminar contaminantes depende directamente de los

perfiles del subsuelo y la estratigrafía. Así, la vulnerabilidad de los acuíferos ante la contaminación también varía según el tipo de contaminante y de su composición. Por ejemplo, un acuífero somero fracturado es significativamente más susceptible a uno confinado poroso (del Puerto & Valdés, 2021).

El movimiento del agua y transporte de contaminantes desde la superficie del suelo a los acuíferos suele ser un proceso muy lento. Puede tomar desde años hasta décadas, antes de que se observe afectación por contaminantes persistentes en el suministro de agua (Lagos, 2002). Este factor puede interpretarse de dos maneras: por un lado, resulta beneficioso para el medio ambiente, pues le da tiempo suficiente a los contaminantes a degradarse; pero también incrementa la probabilidad de penetración de contaminantes más persistentes.

2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS)

Los SuDS son sistemas que buscan aportar a la restauración del ciclo natural del agua maximizando las oportunidades y beneficios que se pueden obtener de la gestión de aguas superficiales (Woods Ballard *et al.*, 2015). Distintos países han optado por la implementación de planes de desarrollo sostenible, dentro de los cuales se involucran diversos sistemas de drenaje que utilizan técnicas de depuración natural de contaminantes y ayudan a restaurar el ciclo hidrológico. Tal es el caso de Australia con los Diseños Urbanos Sensibles al Agua (WSUD), Suecia con la Gestión Urbana Integral del Agua (IUWM) (Global Water Partnership, 2013), o de Reino Unido con los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Fletcher *et al.*, 2014).

El término SuDS surge en Reino Unido. Sin embargo, el uso de técnicas de SuDS está cada vez más extendido por el mundo. Se han realizado multitud de proyectos y experiencias que han generado distintos manuales de diseño, guías y normativas para facilitar su divulgación. En países como Reino Unido o Estados Unidos se han desarrollado normativas que fijan periodos de retorno y duración de lluvias que permiten un diseño integral desde el punto de vista de calidad y cantidad de lluvia. Actualmente

se ha reconocido a nivel mundial que se necesita un cambio para la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos (Mompalmet, 2008). Este tipo de técnicas no han sido no han sido implementadas en México. Sin embargo, existen varios estudios de alternativas de SuDS en distintas partes del país, por ejemplo, en la ciudad de Córdoba, Veracruz (Gorostegui, 2021). Hablando sobre los sistemas de drenaje, éstos pueden contribuir al desarrollo sostenible, mejorar los espacios en los que vivimos, trabajamos y jugamos, equilibrando las diferentes oportunidades y desafíos que influyen en el diseño urbano y el desarrollo de las comunidades (Susdrain, s.f.). El drenaje urbano consiste en la gestión del agua de lluvia precipitada. Actualmente, en países poco desarrollados, el drenaje urbano consiste solo en el movimiento del agua de lluvia precipitada de un lugar hacia otro. Lo cual acaba provocando problemas como: contaminación difusa, inundaciones y pérdida de servicio de sistemas de saneamiento. En cambio, el drenaje sostenible pretende disminuir estos problemas para mejorar la gestión del agua de lluvia y evitar pérdidas de recursos. Para lograr este sistema se requiere de una adecuada metodología para asegurar el objetivo del proyecto y se tomen en cuenta las condiciones particulares de dicho país (Gorostegui, 2021).

Los SuDS son una mejor opción que los métodos tradicionales de drenaje (Susdrain, s.f.):

- Gestionan los volúmenes de escorrentía y los caudales de las superficies duras, reduciendo el impacto de la urbanización en las inundaciones.
- Protegen o mejoran la calidad del agua (reduciendo la contaminación por escorrentía).
- Se adecúan a las necesidades de la comunidad local.
- Proporcionan oportunidades para la evapotranspiración de la vegetación y las aguas superficiales.
- Fomentan la recarga natural de las aguas subterráneas y de los acuíferos.

Los Sistemas de Drenaje Sostenible proporcionan un drenaje de alta calidad al tiempo que ayudan a hacer frente a las lluvias intensas, mejoran la calidad del aire urbano,

regulan las temperaturas de los edificios, reducen el ruido y ofrecen oportunidades de recreación. También contribuyen a contrarrestar algunos de los efectos del aumento de la urbanización en el ciclo del agua, como la reducción de la infiltración, que a su vez puede dar lugar a una disminución de las reservas de agua subterránea (Woods Ballard *et al.*, 2015). De acuerdo con lo anterior, los SuDS son elementos de la red de drenaje que permitirán recoger, transportar, descontaminar, retener, filtrar y evacuar el agua de lluvia de una manera sostenible. Un buen diseño de SUDS maximiza el uso del espacio disponible, por lo que pueden utilizarse incluso en los espacios más pequeños. Con respecto a la calidad del aire urbano, los SuDS muchas veces se relacionan con infiltración en uso de suelo de vegetación o techos verdes. Por lo tanto, dicha vegetación tiene la capacidad de absorber contaminantes a través de sus estomas y reducen la contaminación atmosférica. Por otro lado, esta vegetación también combate con la radiación solar en zonas urbanas lo que permite regular la temperatura dentro de la ciudad.

Es posible clasificar los beneficios de los Sistemas de Drenaje Sostenible en cuatro categorías principales: Cantidad de Agua, Calidad del Agua, Comodidad y Biodiversidad. Se trata de los cuatro pilares del diseño de los SuDS (Woods Ballard *et al.*, 2015). De acuerdo con la Figura 46, el primer pilar de los SuDS (i.e., Cantidad de Agua) se refiere tanto a la gestión del riesgo de inundaciones como a la protección del ciclo hidrológico natural. Por otro lado, la categoría de Calidad del Agua se enfoca al monitoreo de las características del recurso hídrico, con la intención de evitar contaminación de este. Por su parte, con el pilar de Comodidad se busca crear mejores lugares para la sociedad, tanto para su recreación como para la vida cotidiana en general. Finalmente, la categoría de Biodiversidad se centra en favorecer el desarrollo de la naturaleza.

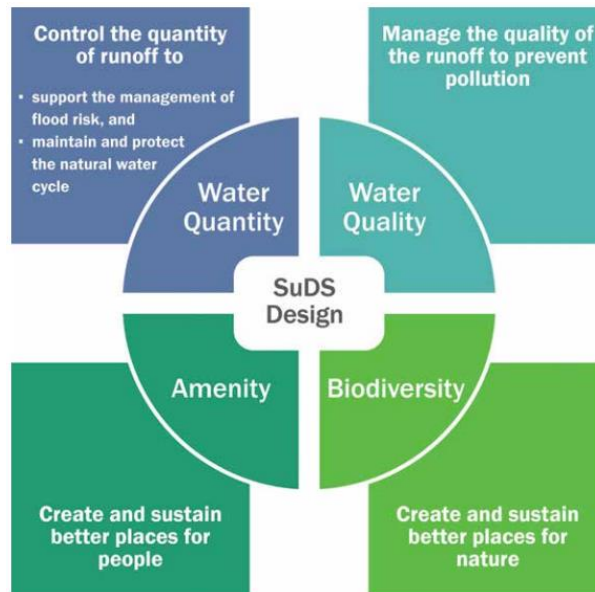


Figura 46. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).

Los SuDS pueden adoptar muchas formas, tanto por encima como por debajo del suelo. Este tipo de sistemas pueden incluir tanto actividades de jardinería, como productos patentados o fabricados. En términos generales, los sistemas de gestión de aguas pluviales que se diseñan para gestionar y utilizar el agua de lluvia cerca de donde cae, en la superficie e incorporando vegetación, tienden a proporcionar los mayores beneficios. La mayoría de los sistemas de gestión del agua pluvial utilizan una combinación de componentes de producto patentados o ya fabricados para alcanzar los objetivos generales de diseño del sitio (Woods Ballard et al., 2015).

Los drenajes sostenibles son una excelente alternativa para aprovechar el agua pluvial y cuidar de la infraestructura urbana. Sin embargo, no siempre pueden ser aplicados y presentan algunas de sus desventajas, como son (Gorostegui, 2021):

- Requieren tiempo, planificación y recursos adicionales que se necesitan mediante un acuerdo entre los inversionistas y las alternativas a evaluar.
- Algunas técnicas son muy costosas.
- Necesitan un grado de tecnicidad para aplicar los métodos de la manera correcta.

- No siempre son aptos en zonas con muchos sedimentos superficiales.
- Requieren de una ubicación específica, diseño y mantenimiento.
- Se necesitan previamente estudios geológicos de la zona.

Dentro del enfoque de los SuDS existen varias alternativas a los sistemas de drenaje convencionales. El proceso de selección del o de los SuDS depende de varios factores como los usos urbanos, la cantidad y la calidad del agua de escorrentía, el entorno arquitectónico, usos de suelo, entre otros. Entre los principales tipos se encuentran las áreas de biorretención, desconexión de la escorrentía, superficies permeables, pozos y zanjas de infiltración, techos verdes y humedales. Los sistemas de infiltración son especialmente útiles ya que contribuyen a disminuir las escorrentías superficiales (y por lo tanto las inundaciones) al mismo tiempo que favorece la recarga natural y artificial del agua subterránea.

Las áreas de biorretención consisten en depresiones poco profundas con vegetación, las cuales son una buena opción para el manejo local de agua pluvial. La Figura 47 muestra el diseño general de esta alternativa, el cual incluye una capa de drenaje. Para su diseño, es importante considerar criterios como la ubicación, tamaño, tipo de suelo, tipo de vegetación y mantenimiento. En este tipo de SuDS la escorrentía se retiene en la superficie antes de ser filtrada al subsuelo o transportada por lo que reduce el riesgo de inundaciones y al mismo tiempo que el sistema de biorretención elimina los contaminantes a través de procesos físicos, químicos y biológicos (Paus & Braskerud, 2014). Esta estructura tiene asociada cobertura vegetal y puede implementarse en una gran variedad de espacios como separadores de zonas viales y andenes. Su implementación puede generar beneficios a nivel de paisajismo y amenidad. A pesar de que estos sistemas son populares en distintos países del mundo como Estados Unidos, Canadá y Australia, existen consideraciones o ciertas desventajas al implementarlos; una de ellas es la superficie amplia que requiere en comparación con los sistemas convencionales. Asimismo, en caso de que el suelo no drene adecuadamente, es necesario añadir una tubería de drenaje. No es un sistema adecuado para zonas con

pendientes muy pronunciadas. En la Figura 48 se presenta un ejemplo de este tipo de SuDS.

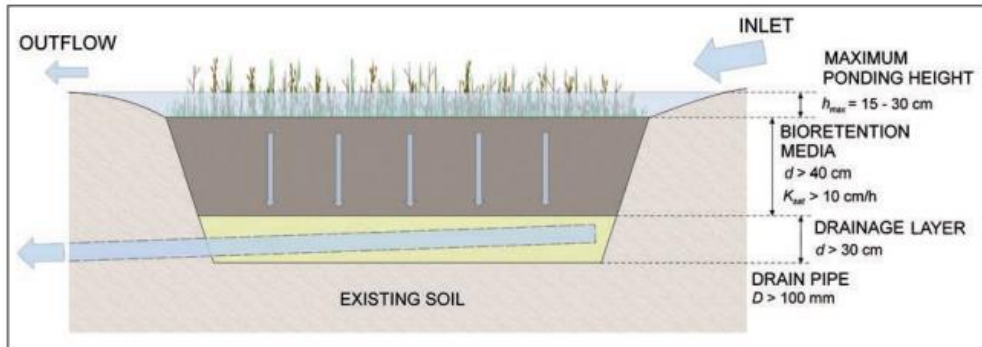


Figura 47. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).



Figura 48. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).

Otro tipo de SuDS son las zanjas de infiltración, las cuales consisten en excavaciones que funcionan como zonas de almacenamiento temporal subterráneas rellenas de grava (Figura 49). Estos sistemas funcionan para pequeñas áreas de drenaje y permiten que las escorrentías de agua pluvial se infiltren en el suelo. Pueden ser utilizadas debajo de cunetas verdes, pavimentos porosos o banquetas. Gracias a su fácil construcción pueden colocarse en áreas residenciales, comerciales, estacionamientos o carreteras.

No son sistemas tan comunes en comparación con los SuDS superficiales; sin embargo, son una buena alternativa cuando la minimización de costos es una prioridad (Chahar, Graillet, & Gaur, 2012).

Es importante considerar que, si el tiempo entre dos tormentas sucesivas es menor al tiempo de vaciado de la zanja, es necesario desviar el exceso de agua al alcantarillado o algún otro tipo de almacenamiento. Este sistema incluye un filtro físico para remover sólidos (Susdrain, 2021). Es necesario su mantenimiento para asegurar que no haya obstrucciones en el proceso de infiltración y su uso no se recomienda en zonas con suelos muy finos.

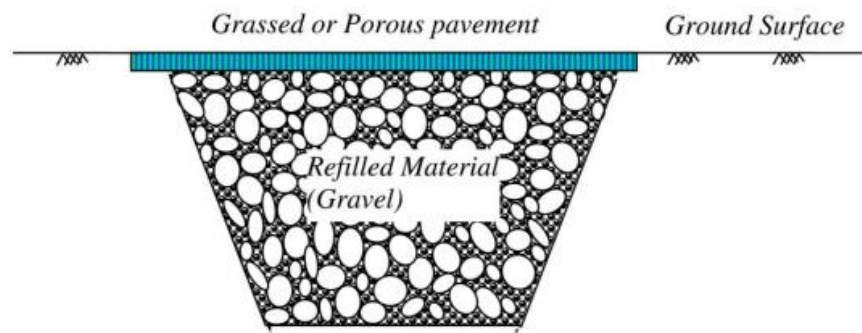


Figura 49. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).

Por su parte los techos verdes consisten en aprovechar la superficie de estos añadiendo vegetación. Básicamente, como se muestra en la Figura 50, su diseño consiste en múltiples capas entre las cuales se incluye una membrana impermeable, una capa de aislamiento, drenaje, un sustrato y la capa final de vegetación. Es importante mencionar que no cualquier tipo de planta puede ser utilizada ya que pueden sufrir exceso de humedad, sequías, temperaturas extremas, velocidad del viento elevada. Las plantas de crecimiento bajo o compacto son una buena opción para este sistema.

Este tipo de SuDS puede utilizarse en cualquier sector (e.g., residencial, industrial). A pesar de ser inicialmente costosos, los beneficios que brinda lo compensan durante su vida útil. Uno de estos beneficios es la disminución de la energía requerida para mantener

un clima agradable en el interior ya que la vegetación añadida intercepta y disipa la radiación solar al mismo tiempo que contribuye a mejorar la calidad del aire. Asimismo, estos sistemas minimizan la escorrentía de agua pluvial de los edificios ya que recolectan y retienen la precipitación (Oberndorfer *et al.*, 2007).

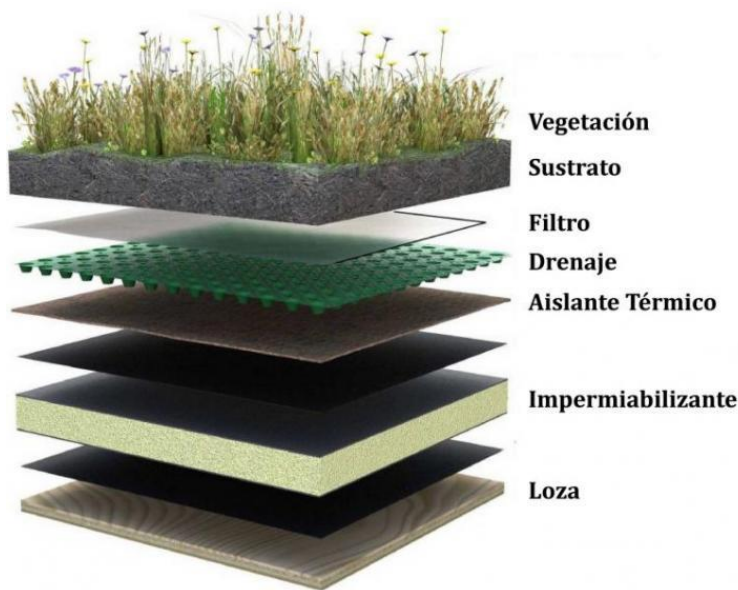


Figura 50. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).

El tipo de vegetación influye en la eficiencia del techo para retención de agua. Se debe considerar que las plantas soportan distintas temperaturas, humedad y viento. Es importante escoger especies adecuadas para un espacio determinado. La vegetación debe cumplir con características fundamentales como: habilidad para sobrevivir en sequía y/o una baja cantidad de nutrientes, tener buena cobertura de suelo, poco mantenimiento, reproducirse rápidamente, tener raíces cortas y poder fitorremediar. Dicha vegetación debe ser capaz de evitar erosión del suelo. Este tipo de plantas se encuentran en el género *Sedum*, además es importante considerar las plantas endémicas del sitio para no alterar el ecosistema (Vijayaraghavan, 2016). A continuación, se muestran algunos tipos de plantas aptas para techos verdes (Molano, 2016).

Tabla 4. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).

Region	Genus (species)	Family	Life form	Source(s)
North America, Central America, South America	<i>Portulaca (P. halimoides, P. grandiflora)</i>	Portulacaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	<i>Sedum (S. praealtum)</i>	Crassulaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	<i>Sempervivum (S. tectorum)</i>	Crassulaceae	Succulent	Dvorak and Volder 2010
	<i>Bouteloua</i>	Poaceae	Graminoid	Simmons et al. 2008
	<i>Hilaria</i>	Poaceae	Graminoid	Simmons et al. 2008
	<i>Dalea</i>	Fabaceae	Forb	Simmons et al. 2008

Por otro lado, la Figura 51 representa un sistema de pavimento permeable que, en conjunto con la gestión integral de las aguas superficiales, permiten que el agua de la lluvia se infiltre en el subsuelo. Además de generar una recarga artificial para el acuífero, se utiliza este método para controlar las inundaciones generadas por eventos de precipitación intensa. El concepto general de los SuDS resalta en los métodos de recarga artificial, ya que se atienden distintas problemáticas que enfrentan las cuencas urbanas con una solución integral que contribuye al mejoramiento ambiental.

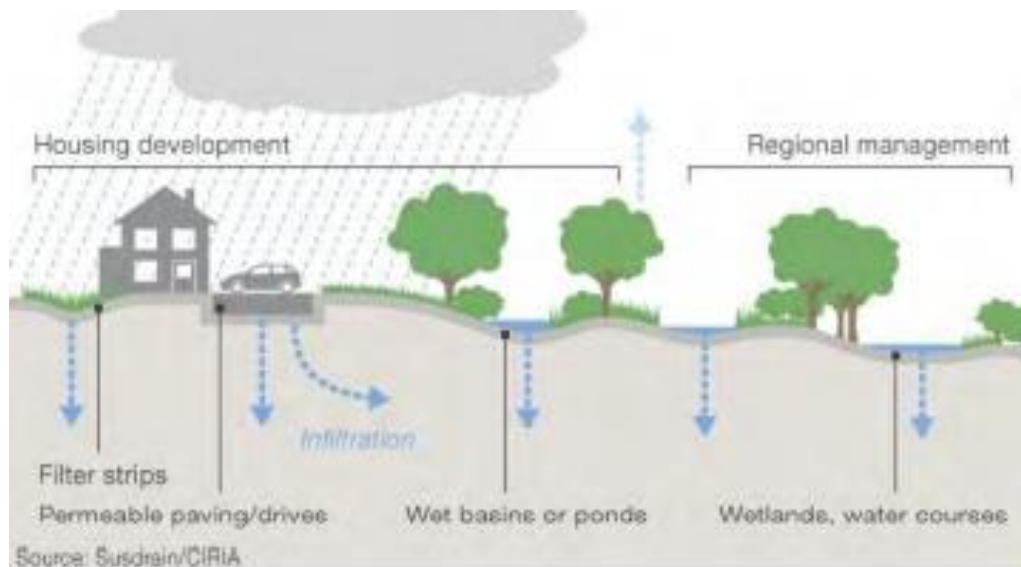


Figura 51. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)

Los sistemas de pavimento permeable (PPS por sus siglas en inglés) resultan ideales para una amplia variedad de zonas residenciales, comerciales e industriales, algunas de sus aplicaciones más comunes resultan en accesos vehiculares, estabilización de pendientes y control de la erosión, caminos en campos de golf, estacionamientos,

accesos pedestres, caminos y senderos, así como en campo de irrigación. En comparación a un sistema de drenaje tradicional, los PPS resultan más económico y rentables en cuanto a los beneficios que aporta puesto que permiten reducir las escorrentías superficiales, la recarga de agua al subsuelo ahorro del agua al permitir completar el ciclo del agua y reducción de la contaminación de la misma (Scholz & Grabowiecki, 2006).

En cuanto al mejoramiento de la calidad del agua gracias a los PPS destacan las siguientes variables: sedimentos y sólidos suspendidos, materia orgánica con altos niveles de DBO, nutrientes y contaminantes disueltos (incluyendo nitrógeno, fósforo, metales pesados, solventes, herbicidas y pesticidas), grasas y aceites, así como patógenos fecales. Un estudio citado en (Scholz & Grabowiecki, 2006), demostró que los PPS ayudan significativamente a reducir los niveles de contaminación de aceites e hidrocarburos en comparación a un pavimento impermeable en donde estos contaminantes son más persistentes. Lo anterior debido a que un PPS puede llegar a funcionar como un biorreactor en el lugar y las comunidades microbianas que se desarrollan de manera natural pueden llegar a funcionar como organismos degradadores de estas sustancias.

Otro estudio mencionado en (Scholz & Grabowiecki, 2006) demuestra la eficiencia de los PPS para reducir los niveles de sólidos suspendidos y plomo en un 64% y 79% respectivamente en comparación a un pavimento impermeable. También mencionan que el funcionamiento de los PPS como reductores de indicadores de contaminación del agua están asociados a las comunidades microbianas que se desarrollan en el sitio. Dichas comunidades se ven influenciadas debido al nivel de los nutrientes presentes en el agua como puede ser el fósforo y nitrógeno.

Otra alternativa de los SUDS son los barriles de lluvia los cuales consisten en recolectar el agua de escorrentía de los techos de las casas en barriles de alta capacidad para después vaciarlos una vez que termine la tormenta y permitir que el agua se infiltre al subsuelo mediante jardines de infiltración. Algunas desventajas de este método es que

requiere mucha participación por parte de los habitantes/encargados de la casa/edificio puesto que se debe de estar vaciando cada vez que se llena para que pueda seguir funcionando. Otra limitación de este sistema está relacionada con la capacidad del suelo en donde se realizan las descargas para infiltrar el agua. Además, es necesario que estos barriles este conectados a un sistema de drenaje para que en caso de que se llenen durante una precipitación prolongada estos puedan desembocar los excesos al drenaje y así evitar afectaciones al inmueble. La Figura 52 muestra cómo es el funcionamiento de los barriles de lluvia (Jennings *et al.*, 2013).

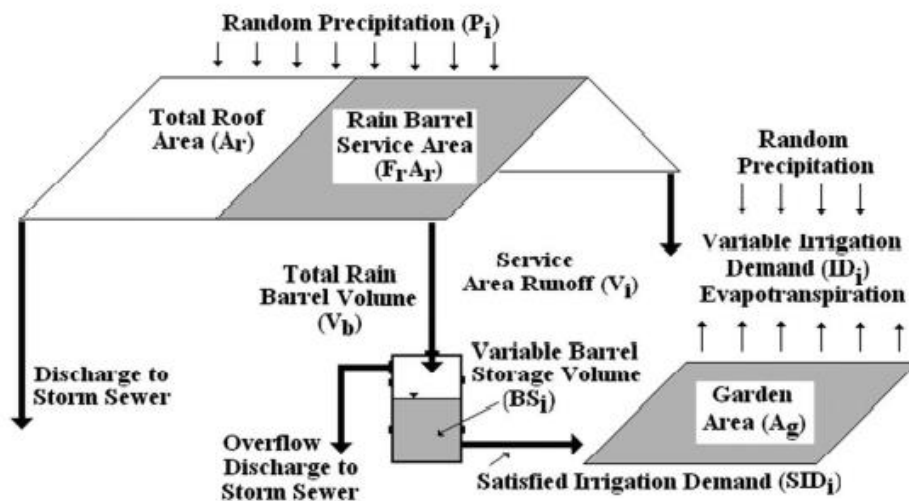


Fig. 1. Rain barrel for urban garden irrigation stormwater runoff management strategy

Figura 52. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings *et al.*, 2013).

La alternativa de desconexión de la escorrentía del techo consiste en desviar el flujo del agua de lluvia del drenaje y dirigirlo hacia áreas vegetadas en donde pueda ser infiltrada al subsuelo. Esto permite reducir el volumen de agua y los contaminantes de los cuerpos de agua. Este sistema puede ser aplicado en cualquier ámbito; comercial, industrial o residencial. Para esto, es indispensable considerar aspectos como la distancia que el agua debe recorrer y un área permeable destinada para recibir el agua, la topografía con pendientes ligeras y el tipo de suelo (las arenas permiten una mejor infiltración) (Maryland Department of the Environment, 2009).

La desconexión de la escorrentía puede ser complementada con otros SuDS, como lo son los jardines de lluvia. Estos consisten en depresiones poco profundas en las que son plantadas árboles y arbustos propios de la zona además de añadir cobertura vegetal al suelo. En realidad, no existe un consenso sobre las dimensiones o diseño propio de los jardines de lluvia o sobre el suelo que se debe de utilizar, lo más importante del diseño es maximizar la infiltración y tratamiento del agua y, al mismo tiempo, evitar los encharcamientos; por la posibilidad de la reproducción de mosquitos. El tiempo de residencia del agua en los jardines debe ser de máximo 3 a 4 horas de acuerdo con el manual para el diseño de jardines de lluvia de Prince George's County, 2002 (Clausen, 2005) |

Un experimento realizado en Haddam, CT en el 2002 (Dietz & Clausen, 2005) consistió en la construcción de dos jardines de lluvia (Figura 53). Los resultados permitieron demostrar la alta eficiencia de estos jardines antes las lluvias y su capacidad para disminuir la escorrentía superficial; solamente el 0.8% terminó en escorrentía superficial, mientras que el resto fue infiltrado. En cuanto a metales contaminantes como lo fueron cobre, plomo y zinc, no fue posible muestrearlos de manera adecuada puesto que en el 64% de los muestreos resultaron por debajo del límite de detección. Para el caso de coliformes fecales se encontró tanto a la entrada como a la salida que los niveles de coliformes fueron <10 UFC / 100 ml (menor a 10 unidades formadoras de colonias cada 100 ml) en los 6 eventos de muestreo. Aunque el potencial REDOX en el suelo era el adecuado para que ocurriera la desnitrificación, es posible que el tiempo de retención fuera muy poco y por eso no ocurriera, el nitrógeno fue el único nutriente que disminuyó sus niveles en la salida del agua a diferencia de como entró, aunque la masa de retención de nitrógeno total no fue la esperada. Para el caso del fósforo se encontraron reducciones significativas en sus niveles y el estudio lo atribuye a alteraciones en el suelo al momento de construir el jardín de lluvia.

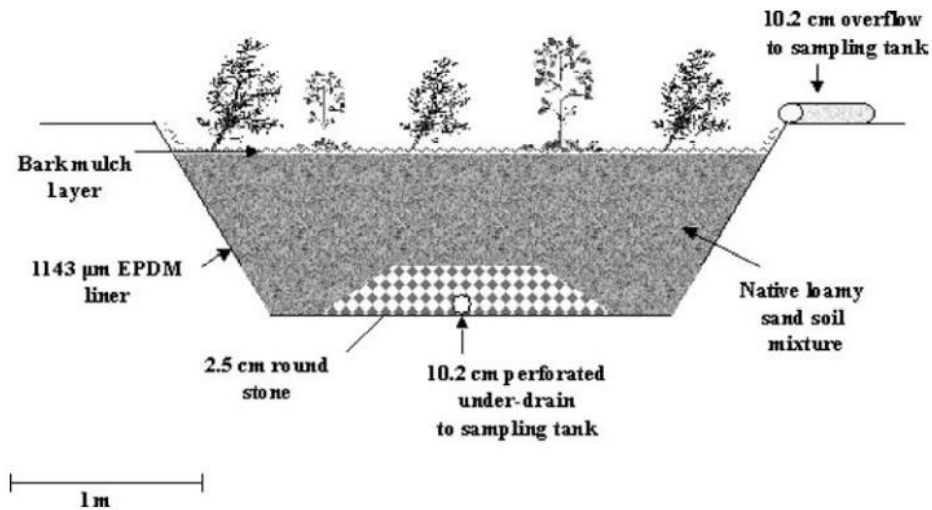


Figura 53. Sección transversal de jardín de lluvia.

La conclusión a la que llega el estudio es que los jardines que se construyeron resultaron ser muy buenos para la infiltración del agua de lluvia y así evitar inundaciones, pero en cuanto al mejoramiento de la calidad del agua los resultados no fueron buenos, por lo que la recomendación es que estos jardines estén conectados a un drenaje subterráneo para un posterior tratamiento secundario del agua.

La siguiente tabla presenta de manera resumida las características de cada uno de los tipos de SuDS descritos en cuanto a los distintos beneficios que brinda su aplicación (Susdrain, s.f.).

Tabla 5. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).

SuDS	Reducción caudal pico	Reducción volumen	Tratamiento de calidad de agua	Beneficio social	Beneficio ecológico
Área de biorretención	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Medio
Techo verde	Medio	Medio	Bueno	Bueno	Bueno

Zanja de infiltración	Medio	Bueno	Bueno	Bajo	Bajo
Pavimentos permeables.	Alto	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
Barriles de lluvia.	Medio	Medio	Bajo	Bueno	Bajo
Jardines de lluvia.	Alto	Excelente	Medio	Bueno	Bueno

Una característica distintiva de los SuDS es que proveen espacio para almacenar agua en contornos naturales. Los pozos de inyección profunda almacenan los volúmenes excedentes de escurrimientos superficiales y los infiltran al subsuelo para que el agua quede almacenada entre los estratos. La implementación de uno de estos sistemas resuelve la problemática en cuestión, estableciendo un plan para asegurar el manejo integral del agua, que ayuda a proteger a la población en los eventos de precipitación extremos y al mismo tiempo aprovechar la gran cantidad de lluvia que cae en la zona como recarga del acuífero, una de las fuentes principales de abastecimiento de agua de la población del AMG.

Varias de las alternativas de SuDS asociadas con la infiltración ya han sido aplicadas alrededor del mundo con éxito. La Figura 54 representa el mapa de experiencias de Gestión de la Recarga Artificial de Acuíferos publicado por el Centro Internacional de Evaluación de Recursos de Aguas Subterráneas (IGRAC, por sus siglas en inglés); en donde es posible observar que la mayoría de estos proyectos se centra en países más desarrollados. Este mapa indica distintos colores de acuerdo con el principal tipo de recarga artificial utilizado.



Figura 54. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).

Como se puede apreciar en el mapa ya existen distintas aplicaciones de SuDS en el mundo. Refiriéndose a la infiltración por extensión habla de la aplicación de zanjas de infiltración. La filtración inducida se entiende por todos esos sistemas que filtran el agua como son los pavimentos permeables, los techos verdes, áreas de biorretención, humedales artificiales, entre otros. Con respecto a la recarga de pozos, son sistemas de drenaje que sirven para recargar las aguas subterráneas, los pozos son ventajosos cuando hay un terreno escaso. Sin embargo, la calidad del agua no siempre es la mejor; son utilizados para recarga de acuíferos por medio de técnicas superficiales. Lo cual se relaciona con la modificación de cauces que consiste en estructuras que interceptan o detienen flujos de corrientes de agua superficial incrementando la recarga natural de los acuíferos (Ojeda, 2016). Por último, otra aplicación es la de recolección de agua y lluvia como la técnica previamente mencionada de los barriles de lluvia.

En síntesis, es importante reconocer que la clave para una adecuada implementación de los SuDS se basa en tres aspectos. El primero consiste en considerar desde el principio cómo manejar la escorrentía superficial y a partir de ahí comenzar el diseño. Asimismo, se debe visualizar la planificación urbana, arquitectura, drenaje y aspectos ambientales como un conjunto y no como elementos independientes. Finalmente, es fundamental incluir a todos los interesados en el proyecto; ya sea autoridades locales, expertos

ambientales, responsables del mantenimiento de lo SuDS, entre otros (Woods Ballard *et al.*, 2015).

2.6 Métodos de Recarga Artificial

La recarga artificial comprende una serie de técnicas que tienen como objetivo un mejor aprovechamiento de los acuíferos mediante el aumento y creación de reservas, interviniendo directamente en el ciclo natural del agua -citado en (Fernandez *et. al.*, 2005). La recarga artificial de acuíferos se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo, como pueden ser Holanda, USA, Australia, entre otros (Fernandez *et. al.*, 2005).

Expertos en hidrología y geotecnia están de acuerdo con las ventajas que suponen los métodos de recarga artificial. Sin embargo, muchos organismos reguladores del agua no ven estas técnicas como viables ya que anteriormente estas eran consideradas como emergentes y riesgosas; este es el primer obstáculo en la utilización de estos métodos. A pesar de esto, la evidencia empírica muestra lo contrario: la cantidad de experiencias en diferentes zonas del planeta demuestran que la aplicación de esquemas de recarga artificial dentro de la gestión hídrica ha ampliado el suministro de agua, la seguridad hídrica y el mejoramiento de la calidad del agua (Vanegas, 2017).

La tecnología muestra que esta técnica ya es aplicada y comprobada, según datos tomados por el Centro Internacional de Evaluación del Agua Subterránea en el que se muestran todas las experiencias de recarga artificial del mundo, estas se categorizan en 5 diferentes grupos de tecnologías:

- Infiltración por extensión
- Filtración inducida
- Recarga de pozos
- Modificación de cauces
- Recolección de agua de lluvia/escorrentía.

La gran mayoría de estos casos se encuentran distribuidos en Europa y Asia, con apenas 16 interacciones en México.

El almacenamiento subterráneo, sobre todo en zonas urbanas donde hay pocas alternativas, permite conservar el exceso de agua estacional hasta que la demanda de agua sea mayor. Los sistemas bien diseñados y operados pueden mejorar la calidad de las aguas subterráneas, esto supone que el agua recargada en un acuífero pueda ser utilizada para diferentes objetivos:

- Almacenar agua en los acuíferos para su uso futuro, especialmente en zonas de escasa disponibilidad de terreno en superficie o sin posibilidad de otras formas de almacenamiento.
- Suavizar las fluctuaciones en la oferta/ demanda del agua.
- Desarrollar estrategias de manejo integral del agua en una cuenca.
- Estabilizar o aumentar los niveles del agua subterránea en acuíferos sobreexplotados.
- Almacenar agua en el subsuelo cuando no hay espacio superficial disponible para la construcción de presas.
- Reducir las pérdidas por evaporación y escurrimiento.
- Reducir el escurrimiento superficial y la erosión del suelo.
- Mejorar la calidad del agua y suavizar sus fluctuaciones
- Mantener caudales ecológicos en ríos y arroyos
- Manejar la intrusión salina y la subsidencia del terreno
- Disponer/reusar el agua de desecho o de las tormentas.

Para lograr esto existen dos tipos de recargas artificial: los sistemas de recarga por superficie o en profundidad, que se explican con mayor detalle a continuación.

2.6.1 Recarga superficial

Los sistemas de recarga en superficie buscan extender la superficie de contacto agua terreno y así incrementar la infiltración. Principalmente se implementan en acuíferos libres que no presentan niveles de baja permeabilidad en las cercanías de la superficie del terreno, permitiendo así que el agua se infiltre y llegue al acuífero. Dentro de esta categoría se dividen en varios métodos, los más comunes son (Custodio, 1996):

- a) Zanjas o canales: este es el método más primitivo y consiste en hacer circular el agua por surcos, estos pueden seguir las curvas de nivel del terreno e irse ramificando o que la serie de surcos se encuentren lateralmente en la zanja principal. La infiltración ocurre en el fondo y en los lados, con importancia variable según su anchura. Su inconveniente es que necesita una gran área (Custodio, 1996).
- b) Balsas: consiste en excavar balsas en el terreno que almacena el agua para dejarla infiltrar, esta se produce principalmente en el fondo. La disposición de unas varias balsas en línea sirve para disminuir las interferencias hidráulicas que se producirían si estuviesen juntas, simultáneamente, facilita la extracción de agua por líneas de pozo, asegurando un tiempo mínimo de retención.
- c) Fosas: este método se considera cuando el acuífero tiene mucho espesor de materiales sueltos y permeables, al igual que su nivel freático es muy profundo. Algunas de las fosas que se pueden utilizar son de las excavaciones para la extracción de gravas, por decir un ejemplo. En este caso es importante considerar la relación entre la superficie lateral con la del fondo, su infiltración predomina por los flancos. Si se decide utilizarlas, se deben retirar escombros, basura, u otros residuos que puedan existir e impedir su funcionamiento.

Un método matemático para la estimación de la infiltración es el de Bourguet, quien encontró en un estudio, de forma empírica, una relación entre la velocidad aparente de infiltración y la permeabilidad de un suelo, como se muestra a continuación (Bourguet, 1971):

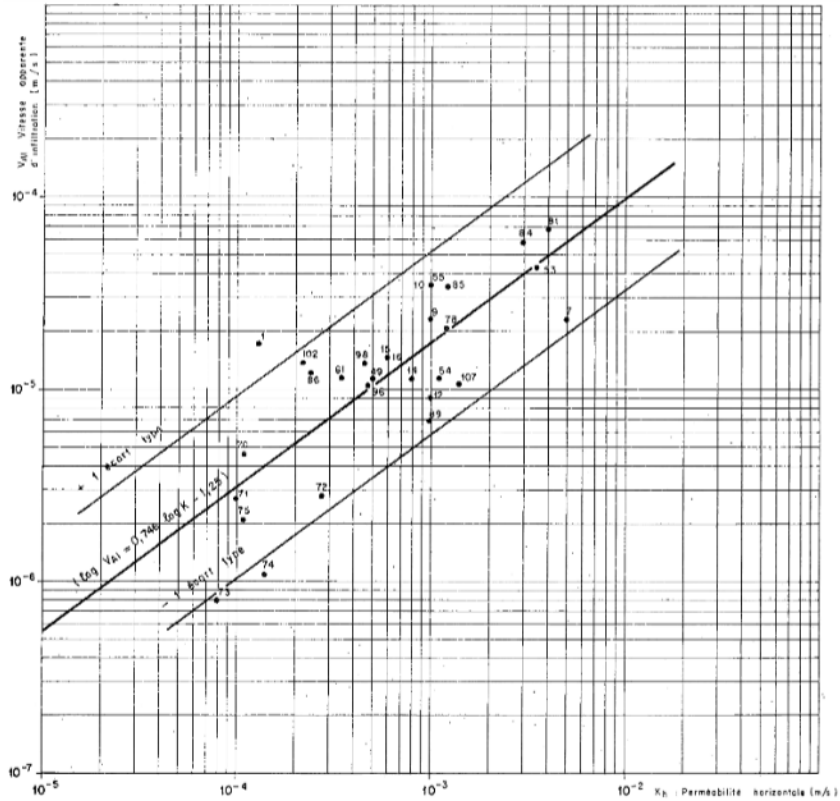


Figura 55. Método de infiltración de Bourguet, 1971

$$\text{Log } VAI_{(10^{-5} \text{ m/s})} = 0.746 \text{ Log } K_{(10^{-5} \text{ m/s})} - 1.25 \quad \pm 0.47$$

Donde:

K = Permeabilidad horizontal [10^{-5} m/s]

VAI = Velocidad aparente de infiltración [10^{-5} m/s]

Esta ecuación se obtuvo a partir de una regresión logarítmica, la cual obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho = 0.789$, lo que permite obtener una primera aproximación confiable a la infiltración cuando se conoce la permeabilidad horizontal de los suelos, o viceversa.

2.6.2 Recarga profunda

El segundo tipo de recarga artificial es la recarga en profundidad. Se basa en pozos verticales que introducen el agua al acuífero por medio de la fuerza hidrostática que

genera la columna de agua para lograr atravesar muchos estratos, con la ventaja de recargar todas las capas que se atraviesan. Este método presenta dos inconvenientes: el primero es que su coste de construcción y mantenimiento es alto, y el segundo es que se necesita de agua con una mejor calidad para reducir los problemas de colmatación, ya que la superficie filtrante es mucho menor, sin embargo, es la mejor alternativa de recarga para terrenos formados por niveles permeables e impermeables alternados, así mismo, son muy útiles en zonas donde el terreno disponible para las instalaciones superficiales es escaso o muy caro; como ocurre en zonas urbanas (Custodio, 1996).

Con este método se suelen recargar los estratos con menor extracción de agua subterránea pues, de este modo, se logra un mayor recorrido del agua en el acuífero. Por consiguiente, esto ayuda a que el agua pueda pasar con facilidad de un nivel a otro, evitando problemas de contaminación y logrando una mezcla más homogénea entre el agua inyectada y la que se encuentra en el acuífero (Custodio, 1996). Este método es factible para las zonas urbanas, debido a que se tiene la mayoría de su terreno construido y no se pueden usar áreas grandes como para aplicar el primer tipo de recarga. Dentro de esta categoría se incluyen los sondeos de inyección, el aprovechamiento de simas y dolinas, la implementación de drenes y galerías.

Los métodos de recarga sitúan el agua de tal forma que pueda percolar hacia la formación geológica, lo que supone varios beneficios dentro de los que se encuentran:

- El incremento en la disponibilidad de agua.
- Estabilización/aumento de los niveles piezométricos.
- Aumento del flujo de base (gasto ecológico) en ríos.
- Control de la intrusión salina.
- Reducción de la subsidencia del terreno.
- Fuente sostenible de agua subterránea.
- Sostenibilidad de áreas irrigadas.
- Estabilización de la erosión del suelo.
- Análisis positivo de la relación costo-beneficio.

- Mejoramiento del nivel de vida.
- Mitigación de inundaciones.
- Control de la contaminación.
- Ahorro de espacio superficial para el almacenamiento del agua.

Sin embargo, no todo son ventajas en los proyectos de recarga, también es importante tener en cuenta las desventajas como:

- La necesidad de limpieza en las áreas de infiltración.
- El manejo de obstrucciones en la superficie.
- Información básica inadecuada/conceptos erróneos de la geología e hidrología:
 - Diseño pobre y limitado del sistema
 - Mal diseño de las estructuras de infiltración, de los pozos e inestabilidad de las estructuras.
 - Pozos con malas condiciones de funcionamiento
 - Mala operatividad y rendimiento por debajo de los niveles esperados.
- Agua resultante en el acuífero de baja calidad.
- Pérdidas de agua por infiltración debido a fallas geológicas no conocidas o mal identificadas.
- Aceptabilidad política y social.
- No contar con personal capacitado para mantenimiento y/o ejecución.

Para implementar un proyecto de recarga se necesita información hidrogeológica como el tipo de acuífero, superficial o profundo, determinar la capacidad de infiltración del suelo (m/día) y la conductividad (i.e., permeabilidad) hidráulica de este (m/día), es decir, qué tan rápido absorbe y distribuye el agua el suelo, la porosidad y porosidad efectiva del suelo, la profundidad a nivel freático o la superficie piezométrica, es decir, qué tan profundo y qué tan fácil es llegar a este acuífero, la calidad de agua, tanto de la que llega como la que ya está en el acuífero, la disponibilidad de terreno, el espesor saturado y el volumen del agua disponible para la recarga en un determinado tiempo (Ojeda, 2016).

Se encontró una ecuación empírica para los pozos de absorción, que relaciona el caudal inyectado con la permeabilidad horizontal, el diámetro, la profundidad del pozo y la constante π (Bourguet, 1971):

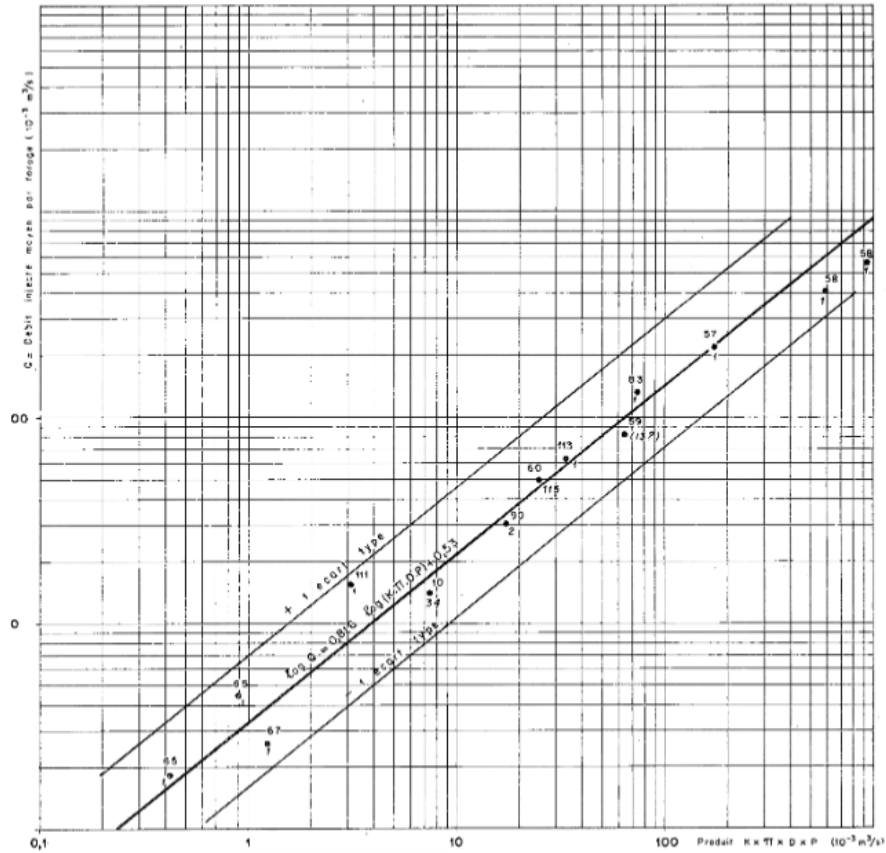


Figura 56. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971

$$\text{Log } Q = 0.816 \text{ Log } (K \cdot \pi \cdot D \cdot P) + 0.53 \quad \pm 0.32$$

Donde:

Q = Caudal inyectado por el pozo de infiltración [m³/s]

K = Permeabilidad horizontal del acuífero [m/s]

D = Diámetro del pozo [m]

P = Profundidad del pozo [m]

Esta ecuación se obtuvo a partir de una regresión logarítmica, la cual obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho = 0.976$, lo que brinda una primera aproximación bastante

confiable a la infiltración de un pozo cuando se conoce la permeabilidad horizontal del acuífero.

La recarga de acuíferos puede ser modelada para analizar el comportamiento de estos a lo largo del tiempo sin necesidad de hacer un gasto importante de construcción y monitoreo de un pozo. Existen diferentes programas que sirven para este tipo de simulaciones; uno de los Softwares más utilizados para estos trabajos es Modflow, desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, que utiliza el método de diferencias finitas para los cálculos matemáticos del modelo.

Modflow funciona con el método de diferencias finitas, el cual lleva desde los años 60 en desarrollo y tiene bastante documentación. La ecuación general que rige para las condiciones transitorias, heterogéneas y anisotrópicas está dada por:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

k_x, k_y y k_z : conductividades hidráulicas en la dirección x, y & z

W: término de fuente o sumidero

S: rendimiento específico o coeficiente de almacenamiento

2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano

El monitoreo es el proceso de recolección, verificación, evaluación y utilización de información en una determinada zona o sitio de interés particular, buscando definir el impacto causado en este, sea positivo o negativo. Su concepto metodológico supone un sistema integral de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de las diferentes características del ambiente para su evaluación y el pronóstico de los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y de los factores naturales (Perevochtchikova, 2009).

La información recabada en los sistemas de monitoreo sirve de insumo base para un trabajo de gobernanza que, idealmente, busca reducir la contaminación del agua, aprovechar el agua pluvial y apegarse al proceso natural del ciclo hidrológico en la medida de lo posible.

2.7.1 Gestión informada del agua

En la actualidad, el problema de escasez de agua de buena calidad lo comparte una gran cantidad de ciudades alrededor del planeta; particularmente aquellas que padecieron el crecimiento acelerado que se detonó en la década de 1960. Con el aumento de la población y el consumo, los gobiernos tuvieron que ampliar la provisión de agua potable y los sistemas de alcantarillado; siendo la última menos urgente que la primera, la construcción y mejora de los sistemas pluviales fue descuidada.

Este aumento en la demanda de agua y acumulación de poblaciones en centros urbanos ocurrió de la mano de desarrollo económico inestable y falta de experiencia para administrar el recurso del agua. Todo esto dio lugar al estado actual en que se encuentran las grandes urbes, donde es común la escasez de agua potable, así como las inundaciones estacionales derivadas de un sistema de alcantarillado insuficiente a causa de su desactualización y falta de mantenimiento (Biswas, 2006).

Considerando lo anterior, se concluye que la mayoría de los impedimentos para contar con prácticas de administración del agua sostenibles en ciudades son institucionales, más que técnicos (Porse, 2013). Esto abre una línea de acción como alternativa para solucionar el problema en cuestión, actualmente conocida como gobernanza.

Se entiende como gobernanza al sistema que trabaja de la mano de la administración del agua con el fin de brindar óptimamente el recurso hídrico a poblaciones. Grigg (2011, p.800) en su publicación *Water governance: from ideals to effective strategies* la define de la siguiente manera:

“La gobernanza del agua implica un amplio conjunto de funciones habilitadoras y reguladoras que apoyan y supervisan a las organizaciones que utilizan los recursos para gestionar el agua para las necesidades humanas y ambientales. La gobernanza requiere el establecimiento de políticas para crear mecanismos para empoderar y controlar las funciones y los resultados de los procesos de gestión del agua”.

Es de suma importancia comprender la diferencia entre administración del agua y gobernanza, ya que estos trabajan de forma complementaria, cada uno con sus propias tareas. A grandes rasgos, la administración se encarga de la planeación, implementación y operaciones, mientras que la gobernanza se enfoca en formulación de políticas, empoderamiento y control. Una descripción de los roles que juega cada uno de ellos se presenta a continuación (Grigg, 2011).

Tabla 6. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).

Sector	Roles de gestión	Roles de gobernanza
Suministro público e industrial	Provee el suministro de agua por medio de servicios públicos y otros sistemas.	Garantizar el acceso, regular la asignación y calidad, empoderar a los servicios públicos.
Aguas residuales y calidad ambiental del agua	Provee la remoción y tratamiento de aguas residuales y calidad ambiental del agua.	Garantizar el acceso, regular las descargas y la calidad del agua, empoderar a los proveedores.
Aguas pluviales e inundaciones	Proporcionado por organizaciones para el control de aguas pluviales e inundaciones de áreas y sitios urbanos.	Garantizar el acceso, regular las inundaciones y las fuentes difusas, garantizar la preparación.
Riego y drenaje agrícola	Proporcionar agua cruda y sistemas de drenaje en	Regular la asignación y el drenaje, empoderar a los

	zonas irrigadas y las alimentadas por la lluvia.	sistemas de riego, supervisar las organizaciones.
Control de flujo interno	Coordina los flujos para la energía hidroeléctrica, la navegación, la recreación, la pesca y la vida silvestre.	Establecer los flujos internos, controlar desvíos y descargas
Gestión de aguas subterráneas	Gestiona el desarrollo y el uso de las aguas subterráneas.	Regular la extracción y protección de aguas subterráneas
Gestión de áreas y usos múltiples	Proporciona coordinación y planificación de cuencas hidrográficas a través de agencias multipropósito.	Empoderar y coordinar la cuenca hidrográfica y otras acciones multipropósito.

Complementariamente, Porse (2013, p.31) en su publicación *Stormwater Governance and Future Cities* escribió sobre la gobernanza:

“Se distingue de las acciones gubernamentales para reconocer la flexibilidad, la descentralización y la inclusión de los participantes privados y comunitarios, que pueden haber establecido procesos extra-gubernamentales para la gestión de los recursos ambientales. La gobernanza del agua describe la gama de actores, instituciones y organizaciones que contribuyen a la gestión del agua en muchos niveles.”

De acuerdo con el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP, por sus siglas en inglés), el estado de confusión presente en la gobernanza de la mayoría de los países, por falta de instituciones que administren el agua o por la fragmentación de autoridades encargadas de la toma de decisiones, causan una gran cantidad de problemas que derivan como escasez de agua en las comunidades humanas (Grigg, 2011).

La implementación de políticas por parte de la gobernanza es de gran utilidad puesto que tiene como fin terminar con la escasez económica del agua, caso presente en la mayoría de las grandes ciudades. Esto quiere decir que no hay escasez física como tal, sino que cada vez resulta más caro obtener agua limpia, ya que se tiene que recurrir a pozos más profundos, o bombeos de fuentes más alejadas de las urbes.

Siendo el desarrollo de políticas una de las principales tareas de la gobernanza, es indispensable contar con información del comportamiento del recurso hídrico y la disponibilidad del agua. Para esto es necesario contar con estaciones de monitoreo que tengan la capacidad de brindar información certera y constante, y así poder implementar acciones para perjudicar en menor medida el ciclo hidrológico. Sin embargo, la disponibilidad de datos es uno de los más grandes retos por el alto costo del monitoreo. Algunos otros retos para la gobernanza de las aguas pluviales son la falta de financiamiento, desarrollo descontrolado, sistemas desactualizados, requisitos de calidad ambiental e hidrología incierta (Porse, 2013).

Debido a la importancia de reconocer las necesidades específicas para una correcta gobernanza, redes a nivel mundial como Watershare y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) se han dedicado a determinar los desafíos locales del agua a partir de la experiencia global. Para esto, han implementado herramientas como City Blueprint y el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua; las cuales son ejemplos de tendencias para establecer indicadores concretos que proporcionan información acerca del manejo del agua en cada región.

City Blueprint revela los puntos de mejora de una ciudad respecto a los recursos hídricos. Al ser una evaluación rápida, funciona como la base para la planificación de las estrategias a largo plazo para el uso sostenible del agua. Asimismo, con los resultados obtenidos, City Blueprint proporciona una plataforma en la que las ciudades comparten sus mejores prácticas y aprenden unas de otras. Actualmente incluye alrededor de 125 ciudades en más de 50 países (KWR, 2020).

Como se muestra en la Figura 57, esta metodología se basa en tres bloques asociados a tres preguntas muy concretas:

1. ¿Cuáles son los retos principales de la ciudad? (TPF).
2. ¿Qué tan adecuado es el manejo del agua en la ciudad? (CBF).
3. ¿En qué aspecto se puede mejorar la gobernanza? (GCF).

El primer bloque (i.e., TPF) se divide en 12 indicadores sociales, ambientales y económicos (e.g., tasa de urbanización, escasez del agua, inflación) evaluados del 0 al 4 respecto al nivel de preocupación. El segundo (i.e., CBF) incluye 25 indicadores divididos en 7 categorías (e.g., calidad del agua, residuos sólidos, infraestructura) evaluados del 0 (bajo desempeño) al 10 (alto desempeño). Como puntaje general, para estos dos bloques se calcula el Índice de Tendencias y Presiones (TPI, por sus siglas en inglés) y el Blue City Index® (BCI), respectivamente. Por su parte, el tercer bloque (i.e., GCF) se compone de 27 indicadores divididos en 9 condiciones de gobernanza (e.g., sensibilización, participación de las partes interesadas, capacidad de implementación) evaluados con una escala de puntuación tipo Likert desde muy alentadora (++) a muy limitante (-) (Feingold *et al.*, 2018).

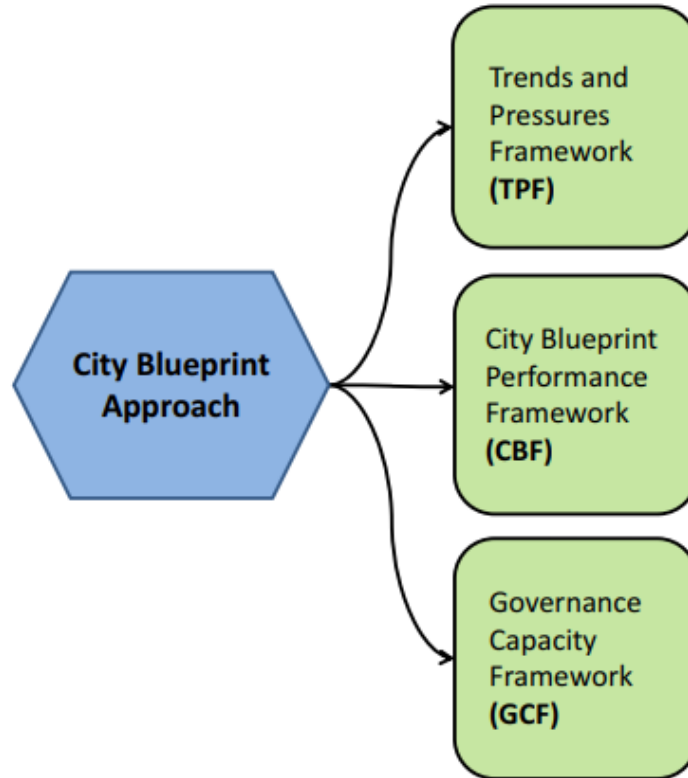


Figura 57. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).

Por su parte, el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE es una herramienta de autoevaluación. Incluye 36 indicadores agrupados en 12 principios (e.g., financiación, monitoreo y evaluación, coherencia de políticas) que se evalúan con el sistema de semáforo, una lista de verificación con más de 100 preguntas sobre la implementación de cada principio y un plan de acción a corto, medio y largo plazo. Esta metodología considera una evaluación en 10 pasos divididos en 3 fases: preparación, diagnóstico y acción.

El sistema de semáforo utiliza una escala de cinco puntos que van desde el caso en que la dimensión analizada es completa y pertinente (“existe y funciona”) hasta la ausencia de dicha dimensión (“no existe”); incluyendo la opción de “no es aplicable”. Asimismo, se identifica la tendencia prevista a tres años en cuanto a la situación actual (i. e., mejora, estable o reducción) y el nivel de consenso entre las partes interesadas (i. e., amplio, aceptable o débil). Como último paso, el plan de acción describe detalladamente

aspectos como el marco de políticas, instituciones e instrumentos involucrados, los recursos financieros y humanos necesarios, así como la responsabilidad tanto del sector público como del privado (OCDE, 2018).

Ambas herramientas evalúan de manera detallada cada aspecto relevante para la adecuada gestión del agua. A pesar de tener indicadores y preguntas establecidas, la evaluación se adapta al contexto y objetivos de cada ciudad, lo cual proporciona resultados específicos en cada proyecto. Actualmente City Blueprint se utiliza principalmente en países europeos, sin embargo, es una buena opción para que los países menos desarrollados generen ideas y las adapten a sus necesidades. Por su parte, el Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE ya ha sido utilizado tanto en países avanzados como en países en desarrollo (e. g., México). La disposición de todos los involucrados para proporcionar información y reconocer los puntos de mejora es clave para la participación en estas alternativas; requiriendo poco esfuerzo a cambio de una oportunidad para mejorar la gobernanza del agua de las ciudades.

2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional

Internacionalmente se encuentran en desarrollo varios proyectos que integran la gobernanza y monitoreo con el fin de lidiar con la problemática de escasez del agua. Un proyecto destacado es el que se denomina Sistemas de Aguas Pluviales Inteligentes. Kerkes *et al.* (2016) lo describen como un sistema que busca mejorar los sistemas de alcantarillado que dejaron de ser funcionales por el rápido crecimiento de las ciudades. Fueron diseñados a partir de observaciones del comportamiento del agua y se han ido modificando conforme se desarrolla la ciudad. El proyecto busca complementar el sistema de alcantarillado con sensores y controladores de bajo costo, de modo que éstos puedan responder en tiempo real a los cambios en el entorno, desde tormentas hasta cambio de uso de suelos, convirtiéndolos en sistemas adaptativos como se observa en la Figura 58.

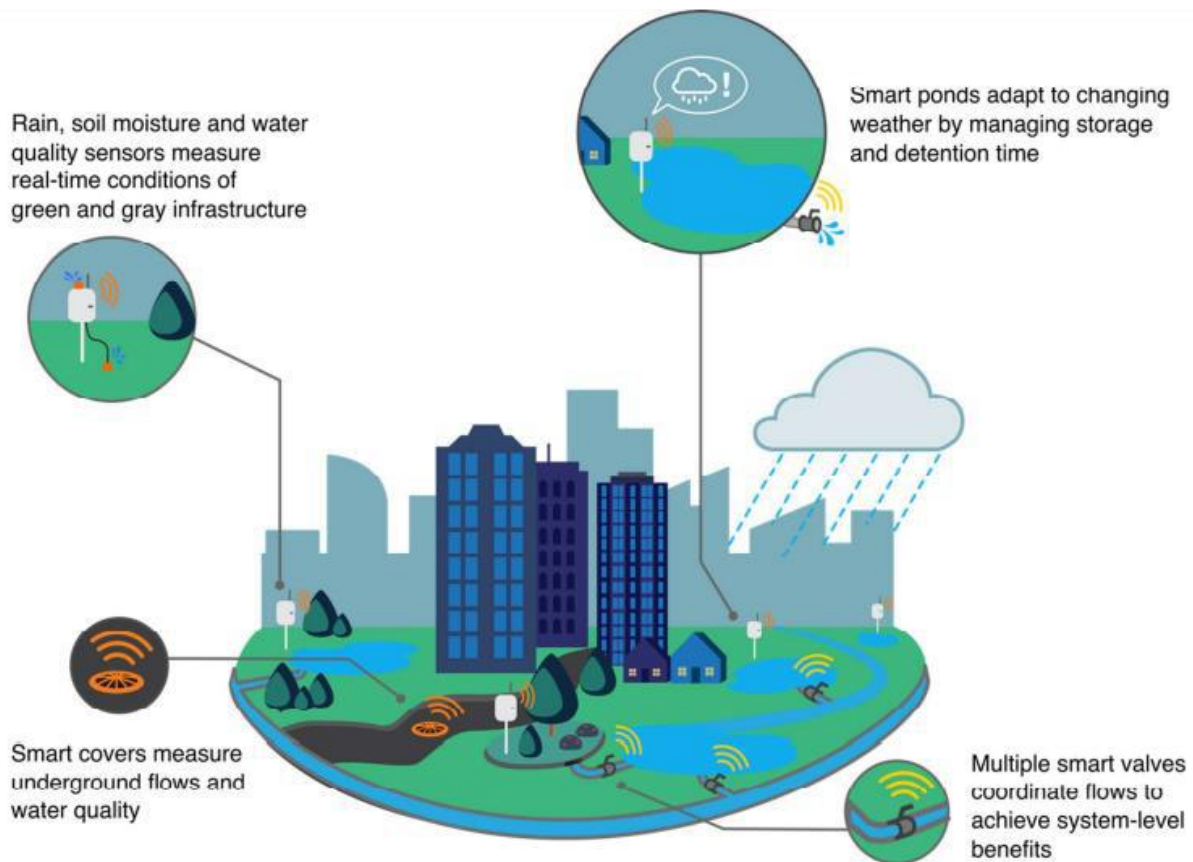


Figura 58. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).

Los proyectos como este se consideran como una posible herramienta para mejorar la calidad del agua en ciudades puesto que, además de proveer información en tiempo real a las poblaciones y administradores, tendrán la capacidad de controlar válvulas, compuertas y bombas para controlar flujos de agua en tuberías, e incluso en infraestructuras verdes, con base en los datos recabados por los sensores in situ, lo cual puede reducir los flujos erosivos, prevenir inundaciones y, por medio de detención y retención, aumentar la calidad del agua por remoción de SST, contaminantes biológicos como *E. Coli*, nitritos y metales.

Este tipo de proyectos que buscan llevar a cabo un control de la calidad de agua en tiempo real tienen una baja cantidad en cuanto a número de estudios, sin embargo, son prometedores debido a la reducción de costos en la tecnología que ya arroja datos precisos de flujo de agua, precipitación y humedad en el suelo, aunados al éxito en los

resultados obtenidos en un área prueba de 100 km² en South Bend, Indiana, el cual funciona con datos generados cada 5 min.

Los próximos desafíos del proyecto de Sistemas de Aguas Pluviales Inteligentes consisten en mejorar la tecnología para la medición de nutrientes, metales y bacterias ya que sigue en desarrollo, y, por otro lado, continuar estudiando la compleja dinámica espaciotemporal que gobierna el flujo del agua para poder hacer funcional la propuesta a mayor escala (Kerkez *et al.*, 2016).

Otro proyecto destacado es la iniciativa de ciudades esponja (SCI, por sus siglas en inglés). Este proyecto surge en respuesta al aumento de desastres por inundaciones pluviales, y la escasez y contaminación de agua derivada de la urbanización. Durante el periodo 2014-2020 China comenzó este proyecto, que es análogo a otros que se han realizado en otros países como EE.UU., U.K. y Australia.

Jiang *et al.* (2018) mencionan que la SCI consiste en sistemas de agua pluvial integrados con la restauración de ecosistemas estratégicos (i. e., jardines de biofiltración o humedales), para preservar su capacidad de absorber y almacenar agua. Asimismo, se opta por cambiar el pavimento convencional por materiales permeables como adoquines porosos. Esta iniciativa se basa en un desarrollo de bajo impacto, que aplica soluciones ingenieriles y naturales encaminadas a almacenar temporalmente el agua de lluvia y mantener el proceso hidrológico natural. Esto es equivalente a los SuDS mencionados en secciones anteriores.

Las ventajas de la SCI son congruentes con los objetivos del presente proyecto puesto que permite mitigar inundaciones, reducir la carga de contaminación en las escorrentías y recolectar agua de lluvia para almacenarla en cisternas subterráneas con el fin de garantizar la disponibilidad del recurso. Sin embargo, para que las ciudades esponja sean una propuesta eficiente, es necesario adoptar medidas técnicas, de gobernanza y financieras adecuadas para cada región (Jiang *et al.*, 2018).

2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro

Una tecnología existente para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente es el espectro-radiómetro de imágenes de media resolución (MODIS). Este instrumento se encuentra en satélites que capturan la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en distintas longitudes de onda (NASA, 2020). Fue diseñado y se está utilizando para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente, sin embargo, podría aplicarse también a contextos urbanos. Al monitorear un humedal pequeño con MODIS, se ha encontrado que el nivel de agua respecto al tiempo es un buen indicador para determinar la extensión de inundación (Li *et al.*, 2015).

De acuerdo con lo anterior, los sensores se han utilizado para monitorear desde el cumplimiento de reglamentos hasta el desempeño de instalaciones individuales de aguas pluviales. Se sigue buscando desarrollar tecnología capaz de brindar datos fiables y constantes de parámetros como presencia de nutrientes, metales pesados y bacterias, para asegurar una calidad óptima en el agua para su infiltración a los acuíferos y evitar problemáticas para la salud humana (Kerkez *et al.*, 2016). También es necesario trabajar con tecnología que permita el monitoreo localizado de la infraestructura distribuida para asegurar el desempeño de los sistemas.

Las ciudades son consideradas puntos clave para la obtención y análisis de información puesto que es posible combinar datos de plataformas privadas con redes públicas de sensores y así fortalecer el desarrollo de métricas para el monitoreo ambiental (Porse, 2013).

Como se mencionó anteriormente en esta sección de Marco Teórico, la infiltración del agua es parte fundamental del ciclo hidrológico. Este se ve alterado principalmente por la impermeabilización de suelos. Al impedir el flujo natural del agua de lluvia hacia los acuíferos se minimiza el aprovechamiento de este recurso, además de generar problemáticas como las inundaciones. Una opción para modificar esto son los SuDS, cuyo objetivo es maximizar los beneficios que es posible obtener de la adecuada gestión de las aguas superficiales. Sin embargo, para realmente solucionar el problema en

cuestión es imperativo reconocer la importancia de una adecuada gobernanza del agua, acompañada de un plan de monitoreo del flujo y calidad de los recursos hídricos de cada región; en este caso del AMG.

3. Marco Contextual

México, al igual que la mayoría de los países, ha padecido un proceso de urbanización que se desarrolló sin una adecuada planificación. De acuerdo con datos de la Comisión Estatal del Agua (CEA), el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) necesita 13.06 m³/s, sin embargo, sólo recibe 9.5 m³/s. Durante muchos años, se ha demandado casi el 40% más de lo que realmente se dispone en acuíferos y aguas superficiales. Cabe mencionar que la disminución de disponibilidad de agua potable en la ciudad es debido a la contaminación. La generación de más agua residual que se vierte a acuíferos naturales, lagos y ríos elimina la vida biológica y afecta todo el ecosistema incluyendo la vida humana (Palacios, 2017). Cada año durante la época de lluvias en el Área Metropolitana de Guadalajara se presentan inundaciones originadas por el temporal. Como consecuencia de éstas, ocurren daños a la infraestructura en toda la ciudad, por ejemplo: en el pavimento, calles, edificios, alcantarillado, comercios, vehículos, árboles, etc. (Félix, 2005). La poca gestión de agua pluvial, las fugas de agua y el escurrimiento del subsuelo son factores que propician al desaprovechamiento de este recurso.

Debido al crecimiento descontrolado de la zona urbana, se ha interrumpido el cauce natural del ciclo hidrológico y, por lo tanto, la recarga de acuíferos se ha visto también afectada (ver sección anterior). Con el fin de mitigar dichos efectos se han estudiado e implementado métodos de recarga naturales y artificiales, tales como los enlistados en el Marco Teórico del presente documento.

3.1 Experiencias de recarga artificial en México

En el país se reportan diversos proyectos de recarga artificial de acuíferos en los estados de Aguascalientes, Estado de México, Sonora, Baja California, Baja California Sur, Oaxaca, San Luis Potosí y en la frontera de Coahuila con Durango. Algunos de estos se encuentran en planeación y otros ya se han instalado. La siguiente tabla presenta casos de todo el país, con inclusión propia de casos conocidos en el AMG, con los métodos y objetivos de cada proyecto (Palma *et al.*, 2014).

Tabla 7. Proyectos de recarga artificial de acuíferos en México (Palma et al., 2014).

Proyecto	Método	Dispositivo	Fuente del agua	Objetivos
San José del Cabo	Superficial	Modificación de cauce	Presa	Incremento recarga y disponibilidad de agua.
Santo Domingo	Superficial	Presas de infiltración	Presa	Reducción ritmo de abatimiento niveles piezométricos, SAT.
Valle de Palmas	Superficial	Lagunas de infiltración	AR tratada	Incremento recarga y disponibilidad de agua.
San Luis Río Colorado	Superficial	Lagunas de infiltración	AR tratada	Reducción ritmo de abatimiento niveles piezométricos, SAT.
Caborca	Directo	Pozos de absorción	Agua pluvial	Incremento de almacenamiento.
Hermosillo	Superficial	Lagunas de infiltración	AR tratada	Reducción ritmo de abatimiento niveles piezométricos, SAT.
Ciudad Juárez	Directo	Pozos de inyección	Agua pluvial	Control de avenidas.
Región Lagunera	Superficial	Lagunas de infiltración	Presa	Reducción ritmo de abatimiento niveles piezométricos, SAT.
Aguascalientes	Directo	Pozos de inyección	AR tratada	Incremento recarga y disponibilidad de agua.
Valles centrales de Oaxaca	Directo y superficial	Pozos de inyección/ presas de infiltración	Agua pluvial, escurrimientos, AR tratada	Incremento recarga y disponibilidad de agua.

Valle de México	Directo	Pozos de absorción	Agua pluvial	Reducción ritmo de abatimiento niveles piezométricos, SAT.
San Jerónimo	Superficial	Presas de infiltración	Agua pluvial	Incremento recarga y disponibilidad de agua.
Durango	Superficial	Barreras y lagunas de infiltración	Presa	Incremento recarga y disponibilidad de agua.
Ixtapaluca	Directo	Recarga de pozos	Agua pluvial	Incremento recarga y disponibilidad de agua.

*AR: agua residual, SAT; tratamiento del agua en el subsuelo.

En conjunto, los proyectos presentados en la Tabla 8 permiten una recarga artificial de aproximadamente 100 m³/año, es decir, casi 3 mm³/s. La recarga artificial es un elemento clave dentro de la Gestión Integral del Agua como una estrategia para favorecer el manejo sustentable del recurso en situaciones de escasez y cambio climático. En el AMG existen algunas técnicas de recarga de acuífero como son zanjas de infiltración y pozos de absorción construido “*in situ*” y otros prefabricados para la captación de agua pluvial. Los cuales están equipados con tuberías de concreto armado perforado que permite el almacenamiento de agua pluvial y su distribución para la infiltración del subsuelo (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento, 2007). Sin embargo, cabe mencionar que no deja de ser una recarga superficial que ha generado problemas como socavaciones, principalmente cuando la recarga es sobre paleo de cauces rellenos. Lo cual tiene poca aceptación y dificulta la instrumentación de estrategias de recarga.

3.2 Antecedentes hidrológicos en la zona de intervención

La expansión del área urbana debido a la demanda de vivienda y parques industriales en el Área Metropolitana de Guadalajara y área conurbada, a través de los años, ha provocado cambios en el comportamiento y ciclo natural del agua. Demanda que se ha incrementado significativamente, desapareciendo las condiciones naturales originales que constituyeron los recursos aprovechables como el agua, el suelo, la flora y la fauna.

El impacto ha provocado que cauces de ríos y arroyos hayan resultado invadidos por construcciones alojadas al borde de sus márgenes, en la zona de inundación y, en algunos casos, dentro del mismo cauce. Actualmente, Guadalajara depende de tres fuentes de abastecimiento de agua potable: el Lago de Chapala, la presa Calderón y los pozos profundos ubicados en los acuíferos de Atemajac y Toluquilla (Suárez, 2012). El acuífero de Atemajac limita al norte con el acuífero Arenal y caqui, al sur con Ameca y Toluquilla y al oriente con Altos de Jalisco. Tiene una extensión superficial de 736.5km² aproximadamente. Abarca totalmente el municipio de Guadalajara y partes de Tonalá, Tlaquepaque y Zapopan. El clima de la zona es templado-subhúmedo con una temperatura promedio de 18°C. La precipitación anual entra en un rango de 910 a 1040 mm, con una media de 989 mm. La evaporación media se considera de 2130 mm/año que equivale a 216% de la precipitación media anual del acuífero. Por otro lado, el acuífero de Toluquilla colinda con el acuífero de Atemajac al norte, al sur con Cajititlán, al este con los Altos de Jalisco y al oeste con los acuíferos de San Isidro y Arenal. El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca “Lerma -Santiago- Pacífico”. Geopolíticamente, abarca los municipios de Zapopan, Tlaquepaque, Tlajomulco Zúñiga, Tonalá, Juanacatlán, El Salto y pequeñas partes de municipio de Ixtlahuacán. El clima que predomina es el templado semicálido- subhúmedo, tiene una temperatura promedio anual entre 19.4 a 21°C. La precipitación media varía entre 800-1000 mm con una media anual de 940 mm. Los meses de lluvia son de junio a septiembre. Cabe mencionar, que con base en la NOM-011-CNA-2000 se establecen métodos para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Estos acuíferos, según datos publicados en el Diario Oficial de la Federación se encuentran en calidad de sobrexplotados (CONAGUA, 2020).

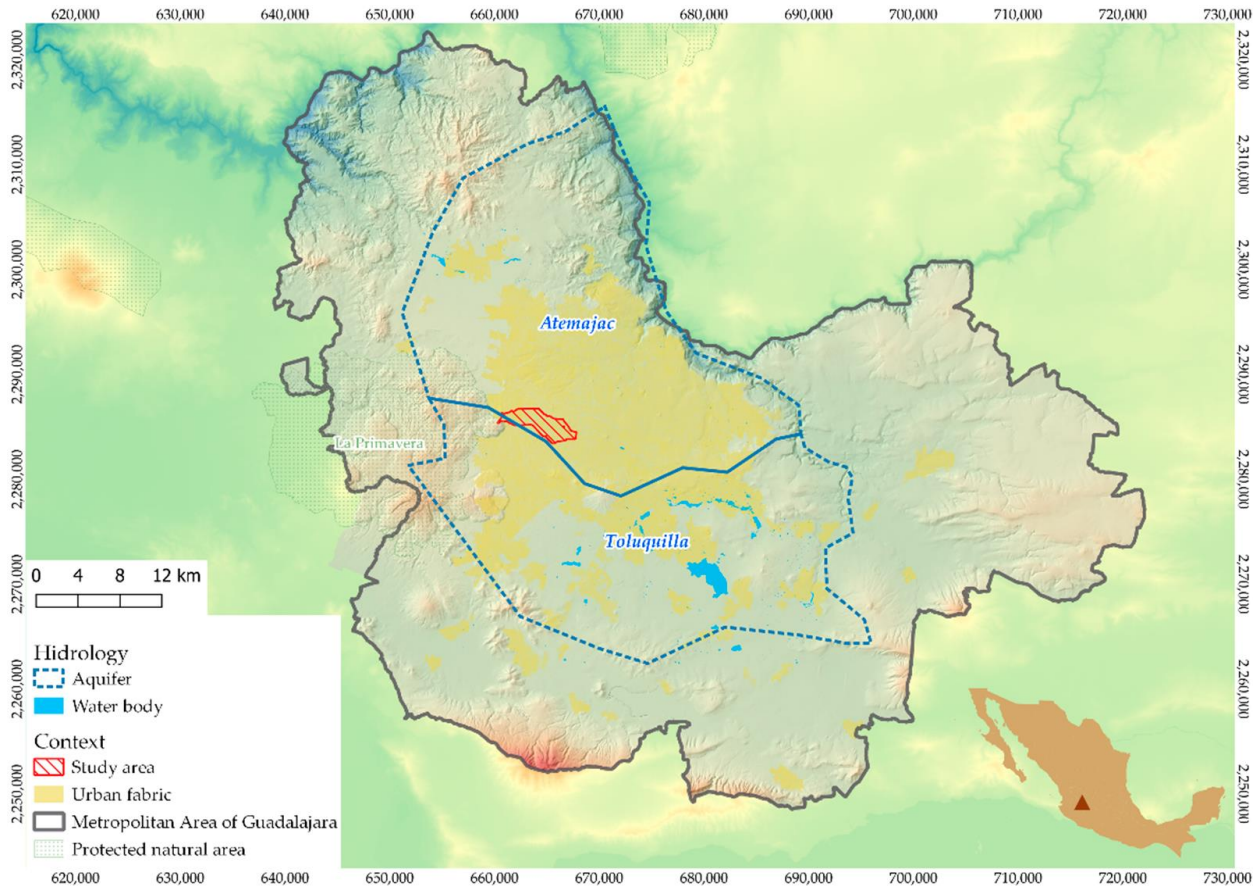


Figura 59. Ubicación geográfica del acuífero de Atemajac y Toluquilla (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022)

Conocer la historia del manejo de las lluvias y aguas sanitarias a lo largo de los años en el Área Metropolitana de Guadalajara es esencial debido a que la ciudad es una de las ciudades más grandes del país, contando con 5'179,874 habitantes (INEGI, 2020). El ritmo y la magnitud de la urbanización, a lo largo de la historia, plantea desafíos urbanos como lo es satisfacer las demandas de servicios básicos, siendo uno de los desafíos más delicados el manejo integral del recurso hídrico.

Contextualizando, Guadalajara se fundó en 1542 sobre el Valle de Atemajac, su única fuente de abastecimiento de agua era del arroyo Agua Blanca, actualmente cerca del parque del Agua Azul. Fue hasta 1673 cuando dicho arroyo se entubó. En 1730 se construyeron galerías filtrantes al poniente de la ciudad para explotación de agua subterránea, y así fue abastecido hasta 1759. A lo largo de los años, existieron distintos

desafíos que surgen a partir de una ruptura del ciclo hidrológico en el AMG, derivada del desarrollo industrial que comenzó desde principios del siglo XIX (Félix, 2005).

En 1800, la ciudad de Guadalajara contaba sólo con un tramo de colectores en la parte noreste, donde las inundaciones eran frecuentes. La cuenca hidrológica principal del valle de Atemajac corresponde al río San Juan de Dios, por lo que éste era el colector natural para la ciudad antes de su gran crecimiento. Esto hizo necesario subdividirla en el área de captación para la construcción de nuevos colectores. Para determinar las cuencas y ejecutar la red de colectores se tomaron en cuenta criterios técnicos como la intensidad de las lluvias y los escurrimientos de aguas sanitarias. A finales de 1800 se comienza a invertir en el aprovechamiento de agua potable en Colomos y se construye el acueducto de El Colli. Además, se instalan bombas con motor eléctrico en el parque Agua Azul para riego de calles y jardines (Félix, 2005).

A principios del siglo XX, se requiere la presencia de colectores de agua artificiales. Es por ello que el gobernador Luis del Carmen Curiel decidió embovedar el antiguo cauce natural del río San Juan de Dios cerca del año 1904, siendo éste el único colector artificial en la ciudad. Durante esta misma época Guadalajara se caracterizó por un gran dinamismo comercial que se reflejó en el ámbito urbano como un crecimiento de la ciudad. Durante este tiempo, se entregaron apoyos económicos del gobierno estatal para embellecer la ciudad y mejorar las vías de comunicación. Sin embargo, después de la década de 1940 fue perdiendo propósito esta modernización, dejando de lado el medio ambiente y los elementos innovadores que habían elevado la calidad de vida en la ciudad (Félix, 2005).

Cabe mencionar que antes de 1900 lo normal en las viviendas era tener un pozo ciego, ya que no había drenaje. Fue hasta 1942 que se realizaron nuevas obras de entubación y mampostería, correspondientes a nuevos tramos del río San Juan de Dios. El cual se consideró como el primer gran colector de la ciudad que abarcaba una superficie tributaria cercana a las 13,800 ha. Al ser responsable del transporte hídrico de una cuenca tan grande se comenzaba a poner en riesgo su saturación, provocando

inundaciones severas en zonas comerciales y residenciales. Para estos años, la ciudad contaba con alrededor de 230,000 habitantes. No obstante, fue hasta 1948 que se iniciaron las obras más serias tanto en agua potable como en alcantarillado, contando con la asesoría proveniente de la Ciudad de México. Se proyectaron los colectores necesarios a partir del aprovechamiento de las obras existentes, manteniéndose en todo momento dentro de la seguridad mecánica e hidráulica requerida (Félix, 2005).

El crecimiento de la población en los años 1960 en Guadalajara impulsó a los ciudadanos a la creación de nuevos desarrollos habitacionales fuera del centro de la ciudad. El centro del AMG se caracterizaba por ser el corazón de la actividad comercial. Al desplazarse a las nuevas colonias de clase media alta, se crearon zonas comerciales en los nuevos desarrollos para satisfacer las diferentes demandas de los ciudadanos. En 1974 se desarrolló un programa para la planeación y ejecución de la red de colectores, donde se tomaron en cuenta criterios técnicos, intensidad de lluvias y escurrimientos de aguas negras. Dicho programa describe la delimitación demográfica de las cuencas naturales en tres grupos. El primero es el área central de la cuenca del Río San Juan de Dios, se constituye de los colectores de San Juan de Dios y los subcolectores afluentes: Jesús García, Talpita Federacha, Álamo y Las Juntas. El segundo es el área Poniente que se forma de la sub-cuenca del arroyo de Atemajac y subcolectores afluentes como: López Mateos, Barranca ancha, Zapopan, El Batán y Arroyo Hondo. Por último, el tercero es el área del Oriente que consta de la cuenca del arroyo de San Andrés, la de Osorio y la de San Gaspar (González, 1974)

En el AMG el sistema de colectores de drenaje moderno fue diseñado y construido entre los años de 1970 y 1980. Estos sustituyeron cauces naturales y afluentes principales: el río Atemajac, el río San Juan de Dios y los arroyos San Andrés de los Caños y Osorio. En 1990 la ciudad ya contaba con 1'626,152 habitantes (Félix, 2005).

El tejido urbano sumergió a muchos lugares históricos que habían tenido gran valor en el crecimiento de Guadalajara, como ríos, llanuras, cerros y acueductos se perdieron en la urbanización junto a pueblos cercanos (Félix, 2005). En 1992 se apresuró el desarrollo

urbano y ocurrieron ocho explosiones por presencia de gasolina en el drenaje principal de Reforma, se transformó totalmente la vida de la ciudad, deteriorando la arquitectura y obligando reubicaciones de mucha gente. Este suceso indicó la mala gestión de los drenajes, desinterés del gobierno y la mala infraestructura creada por el aumento de población (Reguillo, 1998).

En 2013 se reportó que en el AMG existían 15 mil pozos de absorción, los cuales sirven para la captación de agua pluvial y recarga de los mantos acuíferos (Félix, 2005). Es importante la ubicación de estas estructuras hidráulicas, debido a que existen ocasiones en las que el agua queda retenida en las primeras capas del subsuelo. De tal manera que, los pozos de absorción sirven para la recarga de acuíferos, es decir realizan la captación e infiltración de aguas pluviales, las cuales son conducidas por el alcantarillado o drenaje pluvial. Estas estructuras hidráulicas pueden ser construidas en el sitio o prefabricadas. Las que son construidas en el sitio son circulares, tienen una profundidad entre 3-8 m, las paredes tienen huecos excepto en la parte superior y alrededor del pozo tienen un filtro de grava de 5 cm de espesor (SIAPA, 2014). Mientras que, la prefabricadas siguen las mismas características que los anteriores y son hechos de concreto armado o de polietileno de alta densidad, así como se muestra en la siguiente imagen.

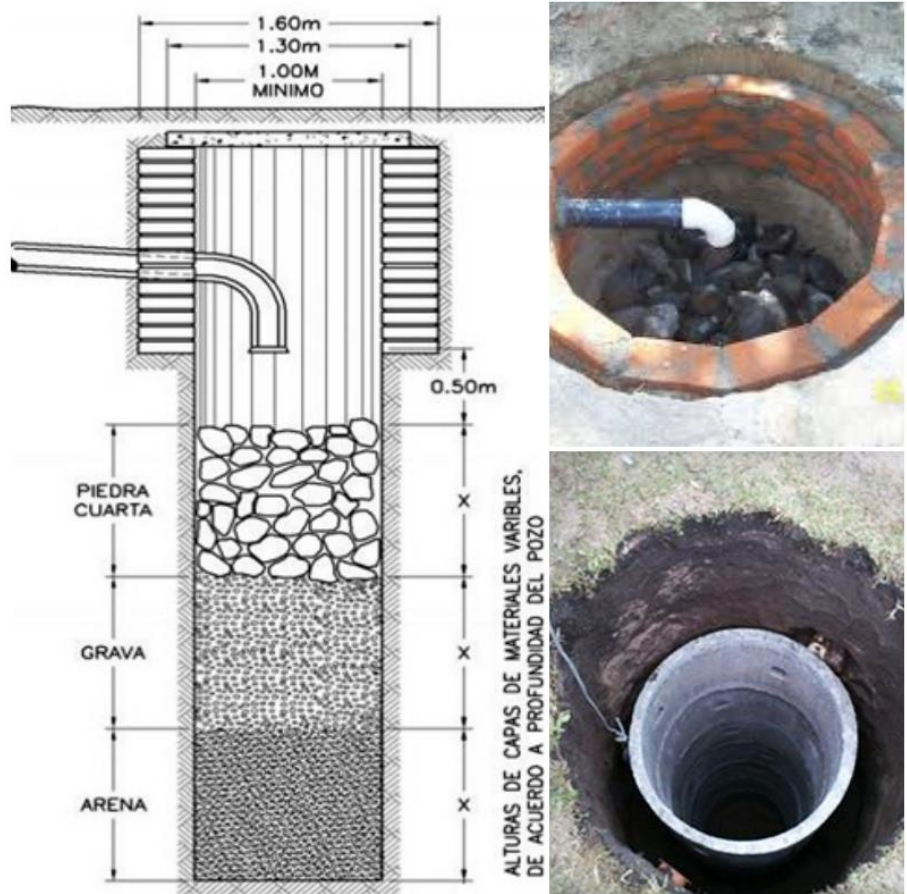


Figura 60. Características pozo de absorción (Taller botánico, 2020).

El crecimiento urbano de las nuevas zonas trajo consigo un gran aforo vehicular. Estos factores redujeron el terreno natural de la zona y se creó la problemática de las inundaciones en la época de lluvia, caos y daños a la infraestructura urbana (Tobias, 2013). La situación ocurre año con año, cada vez siendo más intenso el problema. Hasta la fecha, no se ha podido solucionar a pesar de los esfuerzos de las autoridades (Félix, 2005).

Debido al crecimiento poblacional en la zona urbana, cada vez se han tenido que extraer volúmenes más grandes de agua del subsuelo. Según cifras del Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) y la Comisión Estatal de Agua (CEA), el Lago de Chapala y la Presa Calderón en conjunto sólo aportan $9.5 \text{ m}^3/\text{s}$, de los $13.06 \text{ m}^3/\text{s}$ que

se estima se necesitan para satisfacer las necesidades la población del AMG; es decir, existe un déficit de aproximadamente un 27%. Los dos acuíferos de la ciudad intentan suministrar esta cantidad. Ambos se encuentran en condición de sobreexplotados, como se mencionó antes, con un déficit de 1.41 hm³ anuales y 71.88 hm³ anuales respectivamente.

Una vez mencionado lo anterior, se puede deducir que el cambio de uso de suelo, las migraciones campo-ciudad y la proliferación de asentamientos irregulares acompañan los sucesos de inundación constantemente. Ante esta problemática se han creado instituciones que aportan a la transformación de la ciudad, pero al compararlo con el crecimiento urbano acelerado resulta insuficiente. Con esto se generan más zonas de riesgo por construcciones en zonas frágiles, con pendientes pronunciadas haciendo cambios en los cauces y desestabilización de suelos (Tobias, 2013).

3.3 Descripción de la zona de estudio

El área de estudio es la microcuenca “El Chicalote”, que se encuentra ubicada al sureste del municipio de Zapopan. Tiene una forma tipo semicircular y ligeramente alargada, posee un relieve fuerte y cambios en las pendientes del terreno. En el 2020, la microcuenca tenía una longitud de 14.67 km y contaba con 20 cauces en el 2017 (Ayuntamiento de Zapopan, 2020).

El arroyo del Chicalote conduce escurrimientos pluviales provenientes del cerro del Colli. Posteriormente, se construyó un canal en avenida las Torres que capta agua del Chicalote y el Arroyo Seco; sin embargo, en determinadas tormentas el agua sigue su trayecto original por la calle Tepeyac (Ayuntamiento de Zapopan, 2020). Anteriormente, pasaba por la calle Popocatépetl, cruzaba Av. López Mateos y desembocaba en Colón y Lázaro Cárdenas. Sin embargo, actualmente se encuentra entubado (Félix, 2005).

De la misma manera, la microcuenca “Arroyo Seco” se localiza en el sureste del municipio de Zapopan; posee una forma ligeramente alargada. En el 2020 se reportó que la microcuenca tenía una longitud de 17.3 km, un área de 115.8 km², contaba con 253

cauces y una pendiente media de tipo llano. Este arroyo se entuba en varias partes de la ciudad y reaparece en el canal detrás del ITESO (Ayuntamiento de Zapopan, 2020).

La problemática que se pretende abarcar en el presente trabajo es el diseño de la ciudad ante épocas de lluvia. Debido a que la AMG no tiene la infraestructura necesaria, ni la capacidad de conducir toda el agua de lluvia. Anteriormente, la ciudad contaba con calles empedradas, las cuales ayudaban a que el agua de lluvia se infiltrará. Sin embargo, por el crecimiento exponencial de la población la ciudad se fue impermeabilizando, de manera que ocurren inundaciones cuando el caudal de escurrimiento supera la capacidad de los colectores. No se han tomado medidas de mitigación para resolver el problema (Félix, 2005).

En Guadalajara la precipitación media anual es de 942 mm (CEA, 2011), lo que implica que la ciudad cuenta con gran cantidad de agua que cae sobre ella en épocas de lluvia. Este recurso gratuito no está siendo aprovechado adecuadamente, como resultado de la mala administración que resultó del crecimiento descontrolado del AMG. Esto ha provocado repercusiones en el subsuelo ocasionando escasez de agua en los acuíferos. Si existiera un plan adecuado de aprovechamiento y gestión del agua pluvial, este recurso no sólo sería capaz de proveer la cantidad suficiente para abastecer a toda la población, sino que sobrepasaría en seis veces la demanda (Félix, 2005).

Esto se puede comprobar de la siguiente manera: multiplicando los 942 mm de la precipitación media anual por 2,734 km² que comprenden el área metropolitana de Guadalajara y después dividiéndolo entre los 31,536,000 segundos que tiene un año, resultando un caudal de 81.66 m³/s, gasto que representa 6.25 veces más de los 13.06 m³/s que se necesitan según la CEA. Con lo mencionado, se puede reflexionar sobre la gran paradoja que se presenta, ya que a pesar de las abundantes lluvias que hay en la zona, aún existe una gran escasez del recurso evidenciando su mal aprovechamiento y gestión.

A continuación, en la Figura 65, se muestra un mapa de los pozos reportados ante el SIAPA y la CEA dentro de la microcuenca de estudio:

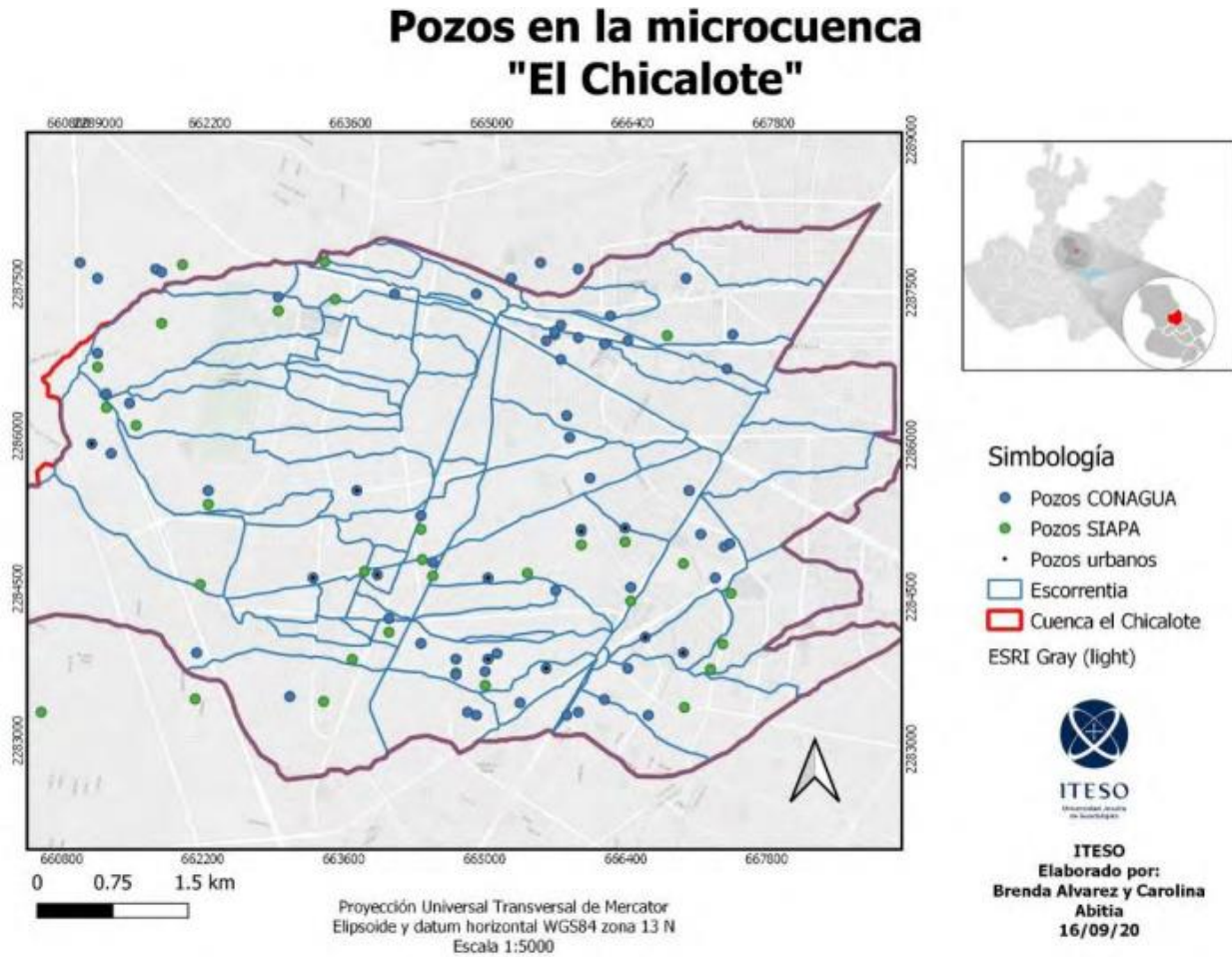


Figura 61. Mapa de pozos en la microcuenca de estudio

En las últimas décadas se han realizado esfuerzos para solucionar los problemas derivados del crecimiento descontrolado de la ciudad, pero las propuestas y proyectos no siempre se llevan a cabo. Un ejemplo fue el proyecto de una red piloto automática de monitoreo de acuíferos en las cuencas de Atemajac y Toluquilla; ubicadas en el estado de Jalisco. La red incluiría equipos de alta tecnología instalados en 8 pozos inactivos distribuidos en ambas cuencas (GEOEX & SIAPA, 2004).

Esta iniciativa permitiría al Sistema Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado registrar automáticamente niveles piezométricos, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea (GEOEX & SIAPA, 2004). Los objetivos específicos que se buscaban cumplir eran los siguientes:

- Monitorear de manera continua el impacto de las extracciones de agua subterránea, así como la incidencia de factores naturales o inducidos en la calidad de esta.
- Analizar los efectos a corto, mediano y largo plazo sobre los niveles piezométricos, por factores naturales o inducidos.
- Anticipar inundaciones y sequías.
- Evaluar los posibles conflictos entre usuarios de un mismo acuífero.

El equipo que se emplearía en el diseño de esta red consistía en un registrador automático (modelo “Levellogger LTC” marca “Solinst”); ideal para las siguientes aplicaciones (GEOEX & SIAPA, 2004):

- Monitoreo de acuíferos con altas fluctuaciones de niveles piezométricos
- Pruebas en aguas con residuos de cloro
- Monitoreo de plumas contaminantes
- Monitoreo de aguas salobres o con altas concentraciones de STD
- Descarga de aguas de tormenta o agrícolas

El proyecto consideraba ampliar la red y construir pozos específicamente para monitoreo. Sin embargo, dicho proyecto no se llevó a cabo (GEOEX & SIAPA, 2004). Las razones exactas de por qué no se concretó el proyecto son desconocidas, pero es posible que se deba a la falta de presupuesto, o la priorización de proyectos que requieran menor inversión.

3.4 Antecedentes geohidrológicos en la zona de intervención

El Bloque Jalisco es un fragmento semidesprendido de la placa tectónica de Norteamérica ubicada en el choque de las placas Rivera y la de Cocos, llamado “juntura triple de grieta continental”. El límite norte del Bloque Jalisco es casi paralelo a la barranca del río Grande de Santiago. Esto implica que la caldera de la primavera se encuentra dentro de dicho bloque, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en una zona de grietas y formaciones volcánicas alineadas, las cuales son responsables de su desprendimiento por la inestabilidad de la zona generada por la subducción de las placas. El vértice está representado por el Lago de Chapala, donde se formó una depresión que desciende 2 mm al año. Anteriormente se pensaba que el Bloque Jalisco pertenecía al eje Neovolcánico que cruza México, pero con el tiempo se determinó que esta zona era independiente conteniendo una geología muy particular (Weigand, 2012).



Figura 62. Contexto geotécnico del bloque Jalisco (Weigand, 2012)

En el caso del Bosque de la Primavera, se trata de un movimiento de placas en el Bloque Jalisco. El Bosque de la Primavera está ubicado al oeste de la ciudad de Guadalajara,

Jalisco. Este bosque es conocido como Complejo Volcánico La Primavera (CVLP). En su configuración original era una caldera más o menos circular con un diámetro de 11 km, y cubría una superficie aproximada de 96 km²; relativamente pequeña al compararla con Yellowstone o Long Valley (California). En la actualidad, el diámetro es un tanto menor debido a que las orillas exteriores de la caldera han sufrido bastante erosión. Las elevaciones más altas rondan entre los 2,000 y 2,270 msnm, o sea unos 500-600 m sobre el piso de los valles circundantes (Weigand, 2012).

La actividad volcánica sucedida en este lugar dio la forma y las características al suelo en el que el Área Metropolitana de Guadalajara se asentó, ya que el material expulsado en las explosiones fue depositado capa tras capa formando una serie de estratos principalmente de jal y tepetate que se conoce como toba tala. Estos materiales tienen porosidades altas que los vuelven muy buenos acuíferos, por lo que existe el interés de crear proyectos de infiltración en ellos, como se habla en este documento.

(Weigand, 2012) describió la formación del CVLP:

1. El primer evento fue hace unos 120,000 años;
2. El evento explosivo que produjo toda la toba Tala ocurrió hace unos 95,000 años;
3. Casi contemporánea (pero un poco después) con ese evento (2) fue la formación del primer domo posterior a la caldera dentro de la estructura en la porción sur-centro;
4. Justo después de que se formó ese domo, otro hizo erupción en el área norte-centro;
5. Antes del momento de la erupción de los domos centrales, un gran lago se había formado en la depresión dejada por el colapso del manto dentro de la cámara de magma superior;
6. Estos dos domos centrales hicieron erupción dentro de este lago, perturbando un poco la formación de sedimentación aluvial, aunque dejaron un gran horizonte de pómez como marcador estratigráfico;

7. Después de la formación de ese horizonte, varios domos anulares hicieron erupción, uno sobre el segmento noroeste de la zona de fractura original, mientras que el otro cruzaba el lago. Todos estos eventos posteriores a 120,000 años, desde la erupción explosiva que produjo a la toba de Tala (hace 95,000 años), la formación del lago y las dos erupciones del domo central, hasta los domos en forma de anillo, ocurrieron dentro de un periodo de 5-10,000 años. En ese periodo -tan breve en términos geológicos- se formó rápidamente la forma básica de la caldera como la vemos actualmente;
8. El lago, aunque alterado, siguió existiendo hasta hace unos 75,000 años, cuando nuevos domos en forma de anillo hicieron erupción a lo largo del margen sur de este;
9. Hubo un levantamiento a causa de la oleada de nuevo magma dentro de la cámara superior, y el lago entonces de apareció;
10. Siguieron más erupciones de lava hace unos 60,000 años;
11. Los últimos eventos de lava tuvieron lugar hace unos 20-30,000 años.

Estos eventos determinaron una sucesión estratigráfica conformada por rocas extrusivas, seguidas de una sucesión de depósitos de fragmentos piroclásticos. La estratigrafía realizada durante la perforación del pozo geotérmico PR-9 de 2986 m de profundidad, ubicado en la parte central del CVLP, muestra esta sucesión estratigráfica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) (GEOEX & SIAPA, 2004).

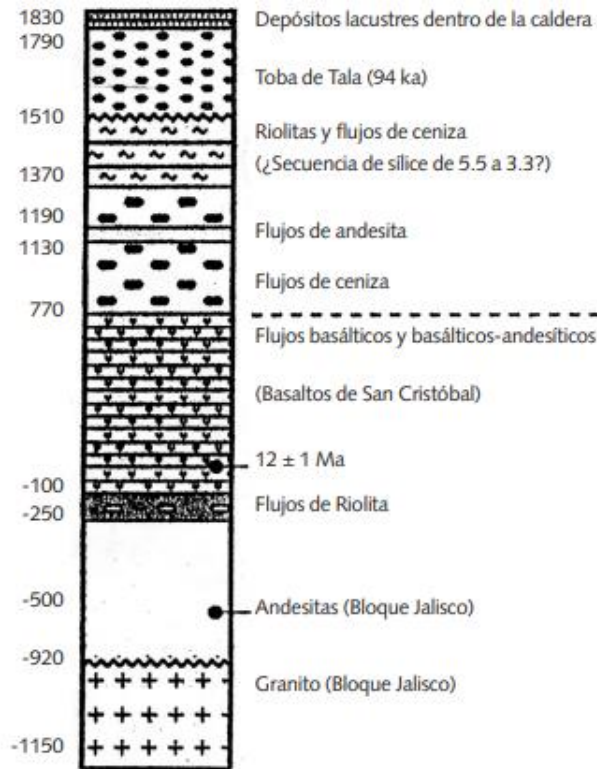


Figura 63. Perfil estratigráfico del pozo PR-9 (GEOEX & SIAPA, 2004)

Como se observa en la figura, las erupciones previamente descritas dejaron capas de suelos pumíticos, compuestos de fragmentos de vidrio y cenizas sinterizadas. Los suelos pumíticos más gruesos se conocen como Jal. Son ligeros, tienen baja densidad, tamaño de arenas y una textura rugosa. Por otro lado, se encuentra el Tepetate, también con baja densidad, sin embargo, estos se encuentran en el lado granulométrico opuesto (Zamudio, Vargas, & Ochoa, 2016)

La Toba Tala se crea por el colapso de la cámara magmática que se formó en la caldera y es la unidad estratigráfica más representativa de la región. Está compuesta por tobas de caída libre (tepetate), lapilli (jal) y flujos de ceniza con numerosos fragmentos de pumicita y algunos de vidrio volcánico, conocido como obsidiana. Asimismo, incluye bloques de basalto, andesita y riolita. Esta se divide en tres unidades; la primera está constituida por pómez blanca africana, la segunda por pómez color blanco y otro color gris, con 5 fenocristales y la tercera por una matriz color ocre. Durante las explosiones,

la Toba Tala se depositó tanto dentro, como alrededor de la estructura del CVLP; aproximadamente a 1200 km². Pocos años después se fue formando un conjunto de domos riolíticos y afíricos, los cuales se forman con la consolidación de finos depósitos de cenizas volcánicas durante enormes explosiones de material piroclástico (GEOEX & SIAPA, 2004).

El grosor de la capa de Toba Tala varía en gran medida por toda el área; este suele ser superior a 100 m dentro de un radio entre 3 a 5 km alrededor del CVLP y ronda entre los 20 y 50 m en el centro (GEOEX & SIAPA, 2004). Esta variación se presenta en el mapa de profundidad a la roca para el AMG que se construyó a partir de un modelo con base en el principio de correlación espacial a partir de los datos de profundidades obtenidos en estratigrafías de 78 pozos del SIAPA y 74 sondeos de exploración con penetración estándar. El principio previamente nombrado interrelaciona cada pozo o muestra que ejerce cierta influencia sobre la ubicación de los sondeos y disminuye en función de la distancia, dando como resultado una capa ráster de la cual se crearon isolíneas con los valores del espesor de la profundidad de la roca y se agruparon en los rangos mostrados en la Figura 64 (Zamudio-Zavala *et al.*, 2019).

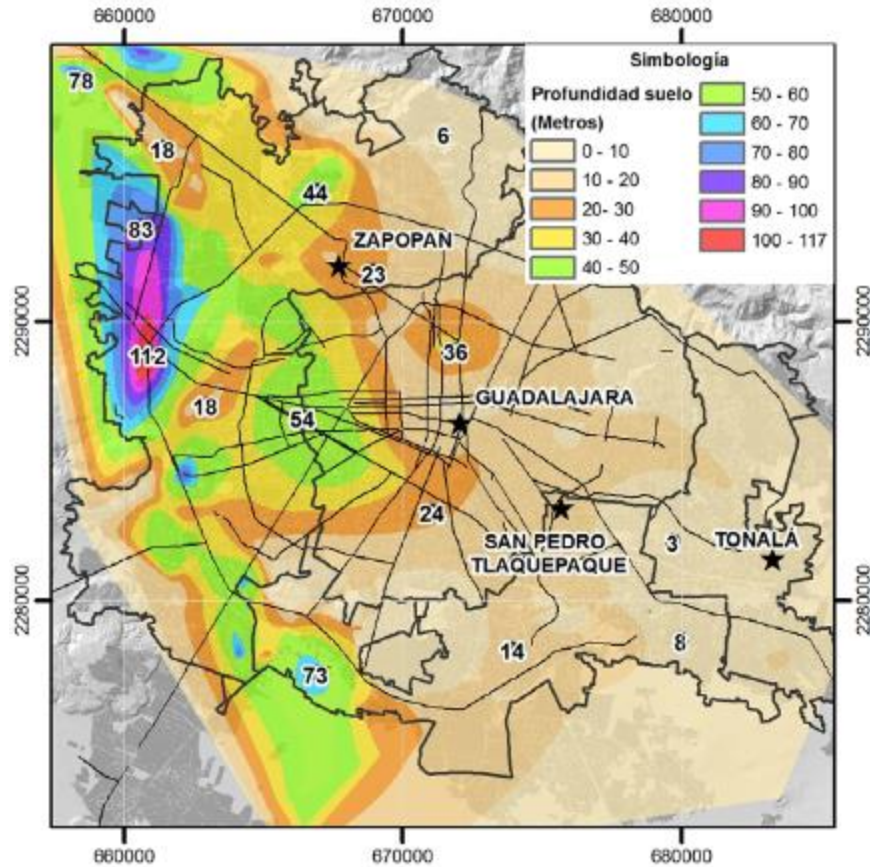


Figura 64. Profundidad a la roca en el Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio Zavala et al., 2019).

La figura anterior es un primer acercamiento que muestra una profundidad notablemente mayor en una franja a la izquierda de la ciudad, en sus límites con el CVLP (Zamudio-Zavala *et al.*, 2019). Se tienen indicios de que esa franja se debe a una falla geológica, por lo que este modelo pudiera seguirse trabajando y afinando para conseguir una representación más exacta de la realidad.

Los sedimentos más importantes de la zona son depósitos aluviales y fluvio-aluviales, estos son depósitos de grava y arena gruesa que se acumulan en abanicos sobre los cauces de drenaje a lo largo de la base de la estructura de La Primavera. Alcanzan espesores de varios metros y tienen granulometría variable, interestratificaciones lenticulares semipermeables de flujos de ceniza volcánica o limo arcillosos donde aparecen acuíferos colgados y cuerpos de agua que sirven de recarga al acuífero profundo (Zamudio-Zavala *et al.*, 2019).

La capacidad de los sistemas de recarga para infiltrar depende de la conductividad hidráulica del subsuelo y la capacidad de que el agua pueda ser almacenada entre sus poros (Tarbuck & Lutgens, 2005). En el AMG esto no supone un problema si consideramos su geología. De acuerdo con estudios realizados en el sistema hidrogeológico Atemajac-Toluquilla por GEOEX & SIAPA (2004) después de la interpretación de información geológica y geofísica se determinaron dos tipos de acuíferos principalmente:

- Acuífero libre superior que aloja materiales granulares porosos de la Toba Tala, materiales que presentan condiciones efectivas de porosidad y permeabilidad las cuales permiten una rápida tasa de infiltración de agua de lluvia y elevado rendimiento en los gastos de extracción
- Acuífero semiconfinado que aloja medios fracturados de rocas volcánicas que presentan una porosidad y permeabilidad muy baja asociada a las zonas de fracturamiento y/o alteración, los cuales aportan gastos inferiores a los 15 L/s, acentuados con la profundidad por el decremento progresivo de la porosidad secundaria

Estos hallazgos fueron gracias al estudio de trece secciones geológico–estructurales transversales, de las cuales lograron determinar la distribución lateral y vertical de las diferentes unidades estratigráficas.

Por otro lado, en estudios realizados por Zamudio *et al.* (2016), se determinó que los coeficientes de permeabilidad de las arenas pumíticas de Guadalajara, que coinciden con la Toba Tala, rondan entre los 0.0000366 m/s y los 0.002730 m/s, así se obtiene una diferencia entre uno y otro de más de 50 veces. Esto explica la variabilidad de estratos que hay en sus diferentes capas. Los valores de permeabilidad están en función de la densidad y el diámetro de las partículas, conforme a la siguiente ecuación:

$$k= 0.00000306659*\rho + 0.0281566*D10 - 0.0000905248*F \quad (1)$$

Donde:

k = permeabilidad

ρ = densidad seca

D = diámetro de las partículas

F = porcentaje de suelo que pasa la malla 200

Realizando un resumen de los resultados obtenidos en los estudios realizados por Zamudio *et al.* (2016), se obtuvo la permeabilidad promedio de cada uno de los materiales pumíticos estudiados en la siguiente tabla:

Tabla 8. Valores típicos de permeabilidad para los materiales pumíticos (Toba Tala) del Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio et al., 2016)

Suelo	Jal 100% (SM)g F = 17%	Jal66%-Tepe33% SM F = 24%	Tepe66%-Jal33% SM F = 35%	Tepetate 100% SM F = 40%
Permeabilidad	0.0023025	0.0014606	0.0008087	0.0000745

Existen formas de calcular y también de medir la permeabilidad de los suelos. Cuando se tienen recursos limitados y no se pueden hacer mediciones se puede utilizar el concepto de permeabilidad equivalente, que es una especie de promedio ponderado de las permeabilidades de diferentes estratos conocidos. La permeabilidad equivalente se puede calcular tanto en lo vertical como en lo horizontal con las siguientes fórmulas (GEOEX & SIAPA, 2004):

$$k_v = \frac{L_1 + L_2 + L_1}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_1}{k_1}}$$

$$k_h = \frac{1}{L_1 + L_2 + L_1} [k_1 L_1 + k_2 L_2 + k_1 L_1]$$

Donde:

k_v : porosidad vertical

k_v : porosidad horizontal

L: Longitud o ancho del estrato

Aunque estas formas de calcular las permeabilidades dan resultados aproximados, la mejor forma siempre es medir las propiedades del suelo. Esto se puede hacer por medio de estudios con trazadores en una red de pozos de monitoreo en el área a analizar. Esto da los resultados más exactos, pues se está midiendo directamente la permeabilidad del suelo en el que se está trabajando (GEOEX & SIAPA, 2004).

Haciendo una comparación de las permeabilidades de cada material destaca la gran diferencia que existe entre la del jal y el tepetate, siendo la primera aproximadamente 50 veces mayor que la del material con mayor porcentaje de finos (GEOEX & SIAPA, 2004).

Desde el punto de vista hidrogeológico, la ciudad cuenta con suelos de alta y muy alta permeabilidad (lapillis, 0.0015 - 0.0043 m/s), alternados con suelos de permeabilidad baja que funcionan como acuitardos (tobas, 0.0008 m/s) (Zamudio *et al.*, 2016). Esto propicia una alternancia de acuíferos semicautivos que fluyen horizontalmente hacia el este, dentro de un macrosistema que puede considerarse como un acuífero libre; confinado en su base por roca con baja conductividad hidráulica y compuesto por materiales con alta porosidad (40 a 80 %) y conductividad hidráulica que varía considerablemente entre sus estratos (10^{-2} a 10^{-4}) (GEOEX & SIAPA, 2004).

La Figura 65 muestra este marco hidrogeológico:

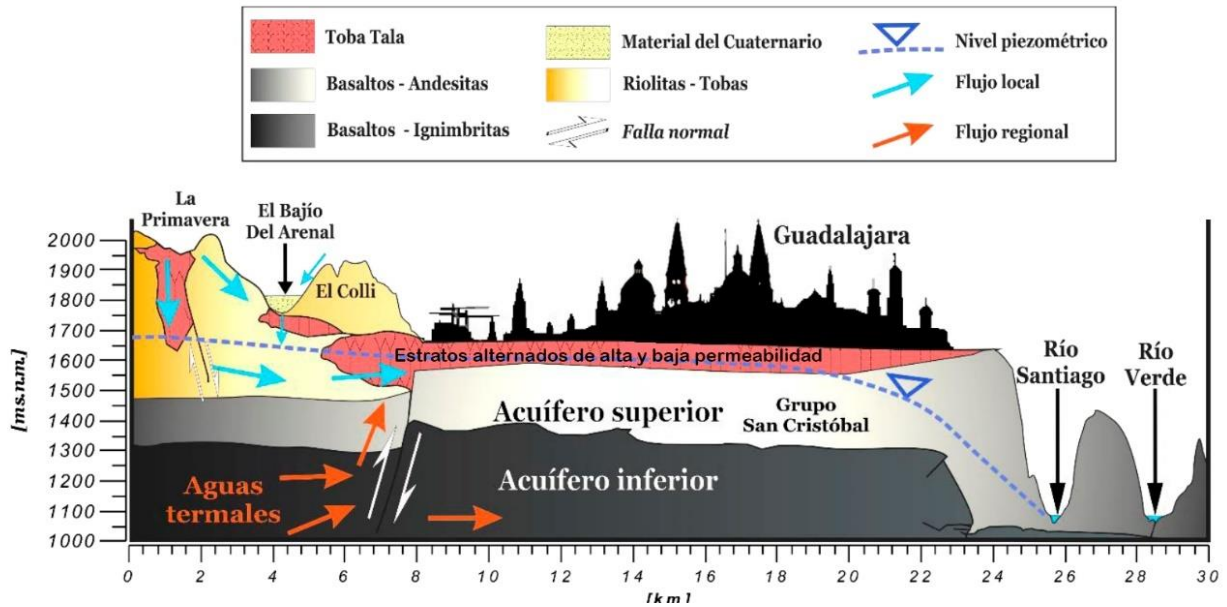


Figura 65. Sección esquemática hidrogeológica del acuífero (adaptación de Rizo, 2017).

La Figura 61, presentada a continuación, es una comparación gráfica del estado natural de un acuífero, el abatimiento ocasionado por los pozos de extracción y al final lo que podría lograrse con pozos de infiltración profunda. Como se aprecia en la imagen, la recarga en profundidad permitiría recargar los estratos de alta y baja permeabilidad, con el fin de almacenar agua de lluvia en el subsuelo y utilizarla durante el período de estiaje, al tiempo que mitigaría las inundaciones. Las condiciones son propicias y el desarrollo de estos proyectos de infiltración en el AMG es viable desde un punto de vista técnico, generar un sistema de recarga artificial mediante pozos profundos para que se pueda seguir abasteciendo a los habitantes de la población y a la vez mitigar las inundaciones.

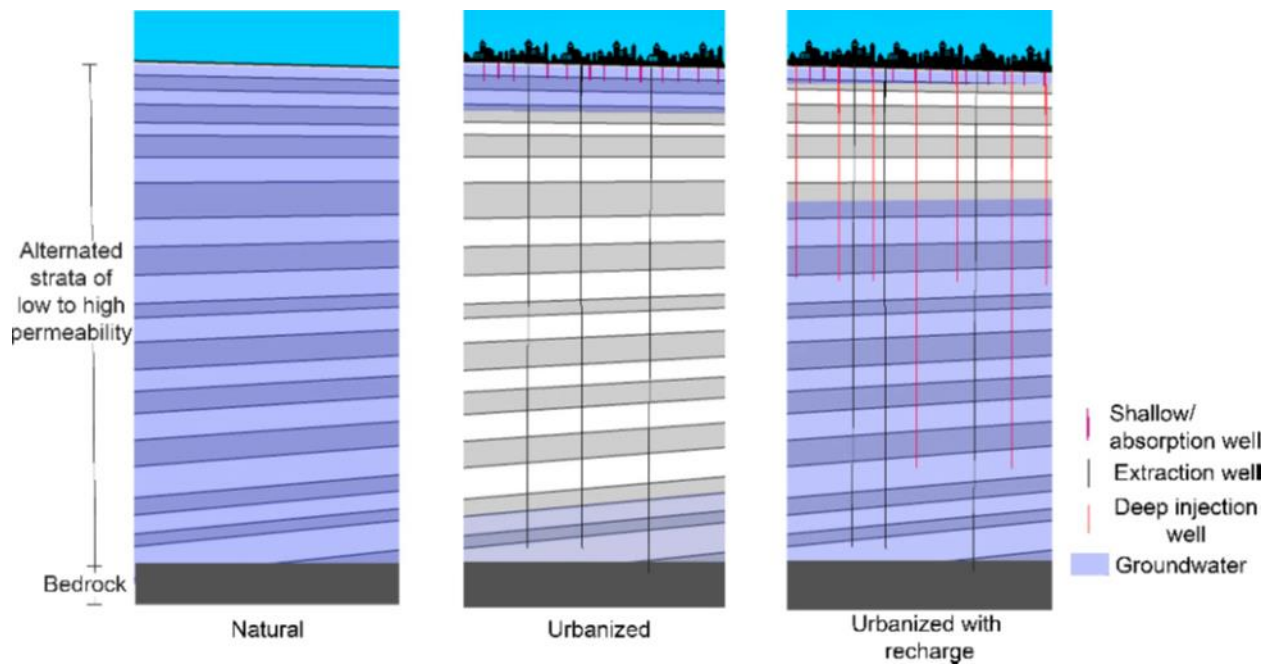


Figura 66. Comparación de los estados de un acuífero (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022)

En la imagen también se puede observar la representación de los estratos del AMG, los cuales fueron tomados en cuenta en el modelo de infiltración de (Vanegas, 2017) para el cálculo del agua que podría infiltrarse con un pozo de 45 metros de profundidad.

3.5 Marco institucional para el monitoreo y la gestión integral del agua en México y el AMG

En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la dependencia gubernamental encargada de la gestión del agua, su gobernanza y el monitoreo ambiental en general. Este organismo forma parte de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y está compuesto por instituciones especializadas; las cuales se encargan de recabar datos para el monitoreo ambiental.

El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), por ejemplo, busca recabar y hacer de conocimiento público, datos estadísticos y geográficos del sector hídrico, a lo largo de la república (SINA, 2019). Por su parte, el Sistema de Información Hidrológica (SIH) proporciona datos recientes e históricos de estaciones climatológicas e hidrométricas de la red de CONAGUA y diversas dependencias gubernamentales. Este incluye reportes de precipitaciones acumuladas a nivel nacional actualizados diariamente, así como otras

variables hidrológicas (CONAGUA, 2019). Finalmente, el Sistema Geológico Mexicano (SGM) es un organismo descentralizado, que presenta información geológica de la nación. Por ejemplo, exhibe datos de la ubicación de acuíferos, su profundidad y dirección de flujo; así como la cantidad de agua disponible en ellos y el efecto de sus potenciales fuentes de contaminación (SGM, 2020).

Enfatizando un tanto en el área de estudio, la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA) es el organismo que coordina, planifica y regula la explotación, el uso, el aprovechamiento, la preservación, la calidad y el reúso de los recursos hídricos de jurisdicción estatal; así como su distribución (Comisión Estatal del Agua, 2012). Claro, se mantiene una relación con la CONAGUA, partiendo de la escala local hasta la integración de los programas escala nacional. Por su parte, el Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) es la instancia encargada de proveer los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en cantidad y calidad suficiente a los habitantes del AMG (SIAPA, 2021).

La publicación de la información generada es un beneficio que se obtiene a partir del monitoreo ambiental. Poner al alcance de todos los datos del manejo, administración, calidad y comportamiento del agua fomentan la educación. Cuando la sociedad tiene acceso a la información, en la cual se basan los gobernantes para la toma de decisiones, tiene la posibilidad de reclamar sus derechos, pudiendo expresar su disgusto respecto a la sobreexplotación de pozos, abastecimiento de agua de procedencia dudosa, construcción de presas que representen problemas adicionales a los ya existentes, inundaciones, entre otras cosas.

A pesar de este complejo marco institucional, se considera que la obtención y generación de datos sigue sin ser suficiente para representar de forma completa la situación del agua en el país y en las grandes ciudades, razón por la cual las decisiones tomadas en el proceso de gobernanza siguen siendo deficientes. Actualmente se considera que es necesario recabar información específica de cada zona en la que se busque aplicar

nuevas medidas para que puedan ser fundamentadas y, a la vez, su publicación motive a la población a exigir dichos cambios.

3.6 Contaminantes de escorrentías superficiales urbanas de México

En México, la CONAGUA utiliza indicadores para evaluar la calidad del agua en los cuerpos de agua nacionales, los cuales se recomienda extrapolar hacia cualquier análisis de calidad del agua. Los principales indicadores son: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF) (CONAGUA, 2021).

La DBO_5 y la DQO son indicadores de la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua, provenientes principalmente de descargas tanto municipales como no municipales. La diferencia entre estos dos indicadores es que la DBO_5 mide la cantidad de materia orgánica biodegradable e incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto con la consecuente afectación en ecosistemas acuáticos. En cambio, la DBO indica la cantidad total de materia orgánica, donde aumentos de valores de este indican presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales (SEMARNAT, 2014).

El indicador de SST mide la cantidad de sólidos sedimentables, sólidos suspendidos y materia orgánica en suspensión o materia coloidal presentes en el agua. Su origen proviene de las aguas residuales y la erosión del suelo y, en niveles de incremento, generan que el cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad acuática, gracias al impedimento del paso de la luz solar (SEMARNAT, 2014).

Por último, los CF indican presencia de excremento en aguas residuales, ya que mide las bacterias que se encuentran presentes en los intestinos de organismos de sangre caliente (incluido el ser humano) y son excretados en sus heces fecales. Es utilizado internacionalmente partiendo de la premisa de que la ausencia de este parámetro indica que otros organismos patógenos al hombre también están ausentes (New York State Department of Health, 2017).

Los análisis de calidad del agua en las escorrentías superficiales son necesarios debido a la contaminación por parte del ser humano. Por ello, es necesario introducir el concepto de cargas de contaminación del agua de escorrentía urbana (i. e., AEU), que son producto de la acumulación de sedimentos contaminados entre dos lluvias consecutivas. El agua de escorrentía urbana se considera una fuente de contaminación difusa, debido a difícil localización de su fuente. Esto gracias a que su vertido está totalmente ligado a la lluvia, un fenómeno aleatorio, variable en el tiempo y difícil de muestrear en origen; así como también está relacionada con los distintos usos del suelo. Por supuesto, la concentración de los contaminantes asociados con los sedimentos acumulados sobre las vías urbanas es generalmente superior a la que ocurre en áreas comerciales y residenciales (Zafra *et al.*, 2009).

Con el fin de establecer un análisis más claro dentro del área de estudio (i. e., el Chicalote), se investigaron, clasificaron y cribaron las actividades socioeconómicas que podrían contribuir en mayor medida a la contaminación del AEU. A continuación, en la Figura 63, se muestran las actividades económicas con dichas posibles fuentes de contaminación. Para su elaboración, se utilizaron datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (i. e., DENUE) de marzo del 2020. Se eliminaron 12,614 actividades que no fueron posibles fuentes de contaminación y se contemplaron 2,895 actividades posibles fuentes de contaminación.

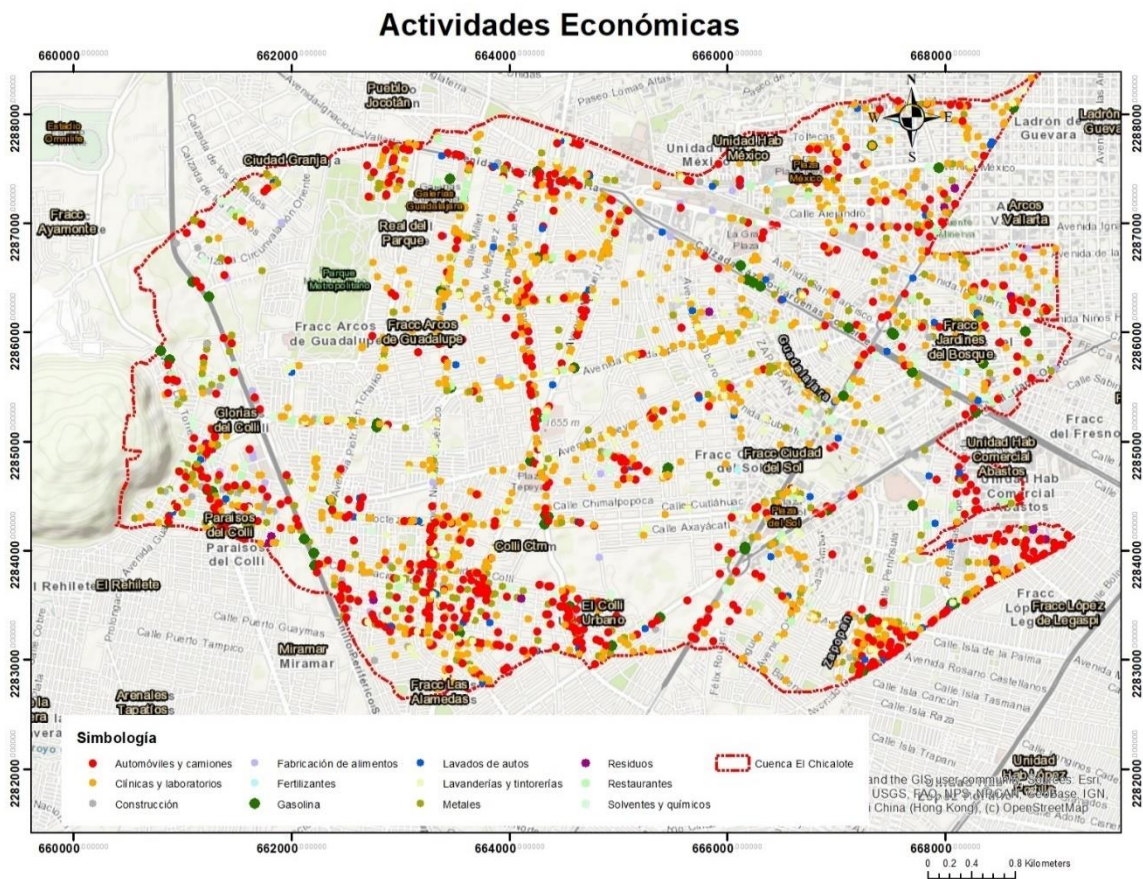


Figura 67. Actividades económicas con posibles fuentes de contaminación en la zona de estudio

Enseguida, en la Tabla 9, se muestra la clasificación por fracción del total de las actividades económicas que se llevan a cabo en la zona de estudio. Las categorías de clínicas y laboratorios, y de automóviles y camiones, son aquellas que representan una mayor atribución.

Tabla 9. Porcentaje de cobertura de actividades económicas.

Actividades Económicas	Cantidad	Fracción
Clínicas y laboratorios	1056	36.48%
Automóviles y camiones	707	24.42%
Metales	400	13.82%
Lavanderías y tintorerías	203	7.01%

Solventes y químicos	160	5.53%
Restaurantes	89	3.07%
Construcción	83	2.87%
Lavados de autos	71	2.45%
Gasolina	60	2.07%
Fabricación de Alimentos	36	1.24%
Fertilizantes	18	0.62%
Residuos	12	0.41%
Total	2895	100%

Dentro de los contaminantes más comunes que se encuentran al analizar la calidad del AEU, están los aceites, combustibles, fluidos hidráulicos, polvo, arena y sal. Además, se pueden encontrar metales pesados originados por la corrosión de los materiales cromados o galvanizados, así como por las emisiones atmosféricas de vehículos, mobiliario urbano e industrias (Zafra *et al.*, 2009). Los metales pesados más predominantes son zinc y plomo, pero también se pueden encontrar, cobre, cromo, níquel, mercurio y cadmio. Las fuentes y mayores detalles se aprecian en la Tabla 10 (Zafra *et al.*, 2007).

Tabla 10. Contaminantes presentes en la escorrentía de las superficies de rodadura (Zafra *et al.*, 2007).

Constituyente	Fuente
Plomo	Escapes de vehículos, uso de llantas, aceite lubricante, grasa, articulaciones soldadas, pinturas.
Zinc	Uso de llantas, aceite de motor, grasa, pastillas de frenos.
Cobre	Galvanizado de metales, uso de llantas, rodamientos y articulaciones en vehículos, movimiento de partes del motor revestimiento de frenos, fungicidas e insecticidas.
Cadmio	Uso de llantas, escapes de vehículos, aplicación de insecticidas.

Hierro	Corrosión de vehículos, estructuras de acero, movimiento de partes del motor.
Cromo	Galvanizado de metales, movimiento de partes del motor, revestimiento de frenos.
Níquel	Combustible diesel y petróleo de escapes, aceite lubricante, galvanizado de metales, rodamientos, revestimiento de frenos, pavimento asfáltico.
Manganeso	Movimiento de partes del motor, uso de llantas, pastillas de frenos.
Cobalto	Radiadores, cadenas para llantas, articulaciones.
Partículas	Uso del pavimento, vehículos, atmósfera, mantenimiento de vías.

Otro grupo importante son los contaminantes emergentes (CE), que son sustancias químicas que no tienen regulación, pero se tiene sospecha de que afectan al medio ambiente o que sus efectos se desconocen. Los CE son definidos como materiales químicos o naturales, fabricados o creados por los seres humanos. También se caracterizan por tener alta persistencia y baja degradación en el ambiente, así como el potencial de causar daños en la salud o en el medio ambiente, aun en bajas concentraciones. La importancia de su estudio radica en que estos no son eliminados al llegar a las plantas de tratamiento y sus afluentes e influentes contienen estos tipos de contaminantes (Gil *et al.*, 2012).

Los contaminantes emergentes se pueden clasificar en tres categorías, la primera comprende a los compuestos que fueron recientemente introducidos al ambiente (i.e., compuestos industriales que se han desarrollado hace poco tiempo), la segunda incluye los compuestos que se introdujeron durante un período sustancial (i.e., sólo se han detectado recientemente) y la última son los compuestos conocidos (i.e., medidos ya por algún tiempo y se reconocen como potencialmente causantes de efectos adversos en los ecosistemas y/o los seres humanos). Algunos ejemplos de CE serían los detergentes,

los productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, hormonas, edulcorantes, pesticidas, drogas ilícitas y sus metabolitos, así como las fragancias, los aditivos de gasolinas y los retardadores de flama (Gil *et al.*, 2012).

3.7 Calidad del agua subterránea en México

En México, el agua subterránea es realmente importante, gracias a que es fuente del 39% del volumen total suministrado (CONAGUA, 2018; Centro Virtual de Información del Agua, 2017). Sin embargo, más de la mitad del agua subterránea extraída proviene de 100 acuíferos sobreexplotados, que representan más del 15% del total de los acuíferos mexicanos (Díaz *et al.*, 2013).

La CONAGUA es la institución encargada de llevar a cabo la medición y monitoreo de la calidad del agua subterránea a nivel nacional. A través de la Red Nacional de Medición de Calidad del Agua, que cuenta con 1,068 sitios de muestreo a lo largo del país, se miden constantemente 14 indicadores fisicoquímicos y biológicos. Estos indicadores son: fluoruros, coliformes fecales, nitrógeno de nitratos, arsénico total, cadmio total, cromo total, mercurio total, plomo total, alcalinidad, conductividad, dureza, sólidos disueltos totales, manganeso total y hierro total. Gracias a esta red, se determinó que solo el 40.6% cumplen la normativa de calidad requerida para todas las sustancias (CONAGUA, 2021).

En el AMG el agua subterránea, proveniente del acuífero Atemajac-Toluquilla, también es una fuente de relevancia (GEOEX-SIAPA, 2003). Esto, ya que el Sistema Intermunicipal de los Servicios del Agua (SIAPA) obtiene desde el subsuelo cerca del 22% del agua destinada a la ciudad (CONAGUA, 2015), cifra que no considera la extracción desde pozos privados.

Debido a las características geológicas de la región, la calidad el agua subterránea del AMG es un tanto particular. Se han elaborado diversos estudios, con el objetivo de determinar las características geoquímicas del agua subterránea, obteniendo muestras representativas de pozos distribuidos por el Área Metropolitana de Guadalajara (Hernández-Antonio *et al.*, 2015; Morán-Ramírez *et al.*, 2016). Una vez terminado el

análisis, se determinó que gran parte del agua subterránea tiene concentraciones de HCO_3^- , relacionadas con Na^+ en las aguas más frías y Mg^{2+} en los flujos hidrotermales. Estas concentraciones fueron predominantes en la parte alta del sistema hidrológico. Sin embargo, en la región baja de la cuenca se encontraron concentraciones elevadas de SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- , representativas de presencia de contaminantes generados por contacto con aguas residuales domésticas e industriales (Morán-Ramírez *et al.*, 2016). Por consiguiente, es válido concluir que la calidad del agua retenida en el sistema hidrogeológico Atemajac-Toluquilla es significativamente mejor en la zona norte del acuífero. Por el contrario, en la parte sur del sistema hidrológico, además de los iones previamente mencionados, se han encontrado altas concentraciones de metales disueltos en agua (e.g., As, Fe y Mn), superando los límites establecidos en la normativa mexicana (Rizo, 2017).

4. Metodología

Como se menciona anteriormente, el objetivo de este proyecto es aportar soluciones tecnológicas que contribuyan a restaurar el ciclo hidrológico en el AMG. Por lo tanto, dentro de los objetivos específicos está el desarrollar un estudio que sirva para comprender el comportamiento de las aguas superficiales del AMG, con la finalidad de poder aplicar nuevas tecnologías que ayuden a mejorar el ciclo hidrológico de la zona. El análisis hace uso de análisis geográfico y simulaciones de distinta naturaleza, para ello se utilizan sistemas de información geográfica, así como distintos softwares (*ArcMap*, *IBER*, *AutoCad* y *Modflow*).

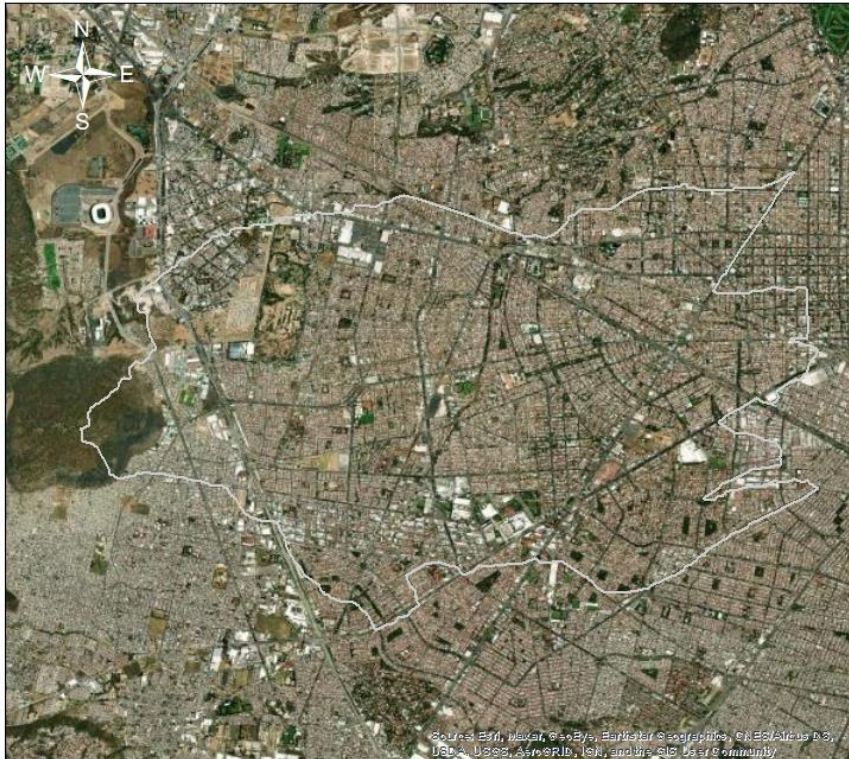
En esta sección se presenta la metodología que se ha ido desarrollando para alcanzar el objetivo. Este apartado consta de tres partes: la primera consiste en la hidrología superficial de la zona de la microcuenca de Arroyo Seco, donde se obtienen datos del modelo de elevación digital de la zona, intensidad de precipitación, perfiles de escurrimiento, entre otras variables, para realizar un análisis del comportamiento del agua en ese sitio. La segunda parte trata de una modelación de intervención del acuífero del Chicalote, donde de igual manera se desarrolla un proceso de recolección de datos y un procedimiento de análisis. Por último, está la parte de desarrollo de estrategia para el conocimiento del acuífero del Chicalote.

4.1 Hidrología

Como se menciona previamente se trabajó con dos áreas de captación distintas. Una de ellas corresponde a la microcuenca de El Chicalote, que abarca parte de los municipios de Zapopan y Guadalajara, y mide 3,645 ha. Esta subcuenca es importante por dos razones: primero porque su parte baja es un área notable de inundaciones durante la época de lluvias, lo cual muestra conflictos derivados de la ruptura del ciclo hidrológico debida a la impermeabilización de la superficie urbana. Segundo, porque la microcuenca se extiende sobre la parte alta del sistema hidrogeológico de la ciudad, en su parte oeste. Como los escurrimientos se contaminan a medida que fluyen hacia el este, sobre la superficie pavimentada, el agua para infiltración es más limpia aquí y ello convierte a la

microcuenca en un buen lugar para comenzar un plan de recarga a nivel urbano. Esta área de estudio se puede ver en la Figura 68.

Delimitación de la microcuenca El Chicalote



Simbología

Microcuenca El Chicalote

0 750 1,500 3,000
Metros

Proyección UTM, Zona 13 Norte
Datum: WGS 1984

Elaborado por:
Leslie Sacramento Ornelas
18/11/2021

Figura 68. Mapa de la microcuenca El Chicalote

La otra zona de estudio es el área de captación del Arroyo Seco, que se encuentra en las faldas del bosque de la primavera, detrás del cerro del Colli. Es una cuenca extensa que fluye hasta la ciudad. Su manejo permite recargar el acuífero de la ciudad y evitar, en la medida de lo posible que el agua fluya hasta la ciudad y derive en inundaciones. En el periodo de verano 2021 se hizo por primera vez una modelación de esta zona para observar el potencial de infiltración de agua limpia hacia los acuíferos, como se muestra en la Figura 30. Sin embargo, en este periodo se volvió a hacer una modelación de Arroyo Seco, ahora abarcando la superficie urbana con la finalidad de poder observar el

comportamiento del Arroyo hacia aguas abajo. El área de estudio se puede observar en la Figura 69.

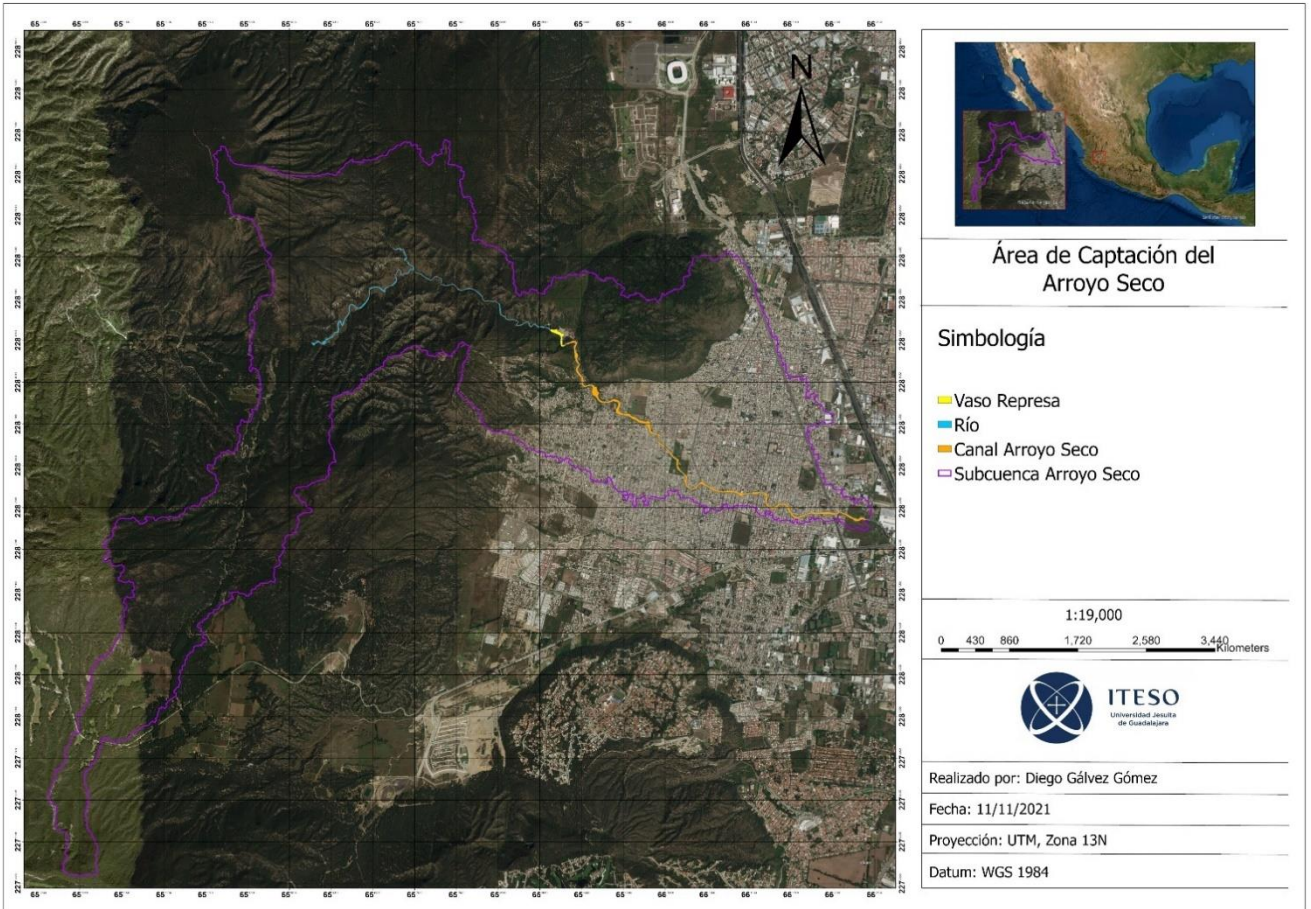


Figura 69. Mapa del área de captación del Arroyo Seco delimitada por la zona urbana.

4.1.1 Modelación del sistema hidrológico

Para realizar la modelación del comportamiento de los cuerpos de agua superficiales de la AMG se utilizó el software IBER. Con el cual, se analizaron las zonas de riesgo, hidrogramas, tirantes y velocidades de escorrentía. IBER es una herramienta de modelación matemática bidimensional para la simulación del flujo del agua en lámina libre en 2 dimensiones de origen español, lo que quiere decir que utiliza el método de volúmenes finitos que permite mayor flexibilidad en la malla para resolver ecuaciones parciales y de esa manera predice los valores de las variables hidráulica como lo es el calado, velocidad y caudal. Asimismo, esta herramienta está compuesta por un módulo

hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé *et al.*, 2012).

El módulo hidrodinámico consiste en un conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos; es decir la solución numérica de las ecuaciones de conservación de momento y de masa en un fluido. Por lo cual, permite entender qué variables controlan el movimiento del agua y cómo la misma se verá afectada ante diferentes modificaciones (Bladé *et al.*, 2012). Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos de microcuencas urbanas se siguieron los tres pasos indicados en la Figura 70.

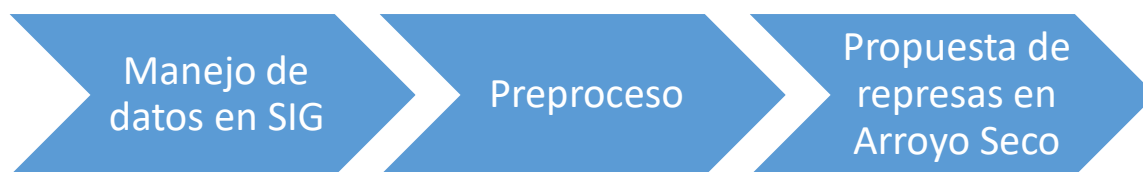


Figura 70. Serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER

En el diagrama de la Figura 71 se presentan las actividades que se realizaron para el manejo de datos en el sistema de información geográfica, previo al modelo numérico que se realiza en la computadora. En este modelo se ingresaron datos como la rugosidad del suelo que depende de las variaciones en el uso de suelo del área; como es el suelo de hormigón (pavimento), suelo desnudo, bosque, arbustos, residencial, entre otros. Por otro lado, se asignó el número de curva (NC), el cual es un parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca, a partir de la cobertura del

suelo. Por lo tanto, cada tipo de suelo tienen diferente NC. De igual manera, se requirió asignar un modelo digital de elevación (MDE) al polígono del área de estudio; uno para la microcuenca del Chicalote y otro para la de Arroyo Seco. El MDE es una representación gráfica y matemática de la variación de altura del territorio con respecto al nivel del mar y permite presentar de una manera visual las formas del relieve y los elementos presentes en el mismo.

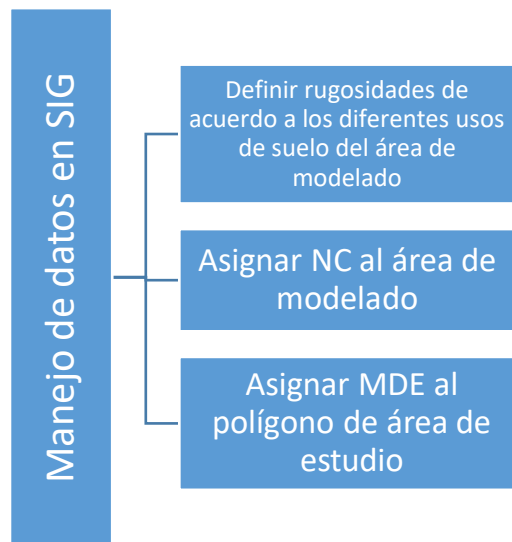


Figura 71. Subactividades del manejo de datos en SIG previo al modelo numérico computacional.

Después de la recolección de información necesaria en ArcMap, se ingresaron todos los datos a la modelación hidrodinámica de IBER. Primeramente, se generaron tres documentos ASCII por área de captación: el primero con los valores de las rugosidades del suelo, el segundo con los valores de NC y el tercero con el modelo digital de elevación (MDE) del límite de la cuenca. El número de curva es la metodología de pérdidas que se seleccionó para trabajar con las simulaciones. La cual propone el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USSCS, por sus siglas en inglés). Este método requiere de una cuantificación de las áreas de los distintos usos de suelo para asignar un coeficiente (también llamado número de curva) particular a cada una y, posteriormente, mediante un promedio ponderado se obtiene el número de curva general para toda el área de estudio.

Para poder realizar los archivos ASCII se obtuvo información vectorial (i.e., shapefile) por cada tipo de uso de suelo. Luego, se agregaron ambos valores en una tabla de atributos y se convirtieron a ráster, para después convertirlos a ASCII y ser importados a IBER. En el caso del MDE del límite de la cuenca, se utilizó un modelo digital de elevación del año 2016, con escala de 1:10,000 y curvas a cada 5 m para El Chicalote. Por otro lado, para el Arroyo Seco se utilizó un MDE del año 2003, con escala de 1:150,000 y con curvas a cada 50 m.

Para los modelos del Chicalote y Arroyo Seco se tomaron los valores de rugosidades y número de curva obtenidos en el periodo de primavera 2021. Con base en los criterios existentes en del software IBER se determinaron los números de nivel de los distintos tipos de suelo. Los NC y la rugosidad del uso del suelo están estrechamente ligados. Por lo tanto, en la siguiente tabla se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning que se obtuvieron conforme a lo establecido en el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), con el fin de determinar correctamente los parámetros necesarios para la estimación del número de curva. De igual manera se analizaron las cartas edafológicas de la región para caracterizar la composición del suelo, así como también se utilizó Google Earth para estimar la condición hidrológica que se tenía en cada tipo de suelo dentro del área de captación.

Tabla 11. Coeficientes de rugosidad de Manning para cada uso de suelo en IBER (INECC, 2014).

Uso de suelo	Coefficiente de Manning
Mixto (vegetación urbana)	0.035
Residencial	0.4
Infraestructura	0.03
Suelo desnudo	0.023
Hormigón	0.014
Bosque	0.12
Pradera	0.05
Río	0.025
Arbustos (Espacios verdes)	0.075
Comercial (edificios aislados)	0.3

Tabla 12. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo – cobertura – manejo (INECC, 2014).

Descripción del uso de la tierra	Detalles de la descripción	Tratamiento o uso	Condición hidrológica	Grupo Hidrológico de suelo			
				A	B	C	O
Tierra Cultivada	baldío	filas rectas	no aplicable	77	86	91	94
	general	sin tratamientos de conservación	no disponible	72	81	88	91
	cultivos en fila	filas rectas	pobre	72	81	88	91
			bueno	67	78	85	89
		en contorno	pobre	70	79	84	88
			bueno	65	75	82	86
		en contorno y terraza	pobre	66	74	80	82
	bueno	62	71	78	81		
	general	con tratamientos de conservación	no disponible	62	71	78	81
	granos pequeños	filas rectas	pobre	65	76	84	88
			bueno	63	75	83	87
		en contorno	pobre	63	74	82	85
			bueno	61	73	81	84
		en contorno y terraza	pobre	61	72	79	82
	bueno	59	70	78	81		
	grano cerrado	filas rectas	pobre	66	77	85	89
		filas rectas	bueno	68	72	81	85
grano cerrado: legumbres o prade cde rotación	en contorno	pobre	64	75	83	85	
		bueno	55	69	78	83	
	en contorno y terraza	pobre	63	73	80	83	
		bueno	51	67	76	80	
Pastizales o campo de animales		pobre	68	79	86	89	
		bueno	49	69	79	84	
		pobre	39	61	74	80	
	en contorno	bueno	47	67	81	88	
		pobre	25	59	75	83	
		bueno	6	35	70	79	
Vegas de frios y prederas			bueno	30	58	71	78
Bosques	troncos delgados, cubierta pob.-e, sin hierbas	pobre	45	66	77	83	
		aceptable	36	60	73	79	
	bueno	25	55	70	77		
Haciendas				59			
Calles y Carreteras	pavimentados con cubetas y alcantarillados	no disponible		95	95	95	95
				74	84	90	92
				76	85	89	91
				72	82	87	89
Áreas abiertas	césped parques, campos de golf, cementerios, etc.	bueno (cubierto de pasto 75%)	39	61	74	80	
		aceptable (cubierto de pasto 50% - 75%)	49	69	79	84	
Áreas comerciales de neRodos		85% impermeables		89	92	94	95
Distritos Industriales	1/8 acre o menos	72% impermeables		81	88	91	93
	1/4 acre	65% impermeable		77	85	90	92
	1/3 acre	38% impermeable		81	75	83	87
	1/2 acre	30% impermeable		57	72	81	86
	1 acre	25% impermeable		54	70	80	85
Residencial		20% impermeable		51	68	79	84
				95	95	95	95
Parqueadores pavimentados, techos, accesorios etc.				95	95	95	95

En la Figura 72 se muestra los pasos a seguir para realizar el preprocesamiento de la información en el programa IBER, de los cuales se importaron archivos de ArcMap, los cuales se mencionaron anteriormente.

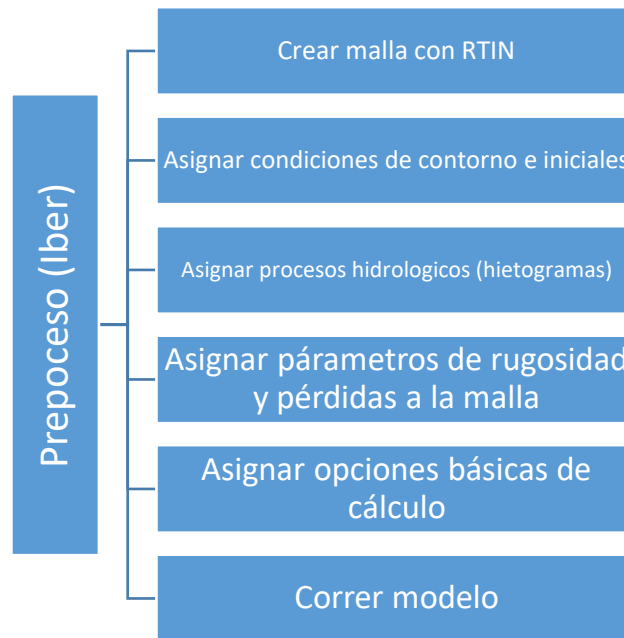


Figura 72. Subactividades del proceso del modelo computacional IBER.

Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación de la malla que se hizo anteriormente en el manejo de datos en SIG, por lo cual en IBER se creó un nuevo archivo de RTIN, en el cual se exportó el archivo ASCII del MDE del área de captación correspondiente; se utilizó una tolerancia de 20 metros, lado de máximo de 20 metros y un lado mínimo de 10 metros. Después se asignaron las condiciones iniciales, en las cuales todas las áreas de captación se utilizó un valor de 0 m de profundidad de agua en toda la zona (i.e. seca). Enseguida se agregaron las condiciones de contorno, es decir los lugares de salida de los escurrimientos. Las salidas asignadas en cada área fueron seleccionadas a partir del punto de menor elevación de cada microcuenca.

Se prosiguió por agregar y asignar a toda la zona un hietograma con tiempo de retorno de 5, 10, 15, 20 y 25 años para cada simulación; los cuales se presentan en las siguientes

figuras. Dichas tormentas fueron generadas por el Mtro. Diego Rojas en su tesis de maestría (Rojas & González, 2015).

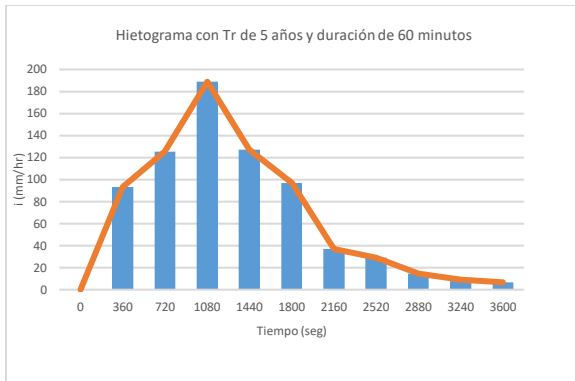


Figura 73. Hietograma con tiempo de retorno de 5 años y duración de 60 minutos.

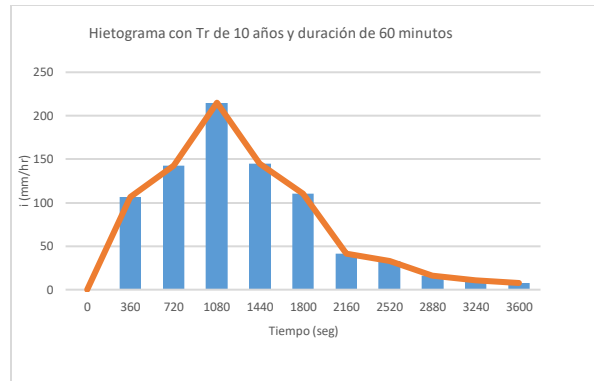


Figura 74. Hietograma con tiempo de retorno de 10 años y duración de 60 minutos.

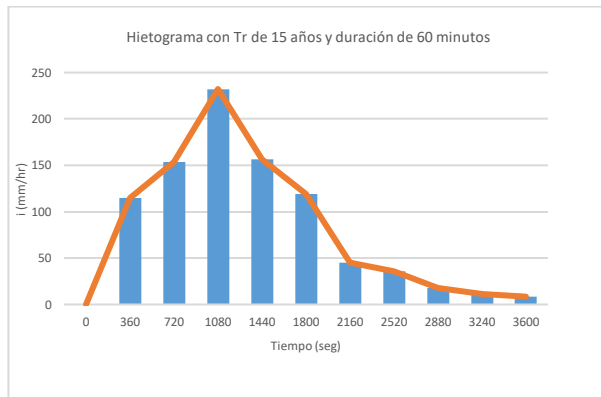


Figura 75. Hietograma con tiempo de retorno de 15 años y duración de 60 minutos.

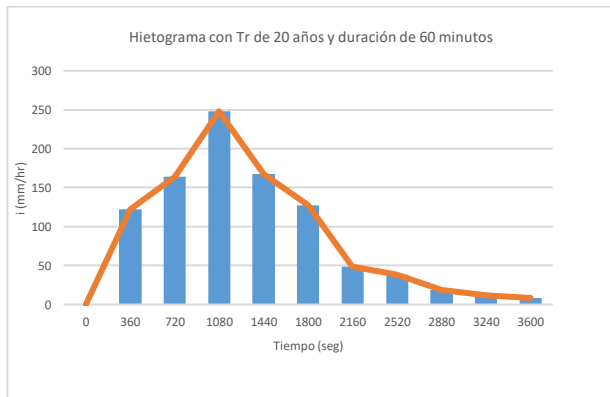


Figura 76. Hietograma con tiempo de retorno de 20 años y duración de 60 minutos.

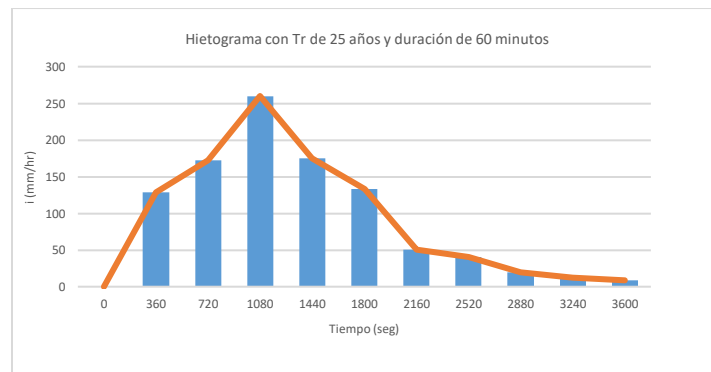


Figura 77. Hietograma con tiempo de retorno de 25 años y duración de 60 minutos.

Posteriormente, se asignó un valor de rugosidad y NC a toda el área para cubrir espacios mínimos que pudieron haber faltado en los archivos ASCII. Finalmente se asignó el

tiempo inicial (i.e., cero) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 900 segundos. Ya que fue la suma de la duración de la tormenta y el tiempo de concentración según cada área de captación; se corrió el cálculo del modelo, y se seleccionaron los siguientes resultados a visualizar: tirantes máximos, velocidades y peligrosidad máximas.

Cabe subrayar, que en el mes abril del 2021 se quemó la parte sur del Bosque de la Primavera, es decir el incendio del bosque fue aledaño a colonias como Lomas de la Primavera, Paraísos del Colli, entre otras (Chávez, 2021). Es importante tomar en cuenta este aspecto, debido a que en temporadas de lluvia la falta de vegetación hará que la infiltración de agua por parte de la flora sea nula, por lo cual el caudal y la velocidad del agua será mayor, de manera que el suelo desnudo se erosionará y será arrastrado en forma de sedimentos por la lluvia, la cual llegará a la ciudad y provocará severas inundaciones (Tálamo *et al.*, 2016). Por esta razón, se realizó una modelación para el incendio ocurrido en el Bosque de la Primavera con los mismos periodos de retorno modificando el valor de número de curva y número de Manning a la zona incendiada, estableciendo estos como 92 y 0.025, respectivamente.

Además, los tiempos de concentración fueron calculados con ayuda de la página web SIATL del INEGI, que es un simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas en México. Asimismo, el tiempo de concentración es el tiempo de equilibrio para que el cuerpo de agua se estabilice después de ocurrir una precipitación, es decir el tiempo que tarda en llegar la gota de agua en el punto más lejano de la cuenca hasta el desembocamiento de la cuenca (Vélez & Botero, 2010). A continuación, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13. Tiempos de concentración para cada área de captación.

Área de captación	Tiempo de concentración (min)
El Chicalote	240
Arroyo Seco	156

4.1.2 Diseño de soluciones sobre los modelos hidrológicos

Finalmente, se realizó una propuesta de represas en el Arroyo Seco para posibles propuestas de restauración y disminución de zonas de riesgo. Primeramente, se generó una red hidrográfica de la subcuenca de Arroyo Grande. La red hidrográfica consta en un sistema de circulación del agua, modela el drenaje de una cuenca hidrográfica donde se representan las distintas corrientes de agua y los canales principales, así como la dirección del flujo de agua (INEGI, 2010). Después, se obtuvo el ordenamiento de cauces en ArcMap, donde se generaron cuatro ordenamientos. El orden de los cauces es una clasificación que proporciona el grado de partición de la corriente de agua dentro de una cuenca. Las corrientes de primer orden son aquellas corrientes portadoras de aguas de nacimiento y que no tienen afluentes. Luego están los de orden dos que son cuando se unen dos corrientes de orden uno. Esto quiere decir que cuando dos corrientes de orden “n” se unen, resulta una corriente de “n+1” (Garzón, 2020).

Posteriormente, se realizaron perfiles de escurrimiento de los cauces de la zona sur de la cuenca de Arroyo Grande ya que es la sección que se vio afectada con el incendio. Se analizaron los perfiles y solo se conservaron los que cumplieron con las características de longitud mayor o igual a 300 metros y una pendiente mayor a 0.05. Una vez que se trazaron los perfiles, se unieron los cauces de diferente orden cuando eran consecutivos y se nombraron; como se muestra en el siguiente mapa:

Escorrentías seleccionadas para la propuesta de represas en la zona incendiada de Arroyo Grande

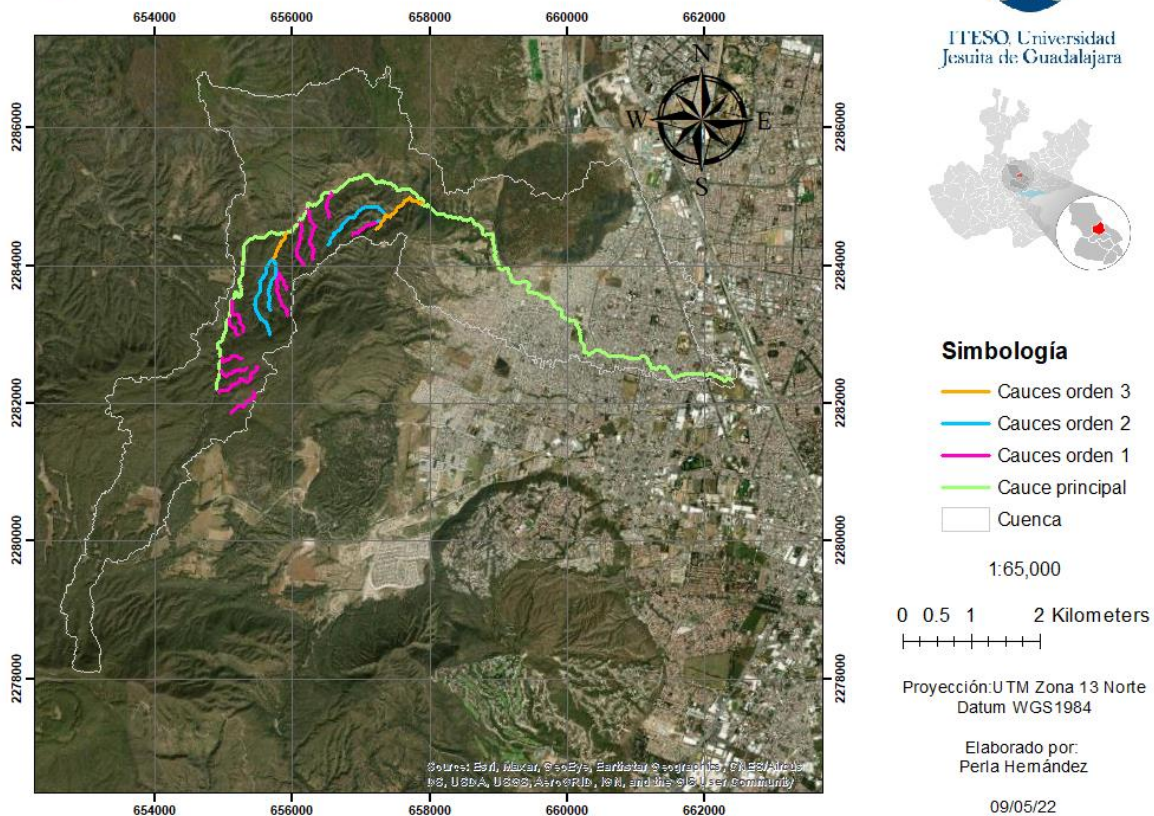


Figura 78. Mapa de escorrentías seleccionadas para la localización de represas en Arroyo Seco.

Después, se importaron los datos de los perfiles de escurrimiento a AUTOCAD para ubicar represas con altura de dos metros a lo largo de cada cauce con una pendiente de 1%. La principal razón de implementar represas en los perfiles de escurrimiento es para retener sedimentos en el Arroyo causados por la velocidad de escorrentía del agua. Esto se debe a la falta de una cobertura de vegetación en el suelo de dicha zona, debido al incendio. Otros objetivos de las represas son: reducir la velocidad de arrastre, disminuir el caudal de escurrimiento y la retención de sedimentos que pueda llegar a la zona urbana en las faldas del Bosque de la Primavera. Ya que se propusieron las represas en cada cauce, se exportó la elevación de cada represa a Excel.

Posteriormente, en ArcMap se realizó un kilometraje en cada cauce para facilitar la identificación de coordenadas de cada represa. Luego se importaron esos datos a ArcMap con la respectiva ubicación geográfica de cada represa y se creó un archivo de información vectorial (*shapefile*) el cual permitió visualizar con puntos cada represa. Seguidamente, se realizaron curvas de nivel a cada dos metros y se generó un *shapefile* de polígonos alrededor de cada punto de las represas.

Los datos de polígonos de las represas se importaron al modelo del Arroyo Seco en IBER, para analizar como influyen en el modelo hidrodinámico superficial. Luego se obtuvo su hidrograma y se comparó con el hidrograma del modelo del Arroyo sin represas. Con la finalidad de comparar la velocidad máxima del agua y el caudal retenido en el Bosque.

Finalmente, se decidió añadir al modelo con una TR=5 años un pozo, el cual se agregó directamente en el programa de IBER con un caudal de $1\text{m}^3/\text{d}$.

4.2 Hidrogeología

El agua de las corrientes pluviales que se desea infiltrar puede servir para recargar el acuífero; asumiendo que los parámetros hidrogeológicos de la Toba Tala son homogéneos en toda su extensión, se puede crear un modelo hidrogeológico que ayude a comprender lo que pasa con los flujos de agua subterránea de la zona. Ese es el objetivo del presente frente del proyecto.

En esta sección se estudió la microcuenca del Chicalote, la cual cuenta con 3,625 hectáreas que podrían captar el agua de lluvia y conducirla hacia pozos de infiltración, propuestos estratégicamente, para aprovechar las características de los suelos e inyectar el agua que causa inundaciones en el temporal de lluvias y escasea en el temporal de estiaje.

Se creó un modelo del acuífero que existe en la microcuenca del Chicalote para así poder observar las afectaciones que tendría su intervención con pozos de infiltración de agua pluvial utilizando el software Modflow para llevar a cabo la modelación numérica del agua subterránea y la interfaz gráfica Modelmuse.

La principal razón por la que se eligió utilizar estos programas es porque son software de modelación muy potentes y de los más utilizados para la modelación hidrogeológica, lo que permite estandarizar fácilmente cualquier resultado de análisis. Por ser software libre y con documentación existente se facilita su disponibilidad y el seguimiento del trabajo en siguientes semestres por otras personas.

Modflow funciona con el método de diferencias finitas que lleva desde los años 60 en desarrollo y tiene bastante documentación. La ecuación general que rige para las condiciones transitorias, heterogéneas y anisotrópicas está dada por:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

k_x, k_y y k_z : conductividades hidráulicas en la dirección x, y y z

W: término de fuente o sumidero

S: rendimiento específico o coeficiente de almacenamiento

Para la elaboración del modelo hidrogeológico se utilizaron los siguientes datos provenientes del SIAPA:

- Nivel estático del agua del AMG en 2018.
- Pozos existentes en el área (ubicación, estratigrafía encontrada y nivel del agua, entre otra información).

Con los datos del nivel estático, en el programa *Surfer*, se hizo una extrapolación con los 9 puntos involucrados en la zona de estudio determinada, dando como resultado una

mallá. Este archivo fue guardado en formato “.grd” para posteriormente ser utilizado en la definición de las condiciones de frontera del modelo en Modflow.

De igual manera, se utilizaron los datos de las perforaciones existentes en el área para hacer un modelo del basamento rocoso. Para esto se utilizó información de los mismos 9 pozos, se calculó la altitud del nivel de la roca con respecto al nivel medio del mar, se ingresó esta información al programa *Surfer* y se hizo una extrapolación de los datos con la que se creó un archivo de salida en formato .grd.

Para el modelo de la topografía de la zona de estudio se utilizó información del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) de la zona estudiada, el cual es un archivo ráster con una resolución espacial de 15 por 15 metros con el que se creó un archivo en formato .grd. Con esto se creó el la topografía del área de estudio, dividida en celdas de 100 x 100 metros, abarcando toda la microcuenca del Chicalote. El Chicalote es un área grande; se utilizó este tamaño de las celdas para el modelo porque si fueran más pequeñas se necesitaría más poder computacional en las corridas y la exactitud sería prácticamente la misma.

Para decidir los valores de conductividades hidráulicas que se utilizarían en el modelo, se tomó como referencia los valores reportados por (Vanegas L. , 2017) quien a su vez los consultó de estudios de (Zamudio, Vargas, & Ochoa, 2016).

- $K_{\text{toba_horizontal}} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ m/s}$
- $K_{\text{toba_vertical}} = 8.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
- $K_{\text{roca}} = 1.16 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

Las permeabilidades anteriores son aplicables para suelos compuestos por materiales pumíticos de distintas granulometrías.

El siguiente paso fue integrar los pozos de extracción de los que se tiene registro. Para agregar estos pozos con sus respectivos caudales al modelo, se utilizó la función de importar puntos en Modelmuse. Se cargó una tabla con los datos (coordenadas,

profundidad, caudal) de los 115 pozos de extracción al programa y este los creó en el modelo usando el paquete “WEL”

Una vez contando con las entradas del modelo descritas anteriormente (topografía, capas de Toba Tala y roca con sus permeabilidades y condiciones de frontera del nivel estático del agua), así como las características hidrogeológicas, como las permeabilidades y los pozos de extracción, se analizó un escenario de infiltración de agua en un pozo de 45 m de profundidad ubicándolo en el parque metropolitano.

Inicialmente, se utilizó el paquete CHD en *Modflow* para establecer una carga hidráulica constante de 1618.1 m en la celda del pozo a una profundidad de entre 40 y 50 metros. La simulación consistió en mantener esta carga por 14 días. Para el análisis de los resultados se utilizó el archivo de salida creado por Modflow con formato .lst para examinar el volumen acumulado de agua infiltrada en función del tiempo y proceder a comparar los resultados del modelo con los de (Vanegas L. , 2017), así como la afectación a los flujos subterráneos de agua, una vez que se toma en cuenta a los pozos de extracción existentes y el pozo de infiltración teórico. Luego se hicieron pruebas modificando los valores hidrogeológicos para ver qué tanto afectaba al modelo.

Enseguida se cambió en Modflow la forma en la que el pozo de infiltración trabaja, activando el paquete WEL en lugar del paquete CHD, especificando entonces un caudal de 140,000 m³ en un lapso de 14 días de infiltración, para comparar los resultados entre estos dos paquetes (CHD y WEL).

El siguiente paso para el modelo fue agregar los pozos de infiltración de los que el SIAPA tiene registro, de su ubicación, profundidad y caudal extraído. La base de datos obtenida del SIAPA se cargó en el modelo de MODEL MUSE, facilitando la adición de 115 pozos, los cuales trabajan con el paquete WEL.

4.3 Caracterización del sistema hidrológico y estimación del balance hídrico

Con el fin de estimar el balance hídrico del AMG, se propone elaborar una caracterización preliminar del sistema hidrológico del ITESO, de manera subterránea y superficial. Se eligió la universidad como área de estudio, debido a la facilidad que se tiene de hacer pruebas y monitorear los recursos hídricos para obtener información, al igual que por los beneficios académicos que los equipos instalados pudieran ofrecer al alumnado y al prestigio universitario.

El proyecto propuesto fue determinado después de un arduo análisis de información recolectada por distintos medios. Además de la asesoría constante del Dr. David Rizo, se entrevistó al Mtro. Rodrigo Villalpando de la Universidad de Memphis. También se discutieron algunos escenarios potenciales con la gerencia de Servicios Escolares del ITESO, a raíz de los cuales se determinaron los equipos necesarios para la estimación preliminar del balance hídrico.

Al interpretar los resultados obtenidos con este estudio, sería posible realizar una evaluación de la calidad del agua y del funcionamiento hidrológico que se tiene en el campus. Después, al determinar las propiedades hidrogeológicas y las cantidades de agua involucradas en las distintas etapas del ciclo hidrológico, podría hacerse una extrapolación a toda la ciudad. Gracias a ello, esta propuesta podría ser el primer paso para hacer distintas modelaciones y planes de gestión integral del agua.

El trabajo estará constituido de documentación, trabajo de campo y laboratorio, así como de análisis de datos. La recopilación documental permitirá obtener toda la información disponible posible. Aquello con el fin de analizarla y compilarla de modo que sea práctica para su posterior comparación con los datos obtenidos en campo. Después, se buscará la obtención de datos experimentales, que serán analizados a detalle en laboratorio, para posteriormente ser contrastados con la información documentada. A partir de esta instancia, se podrá generar un diagnóstico hidrogeológico preliminar de la zona de estudio. Por último, se buscará determinar la calidad del agua, mediante las campañas

de muestreo, con el propósito de completar la caracterización detallada del área de estudio. Las actividades a desarrollar se explican con mayor detalle enseguida.

Se realizará una recopilación de información documentada con investigaciones científicas relevantes. Además, se analizarán estudios y reportes en materia de gestión hídrica, publicados por las autoridades correspondientes como la CEA, CONAGUA, SIAPA y la secretaria de Gestión Integral del Agua. Asimismo, se usará información geológica (e.g., estudios estratigráficos, ubicación de pozos de absorción, etc.), registrada por empresas autorizadas por el ITESO.

Una vez recabada la documentación necesaria, se procederá con el trabajo de campo. Se tomarán muestras de agua de puntos estratégicos, y se comenzará con los ensayos de bombeo y de trazadores. El motivo principal es identificar las propiedades hidrogeológicas experimentales, para su posterior contrastación con los datos documentados. Por su parte, las muestras recolectadas servirán para determinar la calidad del agua subterránea que abastece a la universidad.

Por última estancia, se analizarán las muestras de agua en los laboratorios del campus, con el equipo necesario para identificar la concentración de distintas sustancias importantes para evaluar su calidad. Del mismo modo, se procederá con el análisis de los resultados obtenidos, referentes a las propiedades hidrogeológicas del acuífero. Con ello, será posible caracterizar a detalle el sistema hidrogeológico que abastece con agua al ITESO.

5. Resultados y discusiones

5.1 Simulaciones hidrológicas en la zona de estudio

5.1.1 Definición de escenarios

Se trabajó la hidrología superficial de la cuenca de Arroyo Grande donde se crearon cuatro escenarios para analizar distintos modelos hidrodinámicos. En el primer escenario

solo se tomó en cuenta dos cauces, los cuales tienen 8 represas cada uno, así como se muestra en la siguiente imagen (Figura 79).

Represas en dos cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Grande

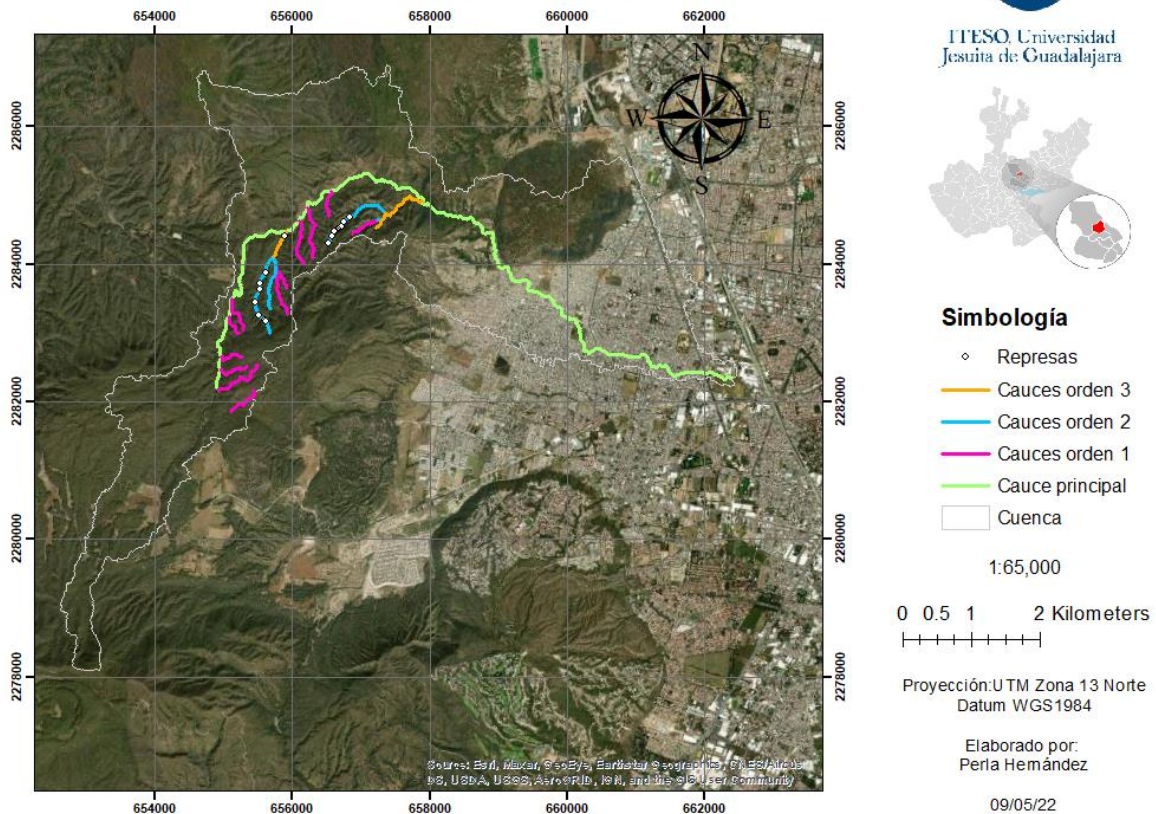


Figura 79. Mapa de represas en dos cauces secundarios en Arroyo Grande (escenario1).

El objetivo principal de este escenario fue saber si el programa IBER estaba funcionando de manera correcta. Es decir, fue el primer intento de simulación para reconocer el comportamiento de la hidrología del sitio. Estos afluentes fueron los primeros en modelar debido a que son los más extensos, de igual manera se seleccionaron ya que se ubican en la zona sur del Bosque de la Primavera, que es la zona afectada después del incendio.

Una vez que se realizó el reconocimiento de la hidrología, se generó segundo escenario con la selección de más cauces secundarios y la ubicación de sus respectivas represas. Donde se obtuvo un total de 72 represas distribuidas en la zona sur del Bosque. Como se menciona anteriormente, existen dos propósitos para estas represas: la infiltración y restauración del suelo desnudo en la zona sur del Bosque de la Primavera y disminuir las inundaciones en las zonas habitadas en las faldas de dicho Bosque. A continuación, se muestra el mapa de la ubicación de todas las represas en el segundo caso (Figura 80).

Represas en cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Grande

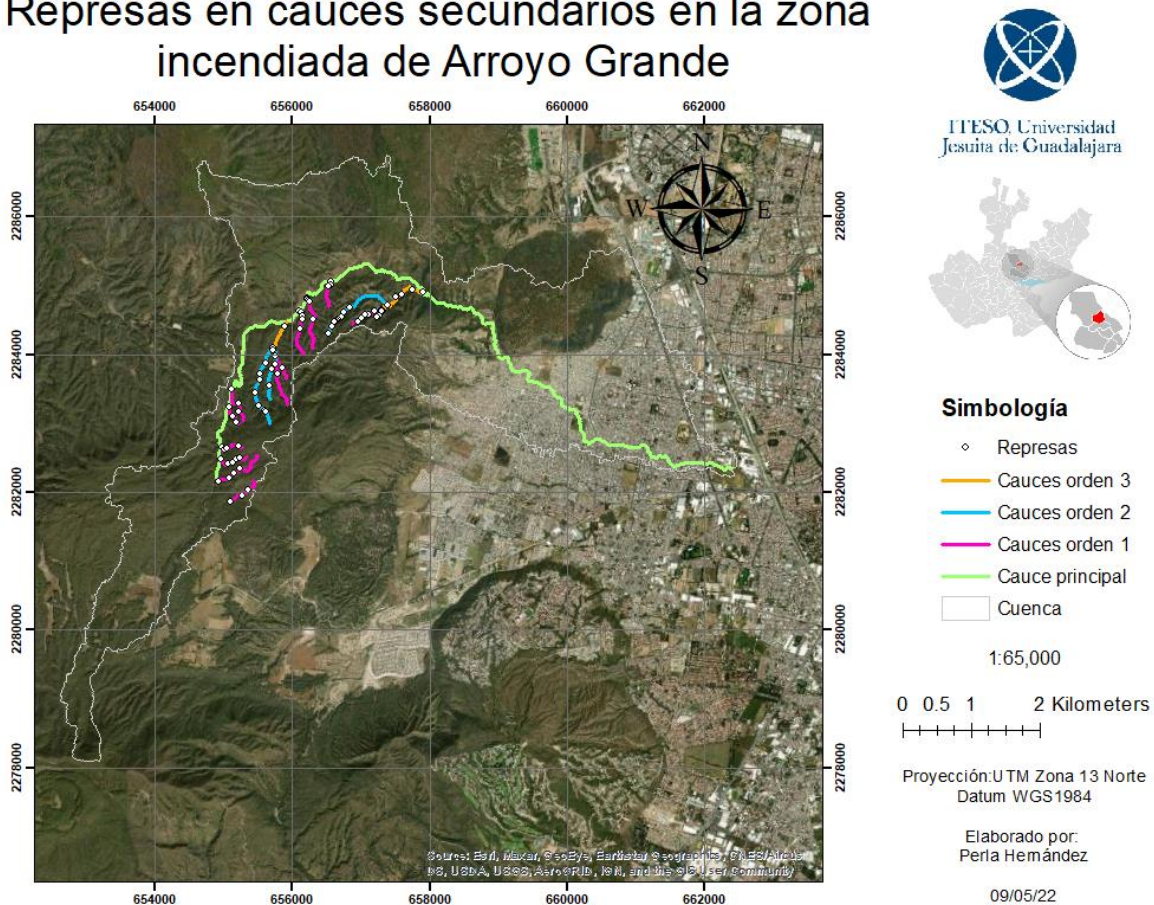


Figura 80. Mapa de represas en cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Grande (escenario 2).

Posteriormente, se realizó un tercer escenario donde se toma en cuenta el cauce principal de Arroyo Seco. Este escenario se inspiró en la propuesta de represas por parte

del gobierno de Zapopan, donde se toma en cuenta solo el cauce principal. Se considera que la propuesta de Zapopan solo se enfoca en reducir las inundaciones de la zona urbana, ya que no se está tomando en cuenta el área incendiada del Bosque. Por lo tanto, se realiza el tercer modelo donde se agregan 8 represas en el cauce principal tomando las mismas condiciones para la propuesta de las represas anteriores, teniendo como resultado 80 represas en total (Figura 81).

Represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande

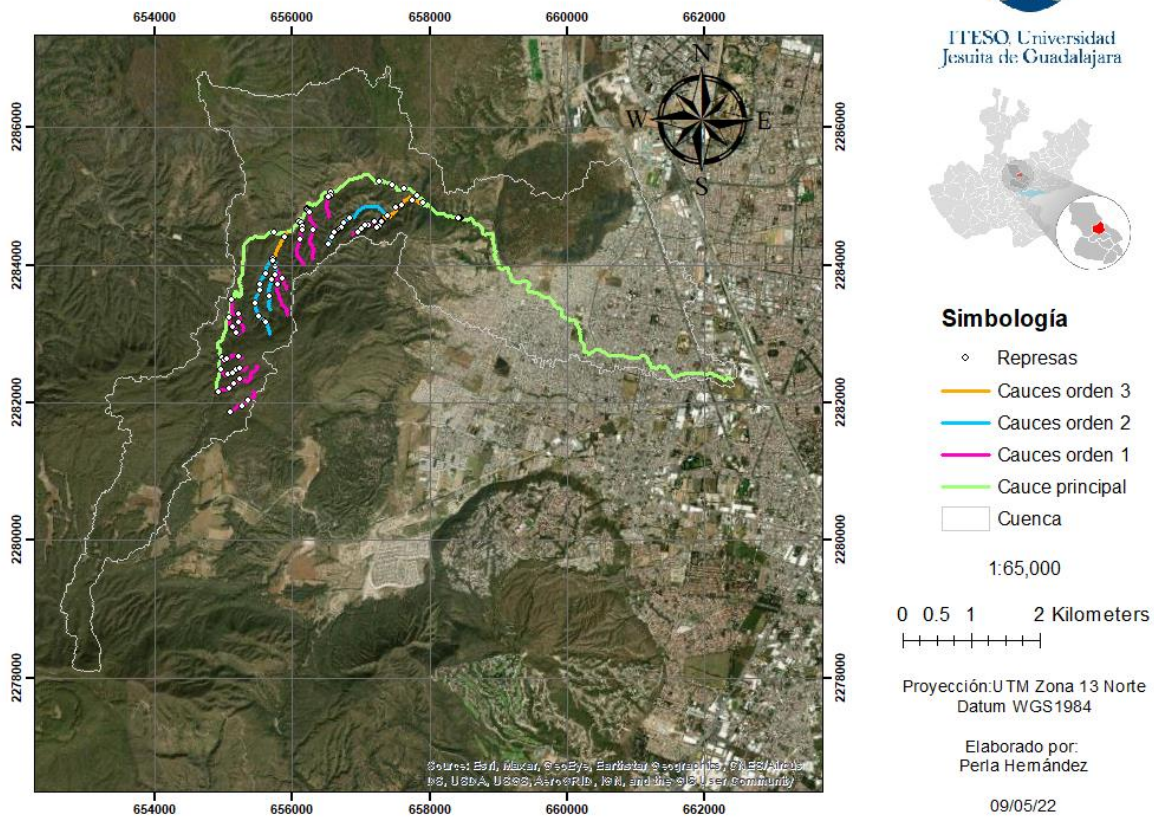


Figura 81. Mapa de represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande (escenario 3).

Por último, en el cuarto escenario se considera un pozo de infiltración aguas abajo antes de todas las represas, de manera que se tiene 80 represas y un pozo de infiltración, así como se muestra en la Figura 82. Se eligió ese sitio, debido a que es donde termina el cauce principal en la zona del Bosque y comienza la zona urbana, ya que se busca tener

un registro del caudal de escorrentía para un mejor control del gasto del agua de descarga. En este caso se modeló un pozo de 45 metros de profundidad con un caudal de 1 m³/día (Figura 82).

Represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande con pozo de infiltración profunda

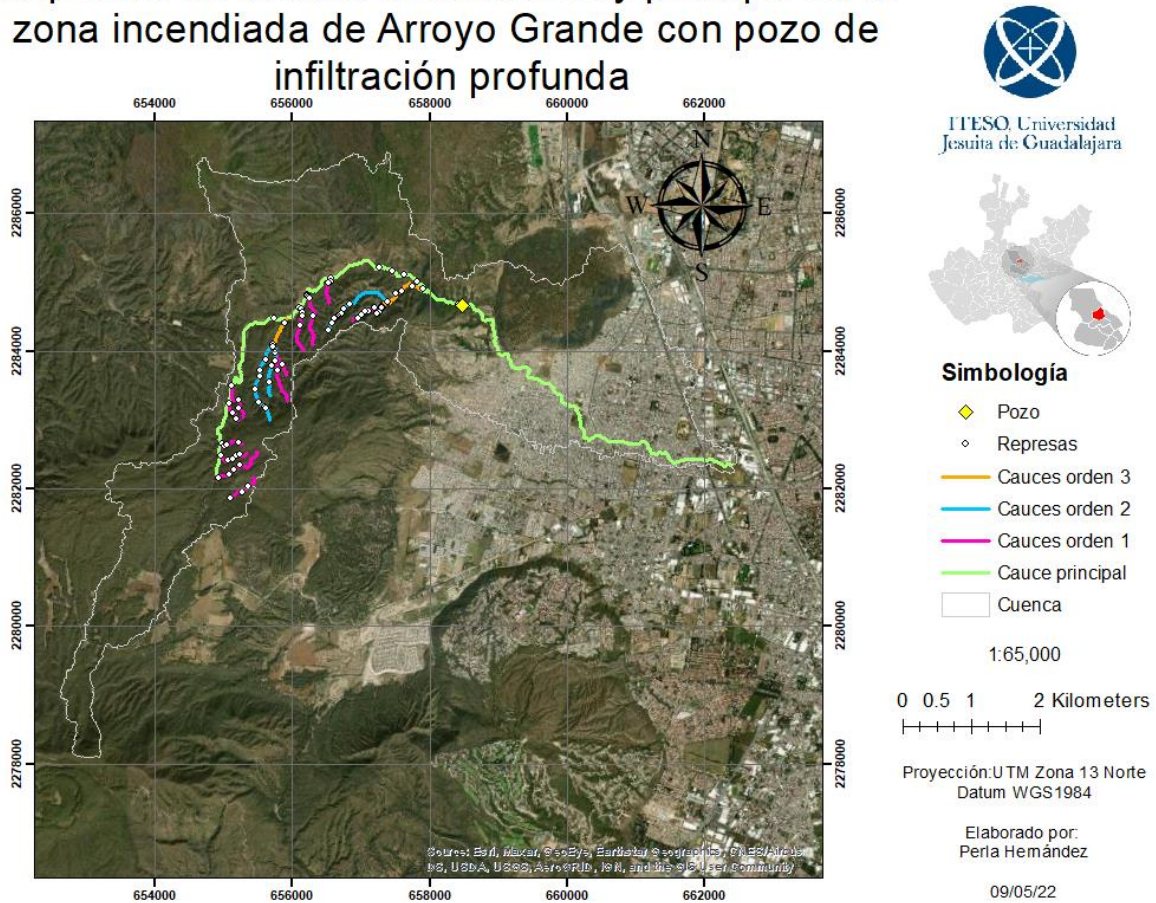


Figura 82. Mapa de represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada de Arroyo Grande con pozo de infiltración profunda en Arroyo Grande (escenario 4)

A continuación, en la siguiente tabla se presenta una síntesis de la descripción de los escenarios.

Tabla 14. Propuestas de intervención (descripción de escenarios).

No. Escenario	Ubicación de represas	Cantidad de infraestructuras
1	Dos cauces secundarios (los más extensos)	16 represas
2	Cauces secundarios	72 represas

3	Cauces secundarios y cauce principal	80 represas
4	Cauces secundarios y cauce principal	80 represas y un pozo de infiltración

Como se muestra en las imágenes anteriores, las propuestas se pretenden implementar en una cuenca de área 115.8 km², con alto potencial de erosión y remoción de suelo a causa de los incendios. Por lo cual, se realizaron cuatro diferentes escenarios, en los cuales poco a poco se iban añadiendo represas para poder observar de forma clara el caudal de agua que será retenido en el bosque. Asimismo, las condiciones en las que se realizaron las simulaciones difieren a un poco a comparación de lo que ocurre en la realidad, debido a la complejidad que implica un temporal de lluvia. Por lo cual, se trabajó con modelos que representarán el incendio que ocurrió en junio del 2021, ya que con el incendio se espera que las lluvias posteriores se tengan mayor escurrimiento superficial, debido a la falta de cobertura vegetal. Con esto se espera que el suelo desnudo de la zona incendiada del Arroyo Grande se recupere.

Anteriormente la ciudad contaba con calles empedradas, las cuales ayudaban a que el agua de lluvia se infiltrará. Sin embargo, por el crecimiento exponencial de la población la ciudad se fue impermeabilizando, de manera que ocurren inundaciones cuando el caudal de escurrimiento supera la capacidad de los colectores. No se han tomado medidas de mitigación para resolver el problema (Félix, 2005). Es importante mencionar que los escenarios tuvieron alteraciones debido a la presencia de objetos indeseados que solo provocan elevaciones falsas a lo largo del modelo digital de elevación (MDE), como son los árboles o arbustos, los cuales afectaron al obtener los perfiles de escurrimientos. También, se implementó de forma incorrecta el número de curva de suelos.

Como se sabe, la zona del Bosque de la Primavera es un área natural protegida, lo que indica que solo se pueden construir con materiales naturales del sitio. Es por ello que se recomienda el uso del geocostal para la construcción de represas. Los geocostales son fabricados con textiles que se degradan con el paso de los años, esos textiles se enlazan

entre sí y se pueden complementar con ramas y arbustos para estabilizar una presa, generalmente se llenan de tierra o arena del sitio; su tiempo de vida útil es mínimo de 10 años. La función del geocostal es controlar la erosión hídrica, reducir la velocidad de escurrimiento, detener azolvante y filtrar agua. Además, las fibras de textil de polipropileno permiten permeabilidad y tienen resistencia a ácidos y álcalis presentes en el suelo. En promedio, cada costal tiene un precio de \$20MXN; se estima que para formar un metro cúbico de represa con diseño piramidal se requieren de 20 a 24 costales aproximadamente. En este caso, se toma un volumen global de 20 metros cúbicos para cada una de las represas propuestas. Lo cual da un valor muy accesible del material. (GreenForestMéxico, 2018).

5.1.2 Resultados de hidrogramas

A cada escenario previamente mencionado se le asignó un hietograma de tormenta de 5 años y de 15 años, debido a que se espera que la cuenca quede restaurada aproximadamente en un período de 10 a 15 años. Asimismo, al terminar el proceso de simulación de cada escenario, se consultó el hidrograma de la descarga del caudal máximo del agua. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas donde se muestra el tiempo de simulación en función de caudal del agua de descarga y el área bajo la curva para tiempos de retorno de 5 y 15 años.

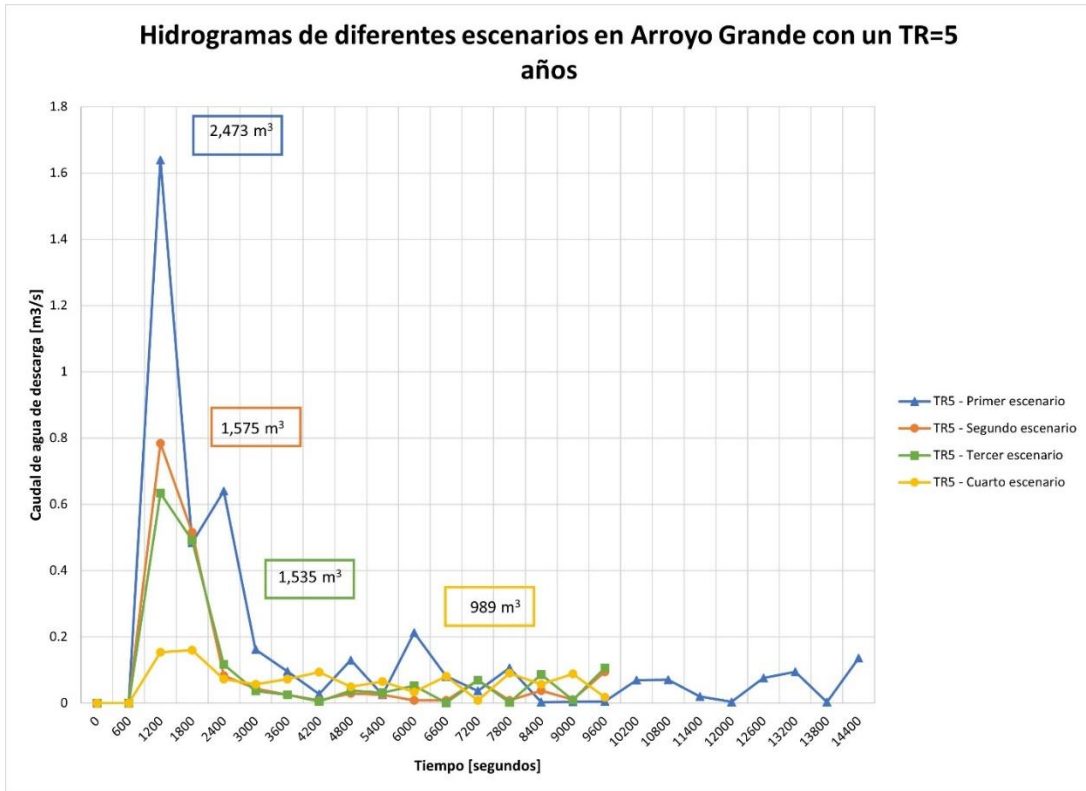


Figura 83. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.

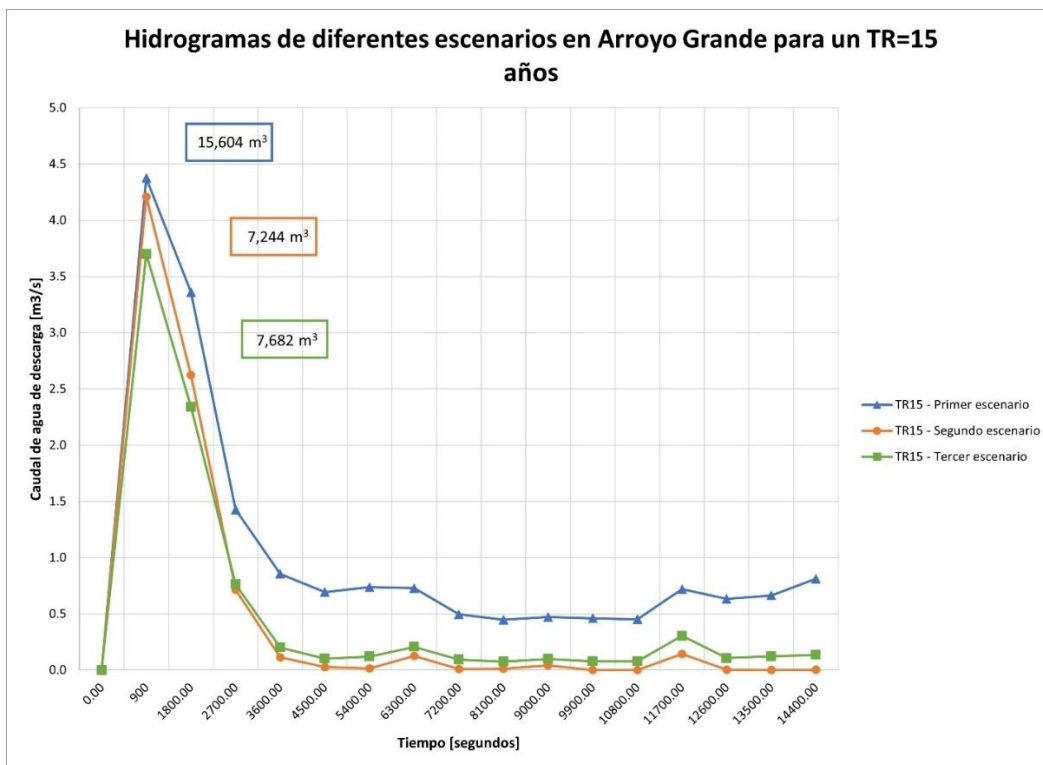


Figura 84. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.

En las gráficas anteriores se muestran los cuatro escenarios, por lo cual la línea de color azul le corresponde al primer escenario (16 represas en los dos cauces más largos), la línea naranja le corresponde al segundo escenario (72 represas en cauces secundarios en la zona incendiada), la línea verde corresponde al tercer escenario (80 represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada), y la línea amarilla corresponde al cuarto escenario (80 represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada y un pozo). Además, también se observan números dentro de pequeños cuadros de colores los cuales muestran el área bajo la curva que corresponde a cada escenario correspondiente. En la siguiente tabla se muestra de forma clara los datos obtenidos en cada hidrograma.

Tabla 15. Caudal máximo de descarga y área bajo la curva para un periodo de retorno de 5 años.

No. Escenario	Caudal máximo [m ³ /s]	Volumen de agua retenido en el bosque [m ³]	Volumen de agua que recibirá la ciudad [m ³]
1	1.64	-	2,473
2	0.78	898	1,575
3	0.63	939	1,534
4	0.16	1,484	989

Tabla 16. Caudal máximo de descarga y área bajo la curva para un periodo de retorno de 15 años.

No. Escenario	Caudal máximo [m ³ /s]	Volumen de agua retenido en el bosque [m ³]	Volumen de agua que recibirá la ciudad [m ³]
1	4.37	-	15,604
2	4.21	8,360	7,244
3	3.70	7,922	7,682

Como se observa en las gráficas y en las tablas anteriores el caudal máximo de descarga de agua disminuye notablemente, es decir a medida que al modelo se le asignan represas el caudal máximo de descarga disminuye debido a que el agua queda retenida

en las represas. Además, el área bajo la curva se interpreta como el volumen de agua que llegará a la ciudad, ya que con la ayuda de las represas el volumen de agua se queda retenido, por lo tanto, un porcentaje del agua se evaporará, otra será evapotranspirado por la vegetación y una pequeña parte se infiltrará al subsuelo.

Asimismo, en ambas tablas se muestra la cantidad de agua que se quedará retenida en el bosque, por lo cual los valores mostrados fueron calculados a partir de restas del primer escenario correspondiente, ya que se tuvo problemas al correr los modelos sin ninguna represa.

Para un tiempo de retorno de 5 años, se observó que el caudal de descarga disminuyó notablemente es decir la diferencia que se obtuvo entre el primer escenario (16 represas en dos cauces secundarios), contra el cuarto escenario (80 represas en cauces secundarios y principal en la zona incendiada, y un pozo de infiltración), fue de 1484 m^3 , por lo cual la diferencia refleja el volumen de agua que no llegará a la ciudad. Asimismo, también se pudo determinar que el caudal de descarga del pozo de infiltración es de $0.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

De igual manera, para un tiempo de retorno de 15 años, se observa que el caudal máximo de descarga disminuye. Sin embargo, al analizar la diferencia que existe entre el área bajo la curva del tercer escenario y el segundo escenario se observa que el tercer escenario tiene un área mayor que la del segundo. No obstante, eso no altera el buen funcionamiento del tercer escenario, ya que en este caso podría considerarse insignificante el área bajo la curva, y darle mayor importancia al caudal máximo de descarga, debido a que el caudal máximo se utiliza para el diseño de canales en sus peores escenarios.

La idea de esta propuesta es que con los sedimentos se rellene la pendiente estable. La pendiente estable es menor a la pendiente de flujo, por lo cual la velocidad es directamente proporcional a la pendiente; la velocidad es directamente proporcional a la tangente de rozamiento (fuerza tangente / superficie de rozamiento). De esa manera, si

baja la pendiente, baja la velocidad entonces la tangente es menor porque se espera que el cauce ya no vaya a erosionar. Se estima que esas represas permitan reducir arrastre de sedimentos hasta cuando se restaure la cuenca y regrese la cobertura vegetal en el suelo.

De esta manera, las represas funcionan como sistemas de infiltración que son especialmente útiles ya que contribuyen a disminuir las escorrentías superficiales (y por lo tanto las inundaciones) al mismo tiempo que favorece la recarga natural y artificial del agua subterránea (Woods-Ballard *et al.*, 2015). Además, para implementar un proyecto de recarga se necesita información hidrogeológica como el tipo de acuífero, superficial o profundo, determinar la capacidad de infiltración del suelo (m/día) y la conductividad (i.e., permeabilidad) hidráulica de este (m/día) (Ojeda, 2016). De la misma manera, es importante mencionar que la cantidad de agua que se infiltraría al bosque tiene una buena calidad.

Cabe mencionar que las represas que se proponen son prácticamente unas modificaciones a la naturaleza para su futura sostenibilidad, se habla de represas creadas con materiales naturales como rocas y costales de polipropileno tejido resiste a perforaciones y roturas. Por lo tanto, no se requiere de un mantenimiento futuro.

5.1.3 Mapas de calado máximo de la zona de estudio

A continuación, se presentan los distintos mapas de los resultados del calado en la zona del bosque de la subcuenca de Arroyo Seco, donde se puede observar que entre más represas se propongan, la profundidad del agua se concentra en distintos puntos de la cuenca. Primeramente, se presentan los cuatro escenarios con un tiempo de tormenta de 5 años.

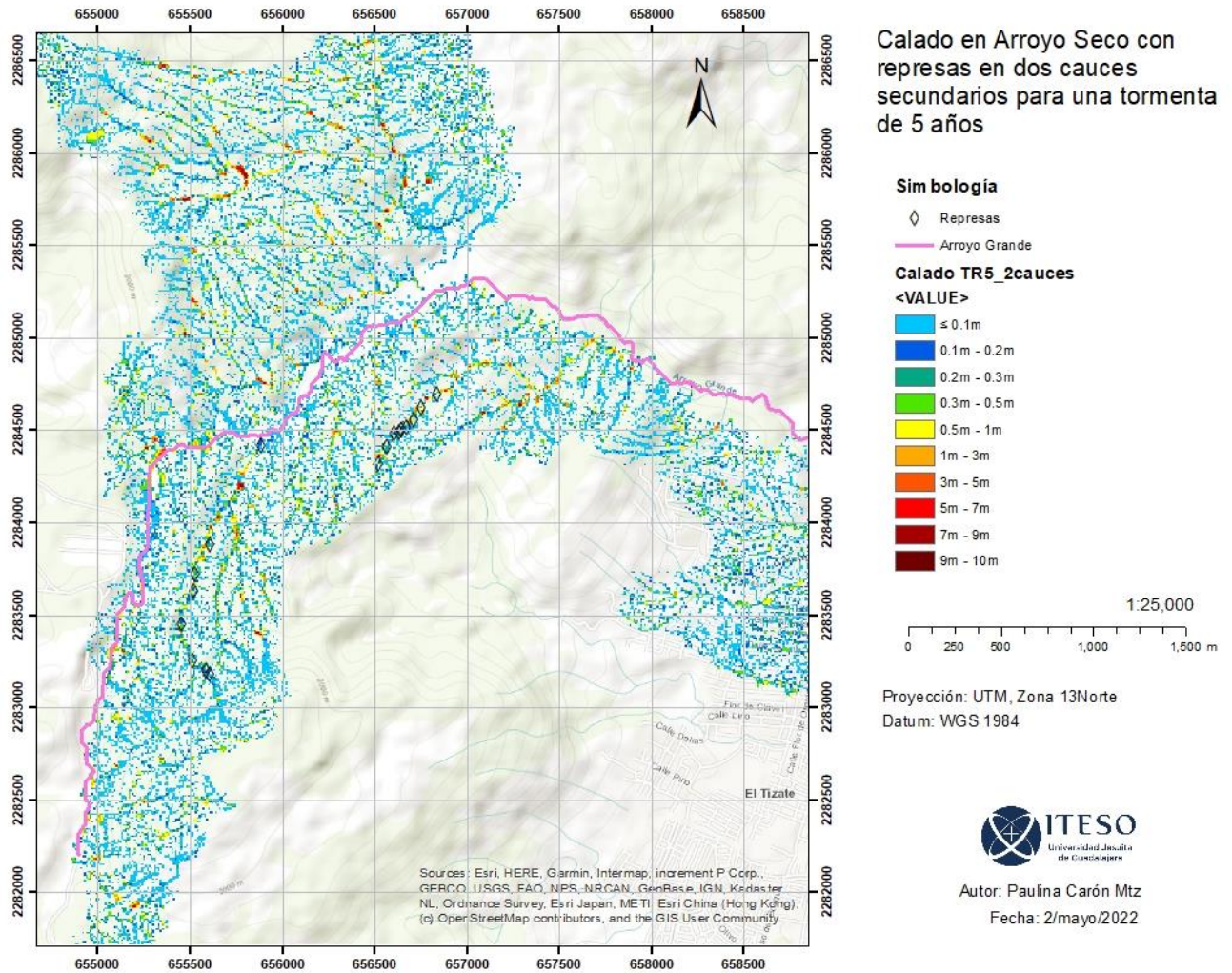


Figura 85. Mapa de calado máximo con represas en dos cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.

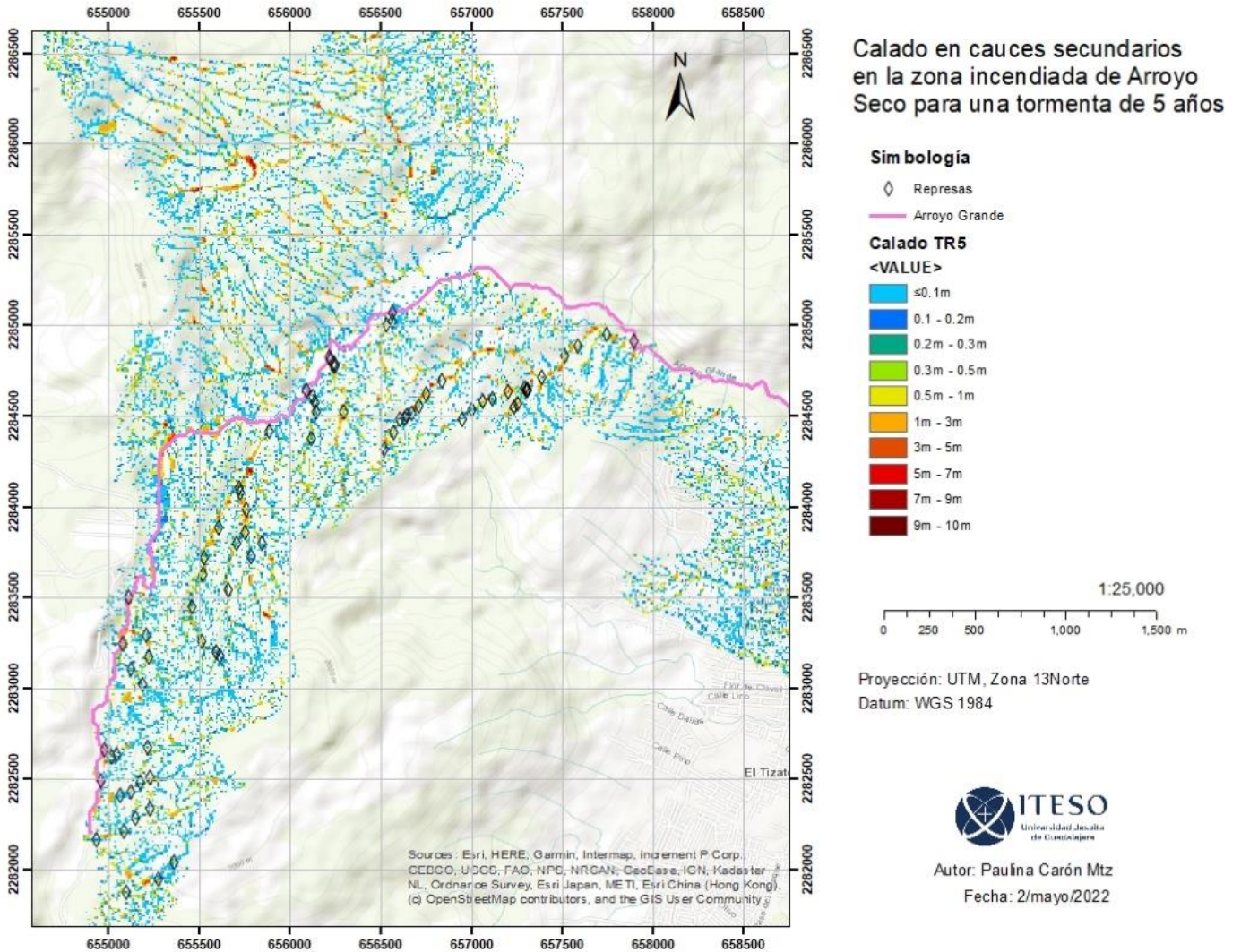


Figura 86. Mapa de calado máximo con represas en todos los cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.

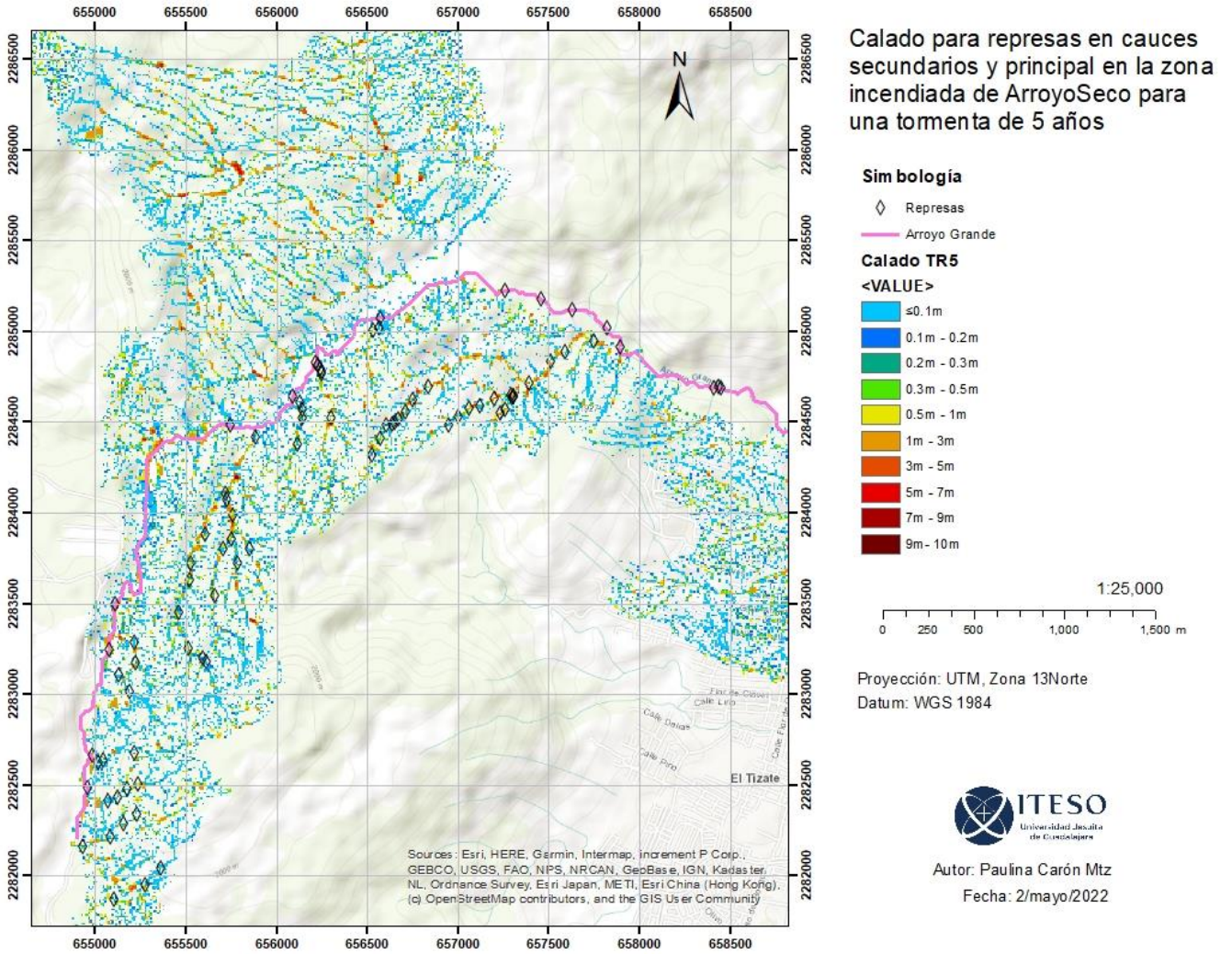


Figura 87. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios y cauce principal en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.

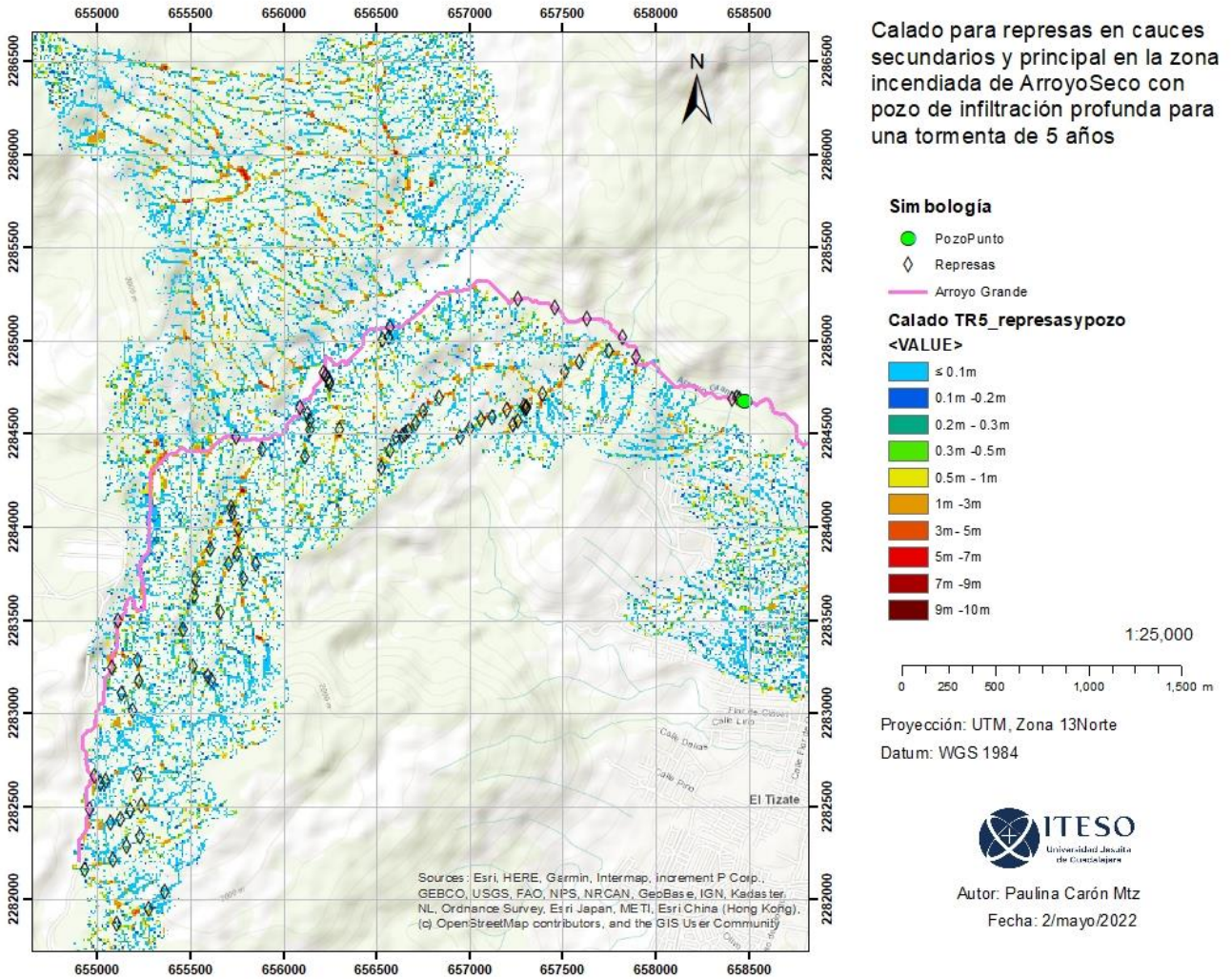


Figura 88. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios, cauce principal y un pozo de infiltración en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 5 años.

Cada mapa muestra cada uno de los escenarios, los cuales son descritos en la Tabla 14, previamente mencionada. Las represas están ubicadas en la zona sur debido a que es la zona incendiada con suelo desnudo, más erosionable y requiere de restauración. Como se puede observar, en el primer mapa se detectan muchas escorrentías de tonos azules donde la profundidad del agua puede llegar de 0 a 0.3 metros, lo que implica que el agua se esparce por toda la superficie y no se logra acumular para infiltración del suelo. Por otro lado, en el segundo y tercer mapa, se muestran más puntos con tonos de color verde, amarillo, naranja y rojo, lo que indica puntos con 0.5 hasta 7 metros de profundidad de agua. Esto representa puntos en la subcuenca donde se acumula el agua y son sitios

de retención para infiltración del suelo. Por último, con respecto al cuarto escenario, se puede observar como la presencia de agua es menor que en los tres casos anteriores, ya que, al tener un pozo de infiltración, eso permite que el agua se infiltre directamente al subsuelo y no se retenga en el suelo superficial.

Posteriormente, se realizan modelaciones de los mismos escenarios con una tormenta de 15 años como se muestra en las siguientes figuras.

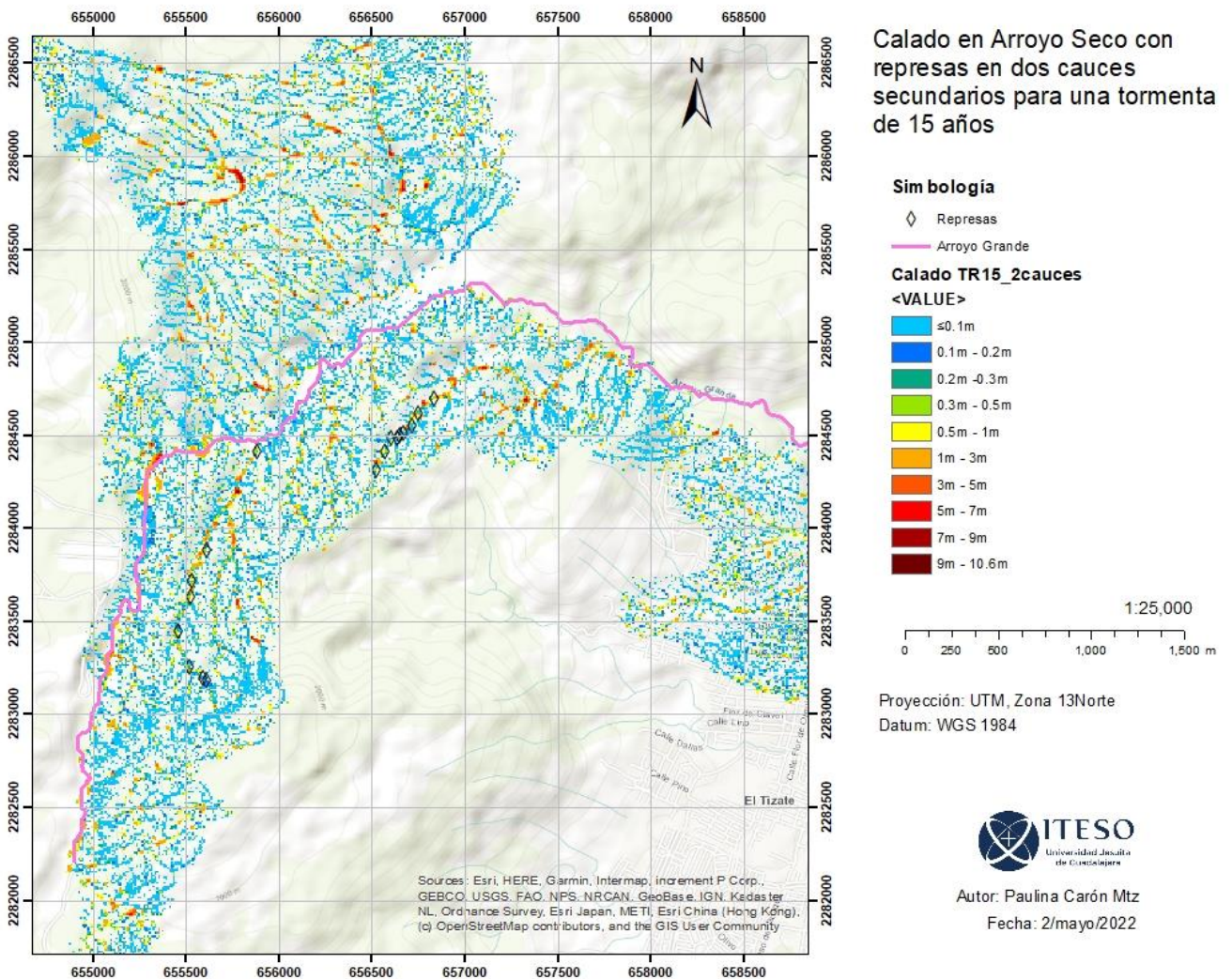


Figura 89. Mapa de calado máximo con represas en dos cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.

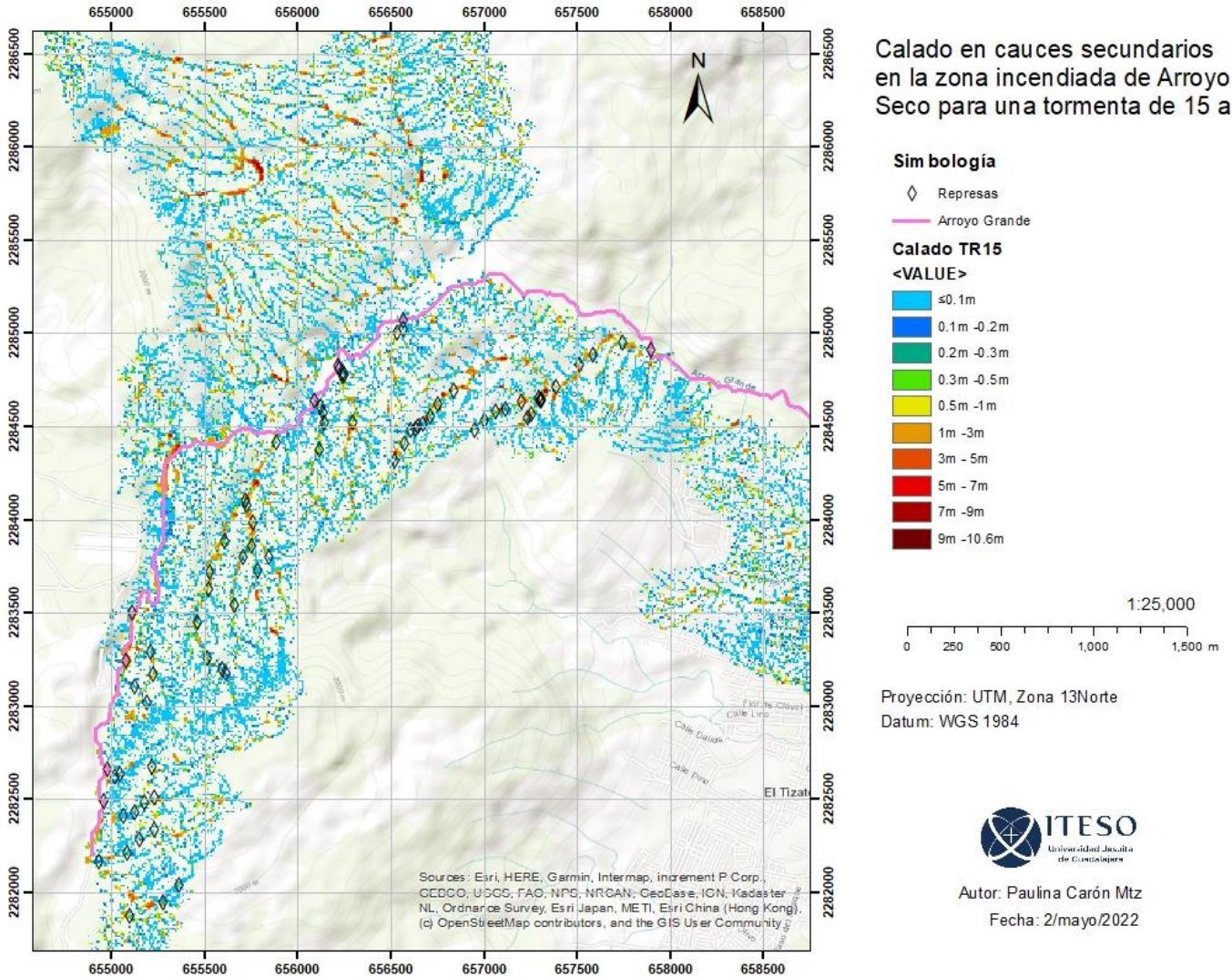


Figura 90. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.

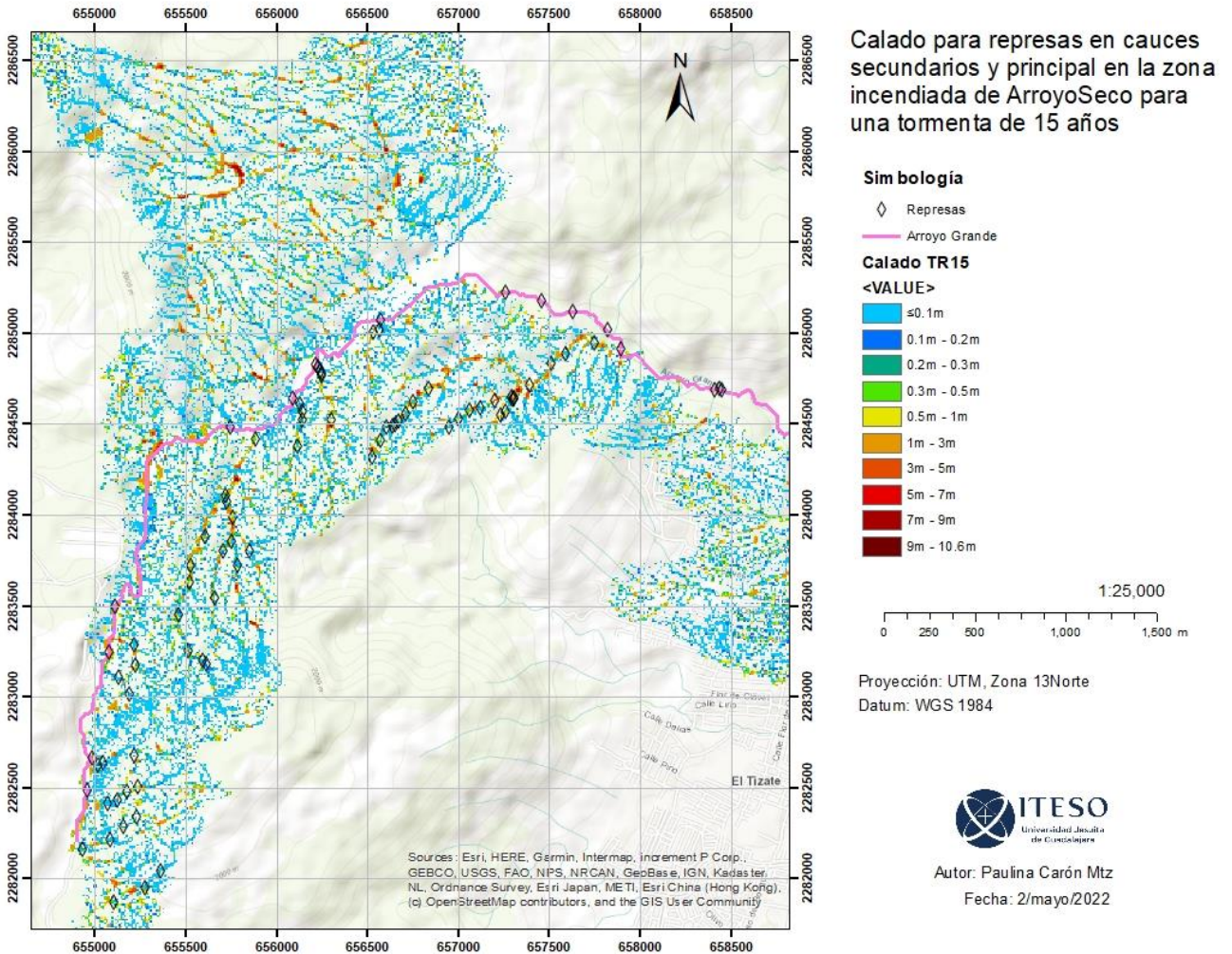


Figura 91. Mapa de calado máximo con represas en cauces secundarios y cauce principal en la zona incendiada de Arroyo Seco para una tormenta de 15 años.

Como se puede observar, en las simulaciones con tormenta de 15 años, la presencia de agua en la superficie es mayor. Se observa un calado de 0.1 metros más abundante en toda la subcuenca. De igual manera, se presenta el mismo comportamiento que en la simulación de tormenta de 5 años, donde en el mapa de represas tanto en cauces secundarios como en el principal se logra identificar que se presentan más puntos de 3 a 7 metros de profundidad en los sitios cercanos a donde están ubicadas las represas.

En los mapas de calado máximo se determina la profundidad del agua que se puede alcanzar en el suelo en temporal de lluvias. Se observó que en la zona en la que se encuentran las represas la profundidad del agua es mayor, por lo tanto, el agua retenida

se infiltrará. El agua que llega al subsuelo por medio de la infiltración depende de varios factores: la pendiente de la superficie del terreno, la vegetación, la profundidad del suelo y el tipo de roca (Craig *et al.*, 2007). Por lo cual, las represas harán que la pendiente baje, entre menos inclinada sea la pendiente entre dos puntos, más lento es el movimiento del agua. (Sánchez San Román).

Para terminar, en la siguiente tabla se muestra los resultados obtenidos de los diferentes escenarios para un tiempo de retorno de 5 años, en la cual se calculó los costos aproximados para la implementación de las propuestas.

Tabla 17. Costos aproximados para cada escenario con un tiempo de retorno de 5 años.

No. escenario	Ubicación de represas	Caudal máximo [m ³ /s]	Volumen de agua retenido en el bosque [m ³]	Volumen de agua que recibirá la ciudad [m ³]	Cantidad de infraestructuras	Costos aproximados de infraestructura [pesos MX]
1	Dos cauces secundarios (los más extensos)	1.64	-	2,473	16 represas	\$128,000 (más mano de obra)
2	Cauces secundarios	0.78	898	1,575	72 represas	\$576,000 (más mano de obra)
3	Cauces secundarios y cauce principal	0.63	939	1,534	80 represas	\$640,000 (más mano de obra)
4	Cauces secundarios y cauce principal	0.16	1,484	989	80 represas y un pozo de infiltración	\$940,000 (más mano de obra)

Finalmente, se puede concluir que el cuarto escenario es la mejor opción para disminuir la problemática de inundaciones en el AMG. Esto, gracias a que al comparar la cantidad de agua que se quedará retenida en el bosque contra los costos de la obra, se puede decir que es una alternativa viable. Debido a que es una estrategia para el aprovechamiento del agua de lluvia y también es una solución para la retención de sedimentos, ya que esta estrategia no necesita una readaptación de la infraestructura de

la ciudad, el cual ha sido una de las grandes problemáticas al querer solucionar el problema de las inundaciones de la AMG, por lo tanto, sería una solución para la restauración del ciclo hidrológico.

Es decir, se comprueba que la implementación de represas permite que el agua se retenga en la zona del Bosque y permita la restauración de esa área. Por otro lado, la implementación de un pozo de infiltración permite directamente la recarga del acuífero. Un acuífero tiene la capacidad de limpiar naturalmente el agua de contaminantes biodegradables gracias a las bacterias presentes, sin embargo, es difícil disolver o eliminar productos y/o contaminantes químicos, los cuales llegan por medio de la infiltración de agua contaminada por aguas residuales de fábricas, aceites de vehículos, etc. (Sánchez San Román). Por lo cual, uno de los objetivos es retener la mayor cantidad de agua en el bosque, debido a que cuando el agua entre a la ciudad ya no tendrá una calidad adecuada dependiendo el uso que se le quiera dar, por lo cual será más costoso.

Sin embargo, estas soluciones son temporales y no son fáciles de aprobar debido a la poca información que usualmente se les otorga a las comunidades involucradas en las zonas donde se construyen, lo que causa movimientos sociales de oposición a estos proyectos. Asimismo, se puede contratar a las personas aledañas al sitio, para que se involucren en la solución y generen ingresos.

5.2 Resultados del modelo hidrogeológico

A continuación, se muestra la simulación obtenida con Modflow para el pozo de 45 m de profundidad con una carga hidráulica constante por 14 días consecutivos.

Figura 92. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).

En la figura anterior se puede observar el movimiento del nivel piezométrico debido al funcionamiento del pozo; esto forma un cono invertido, con el que se puede saber hacia donde será el flujo del agua ocasionado por la infiltración.

Enseguida se muestra el análisis del volumen acumulado de agua infiltrada, tanto del modelo de este proyecto, como de Vanegas (2017) para su comparación:



Figura 93. Volumen acumulado de agua infiltrada según modelo propio

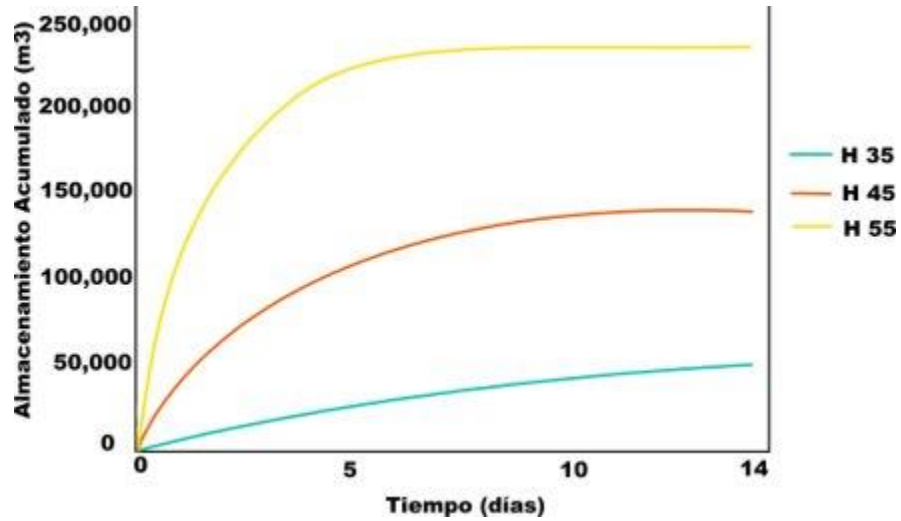


Figura 94. Resultados del modelo de (Vanegas L. , 2017)

La comparación de las gráficas anteriores muestra que al cabo de 14 días de infiltración constante se podría obtener una recarga de más de 6 millones de metros cúbicos según el modelo obtenido en este trabajo, mientras que Vanegas calculó una infiltración de alrededor de 140,000 metros cúbicos. Estos resultados fueron obtenidos sin tomar en cuenta los pozos de extracción existentes en el área de estudio.

A continuación, se muestran los resultados del modelo con los pozos de extracción incluidos:

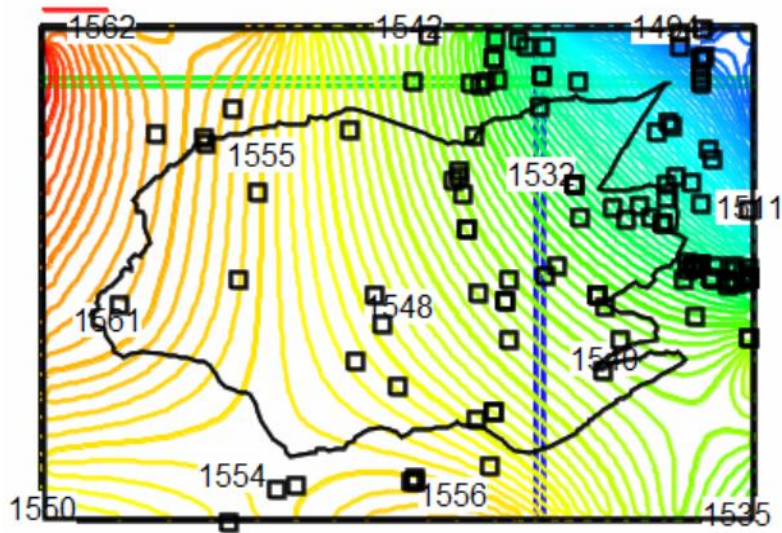


Figura 95. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.

Se puede observar que los 115 pozos de extracción del área de estudio no provocan un cambio notorio en el comportamiento del acuífero a esta escala. Es importante tener en cuenta que el SIAPA tiene el registro de la ubicación, la profundidad y el caudal extraído de cada pozo, pero en realidad no hay ningún tipo de monitoreo para cerciorarse de que se está extrayendo el caudal que se dice. Podría haber pozos no registrados, o los que el SIAPA conoce podrían estar extrayendo más agua.

Los parámetros hidrogeológicos involucrados, como la porosidad o la permeabilidad tienen un rol muy grande en este modelo, por lo que también hay que tener en cuenta que mientras este no sea calibrado con datos reales medidos en piezómetros, los resultados a los que se llegan podrían estar discrepando de forma significativa con la realidad.

5.3 Caracterización del sistema hidrológico y estimación del balance hídrico

A lo largo del semestre se buscó generar un plan de trabajo para obtener un diagnóstico del sistema hidrológico en el ITESO, así como de estimar su balance hídrico; ambos de manera preliminar. Este plan de trabajo contempla la instalación de una red de control de los recursos hídricos, donde se monitoreen variables como precipitación, infiltración, evapotranspiración, y comportamiento del agua subterránea. Esto con el fin de conocer

mejor las propiedades hidrológicas que se tienen en la región sur-poniente de la ciudad, y validar los modelos numéricos, de modo que los resultados aquí obtenidos puedan ser extrapolados y utilizados en toda el AMG.

El trabajo estará constituido de documentación, trabajo de campo y laboratorio, así como de análisis e interpretación de datos. La recopilación documental permitirá obtener la información disponible, con el fin de analizarla para su comparación con la obtenida en campo. Después, se buscará la obtención de datos experimentales, que serán analizados en laboratorio, para ser contrastados con la información anterior. A partir de esta instancia, se podrá generar un diagnóstico hidrológico preliminar de la zona de estudio. Por último, se buscará evaluar la hidroquímica, mediante campañas de muestreo, con el propósito de completar la caracterización del área de estudio.

Se realizará una recopilación de información documentada con investigaciones científicas relevantes. Además, se analizarán estudios y reportes en materia de gestión hídrica, publicados por las autoridades correspondientes, como la Comisión Estatal del Agua de Jalisco (CEA), CONAGUA, SIAPA, COCURS y la Secretaría de Gestión Integral del Agua. Asimismo, se usará información geológica, topográfica, hidrométrica y climatológica, proveniente de informes técnicos.

Una vez recabada la documentación necesaria, se procederá con el trabajo de campo. Se tomarán muestras de agua de puntos estratégicos, y se comenzará con la instalación, calibración y adaptación de los instrumentos de control, así como con los ensayos de bombeo y trazadores. En última instancia, se analizarán las muestras de agua en los laboratorios del campus o externos, con el equipo necesario para identificar la concentración de distintas sustancias y se procederá con el análisis de los resultados obtenidos, referentes a las propiedades hidrogeológicas. Tras concluir con estas fases, será posible caracterizar el sistema hidrológico y estimar el balance hídrico del ITESO. Los equipos necesarios para la red de monitoreo, al igual que su importancia, se explican con mayor detalle enseguida.

Se prevé que la red de control del agua dentro de la universidad contenga puntos de muestreo y recolección de datos, que puedan aprovecharse después para tomar decisiones benéficas para el medio ambiente, la academia y la sociedad. Un factor indispensable para llevar un control hídrico adecuado en el campus es la instalación de piezómetros, estaciones meteorológicas e hidrométricas, y lisímetros.

El agua subterránea es muy importante, especialmente para el ITESO; ya que es su principal fuente de abastecimiento. Entonces, es imperativo comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico del campus. Para ello, sería útil la instalación de la red de piezómetros, que ayuden a monitorear la calidad y cantidad del agua en el acuífero, así como sus propiedades (e.g., T , k , t_r , θ_e , etc.) (Nistor *et al.*, 2020).

Una fase valiosa del ciclo hidrológico es la precipitación, gracias a que es aquí donde el agua inicia su travesía por el suelo y subsuelo. Por lo tanto, se esperan conocer datos sobre la cantidad de agua llovida, al igual que otros valores relacionados directamente con el ciclo del agua (e.g., temperatura, dirección y velocidad del viento, irradiación, etc.) (Román, 2015). Lo cual, se busca resolver con las estaciones meteorológicas en operación, utilizando información momentánea e histórica. Después de cualquier tipo de lluvia o tormenta, se generan escorrentías superficiales, que tienen que ser contabilizadas para obtener un balance hídrico, ya que es agua pluvial que no se infiltra ni se evapora dentro del área de estudio. Para ello, se piensan instalar distintas estaciones hidrométricas, que cuenten con limnógrafos. Con ayuda de estos y de un micromolinetete, se podrá calcular el caudal que pasa por los arroyos más importantes dentro del campus (Figura 96).



Figura 96. Ubicación sugerida de estación hidrométrica en el ITESO.

Para estimar el balance hídrico, se deben de conocer todas las entradas y salidas de materia del sistema. Una de las salidas más difíciles de medir en el ciclo del agua es la evapotranspiración, que abarca el agua retenida en el suelo que después es evaporada y la transpiración generada por la vegetación de la zona. Sin embargo, existen equipos que se instalan directamente en el suelo que ayudan a determinar esta variable tan compleja. Estos equipos se conocen como lisímetros y constan de un pedazo de suelo y vegetación similares a los del área en cuestión, que puede ser removido y pesado conforme sea necesario. Así, al tener los registros de cuánto llueve, se puede estimar (por diferencia de masas) la cantidad de agua que fue evapotranspirada por el suelo y la fauna de la zona (Silicani, 2015). Por lo tanto, también se espera instalar algunos lisímetros a lo largo del campus.

Dentro de las instalaciones de la universidad se cuenta ya con algunos equipos de monitoreo hídrico en operación; así como con algunos discontinuados que podrían ser adaptados para la red de control. Entre ellos, se encuentran dos estaciones meteorológicas que operan en el edificio Q5 y en el Parque Tecnológico, así como un pozo en las Canchas Sur, el cual dejó de funcionar años atrás. Así pues, se determinaron las ubicaciones más adecuadas para instalar los instrumentos propuestos, a través de

los cuales se podrá obtener un panorama claro del funcionamiento hidrológico del ITESO
Figura 97.

Equipos necesarios para el proyecto "Campus Hidrológico"

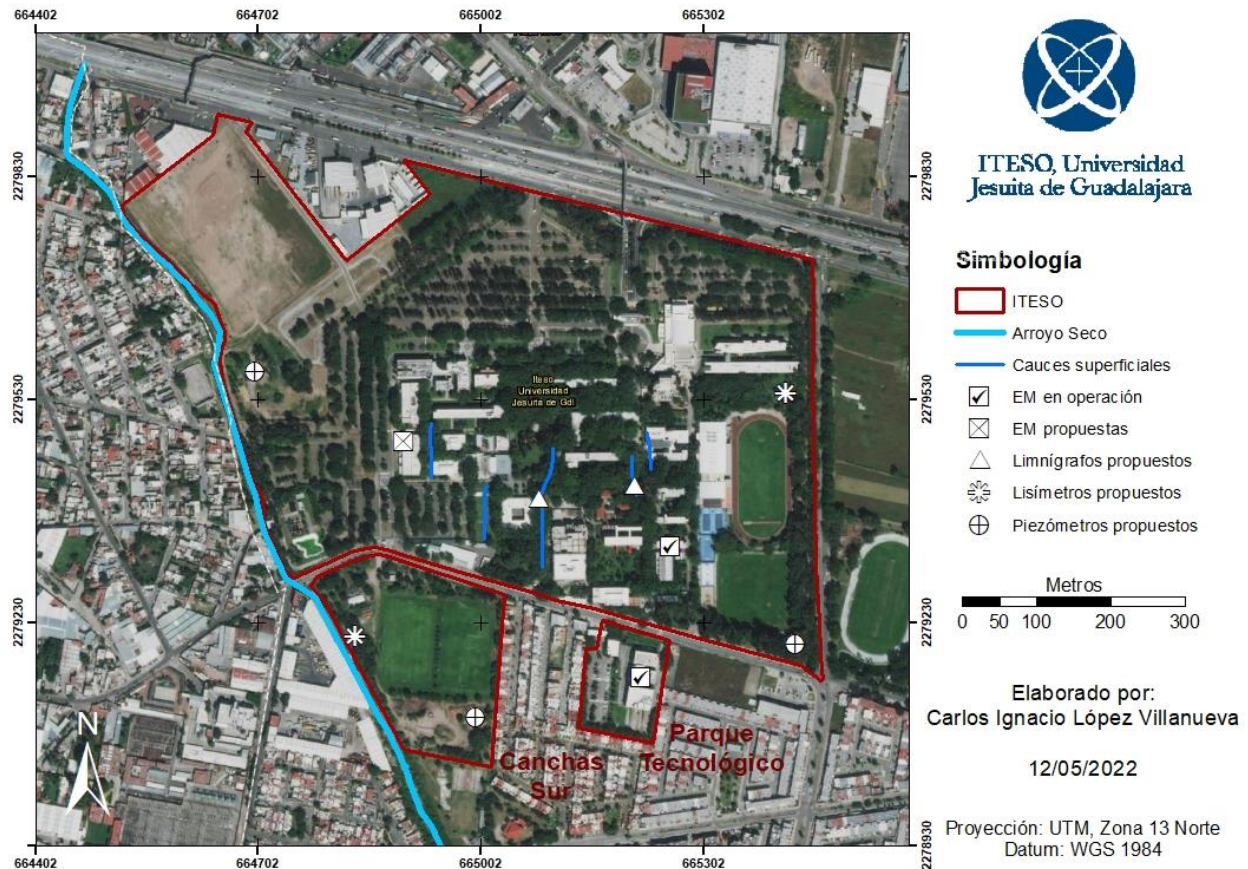


Figura 97. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto "Campus Hidrológico".

6. Conclusiones

Durante las últimas décadas el AMG ha tenido un gran problema con la mala gestión del recurso hídrico. Todo esto comenzó por el crecimiento acelerado de la población y por los proyectos de infraestructura hidráulica injustificados. El objetivo en Primavera 2022 fue plantear aportaciones que contribuyan la restauración del ciclo hidrológico dentro de la ciudad. Esto logrará reducir el volumen de agua que llegará a zonas urbanas, que se

encuentran cerca de las faldas del bosque de La Primavera, durante la temporada de lluvias en la subcuenca “Arroyo Seco”.

Este semestre solo se pudo trabajar con dos hietogramas con un tiempo de retorno de 5 y 15 años. Eso debido a que en el de 25 años hubo errores no identificados al obtener los resultados, ya que los valores fueron incongruentes. Además, al trazar los perfiles de escurrimiento de cada cauce se pudo observar que había elevaciones incongruentes, por lo cual se determinó que el MDE no es el correcto, o tiene mucho ruido.

Asimismo, al obtener los mapas de peligrosidad se observó que hubo un error en los números de curva ingresados, ya que el cauce principal de Arroyo Grande en el parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca, a partir de la cobertura del suelo, se determinó como cero, por lo cual al analizar los mapas de peligrosidad se observaba que esa zona no tenía peligro, lo cual es incongruente con la realidad. Del mismo modo, un área de mejora podría ser volver a cargar todos los ASCII a IBER para obtener un mejor resultado, y no obtener valores incongruentes como al momento que se quiso cargar un pozo al modelo que tiene un tiempo de retención de 15 años, el cual se obtuvieron valores como si el pozo estuviera generando agua.

El frente de hidrogeología encontró que hay una discrepancia muy grande entre el modelo elaborado en este proyecto y el de Vanegas (2017). En ambos casos, las simulaciones muestran un gran potencial de infiltración en los suelos del área metropolitana de Guadalajara, que podría ayudar a disminuir las inundaciones que año con año son habituales en ciertas zonas de la ciudad. Para el futuro de este modelo, es necesario contar con un pozo de monitoreo del que se puedan obtener datos reales de infiltración para calibrar el modelo hidrogeológico y mejorar su exactitud.

En lo que al proyecto Campus Hidrológico respecta, se determinó que es imperativa su aplicación para ser punto de partida de distintos proyectos que busquen la creación de planes de gestión integral del agua. Tal es el caso del modelo hidrogeológico

desarrollado a lo largo del semestre, que carece de información más precisa, medida directamente en el área de estudio. La necesidad de este plan de trabajo se debe gracias a que la metodología detallada en el presente documento es suficiente para ser aplicada y extrapolada en la región sur-poniente de la ciudad, en toda el AMG, e incluso en otros países. Además, reduciendo la escala a nivel del campus, este trabajo ayudaría a estimar la cantidad y calidad de agua que entra y sale del sistema hidrológico que abastece al ITESO, comprendiendo mejor su funcionamiento y estimando, preliminarmente, su balance hídrico.

No obstante, existen algunos factores de éxito indispensables como la inversión de presupuesto para la instalación de los equipos, la disponibilidad de facilitar información de todas las partes involucradas, al igual que el establecimiento de relaciones estratégicas con agentes relevantes a la gestión de los recursos hídricos. Dicha relevancia depende del conocimiento que estas partes puedan aportar al estudio, a la cercanía con la universidad, a la jurisdicción gubernamental o al papel que algunos departamentos jueguen dentro de la universidad.

6.1 Próximos retos del proyecto

Durante el presente semestre se avanzó mucho en cada uno de los distintos frentes de trabajo e incluso se obtuvieron resultados. Sin embargo, es necesario continuar mejorando distintos aspectos para acercarse cada vez más a modelos más apegados a la realidad; dentro de los cuales se encuentra el desarrollo de experimentos y ensayos. De modo que, se presentan a continuación los próximos retos del proyecto seccionados por frente de trabajo.

Los distintos retos por cubrir en el frente de las modelaciones de hidrología superficial serían integrar el número de curva correcto que le corresponde a la zona por donde pasa el Arroyo Grande. De igual manera, se espera volver a correr el modelo con las represas para visualizar cómo reacciona la peligrosidad en la zona urbana del AMG.

En la parte de hidrogeología, un reto muy grande es incluir datos de pozos que están en alrededor de la falla geológica entre el bosque de La Primavera y la zona urbana, con el fin de darse cuenta de las afectaciones que esta falla produce en el agua subterránea, pudiendo ser el caso de aportación de agua limpia o con algún contaminante, o que por el contrario, se esté filtrando y “perdiendo” agua por esa falla.

A lo largo del semestre se desarrolló el plan de trabajo a seguir para establecer una red de control de los recursos hídricos dentro del campus universitario. Sin embargo, ya que durante este semestre se estaba en temporada de estiaje, se espera que en los próximos meses se lleve a cabo la instalación de los equipos de monitoreo. El temporal de lluvias es el momento del año indicado para comenzar a calibrar y poner en operación los distintos instrumentos. Gracias a que comienzan los eventos de precipitación, se generan causas superficiales y se eleva el nivel piezométrico. Esto facilitaría la aplicación de ensayos de bombeo y trazadores, que permitan estimar los parámetros hidrogeológicos del sistema y, simultáneamente, un balance preliminar hídrico del agua del ITESO.

6.2 Reflexiones

Paulina Carlón

Considero que durante mi participación en este proyecto mi intelecto como ingeniera ambiental se ha desarrollado más. He puesto en práctica varios de los cursos de la carrera como son temas de Hidrología, Mecánica de Fluidos, Gestión de Cuencas, Sistemas de Información Geográfica, entre otros. Además, he adquirido nuevos conocimientos relacionados con ingeniería civil como son Hidráulica, Estructuras, entre otros. Por ello, mi aprendizaje en este proyecto ha sido muy enriquecedor debido a los cursos que complementan la carrera de ingeniería ambiental enfocados en el sector hidrológico. Por otro lado, he mejorado mi práctica en programas como AutoCad y ArcMap, de igual manera, aprendía a utilizar el software IBER que se utiliza para modelación hidrodinámica, es una herramienta interesante ya que a partir de condiciones, puede demostrar y simular los flujos de agua en un área determinada considerando factores importantes como es la infiltración de cada tipo de suelo, el flujo del agua dependiendo de la topografía, y demostrar resultados de calado máximo,

velocidad del flujo, dirección del flujo, puntos de peligrosidad máxima entre otras representaciones. Me es agradable el hecho de aprender nuevos conceptos y técnicas relacionadas con el área hidrología e hidráulica, como son los perfiles de escurrimiento, su relación con la topografía e intensidad de precipitación, al igual que el efecto que tienen las represas en la velocidad del escurrimiento en cada cauce. De igual manera, es muy interesante el asimilar cómo se comporta el ciclo hidrológico en la cuenca del Arroyo Seco y cuales técnicas se recomiendan utilizar para la restauración del suelo desnudo después del incendio en la zona sur del Bosque de la Primavera. Por otro lado, se puede concluir que la propuesta de las represas es un avance para lograr la sostenibilidad con respecto a la hidrología en Guadalajara. Con base en los resultados, como se muestra en los hidrogramas, la implementación de represas incide a la reducción del volumen de agua de escorrentías que llegarán a la zona urbana que probablemente generen inundaciones; de igual manera, se permitirá infiltrar todo ese volumen de agua en el suelo de la zona del Bosque. Lo que permitirá una recarga natural en la subcuenca de Arroyo Seco y una restauración a la vegetación del Bosque. Hoy en día, el tema del agua es una problemática en la mayoría de los municipios de México debido a la falta de aprovechamiento de este recurso. Como se menciona al principio de este documento, las principales problemáticas que sufre el AMG son las inundaciones y la escasez de agua; debido a su deficiencia en gestión de agua. Por lo tanto, la propuesta que se trabajó en este semestre de restauración del Bosque de la Primavera contribuye a la solución de reducir la probabilidad de inundaciones y preservar el ecosistema. Sin embargo, creo que faltó alguna salida de campo para visualizar que la localización de cada una de las represas sea viable.

Héctor Almaraz

Trabajar en el modelo hidrogeológico fue algo muy interesante ya que conocía muy poco acerca de esta área de estudios. Este proyecto me permitió conocer y aprender a manejar paquetes de software libre que son de mucha utilidad para la modelación de flujos subterráneos como lo es el software *Modflow*. Otra cosa que me gustó fue entender la forma en que se ha afectado el ciclo hidrológico debido a la actividad humana y el crecimiento de la ciudad, provocando una lista de problemas. Ahora veo que para buscar

soluciones a esto es necesario un trabajo interdisciplinario muy complejo que abarca distintos frentes como lo fueron la hidrología superficial, la calidad del agua, y la hidrogeología, entre otros.

Me siento muy satisfecho con los aprendizajes que logré adquirir con el PAP y también por ser parte de este proyecto que busca proponer soluciones tecnológicas a problemas sociales que nos afectan a todos como las inundaciones en la ciudad, el desaprovechamiento del agua pluvial y la gestión del agua subterránea. Trabajar en este proyecto fue un reto del que rescato sobre todo la importancia de trabajar en equipo para poder dividir una problemática en apartados que puedan ser estudiados a profundidad y luego integrarlos para ver una imagen más clara de las soluciones.

[Perla Hernández](#)

Trabajar en la parte de hidrología superficial me hizo relacionar las materias que he llevado en ingeniería ambiental como modelos matemáticos de calidad del agua. Quedo muy satisfecha con el trabajo realizado durante el semestre, así como los nuevos conocimientos adquiridos. Ya que, aprendí a manejar nuevos programas como IBER y AutoCAD. Asimismo, gracias a este proyecto me pude acercar un poco más a la parte de ingeniería civil, la cual me resulta bastante interesante, de manera que pude aprender las diferentes aplicaciones que se le puede dar a la hidráulica. Además, me gustó el enfoque que se le da al proyecto, en el cual vemos temas sobre el agua, de tal manera que este PAP me está ayudando a descubrir el enfoque que le quiero dar a mi carrera después de graduarme. Por otro lado, quisiera agradecer a los profesores que me guiaron en el semestre, ya que siempre resolvieron mis dudas con mucha paciencia. Como ya lo había mencionado antes, disfruté bastante los conocimientos adquiridos en este proyecto, por lo cual recomendaría plenamente este PAP.

[Carlos Ignacio López](#)

Comencé mi participación en lo que antes era conocido como el frente de calidad del agua, pensando que solo iba a trabajar en mejorar un modelo experimental que desarrollaron alumnos del semestre pasado. Por medio de él se buscaban determinar propiedades hidrogeológicas del acuífero del ITESO, pero quedaba todavía mucho por

recorrer para llegar a los resultados esperados. No obstante, el proyecto evolucionó, convirtiéndose en la aplicación *in situ* de dicho modelo experimental y mucho más. A lo largo del semestre se encontró que existían diversas variables que también valía la pena cuantificar y no se habían tomado en cuenta. Esto gracias a que es muy complicado monitorear el agua subterránea si no se tiene control sobre las demás fases del ciclo hidrológico (e. g., precipitación, escorrentías superficiales, evapotranspiración, etc.). Por lo tanto, se estableció el plan de trabajo para caracterizar el sistema hidrológico y el balance hídrico del ITESO, explicado con detenimiento en las secciones pasadas.

En definitiva, trabajar en este frente del PAP me ayudó a mejorar mi capacidad de solucionar problemas, pensar de manera innovadora y trabajar en equipo eficientemente. Sin embargo, la mayor cualidad que desarrollé durante este semestre fue la habilidad de buscar el beneficio de la sociedad y del medio ambiente, a través de la aplicación de mis conocimientos. Considero que este aprendizaje se alinea a los ideales jesuitas, lo cual me parece muy enriquecedor. Gracias a ello, mi ética profesional ahora abarca más allá de solo trabajar de la manera adecuada, ya que aprendí a también buscar aquellos trabajos que tengan un bien comunitario y aporten al cuidado de la casa común, fundamentos necesarios para todo profesionalista del ITESO.

Bibliografía

- Abellán, A. (2016). *Áreas de biorretención*. Obtenido de SuD Sostenible: <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/areas-de-biorretencion/>
- Agrawal, A., Pandey, R. S., & Sharma, B. (2010). Water Pollution with Special Reference to Pesticide Contamination in India. *Journal of Water Resource and Protection*, 2, 432-448. doi:10.4236/jwarp.2010.25050
- Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (febrero de 2000). *World Water in 2025*. Obtenido de University of Kassel: <http://www.env-edu.gr/Documents/World%20Water%20in%202025.pdf>

- Arquitectura y empresa. (2021). *Techos Verdes*. Obtenido de Arquitectura y Empresa: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/techos-verdes>
- Artmann, M. (2014). *Assessment of Soil Sealing Management Responses, Strategies, and Targets Toward Ecologically Sustainable Urban Land Use Management*. Obtenido de SpringerLink: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-014-0511-1>
- Auge, M. (2022). *Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias Geológicas*. Obtenido de AGUA FUENTE DE VIDA: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Agua-fuente-de-vida.pdf>
- Ayuntamiento de Zapopan. (2020). *Ayuntamiento de Zapopan*. Obtenido de Estudio hidrológico detallado del municipio de Zapopan: <https://servicios.zapopan.gob.mx:8000/wwwportal/publicfiles/2020-07/Gaceta%20Vol.%20XXVII%20No.%2040%20TIII.pdf>
- Biswas, A. K. (June de 2006). Water Management for Major Urban Centers. *International Journal of Water Resource Development*, 22(2), 183-197.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez Cendón, E., . . . Coll, A. (19 de Noviembre de 2012). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Obtenido de ELSEVIER España: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,Compostela\)%2C%20del%20Instituto%20Flumen%20\(](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,Compostela)%2C%20del%20Instituto%20Flumen%20)
- Bourguet, L. (1971). *INVENTAIRE INTERNATIONAL DES AMENAGEMENTSD'ALIMENTATION ARTIFICIELLE / DEPOUILLEMENTET SYNTHESE DES REPONSES*. International Association of Scientific Hydrology. .
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (3rd ed.). San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Castillo, J., & Carrasco, A. (2019). *Efecto del agua de mezclado proveniente del subsuelo (nivel freático) y mar en la resistencia a la compresión del concreto*. . Obtenido de Universidad Nacional del Trujillo: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12355/Castillo%20D%c3%adaz%2c%20Jhordan%20Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballester, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, 255-260.
- CEA. (2011). *GUADALAJARA*. Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Jalisco: <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/municipios/guadalajara>
- Centro Virtual de Información del Agua. (2017). *Visión General del Agua en México*. Obtenido de AGUA.ORG.MX: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/#:~:text=Anualmente%20M%C3%A9xico%20recibe%20aproximadamente%201,natural%20y%20recarga%20los%20acu%C3%ADferos.>
- Chahar, B., Grailot, D., & Gaur, S. (2012). Storm-Water Management through Infiltration Trenches. *Irrigation and Drainage Engineering*, 274-281.
- Chávez, V. (2021). *Incendios en La Primavera dejan riesgos de inundaciones y lodazales*. Obtenido de El Occidental: <https://www.eloccidental.com.mx/local/noticias-incendios-en-el-bosque-de-la-primavera-dejan-riesgos-de-inundaciones-y-lodazales-6609132.html>
- Clausen, M. E. (2005). *A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. Water Air Soil Pollut.* Obtenido de A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water Air Soil Pollut*: <https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>
- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. (2007). *Manual Técnico del Sistema Hidráulico de Alcantarillado Sanitario y Pluvial*. Guadalajara, Jalisco, México.
- Comisión Estatal del Agua. (2012). *Programa Especial 21. Administración y Uso del Agua*. Jalisco.
- CONAGUA. (2015). *PMPMS para Usuarios Urbanos de Agua Potable y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. SEMARNAT.
- CONAGUA. (22 de August de 2019). *Sistema de Información Hidrológica (SIH)*. Obtenido de <https://sih.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA. (2020). *Acuíferos Jalisco*. Obtenido de Disponibilidad Aguas Subterráneas Jalisco: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html>
- CONAGUA. (1 de Marzo de 2021). *Calidad del agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>

- CONAGUA. (March de 2021). *Calidad del Agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- Conesa, C., & García, R. (2011). Factores e índices de peligrosidad de las aguas de avenida en cruces de carreteras con ramblas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 195-218.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J., & Skinner, B. J. (2007). *Recursos de la Tierra*. Madrid: Pearson prentice hall.
- Custodio, E. (1996). *HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. TOMO I*. España: Editorial Omega.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. d. Omega.
- Dávila, R. A., & de León, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463-477.
- De la Cruz, U., & Gleason, J. (2018). *Beneficios económicos de implementar un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad de Guadalajara en la Universidad de Guadalajara*. Obtenido de Vivienda Y Comunidades Sustentables, (4), 11–20: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i4.63>
- del Puerto, J. A., & Valdés, Y. M. (2021). Peligros ambientales y antrópicos sobre las aguas de la Comuna de Ondjiva, Angola. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(3), 14-28.
- Díaz, R. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. C., & Sánchez, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*, 82, págs. 93-103.
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2005). A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 167, 123–138. doi:<https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>
- ECOL. (1997). *NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación.
- El Informador. (2019). *El SIAPA repara 10 hundimientos al día*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/El-SIAPA-repara-10-hundimientos-al-dia--l201906060001.html>

- El Informador. (10 de marzo de 2021). *Sin fecha de solución, Gobierno responde a quejas por falta de agua en Guadalajara*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/jalisco/Sin-fecha-clara-responden-a-quejas-por-la-falta-de-agua-20210310-0021.html>
- Espín, P., García, J., & Castillo, L. (13 de Junio de 2016). Obtenido de Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia: https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/BN2.pdf
- Feingold, D., Koop, S., & van Leeuwen, K. (2018). The City Blueprint Approach: Urban Water Management and Governance in Cities in the U.S. *Environmental Management Springer*, 9-23.
- Félix, C. P. (2005). *Riesgo Causado por Inundaciones Pluviales en la Zona de Plaza del Sol*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Fernández, Á. E., García, M., & Villarroya, F. (2005). Inventario de Experiencias de Recarga Artificial de Acuíferos en el Mundo. *Tecnología y Desarrollo, III*.
- Fernández, A., & Du Mortier, M. (s.f). *Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica: https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf
- Fletcher, T., Shuster, W., Hunt, W., Richard, A., Butler, D., Arthur, S., . . . Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12:7,, 12(7), 525-542. doi:DOI:10.1080/1573062X.2014.916314
- Garzón, A. G. (2020). *COMETII*. Obtenido de Caracterización de una cuenca: principios y métodos : <https://www.riego.mx/files/webinars/webinar04.pdf>
- GEOEX & SIAPA. (2004). Capítulo III. Geología y geofísica del área de estudio. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. III.1-III.34). SIAPA.
- GEOEX & SIAPA. (2004). *Capítulo V Hidrología del Área de Estudio*. SIAPA.

- GEOEX & SIAPA. (2004). Capítulo XII. Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. XII.1-XII.9). SIAPA.
- GEOEX-SIAPA. (2003). Diseño e instalación de un sistema de monitoreo del acuífero. En *Geohidrológico Atemajac-Toluquilla* (págs. 1-9).
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia*, 7(2), 52-73.
- Gleason, J. (2011). *Hacia una gestión sustentable del agua en la zona conurbada de Guadalajara*. Obtenido de Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(spe1), 113-126: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700009&lng=es&tlng=es.
- Global Water Partnership. (2013). *GWP in Action 2013 Annual Report*. Obtenido de GWP in Action 2013 Annual Report: https://issuu.com/gwp-publ/docs/gwp_in_action_2013_annual_report
- Gobierno de Zapopan. (2020). *DIRECCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS E INFRAESTRUCTURA*. Obtenido de Gobierno de Zapopan: https://www.zapopan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/08/INVITACIONES_011-20_Censurado.pdf
- Gómez, E. (5 de septiembre de 2021). *Desbordamiento de arroyo "El Seco" deja 52 casas dañadas en Zapopan*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/jalisco/Lluvias-en-Zapopan-Desbordamiento-de-arroyo-El-Seco-deja-52-casas-danadas-20210905-0096.html>
- González de Vallejo, L. F. (2002). Ingeniería Geológica. Ed. Pearson Educación.
- González, J. A. (1974). El sistema de colectores de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Trabajos presentados para el Gobierno del Estado de Jalisco. Departamento Obras públicas*, 34.
- Gorostegui, M. A. (julio de 2021). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos*. Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos : <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22166/TFG%20Maria%20Antonia%20Arnaiz%20Gorostegui.pdf?sequence=1>

- GreenForestMéxico. (2018). *Green Forest México* . Obtenido de Geocostales : <https://www.greenforestmexico.com/geocostales>
- Grigg, N. S. (2011). Water Governance: From Ideals to Effective Strategies. *Water International*, 36(7), 799-811. doi:<https://doi.org/10.1080/02508060.2011.617671>
- Henríquez, C., & Azócar, G. (2006). *Revista de geografía Norte Grande*, (36), 61-74. Obtenido de Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile.: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>
- Hernández-Antonio, A., Mahlkecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., . . . Eastoe, C. J. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3937–3950. doi:10.5194/hess-19-3937-2015
- Hidrología Sostenible. (s.f.). *Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS*. Obtenido de Hidrología Sostenible Web Site: <http://www.hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>
- IGRAC. (2021). *MAR Portal*. Obtenido de <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal>
- INECC. (2014). *Ánalysis de la Relación entre Precipitación Máxima Anual, el Cambio de Uso de Suelo y la Respuesta Hidrológica en Cuencas Costeras del Pacífico Tropical Mexicano*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- INEGI. (agosto de 2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica* . Obtenido de Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica : http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf
- INEGI. (2020). *Área Metropolitana de Guadalajara*. Obtenido de <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua . (2019). *gob.mx*. Obtenido de Aguas Subterráneas: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>
- Jennings, A. A., Adeel, A. A., Hopkins, A., Litofsky, A. L., & Wellstead, S. W. (2013). Rain Barrel–Urban Garden Stormwater Management Performance. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 757-765. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000663

- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban Pluvial Flooding and Stormwater Management: A Contemporary Review of China's Challenges and "Sponge Cities" Strategy. *Environmental Science and Policy*, págs. 132-143.
- Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., . . . Pak, C. (2016). Smarter Stormwater Systems. *Environmental Science & Technology*.
- Kuroiwa, J. M. (2002). *Daños a Infraestructuras por Erosión de Cauces y Riberas*. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- KWR. (2020). *City Blueprint*. Obtenido de Water Research Institute: <https://www.kwrwater.nl/en/tools-producten/city-blueprint/>
- Lagos, R. H. (2002). *Línea base de la calidad del agua subterránea en el valle del Yeguaré, Honduras*. ZAMORANO. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2270/1/IAD-2002-T024.PDF>
- Lekshmi Prasad, S., & Mophin, K. (2017). Water Quality Assessment of Ashtamudi Lake Using Nsfwqi. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 7, 130-135.
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Wetlands Springer*, 851-864.
- López, M. (2015). *Riesgo en el piedemonte del gran Mendoza por avance urbano. Argentina*. Obtenido de tiempo Y Espacio, (21), 47-57: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/TYE/article/view/1739>
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales Pesados Totales y As en el Agua para Riego de Puebla y Veracruz. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 39-48.
- Marcia, S. (2010). *La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia- escasez*. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44525270/La_escasez_de_Agua_en_el_mundo-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1650868461&Signature=TSFkK3HPCxjQ3W-

i5c9Fi100qhF~eF9uknr40YEUnbMuNOAACimxnGfIS5TNcuqhZGtC5lkGmV2bbE
MldMTbTIRglxriPwX~NAFdiLCAHmwPp-Fv~IFBsC4P6mGMY

Maryland Department of the Environment. (2009). Chapter 5 Environmental Site Design. Maryland: Maryland Department of the Environment.

Miao, S., Chen, F., Li, Q., Fan, & S. (2011). *Impacts of Urban Processes and Urbanization on Summer Precipitation: A Case Study of Heavy Rainfall in Beijing on 1 August 2006*. Obtenido de American Meteorological Society: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/50/4/2010jamc2513.1.xml>

Mijangos, M. A., González, R., Bravo, L. A., Alba, M., & Evans, B. M. (2015). ESTUDIO DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUAL Y DIFUSA EN LAS SUBCUENCAS DEL LAGO DE TUXPAN Y RÍO TOMATAL, IGUALA, GRO., MÉXICO. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ*.

Milenio. (17 de Diciembre de 2017). *Hundimiento del Valle de México es crítico: especialistas*. Obtenido de Milenio: <https://www.milenio.com/estados/hundimiento-del-valle-de-mexico-es-critico-especialistas>

Molano, L. I. (2016). SISTEMAS DE CONTROL DE ESCORRENTÍA DE AGUAS LLUVIAS: TECHOS VERDES VS. TANQUES DOMICILIARIOS DE ALMACENAMIENTO PARA EL CONTROL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN CIUDADES. Bogotá, Colombia.

Momparlet, S. P. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza*. Obtenido de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza: <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>

Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mahlknecht, J., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Rockwater Interactions and Pollution Processes in the Volcanic Aquifer System of Guadalajara, Mexico, Using Inverse Geochemical Modeling. *Applied Geochemistry*, 68, 79-94. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.008>

Narváez, E. J. (2021). *Manual metodológico de monitoreo para la evaluación de la calidad del agua utilizando el Índice de calidad del agua (ICA) en los jagüeyes del municipio de sabanas de san ángel (magdalena)*. Magdalena: Universidad de

- Magdalena. Obtenido de <https://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/5903>
- NASA. (2020). *MODIS*. Obtenido de <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- New York State Department of Health. (2017). *Coliform Bacteria in Drinking Water Supplies*. Obtenido de New York State: https://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/coliform_bacteria.htm
- Nistor, M. M., Rahardjo, H., Satyanaga, A., Hao, K. Z., Xiaosheng, Q., & Sham, A. W. (March de 2020). Investigation of groundwater table distribution using borehole piezometer data interpolation: Case study of Singapore. *Engineering Geology*, 271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105590>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., & Doshi, H. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, functions and services. *BioScience*, 823-833.
- OCDE. (2018). *Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE*. París.
- Ojeda, C. G. (2016). RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (Managed Aquifer Recharge). La Serena, Chile.
- Oki, T., Entekhabi, D., & Ives, T. (2020). *Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Meguro, Tokyo, Japan*. Obtenido de The Global Water Cycle: https://www.researchgate.net/profile/T-Harrold/publication/260072736_The_global_water_cycle/links/5f1798f4299bf1720d58d0eb/The-global-water-cycle.pdf
- ONU. (2012). *Guía ciudadana para la participación incluyente en la gestión del agua*. Ciudad de México.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas* (5 ed.).
- Orozco, M. (15 de July de 2020). Fuerte Lluvia Deja Inundaciones en Plaza del Sol en Guadalajara. *Debate*. Obtenido de <https://www.debate.com.mx/guadalajara/Reportan-inundacion-por-lluvias-en-Plaza-del-Sol-en-Guadalajara-20200715-0251.html>
- Palacios, D. (2017). *Universidad de Guadalajara*. Obtenido de ZMG sobrepasa demanda de agua : <https://www.udg.mx/es/noticia/zmg-sobrepasa-demanda-de>

- http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000200003&lng=es&tlng=es.
- Reguillo, R. (1998). *Alteridades*, 8(15),35-44. Obtenido de Semantizarás el territorio: los vecinos de Analco y las explosiones de 1992 en Guadalajara: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74745550004>
- Rizo, L. D. (2017). *Consideraciones sobre la Calidad del Agua del Río Santiago (México) y Cartografía de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos de su Cuenca, para una Adecuada Gestión y Planificación Hidrológica*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Rodríguez, J., Rodríguez, J., Ballester, F., & Castro, D. (2005). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. Obtenido de *Interciencia*, 30(5),255-260.: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910403>
- Rojas, D., & González, M. (2015). *Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México*. Obtenido de SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200006&script=sci_arttext&tlng=pt
- Román, J. M. (2015). *Telemetría de Estación Meteorológica*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Sachs, J. D. (2015). *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press.
- Salas, C., Coy, D., Acuña, K., Páez, L., & Upegui, E. (2019). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). Obtenido de Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá: [https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20\(2019-I\)/151561629006/](https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20(2019-I)/151561629006/)
- Sánchez San Román, J. (s.f.). *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Obtenido de Universidad Salamanca: <http://hidrologia.usal.es>
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2006). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

- Science for Environment Policy. (2012). *Soil Sealing*. European Commission, Directorate-General Environment . Bristol: University of the West of England.
- SEMARNAT. (2014). 6.2.1 *Calidad del agua*. Obtenido de El Medio Ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html
- Serieys, N. (2004). *Impacto de recarga artificial sobre la calidad del agua en acuíferos sensibles de la Sabana de Bogota*. Obtenido de Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10445/u251247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- SGM. (2020). *¿Qué hacemos?* Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.gob.mx/sgm/que-hacemos>
- SIAPA. (2014). *RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES*. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5._infiltracion_pluvial.pdf
- SIAPA. (2021). *Funciones Públicas*. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/funciones_publicas
- Silicani, M. R. (2015). *Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo*. Facultad de Agronomía. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- SINA. (2019). *Acerca del SINA*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- Soto, J. F. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología, XI(2)*, 167-177.
- Suárez, C. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Susdrain. (s.f.). Obtenido de Sustainable Drainage: <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.html>
- Susdrain. (2021). *Component: Infiltration trenches*. Obtenido de https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/infiltration_trench.html

- Susdrain/CIRIA. (2014). *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention*. Obtenido de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention: <https://www.duratex.co.uk/company-blog/industry-news/sustainable-urban-drainage-systems-suds-in-flood-prevention>
- Tálamo, A., Bermudez, R., Garibaldi, L., & Chavez, A. (2016). *Erosión y escorrentía en respuesta a lluvias simuladas e incendios en bosques secos de montaña*. *Ciencia del suelo*. Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100010&lng=es&tlng=es.
- Taller botánico. (2020). *¿Qué es y cómo funciona un pozo de absorción?* Obtenido de Taller botánico: <https://www.eltallerbioclimatico.com/blog/post/85530/qu-es-y-como-funciona-un-pozo-de-absorci-n>
- Tarbut, E. J., & Lutgens, F. K. (2000). *Ciencias de la Tierra* (Sexta ed.). Madrid: Prentice Hall.
- Tarbut, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*. Pearson Education.
- Tinoco, J. (2019). *NIVELES DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN LA CIUDAD DE CALI EN EL AÑO 2019*. Cali: UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI. Obtenido de <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/3262/NIVELES%20DE%20CLORO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tobias, S. (2013). *Federal Institute of Forest*. Obtenido de Preserving Ecosystem Services in Urban Regions: Challenges for Planning and Best Practice Examples from Switzerland: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3664025/#:~:text=Spatial%20planning%20can%20contribute%20to,compensating%20for%20new%20soil%20sealing>
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8, págs. 79-94.

- Tráfico ZMG. (2016). *Problema de cada temporal; El negocio de los baches*. Obtenido de Tráfico ZMG: <https://traficozmg.com/2016/07/problema-temporal-negocio-los-baches/>
- UNAM. (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos.
- Ungaro, F., Calzolari, C., Pistocchi, A., & Malucelli, F. (2014). *Hydrol Hydromech*. Obtenido de Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydrogeological approach.: <https://sciendo.com/abstract/journals/johh/62/1/article-p33.xml>
- United States Geological Survey [USDG]. (s.f.). *El Ciclo del Agua*. Obtenido de USDG Web Site: https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#
- Vanegas, L. (2017). *POZOS DE INYECCIÓN PROFUNDA: RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS CON AGUAS PLUVIALES Y DISMINUCIÓN DE INUNDACIONES EN EL AMG*.
- Vanegas, L., Vargas, D., Ochoa, G., & Grindlay, A. (2022). Flood Mitigation in Urban Areas through Deep Aquifer Recharge: The Case of the Metropolitan Area of Guadalajara. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19. doi:<https://doi.org/10.3390/ijerph19063160>
- Vázquez, G. A., Ortiz, J. E., & Lizárraga, L. G. (2020). Efecto de las tecnologías de bajo impacto en el tratamiento del agua de escorrentía urbana. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 8, 103-115.
- Vélez, J., & Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*. . Obtenido de Scielo Org: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006
- Vijayaraghavan, K. (2016, May). A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>

- Vörösmarty, C., & Sahagian, D. (2000). *BioScience*, Volume 50, Issue 9. Obtenido de Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle: <https://academic.oup.com/bioscience/article/50/9/753/269247?login=false>
- Weigand, P. C. (2012). La Caldera de Coli y su vecina Guadalajara. *Relaciones*, 291-318.
- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *CIRIA*. Obtenido de The SuDS Manual: <http://www.scotsnet.org.uk/documents/nrdg/ciria-report-c753-the-suds-manual-v6.pdf>
- Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, I. (2009). Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación*, 29.
- Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, J. I. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación*, 27.
- Zamudio Zavala, P., Mayoral Ruiz, P., & Gómez Mora, I. (2019). *MODELO DE PROFUNDIDAD A LA ROCA BASAL DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG)*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., Monterrey.
- Zamudio, P., Vargas, D., & Ochoa, G. (2016). *Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en*. Guadalajara.
- Zaporozec, A. (1981). Ground-Water pollution and its sources. *GeoJournal*, 5, 457-471. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02484718>