

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

Sustentabilidad y Tecnología

PROYECTO DE APLICACIÓN PROFESIONAL (PAP)

Infraestructura para la Gestión Inteligente del Agua



**ITESO, Universidad
Jesuita de Guadalajara**

PRESENTAN:

Rosa María Almaraz Reynoso

Yoshiro Susumu Azano Carrillo

Sofía Limón Ochoa

Ana Karen Madrigal García

Joaquín Sainz Hermsillo

Siego Seidel Quirarte

Miguel Ángel Valenzuela Ponce

Luis Xavier Villaseñor Coss y León

Profesores PAP: Dr. José Manuel Ramírez León, Dr. David Vargas del Río, Tlaquepaque,
Jalisco, 5 de diciembre de 2023.

Índice

Índice.....	1
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tablas.....	13
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional.....	15
1. Introducción.....	16
1.1 Problemática	16
1.2 Justificación.....	18
1.3 Antecedentes de otros semestres	22
1.3.1 Primavera 2020	22
1.3.2 Otoño 2020	25
1.3.3 Primavera 2021	29
1.3.4 Verano 2021	35
1.3.5 Otoño 2021	39
1.3.6 Primavera 2022	45
1.3.7 Verano 2022	51
1.4 Objetivos del proyecto.....	51
1.5 Descripción de los equipos de trabajo.....	51
2. Marco Teórico	52
2.1 Ciclo Hidrológico	52
2.2 Aguas Subterráneas.....	55
2.2.1. Acuíferos.....	58
2.2.2. Factores que determinan el movimiento hídrico subsuperficial	63

2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos.....	68
2.4 Calidad del agua	72
2.4.1 Calidad del agua superficial.....	75
2.4.2 Calidad del agua subterránea.....	77
2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS)	79
2.6 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos	94
2.6.1 Recarga superficial.....	96
2.6.2 Recarga profunda	97
2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano	101
2.7.1 Gestión informada del agua.....	102
2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional	108
2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro.....	111
3. Marco Contextual	113
3.1 San Juan de Abajo.....	113
3.1.1 Resumen Ejecutivo.....	113
3.1.2 Introducción	113
3.1.3 Objetivos del Documento.....	114
3.1.4 Marco de Referencia	114
3.1.5 Contexto de cuenca.....	116
3.1.6 Contexto local	119
3.1.7. Contexto orográfico	121
3.1.8 Contexto litológico.	122
3.1.9 Contexto de uso de suelo y vegetación	124
3.1.10 Descripción del Mapa	127

3.1.11 Beneficios de considerar la hidrología en la dotación de Infraestructura Hidrológica.....	128
3.1.12 Tipos de Infraestructura Hidrológica que se sugieren.....	129
3.1.13 Consideraciones Ambientales	131
3.1.14 Factores Socioeconómicos.....	132
3.1.15 Evaluación de Riesgos y Beneficios	132
3.1.16 Consideraciones Legales y Regulatorias.....	134
3.1.17 Recomendaciones y Acciones.....	134
3.1.17 Anexos	135
3.2 Arroyo Seco	135
3.2.1 Resumen Ejecutivo:.....	135
3.2.2 Introducción:	137
3.2.3 Objetivos:.....	138
3.2.4 Marco de Referencia:	139
3.2.5 Descripción del Mapa:.....	140
3.2.6 Beneficios de considerar la hidrología en la dotación de Infraestructura Hidrológica:	144
3.2.7 Tipos de Infraestructura Hidrológica que se sugieren:	146
3.2.8. Consideraciones Ambientales:.....	151
3.2.9. Factores Socioeconómicos:	152
3.2.10. Evaluación de Riesgos y Beneficios:	154
3.2.11. Recomendaciones y Acciones	156
4. Metodología	157
4.1 San Juan de Abajo	157
4.1.1 Introducción	157
4.1.2 Definición del área de estudio.....	159

4.1.3 Recopilación de datos	161
4.1.3.1 Topografía	161
4.1.3.2 Usos del suelo	162
4.1.3.3 Litología y edafología.....	164
4.1.3.4 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio	165
4.1.3.5 Información meteorológica.....	166
4.1.4 Modelado hidrológico.....	167
4.1.4.1 Metodología de proceso para primera iteración de simulación.....	167
4.1.4.2 Resultados primera iteración	169
4.1.5 Caracterización territorial.....	173
4.1.5.1 Topografía	173
4.1.5.2 Hidrología	174
4.1.5.3 Litología	174
4.1.5.4 Uso de suelo.....	175
4.1.6 Evaluación de la hidrología superficial.....	176
4.1.7 Análisis de la hidrología subterránea.....	178
4.1.8 Estudio de eventos extremos.....	180
4.1.9 Validación y calibración	180
4.1.10 Evaluación de impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros	181
4.1.11 Anexos.....	181
4.2 Arroyo Seco	182
4.2.1 Planteamiento Metodológico para un Análisis Hidrológico.....	182
4.2.2. Introducción	182
4.2.3. Definición del Área de Estudio	182
4.2.4. Recopilación de Datos	183

4.2.5. Modelado Hidrológico	184
4.2.6. Modelo Digital de Elevaciones	186
4.2.7. Caracterización territorial	190
4.2.8. Evaluación de la Hidrología Superficial	191
4.2.10. Estudio de Eventos Extremos	192
4.2.11 Validación y Calibración.....	195
4.2.12 Evaluación de Impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros	195
5. Resultados y discusiones.....	196
5.1 Propuestas de desarrollo tecnológico para una mejor gestión del agua	196
5.2 San Juan de Abajo	265
2.5.1 Definición del área de estudio.....	266
5.2.2. Recopilación y preparación de datos.....	268
5.2.3 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio.....	271
5.2.4 Información meteorológica.....	272
5.2.5 Parametrización del modelo.....	273
5.2.6 Escenarios de simulación	276
5.2.7 Resultados y análisis	279
5.2.8 Validación y sensibilidad.....	287
5.2.9 Discusión y recomendaciones	287
5.3 Propuestas constructivas San Juan de Abajo	288
5.3.1. Descripción del Problema	289
5.3.2. Objetivos de la Intervención.....	290
5.3.3. Evaluación Preliminar	291
5.3.4. Diseño de la Intervención	292
5.3.5. Beneficios e Impactos.....	295

5.3.6. Consideraciones Ambientales	296
5.3.7. Evaluación de Riesgos y Gestión.	297
5.3.8. Cronograma y Presupuesto	298
5.3.9. Plan de Comunicación y Participación*	300
5.3.10. Evaluación Económica y Financiera	300
5.3.11. Conclusiones y Recomendaciones.....	301
5.3.12. Anexos.....	301
5.3 Arroyo Seco	303
5.3.1. Definición del Área de Estudio	303
5.3.2 Recopilación y Preparación de Datos	305
5.3.3 Selección del Modelo Hidrológico	306
5.3.4 Parametrización del Modelo.....	306
5.3.5 Escenarios de Simulación.....	307
5.3.6 Desarrollo de la Simulación.....	308
5.3.7 Resultados y Análisis	315
5.3.10 Validación y Sensibilidad.....	321
5.3.11 Evaluación de Impactos y Conclusiones	321
5.3.12 Discusión y Recomendaciones.....	322
5.4 Propuestas constructivas	323
5.4.1 Descripción del Problema	323
5.4.2 Objetivos de la Intervención	324
5.4.3. Evaluación Preliminar	324
5.4.4. Diseño de la Intervención.....	325
5.4.5. Beneficios e Impactos	326
5.4.6. Consideraciones Ambientales.....	328

5.4.7. Evaluación de Riesgos y Gestión	330
5.4.8. Evaluación Económica y Financiera	331
5.4.9. Conclusiones y Recomendaciones.....	331
6. Conclusiones.....	332
6.1 San Juan de Abajo.....	332
6.1.1 Conclusiones	332
6.1.2 Recomendaciones	333
6.1.3 Próximos retos del proyecto	333
6.2 Arroyo Seco	333
6.1.1 Conclusiones	333
6.1.2 Recomendaciones	335
Reflexiones PAP	336
Rosa María Almaraz Reynoso	336
Yoshiro Susumo Azano Carrillo	337
Sofía Limón Ochoa.....	338
Ana Karen Madrigal García.....	339
Joaquín Sainz Hermosillo.....	340
Diego Seidel Quirarte	340
Miguel Ángel Valenzuela Ponce.....	342
Luis Xavier Villaseñor Coss y León.....	342
Referencias	343
Referencias Marco Teórico	343
Referencias Marco Contextual	358
Referencias Metodología	360
Referencias Resultados	361

Índice de Figuras

Figura 1. Baches en temporadas de lluvia en el AMG (Tráfico ZMG, 2016).	19
Figura 2. Consecuencias en temporadas de lluvia en AMG (El Informador, 2019).....	20
Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.	23
Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.	23
Figura 5. Pluviómetros terminados en aspecto mecánico.	24
Figura 6. Mapa de áreas de captación de “El Chicalote”	25
Figura 7. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Santa Catalina. ...	26
Figura 8. Resultados de calado del modelo hidrológico de cuenca de plaza del sol.....	26
Figura 9. Resultados de calado del modelo hidrológico del canal de Tchaikovsky.	27
Figura 10. Mapa de puntos de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial en la microcuenca “El Chicalote”	28
Figura 11. Perfil de suelos sur.....	28
Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.....	29
Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.	30
Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.	30
Figura 15. Represa Arroyo Seco.	31
Figura 16. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.....	32
Figura 17. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.....	32
Figura 18. Proceso de la creación de la plataforma de monitoreo.	33
Figura 19. Descarga y decodificación de datos de SEMADET.	33
Figura 20. Creación de tabla (dataframe).....	34
Figura 21, Conversión a archivo csv.	34
Figura 22. Publicación de capa en ArcGIS Online®.....	34
Figura 23. Rutina de actualización de la capa.....	34
Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.....	35

Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.....	36
Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.....	36
Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.....	37
Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.....	37
Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.	38
Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.....	38
Figura 31. Captura de pantalla del Model Space del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.....	39
Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.....	43
Figura 33. Prototipo funcional para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG.	44
Figura 34. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.	47
Figura 35. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.	47
Figura 36. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha)..	49
Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.....	49
Figura 38. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto “Campus Hidrológico”. 50	
Figura 39. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.)	55
Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).....	59
Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).	60
Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).....	61
Figura 43. Acuífero colgado (Sánchez San Román).....	61
Figura 44. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).	62
Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).	64
Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).....	65

Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).	67
Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).	69
Figura 49. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).....	69
Figura 50. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).	70
Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).....	82
Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).....	84
Figura 53. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).	84
Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).	85
Figura 55. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).	86
Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014).....	87
Figura 57. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al., 2013).	89
Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.....	91
Figura 59. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).	93
Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971.....	97
Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971	100
Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).	107
Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).....	109
Figura 64 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016)	111
Figura 65. Ubicación geográfica del acuífero de Atemajac y Toluquilla (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 66. Características pozo de absorción (Taller botánico, 2020). ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 67. Mapa de pozos en la microcuenca de estudio ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 68. Contexto geotécnico del bloque Jalisco (Weigand, 2012) ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 69. Perfil estratigráfico del pozo PR-9 (GEOEX & SIAPA, 2004) ¡Error! Marcador no definido.	

Figura 70. Profundidad a la roca en el Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio Zavala et al., 2019).....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 71. Sección esquemática hidrogeológica del acuífero (adaptación de Rizo, 2017).
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 72. Comparación de los estados de un acuífero (Vanegas, Vargas, Ochoa, & Grindlay, 2022).....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 73. Actividades económicas con posibles fuentes de contaminación en la zona de estudio.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 74. Mapa de la microcuenca El Chicalote**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 75. Mapa del área de captación del Arroyo Seco delimitada por la zona urbana.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 76. Delimitación de la cuenca del Arroyo Teinstique**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 77. Serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 78. Subactividades del manejo de datos en SIG previo al modelo numérico computacional.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 79. Subactividades del proceso del modelo computacional IBER..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 80. Hietograma con tiempo de retorno de 5 años y duración de 60 minutos.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 81. Hietograma con tiempo de retorno de 10 años y duración de 60 minutos.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 82. Hietograma con tiempo de retorno de 15 años y duración de 60 minutos.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 83. Hietograma con tiempo de retorno de 20 años y duración de 60 minutos.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 84. Hietograma con tiempo de retorno de 25 años y duración de 60 minutos.
.....**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 85. Mapa de escorrentías seleccionadas para la localización de represas en Arroyo Seco.**¡Error! Marcador no definido.**

Figura 86 Delimitación de la microcuenca El Chicalote....¡Error! Marcador no definido.

Figura 87 Zonas específicas de estudio (cambios de elevación en el MDE). ¡Error! Marcador no definido.

Figura 88. Prototipo Ecodrain.....¡Error! Marcador no definido.

Figura 89. Corte de sistema Ecodrain.....¡Error! Marcador no definido.

Figura 90. Plano planta de jardineras.....¡Error! Marcador no definido.

Figura 91. Zona de intervención Arroyo Seco "La Colmena"¡Error! Marcador no definido.

Figura 92. Hidrograma resultante de análisis IBER TR_25 años, caudal que pasa al final del terreno "La Colmena".¡Error! Marcador no definido.

Figura 93. Área determinada para el diseño del vaso regulador en 2 diferentes escenarios (escenario 2 a la izq., y escenario 1 a la der.).....¡Error! Marcador no definido.

Figura 94. Hidrogramas resultantes de los análisis en la propuesta 1 (Pt. 1) ¡Error! Marcador no definido.

Figura 95. Hidrogramas resultantes de los análisis en la propuesta 1 (Pt. 2) ¡Error! Marcador no definido.

Figura 96. Mapas de Calado máximo del arroyo con y sin la intervención de los escenarios propuestos¡Error! Marcador no definido.

Figura 97. Mapas de velocidad máxima del arroyo con y sin la intervención de los escenarios propuestos¡Error! Marcador no definido.

Figura 98. Mapas de máxima peligrosidad ACA del arroyo con y sin la intervención de los escenarios propuestos.....¡Error! Marcador no definido.

Figura 99. Calado Máximo TR_25 años.....¡Error! Marcador no definido.

Figura 100. Zona de intervención con represas¡Error! Marcador no definido.

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición. 40

Tabla 2. Propuestas de intervención (descripción de escenarios). 46

Tabla 3. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007)..... 56

Tabla 4. Propiedades de acuíferos.....	66
Tabla 5. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).	86
Tabla 6. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).	91
Tabla 7. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).	103
Tabla 8. Proyectos de recarga artificial de acuíferos en México (Palma et al., 2014).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 9. Valores típicos de permeabilidad para los materiales pumíticos (Toba Tala) del Área Metropolitana de Guadalajara (Zamudio et al., 2016)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10. Porcentaje de cobertura de actividades económicas.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 11. Contaminantes presentes en la escorrentía de las superficies de rodadura (Zafra et al., 2007).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Coeficientes de rugosidad de Manning para cada uso de suelo en IBER (INECC, 2014).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13. Curva numérica (CN) para estimar el escurrimiento bajo diferentes complejos suelo – cobertura – manejo (INECC, 2014).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 14. Tiempos de concentración para cada área de captación.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15. Valores de NC y Rugosidad Manning para diferentes usos de suelo en Arroyo Seco	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 16. Matriz de resultados resultante de 8 análisis en IBER.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 17. Bandas Sentinel 2 (Elaborada por Hugo de Alba)	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 18. Clasificación por USG (United Nations, 2022) (Elaborada por Hugo de Alba).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 19. Tabla de resumen de proyectos de intervención Primavera 2022.....	¡Error! Marcador no definido.

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 hablar del agua es referirnos a uno de los recursos o si es que el recurso más importante para la vida en la tierra. Representa el corazón del desarrollo sostenible y es esencial para el desarrollo social y económica, la producción de alimentos, los ecosistemas, la energía y los medios de vida sostenibles. El agua también es un factor importante en la adaptación al cambio climático y un vínculo importante entre la sociedad y el medio ambiente. (ONU, 2021). Según los desafíos del agua de la ONU, 2 200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura. (OMS/UNICEF 2019). 2 000 millones de personas viven en países que sufren escasez de agua (UN 2019). El 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas (UNESCO, 2017).

Si las personas no tienen acceso a agua limpia, no pueden beneficiarse de otros derechos como la vivienda, la salud y la educación, pero como este es uno de los recursos más importantes, también afecta a la industria y, por lo tanto, a los recursos de empleo. Desde cualquier actividad económica, cuando se trata de la política, la falta de acceso al agua se ha convertido en fuente de conflicto entre las sociedades de todo el mundo.

En México la situación de la escasez del agua lleva varios años afectando, sobre todo en la parte del centro y de norte del país. Y los problemas hídricos provienen desde muchas vertientes, la mayoría de la población creemos que la falta de agua se debe a como las personas o los mismos gobiernos no han sabido administrar, y cuando eso claramente es uno de los problemas principales, no es el único. Según el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) México es uno de los 25 países que enfrente un mayor estrés hídrico del mundo. Dicho esto, en una investigación de la ONU, en la cuenta del Valle de México, se extrae el equivalente a 55 metros cúbicos por segundo y se recargan 25 metros cúbicos. En pocas palabras, se recarga menos de la mitad de lo que se extrae. (ONU, 2021)

En el Área Metropolitana de Guadalajara la situación en los últimos años ha sido muy desfavorable en la que se encuentran una serie de fallas en el sistema hídrico y donde existe una amplia oportunidad de mejora. Según el promedio de la precipitación anual llueve 942 mm. El cual es más que suficiente para abastecer a la ciudad, incluso para usar esa misma agua y abastecer ciudades y poblados más cercanos a la ciudad. Pero por cómo ha sido planeada la ciudad y la construcción de esta, lo que hemos hecho es impermeabilizar la ciudad y el casi 80 por ciento de esta agua va a dar a colectores donde después provoca grandes inundaciones y después va a dar a las aguas residuales. Gracias a este problema, durante años tenemos que recurrir a usar agua de nuestros grandes colectores como el Lago de Chapala, presa Calderón y tener que hacer pozos profundos donde explotamos el acuífero y que aun así no con todo esto no podemos abastecer el 100 por ciento de la demanda de agua en la ciudad.

El problema de la escasez no es el único que tenemos en nuestra ciudad. El agua además de representar todo lo dicho anteriormente, también es un factor de grandes desastres naturales en el mundo, pero esto ha sido provocado por la mala planeación de nuestras ciudades. En Guadalajara, es una zona donde tenemos mucha precipitación al año y las vemos representadas con severas tormentas a lo largo del año, en su mayoría en la época de verano. Se ha registrado que precipitación de mas de 25 mm/h, combinado con el severo daño que hemos provocado en la superficie, se generan estas grandes inundaciones en muchos puntos de la ciudad. Donde tenemos colonias con cientos de casas totalmente inundadas, vialidades que se vuelven intransitables para vehículos y para peatones, y desbordamiento de arroyos que arrasan con casas construidas muy cerca de sus causes. Son cientos de problemas los que ocasionan las tormentas gracias a que hemos transformado de manera severa el sistema hidrográfico de la ciudad y se ha impermeabilizado una gran parte de la superficie que los esfuerzos que se hacen con las redes artificiales no son suficientes para atacar este problema. Unos de los casos que hemos observado es el de “Arroyo Seco”, que el año pasado tuvo múltiples desbordamientos que afecto a decenas de hogares y gracias a eso, este año

se tuvieron que desalojar muchos hogares por la gran amenaza que represento el año pasado.

Después de haber analizado todo lo anterior y consultando múltiples fuentes de información, tenemos ciudades insostenibles en términos hídricos y en muchos otros. Nuestros consumos son extremos, el desperdicio y la contaminación del agua son alarmantes y no sabemos utilizar las grandes cantidades de agua que percibimos de las lluvias. En este proyecto, los objetivos van dirigidos a analizar y proponer soluciones con fin de mejorar estas situaciones.

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).

Se han implementado algunas estrategias para mitigar las inundaciones 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 superficiales 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).

También se ha buscado implementar algunas estrategias para el aprovechamiento del agua de lluvia en el AMG. El Dr. José Arturo Gleason Espíndola (Jefe de Laboratorio de Tecnologías para la arquitectura y urbanismo sustentable de la Universidad de Guadalajara) 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.

Una de las alternativas que pueden disminuir la problemática son los métodos de recarga artificial del acuífero. Estas 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).

Otra solución 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.

La restauración del ciclo hidrológico es la base y lo más importante para la problemática a resolver. Por este motivo se podrían desarrollar 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).

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.

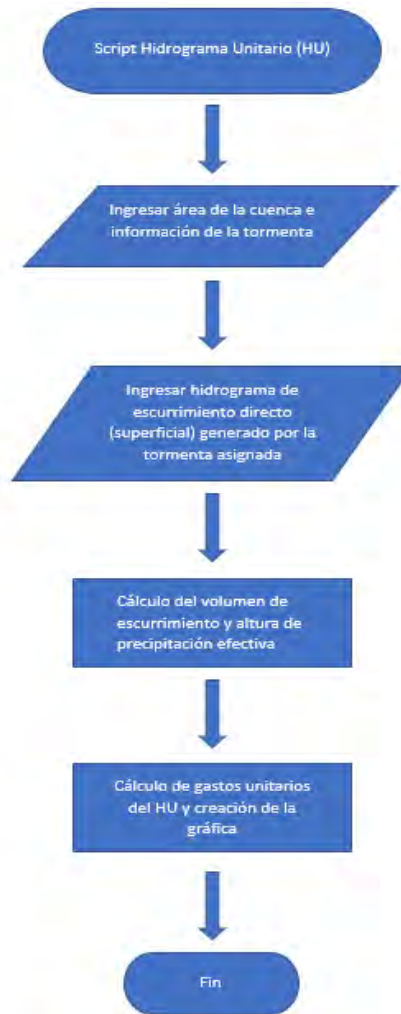


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.

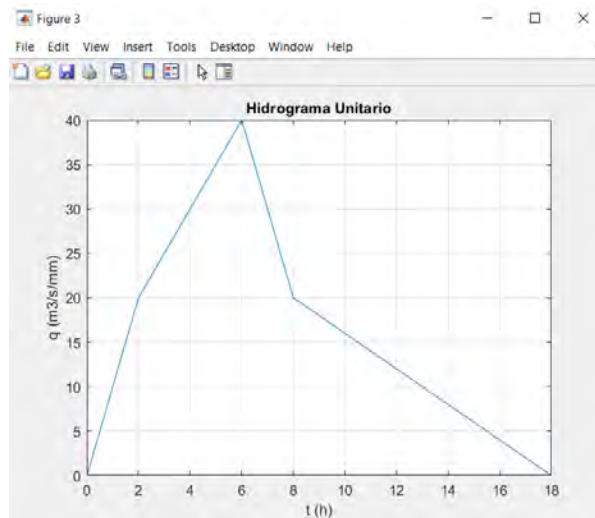


Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.

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.



Figura 10. Mapa de puntos de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial en la microcuenca "El Chicalote".

Por último, se obtuvieron los perfiles estratigráficos del acuífero, incluyendo su permeabilidad.

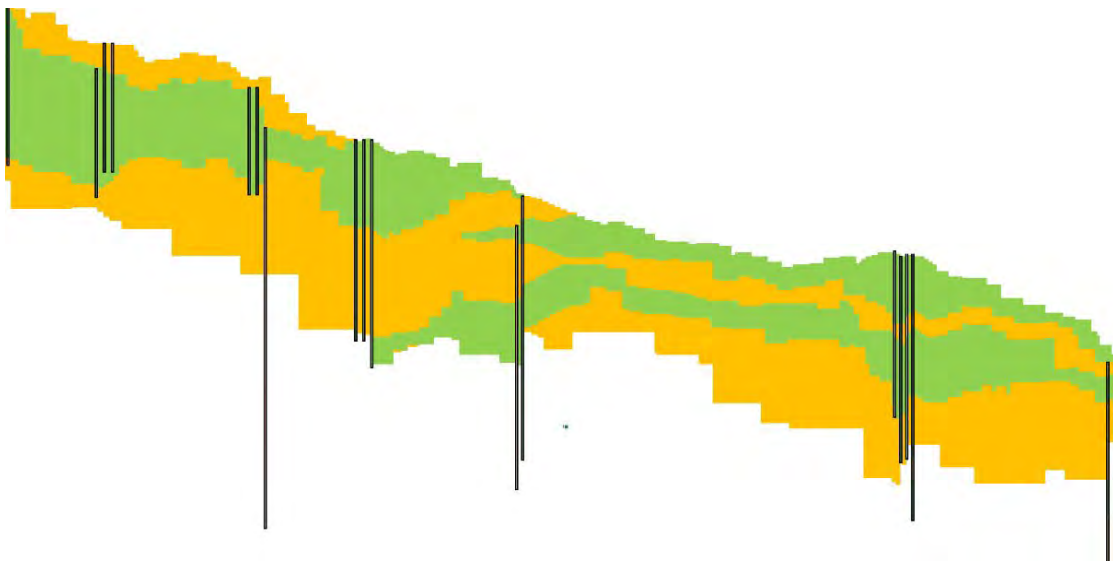


Figura 11. Perfil de suelos sur.

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).

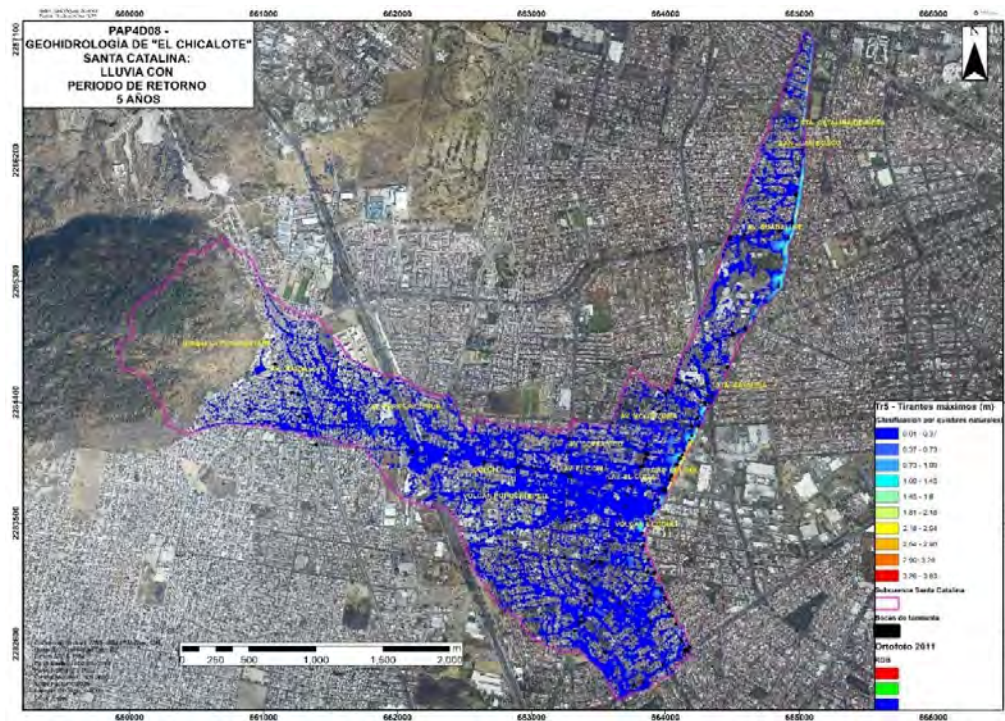


Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

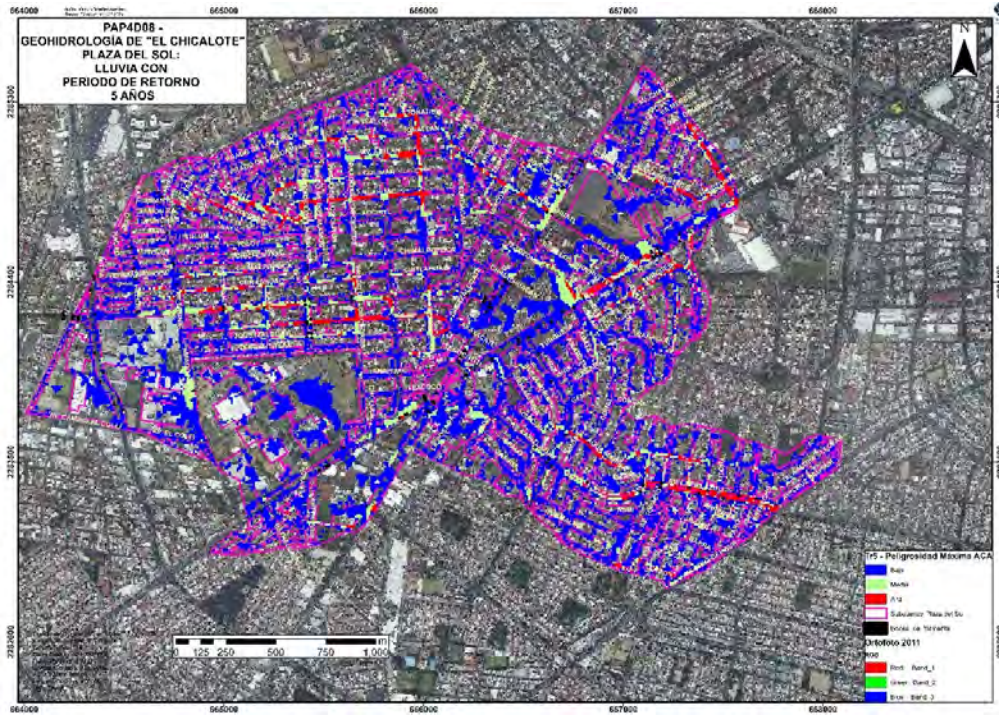


Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.

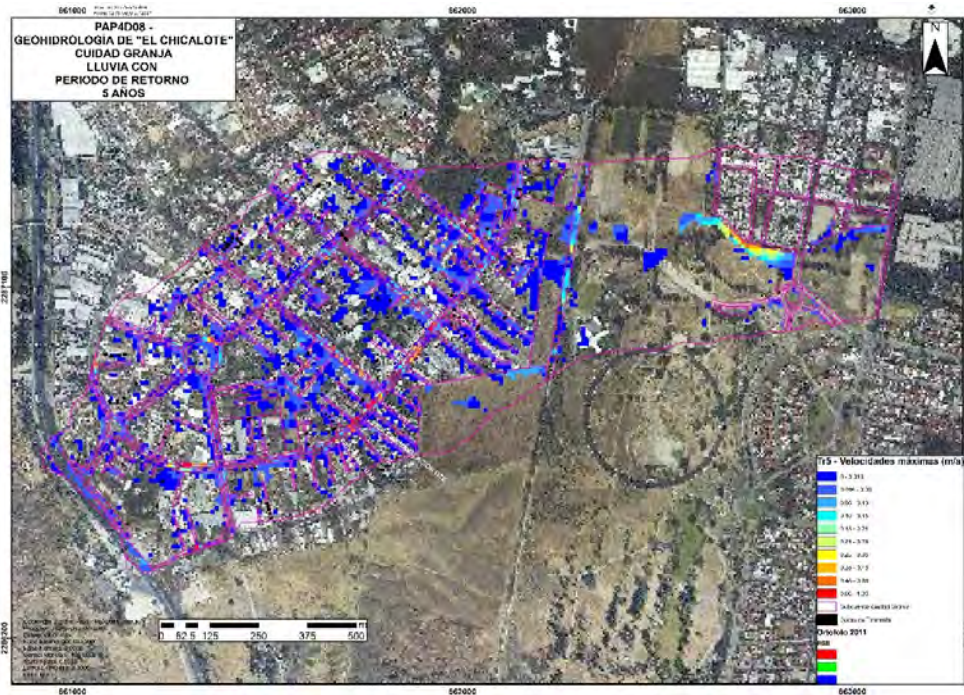


Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.

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", "longitudo", "latitudo", "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], "longitudo": dic[s][0], "latitudo":
                                "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.

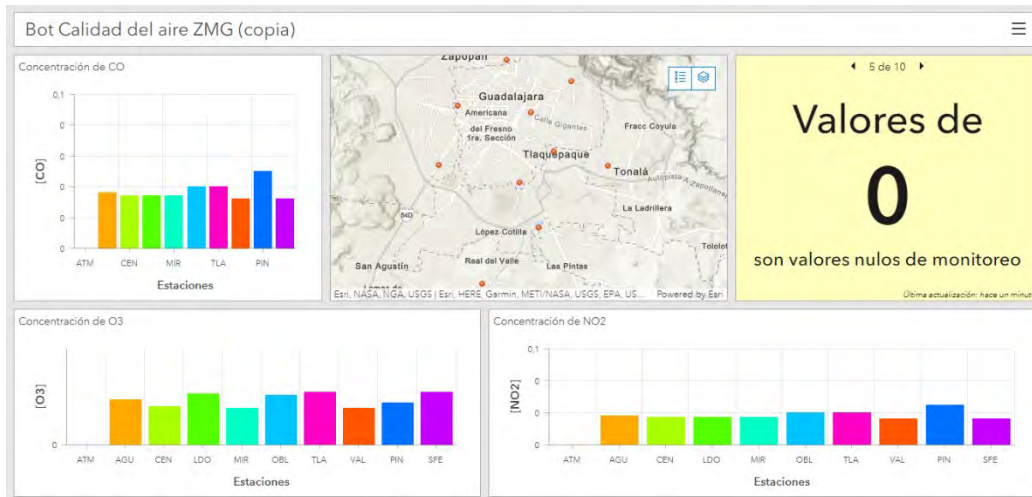


Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.

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.

Peligrosidad máxima subcuenca El Chicalote tr5

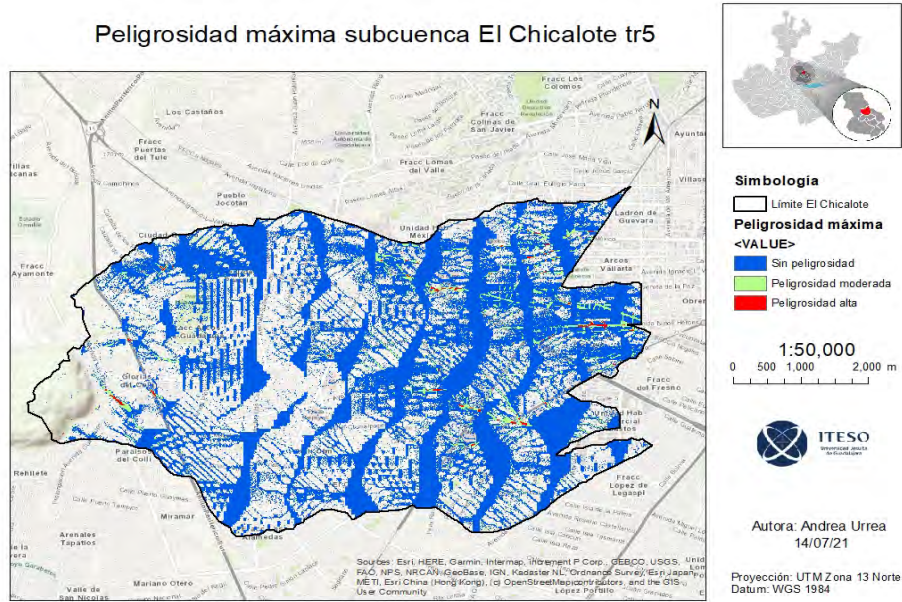


Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.

Máxima peligrosidad ACA área de captación

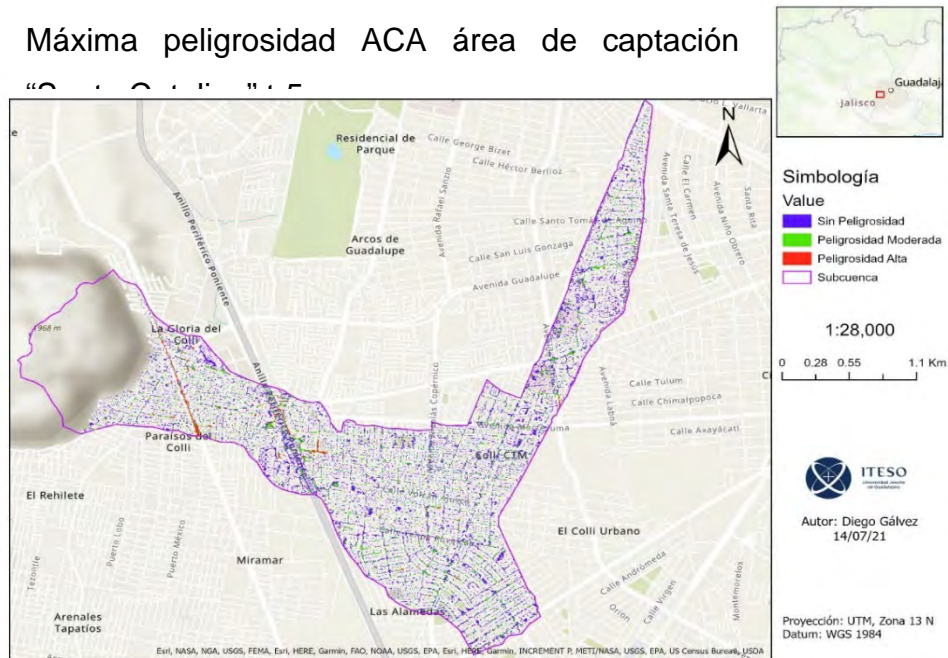


Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

Máxima Peligrosidad ACA área de captación Plaza del Sol tr5

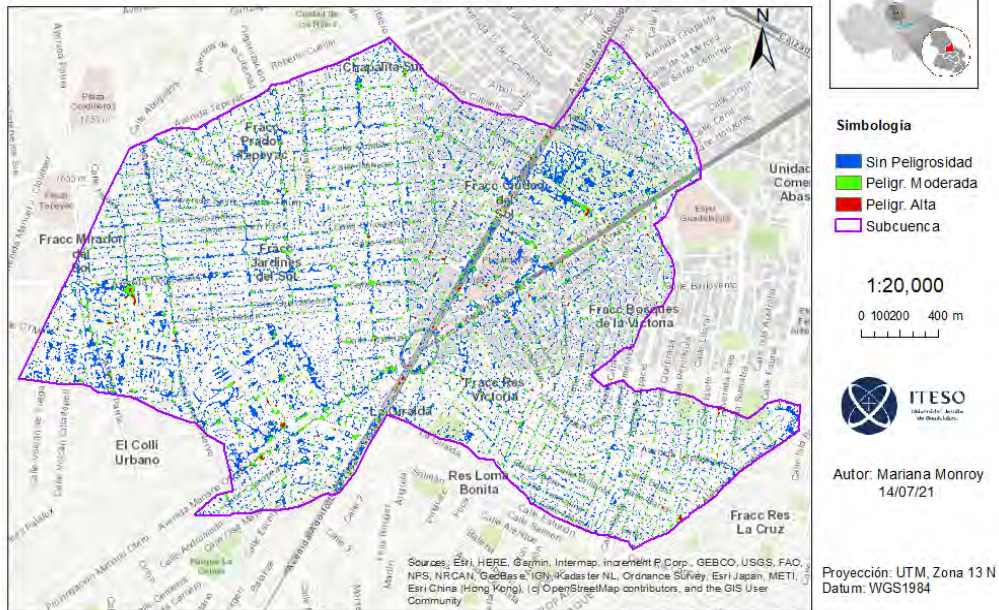


Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.

Máxima Peligrosidad ACA Área de captación Tchaikovsky - Tr 5 años

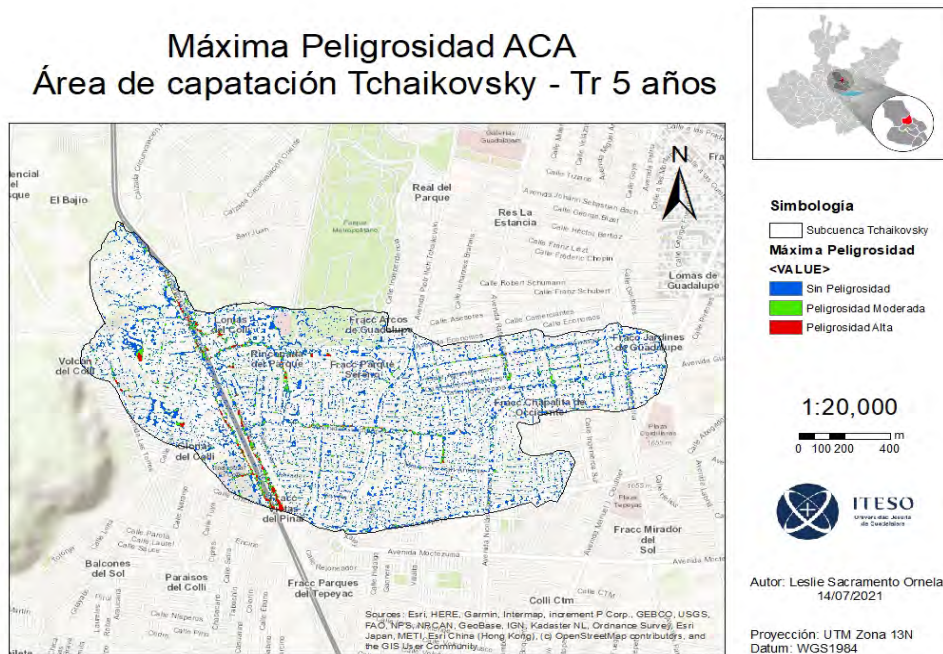


Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.

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

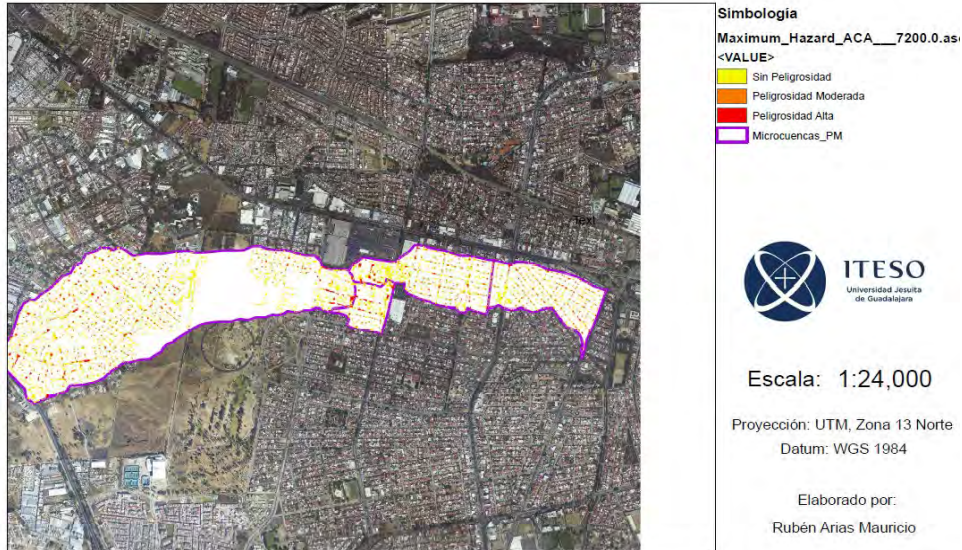


Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.

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

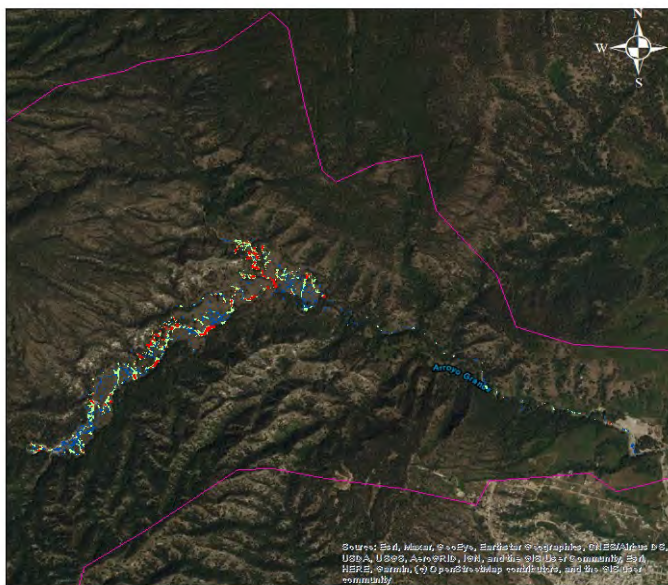


Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.

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.

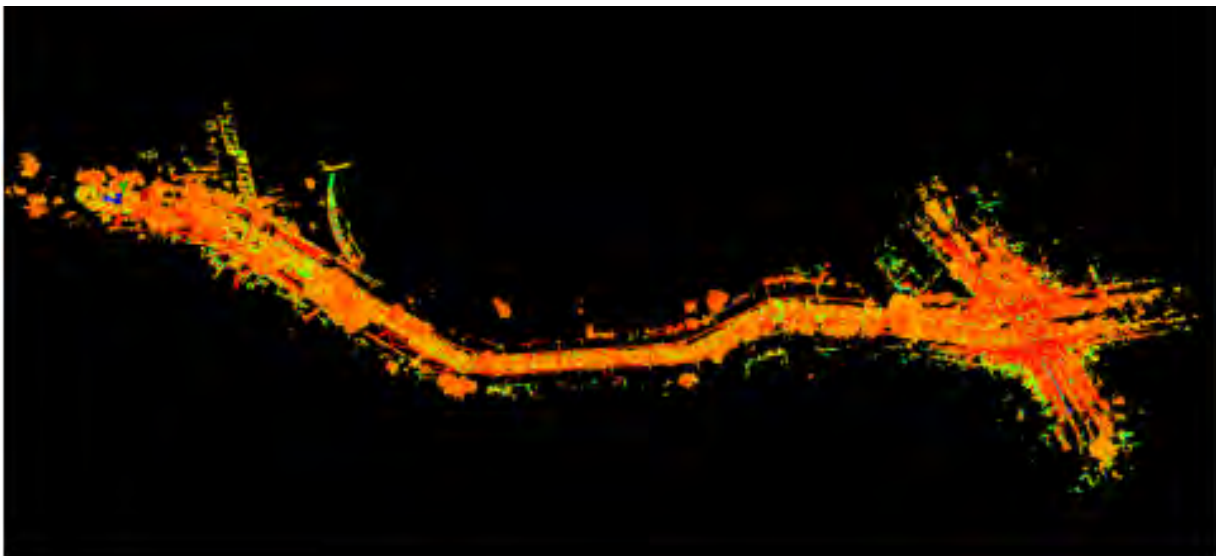


Figura 31. Captura de pantalla del *Model Space* del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.

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-036-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 plata-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	Recoleccionar 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
	SDI [mg/l]	1000,00	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-034-SCTI-2015	
	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.	
	Oxígeno disuelto [mg/l] O2	4	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	Medidor de oxígeno.	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.
	Conductividad eléctrica	-	-	Imprescindible	NMX-AA-093-SCTI-2000 Conductímetro	Deben tomarse un mínimo de 2.0 litros para el muestreo macro-Kjeldahl y 500 ml para el muestro 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 laboratorios, 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	Recoleccionar 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	Desable	NMX-AA-036-SCTI-2001	

Variables inorgánicas	Cloruros como Cl ⁻	250	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Medición con tiras reactivas o espectrofotometría. 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			
	Nitritos como NO ₂ ⁻	10	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible			
	Nitratos como NO ₃ ⁻	1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible			
	Sulfatos como SO ₄ 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 enteriformes fecales u organismos termotolerantes	no detectables	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	NMX-AA-042-SCTH-2015		
Plaguicidas	Hexachlorobenceno [mg/l]	1	NOM-127-SSAI-1994	Descable	NMX-AA-71-1981		
	DDT, encicrina, dimetotoo, diazinón.	-	-	-	-		
Farmacéuticas	Hidrocarburos	Benceno	10	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible	Se identifican cada una de las variables mediante la técnica de espectroscopia infrarroja. (Robledo <i>et al.</i> , 2017)	
		Tolueno	200	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		
		Naftaleno	0.02	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
	Farmacéuticos	F sulfoceno	500	NOM-127-SSAI-1994	Imprescindible		Utilización de la técnica de microextracción en fase sólida, cromatografía de gases y espectrometría de masas. (Pérez-Alvarez, A. y Costillo-Alamís, A. 2015)
		Bisproprano	-	-	Descable		
		Paracetamol	-	-	Descable		
		Clotazepam	-	-	Descable		
		Antibióticos	-	-	Descable		
		Inhibidores de bomba de protones. (omeprazol, pantoprazol, etc.)	-	-	Descable		
		BEAS.	-	-	Descable		
		Carbamazepinas	-	-	Descable		
		Bisphenol A	-	-	Descable		
		Triclosan	-	-	Descable		
Drogas legales e ilegales	-	-	-	Descable	Cromatógrafo		
	-	-	-	Descable	Cromatografía de líquidos acoplada a MS/MS		
Líquidos	Utilización de la técnica de cromatografía de gas. (Durán-Alvarez <i>et al.</i> 2012)	-	-	-	-	Utilización de la técnica de cromatografía de líquidos acoplada a cromatografía de masas con HPLC. (Damiá Barceló, L. y López de Alda, 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.

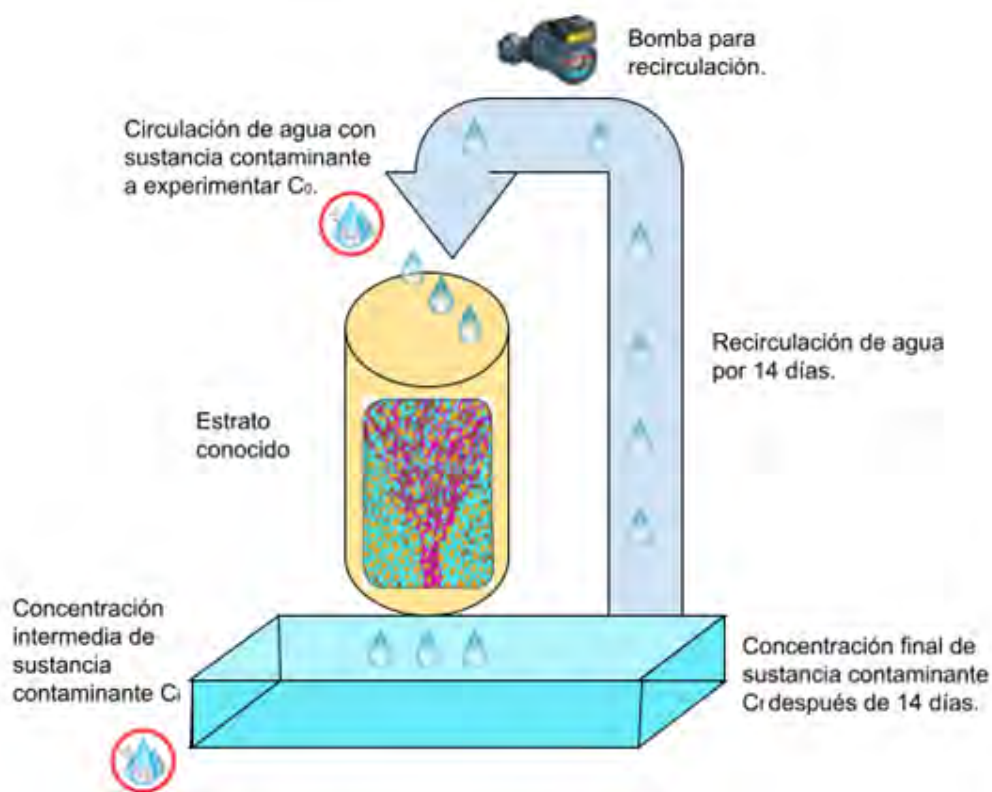


Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.



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 bas dos 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.

1.3.6 Primavera 2022

Se trabajó la hidrología superficial de la cuenca de Arroyo Grande donde se crearon cuatro escenarios para analizar distintos modelos hidrodinámicos. Una vez que se realizó el reconocimiento de la hidrología, se generaron varios escenarios con la selección de distintos cauces secundarios y la ubicación de sus respectivas represas. 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. En uno de los escenarios (el cuarto) 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, dicho pozo se modeló de 45 metros de profundidad con un caudal de 1 m³/día.

A continuación, una tabla donde se presentan los cuatro escenarios generados, mencionados con anterioridad, junto con lo que cada uno de ellos representa.

Tabla 2. 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

Las propuestas se pretenden implementar en una cuenca de área 115.8 km². Las condiciones en las que se realizaron las simulaciones difieren a un poco a comparación de lo que ocurre en la realidad. 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. Por lo anterior, se recomienda el uso del geocostal para la construcción de represas. La función del geocostal es controlar la erosión hídrica, reducir la velocidad de escurrimiento, detener azolvante y filtrar agua.

Posteriormente en otra etapa del curso, 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. 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.

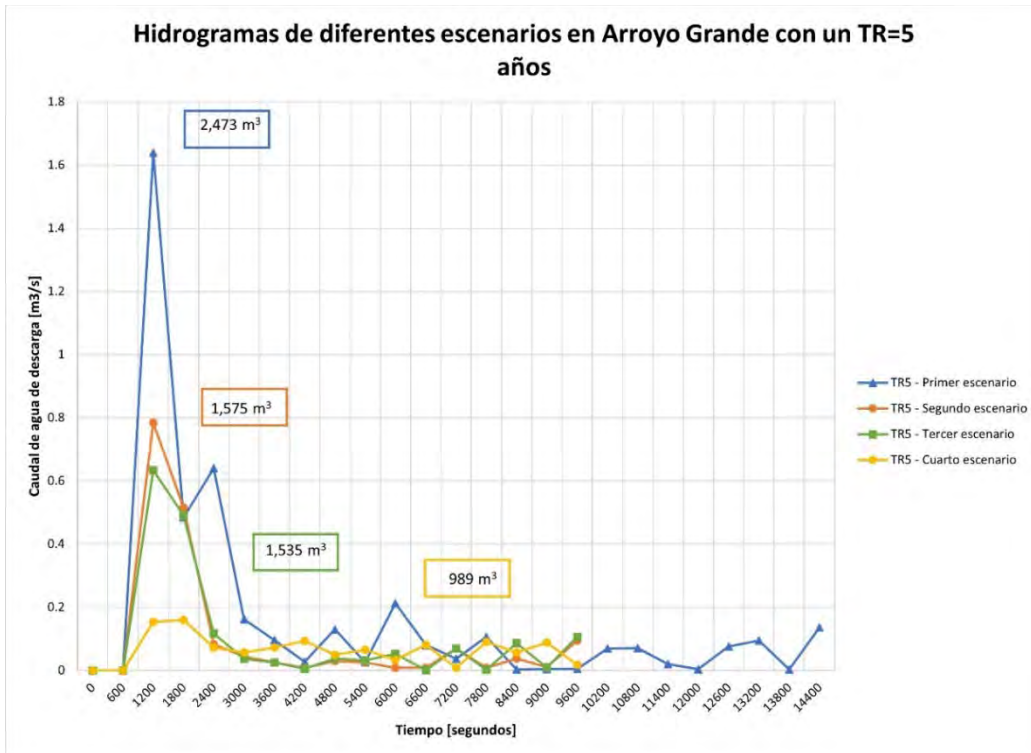


Figura 34. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.

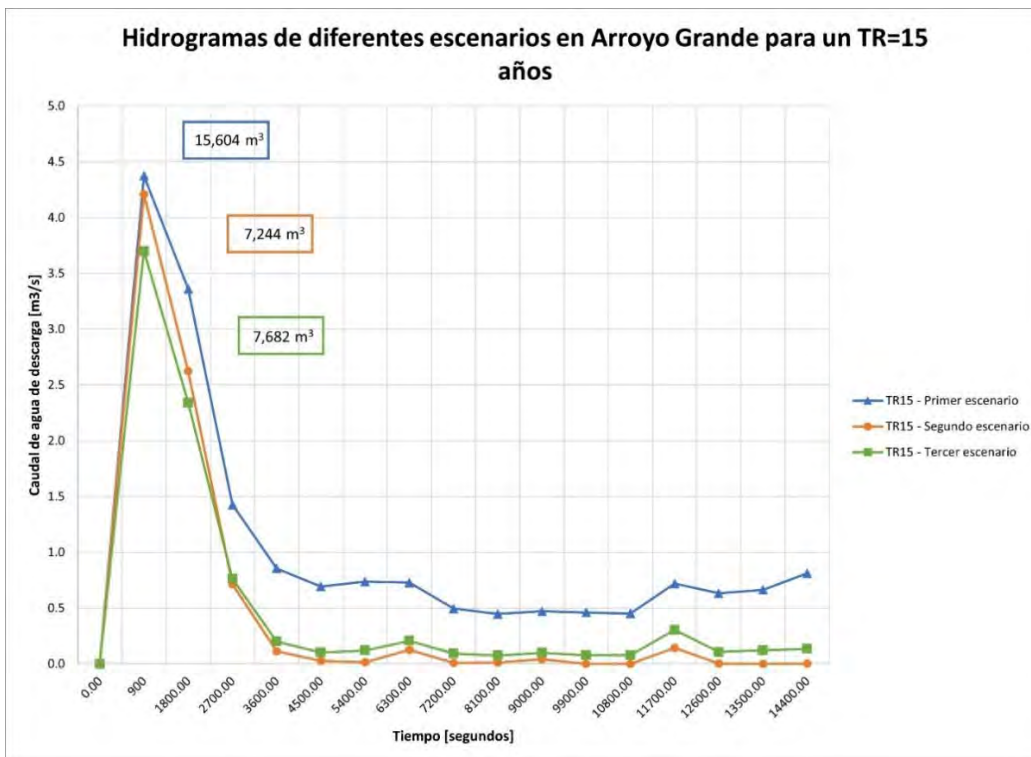


Figura 35. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.

Como se observa en las gráficas 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.

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.

Se generaron 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. 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.

Se puede concluir que el cuarto escenario es la mejor opción para disminuir la problemática de inundaciones en el AMG. 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.

Se muestra la simulación obtenida con MODFLOW para el pozo de 45 m de profundidad con una carga hidráulica constante por 14 días consecutivos.

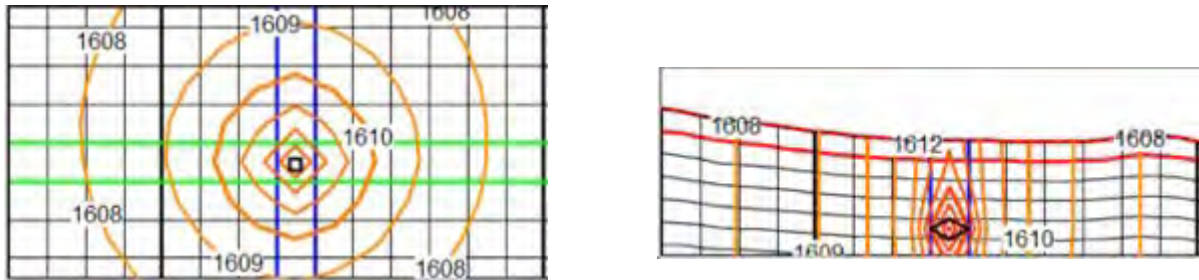


Figura 36. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).

En otros resultados, 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.

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

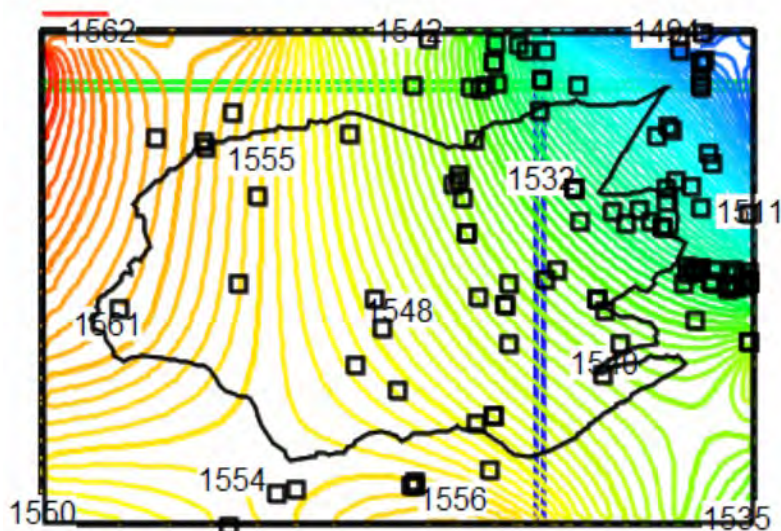


Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.

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.

En otros resultados, se buscó generar un plan de trabajo para obtener un diagnóstico del sistema hidrológico en el ITESO, así como de estimar su balance hídrico. 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. 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.

Equipos necesarios para el proyecto "Campus Hidrológico"



Figura 38. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto "Campus Hidrológico".

1.3.7 Verano 2022

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 son por cuatro:

1. Generar una propuesta viable para mitigar las inundaciones y contribuir en la recarga de los mantos freáticos en la cuenca del Chicalote. Justificando dichas propuestas con modelos de IBER, validando la parte constructiva y los costos de dicha propuesta, así como los beneficios e implicaciones.
2. Proponer soluciones para los problemas de inundaciones en Arroyo Seco, corrección del modelo digital de elevación del territorio que abarca la cuenca.
3. Estudiar la viabilidad de un proyecto de vaso regulador en el predio denominado “La Colmena”, perteneciente a la subcuenca Arroyo Seco.
4. Realizar la caracterización del incendio 2021 en el Bosque de la Primavera, plantear zonas de mayor afectación para posteriormente ver resultados de la intervención en estas zonas.
5. Comenzar el modelado de un nuevo escenario, el Arroyo Teinstique, generar y recopilar la información necesaria para realizar un modelo y poder plantear el uso de represas y analizar los resultados, proponiendo nuevos proyectos y alternativas para una mejor gestión del recurso hídrico en la zona.

1.5 Descripción de los equipos de trabajo

Durante el periodo de Verano 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 conformado por cuatro personas se enfocó en la propuesta de Arroyo Seco. En este frente se hicieron varios modelos para analizar el comportamiento del cauce si se coloca un vaso regulador en el terreno llamado La Colmena. Se realizaron

alrededor de 9 modelos con variaciones en las profundidades del vaso regulador y también con la opción de colocar un pozo de absorción dentro del vaso. Por otra parte, se propuso la colocación de represas a lo largo del cauce y se realizó una caracterización del incendio para obtener las zonas donde la situación es más crítica. También se elaboró una propuesta constructiva de las represas.

Otro frente conformado por 4 personas se dedicó a él análisis de la microcuenca del Chicalote donde se crearon modelos para analizar situaciones críticas en algunos puntos de la Zona Metropolitana de Guadalajara. En este frente se realizó una propuesta de jardineras inundables en las avenidas Patria, Rafael Sanzio y Miguel Ángel.

Por último, se conformó un frente, integrado por dos personas. En este frente se empezó con el estudio y análisis del Arroyo Teinstique el cual consistió en ver cómo se comporta el arroyo y en realizar un modelo colocando represas en algunos puntos del cauce con el fin de mejorar su comportamiento.

2. Marco Teórico

2.1 Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico 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 M. , 2007). 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. Estas se categorizan en quince componentes, y se asume que el ciclo comienza en los océanos, y avanza siguiendo el orden descrito a continuación (United States Geological Survey [USDG], s.f.):

1. Almacenamiento de agua en los océanos
2. Evaporación
3. Agua atmosférica,
4. Condensación
5. Precipitación
6. Agua almacenada en hielos y nieve
7. Agua de deshielo
8. Escorrentías superficiales
9. Corrientes de agua
10. Almacenamiento de agua dulce
11. Infiltración
12. Descarga de agua subterránea
13. Manantiales
14. Transpiración
15. Agua subterránea almacenada
16. Distribución global del agua

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 39). Consideramos a la precipitación y a la evaporación, como los principales factores climáticos que afectan el proceso del ciclo hidrológico, pues son nuestras variables de entrada y se salida en el ciclo (María Paula & Jorge, 2012). La **precipitación**, también llamada condensación, consiste en caída de agua líquida o sólida en la atmósfera (Oki, Entekhabi, & Ives, 2020). Por otro lado, la **evaporación** es el proceso por el cual el agua de la superficie terrestre pasa del estado líquido al vapor, siendo la energía solar el principal factor desencadenante del proceso (María Paula & Jorge, 2012).

Pertencientes a la etapa de precipitación, se encuentran tres principales escenarios posibles donde puede terminar el agua precipitada:

- **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).
- **Escurrimientos:** 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 M. , 2007).



El estudio y entendimiento del ciclo hidrológico es indispensable para llevar a cabo cualquier plan de mitigación o remediación ambiental, que se focalice en la conservación del agua. Desafortunadamente, 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, esta 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 (ver Tabla 3). Aunque el volumen total de agua en nuestro planeta no ha variado en los últimos 30 a 40 mil años, este sí ha sufrido un

deterioro notorio la calidad, debido al crecimiento de la población y de las actividades asociadas (Auge M. , 2007).

El 70% de la superficie del planeta está cubierta por agua, pero sólo el 2.53% es agua dulce (Gómez Ugalde, Mora-Flores, García Salazar, & Valdivia, 2012). Analizando esta información desde el punto de vista del recurso hídrico (agua dulce) 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 (Auge M. , 2007). 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.

La siguiente tabla (Tabla 3), muestra la distribución del agua en el mundo según el Servicio Geológico de los Estados Unidos:

Tabla 3. 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	67 x 10 ³	0.005

	humedad del suelo)		
	Aguas subterráneas hasta una profundidad de media milla	4.2×10^6	0.31
	Aguas subterráneas profundas	4.2×10^6	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 3, 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. Ambas son razones por las cuales existe gran interés en trabajar en su conservación.

En seguida, se presentan conceptos geológicos de importancia para tener una mayor comprensión del agua subterránea (Custodio & Llamas, 2001):

- **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.
- **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.

2.2.1. Acuíferos

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 (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)** 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.

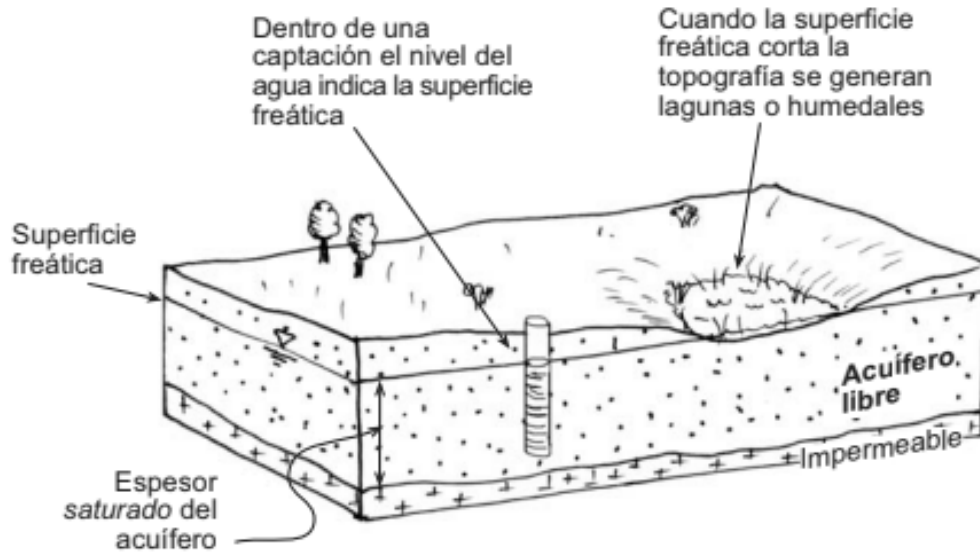


Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).

En cambio, los **acuíferos confinados** (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) 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.

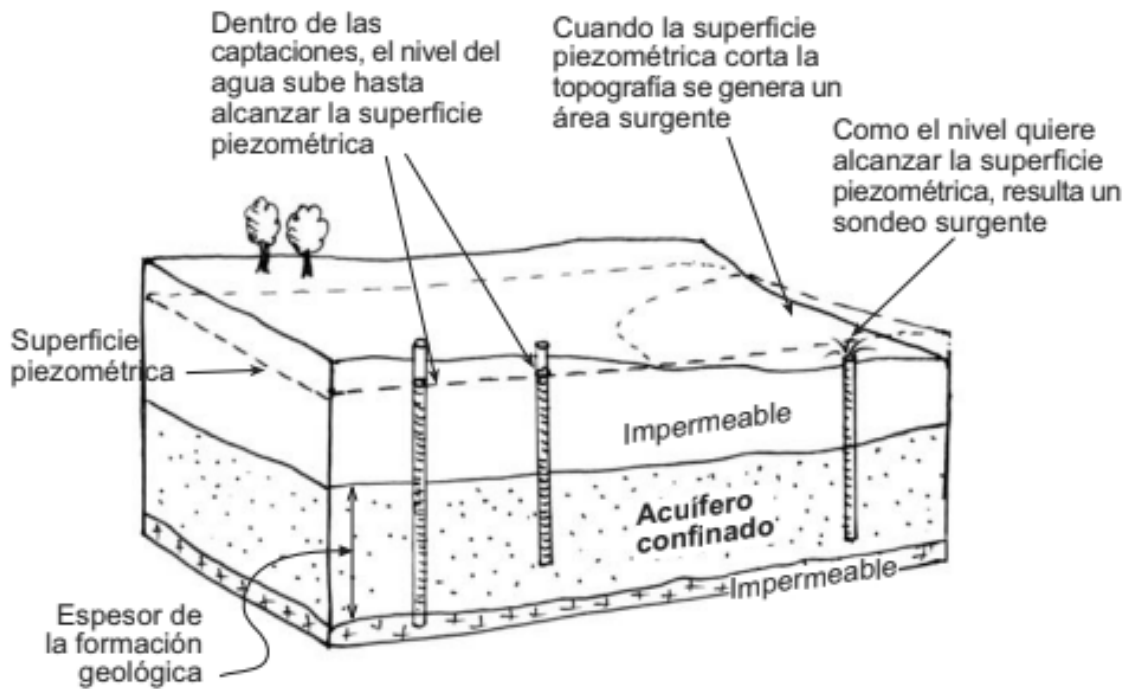


Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).

Los acuíferos semiconfinados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) son acuíferos a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables; permiten pequeñas filtraciones. Y los colgados (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) 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).

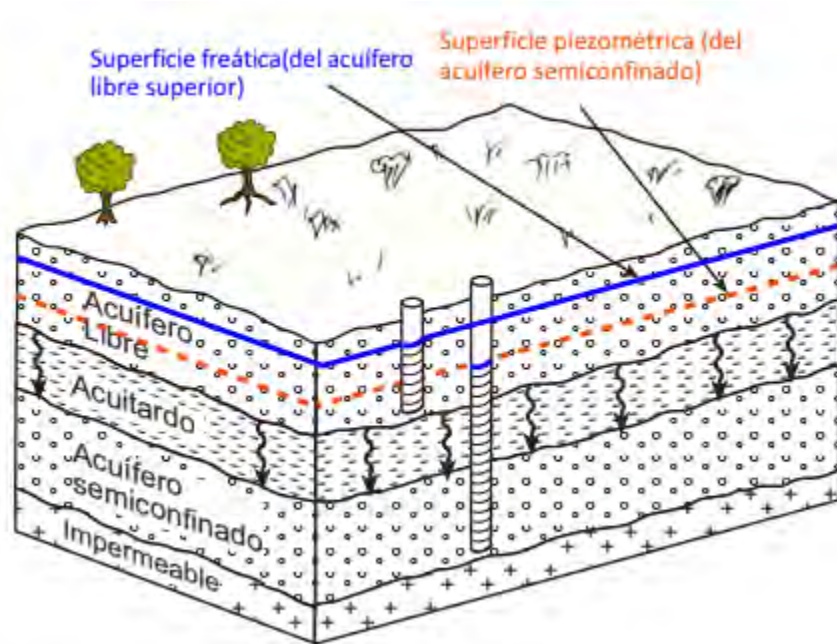


Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).



Figura 43. 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 (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Figura 44. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).

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). En la práctica resulta muy difícil y a veces imposible establecer el límite por encima del cual la explotación se transforma en sobreexplotación (Auge M. , 2006), pero está claro que esto suele generar consecuencias como la disminución de su reserva y de la productividad, salinización, contaminación, subsidencia, desecamiento, etc.

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.

2.2.2. Factores que determinan el movimiento hídrico subsuperficial

Las aguas subterráneas fluyen por los acuíferos, que son formaciones geológicas que constan de incontables poros diminutos entre los granos de suelo y de sedimento; también, 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).

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 es 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 45. Esta porción de agua que no drena por gravedad se calcula restando la porosidad eficaz de la total, y se le llama retención específica.

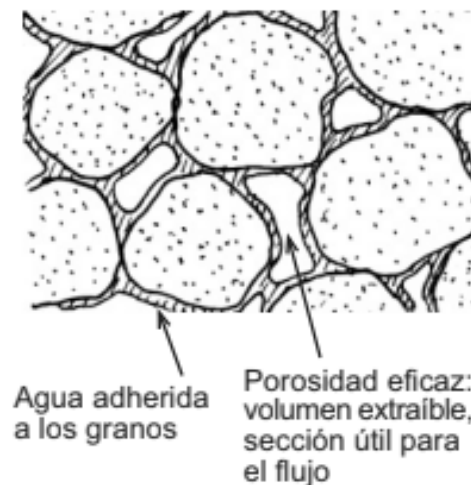


Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).

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.):

$$\frac{Q}{A} = K * i \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde:

Q = Caudal [=] L³/T

A = Área transversal [=] L²

K = Conductividad hidráulica [=] L/T

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

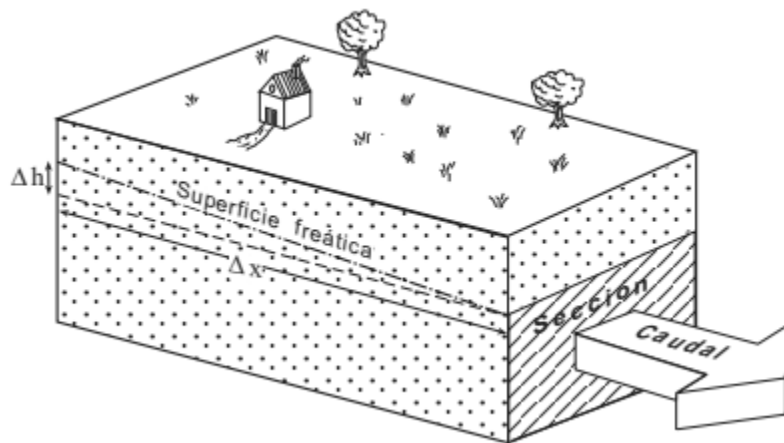


Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** expone las características de porosidad y permeabilidad de cada uno de estos conceptos previamente descritos.

Tabla 4. 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

También es importante hablar del **gradiente hidráulico**, que 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):

$$Transmisividad = K * espesor$$

Ecuación 4.

Donde:

$$Transmisividad [=] L^2/T$$

$$K [=] L/T$$

$$espesor [=] L$$

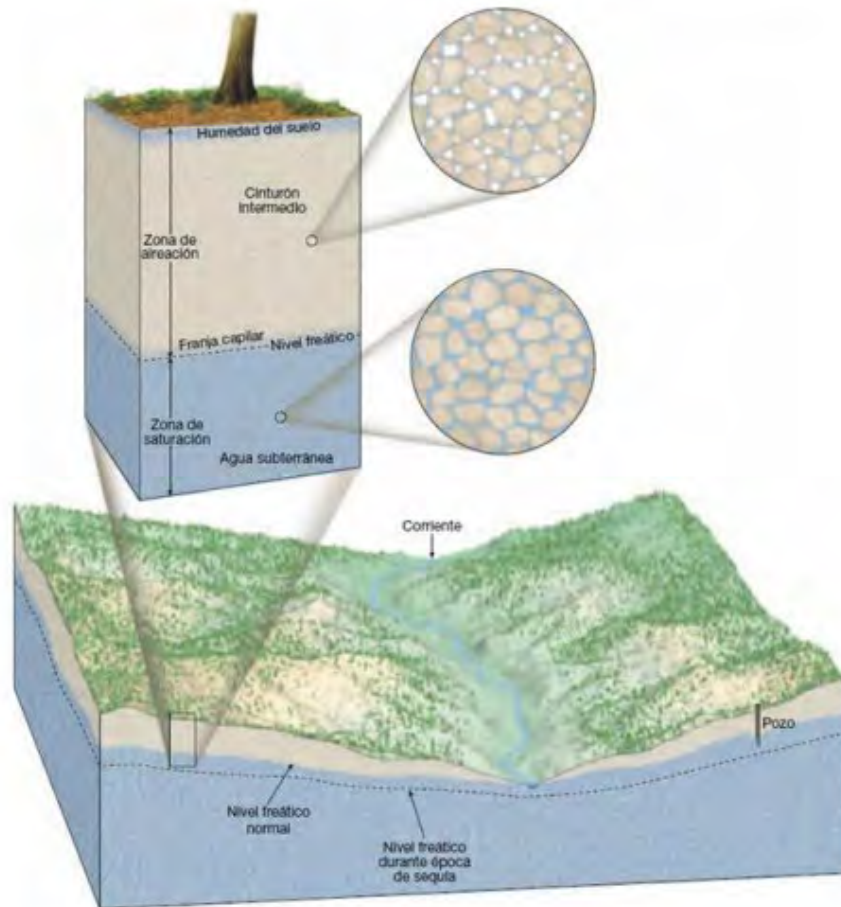


Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).

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 47. 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).

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 48 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).

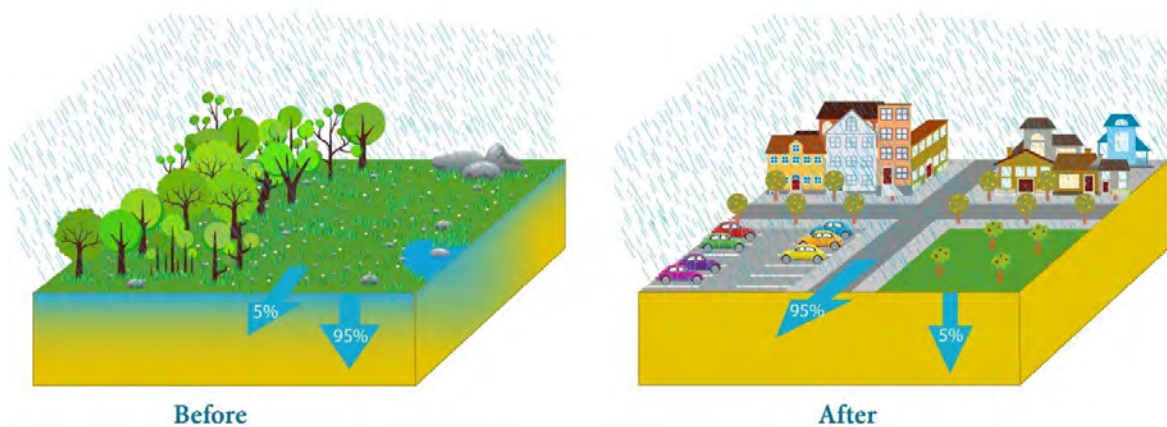


Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).

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 49. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).



Figura 50. 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).

La aportación de contaminantes de mayor impacto es la que resulta de las actividades humanas. Los seres humanos utilizamos 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. Esto se conoce midiendo la actividad de los iones positivos libres en el agua. Por su fórmula molecular H_2O al disociarse ocurre lo siguiente: $H_2O \leftrightarrow H^+$ (Iones Protón) + OH^- (iones Hidroxilo). El agua pura tiene un pH neutro, lo que significa que hay un equilibrio entre las concentraciones de protones e hidroxilos (D'Urquiza, A. 2020). Debido a que el agua está en constante interacción con el entorno debido al ciclo hidrológico, el pH está en constante cambio. En aguas no contaminadas, el pH está controlado principalmente por el equilibrio entre los iones de HCO_3^- (Bicarbonato). Los cambios de pH se pueden ocasionar por lluvias ácidas, desechos industriales, drenaje de minas o lixiviación de minerales (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

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). La dureza no se ha ligado aún con efectos nocivos a los humanos, sin embargo, representan una amenaza debido a que una alta dureza del agua deja incrustaciones en las tuberías

y reducen la efectividad en los intercambiadores de calor, puesto a que también dejan incrustaciones. Como resultante, es más complicado remover suciedad y grasas de equipos industriales (D'Urquiza, A. 2020).

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 mayoría de los componentes que no contengan carbono se catalogan como inorgánicos.

Entre la categoría de componentes químicos inorgánicos se encuentran el oxígeno (i.e., O₂) 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).

En la última categoría se encuentran 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 arrastra 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).

En su gran mayoría, las aguas de lluvia tienen como disposición final 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 grosso 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 ser contaminado 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 algunos 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 (Mompamet, 2008).

Actualmente se ha reconocido a nivel mundial que se necesita un cambio para la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos (Mompamet, 2008). Este tipo de técnicas 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.), puesto que tienen los siguientes beneficios y características.

- 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 51, 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.

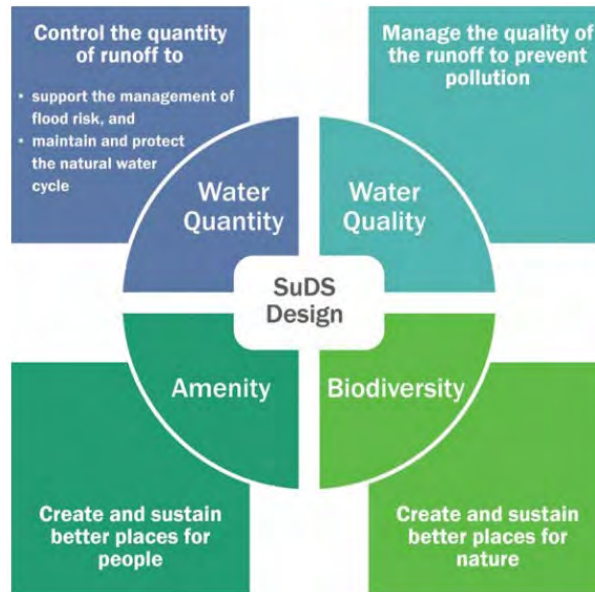


Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).

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 (Paus & Braskerud, 2014)

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 52 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 53 se presenta un ejemplo de este tipo de SuDS.

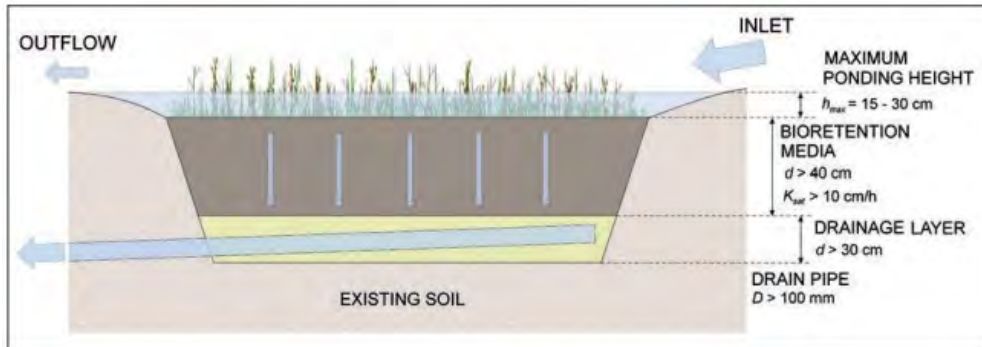


Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).



Figura 53. 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 54). 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, Graillot, & 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.

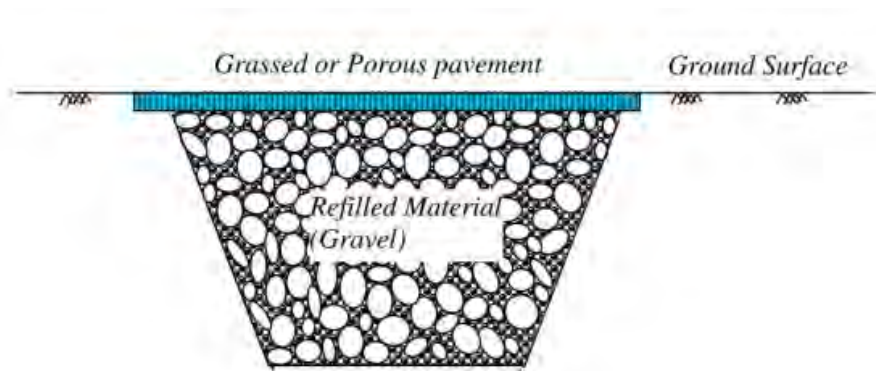


Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).

Por su parte los techos verdes consisten en aprovechar la superficie de estos añadiendo vegetación. Como se muestra en la Figura 55, 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).

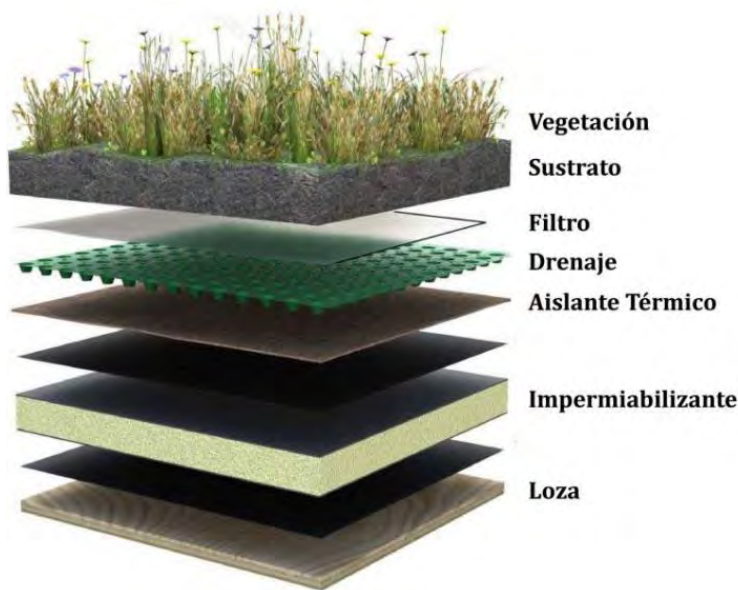


Figura 55. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).

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 5. 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 56 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.

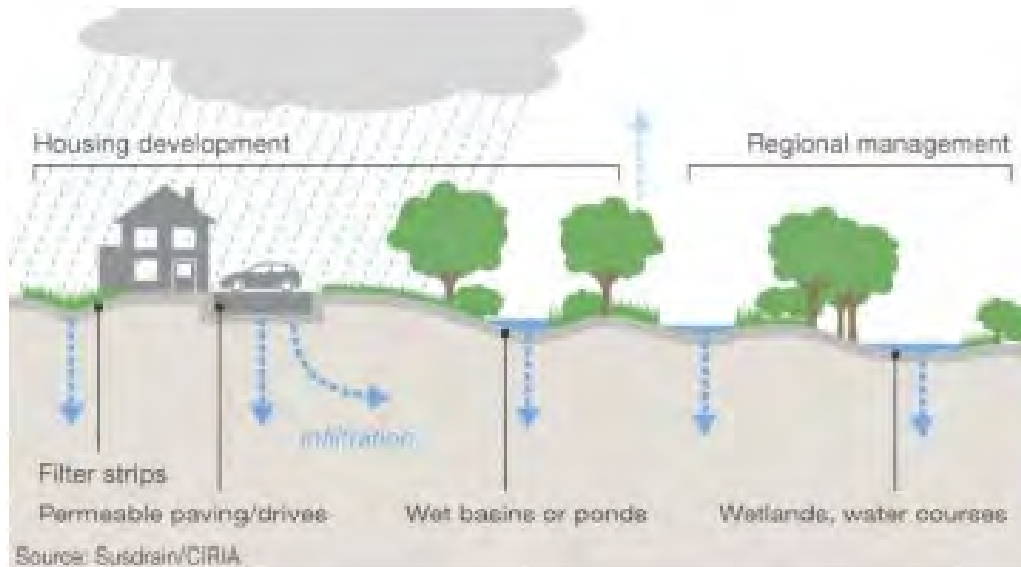


Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)

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 57 muestra cómo es el funcionamiento de los barriles de lluvia (Jennings *et al.*, 2013).

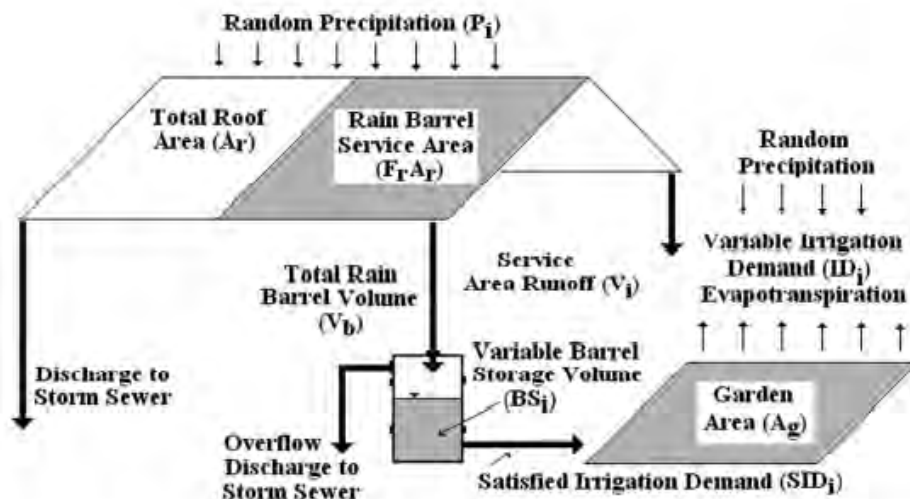


Fig. 1. Rain barrel for urban garden irrigation stormwater runoff management strategy

Figura 57. 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, los 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 58). 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.

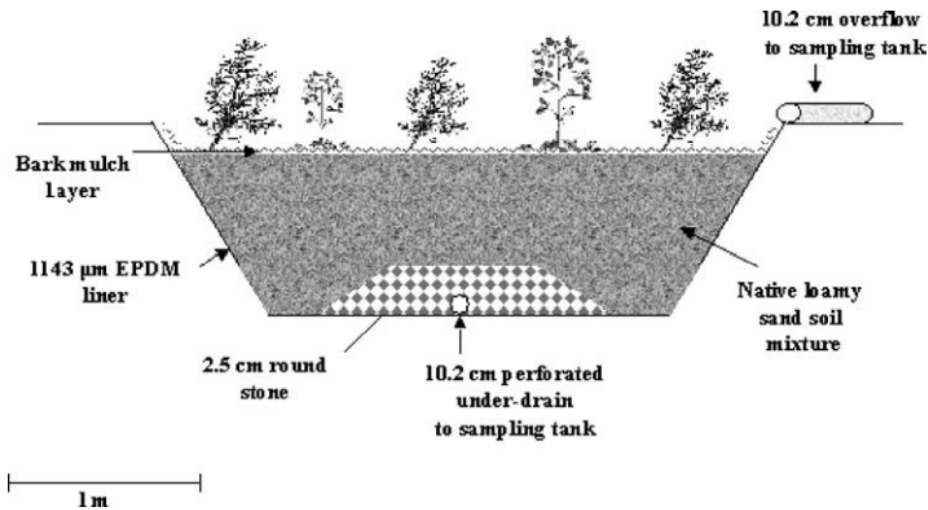


Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.

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 6. 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 59 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 59. 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 de Acuíferos

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):

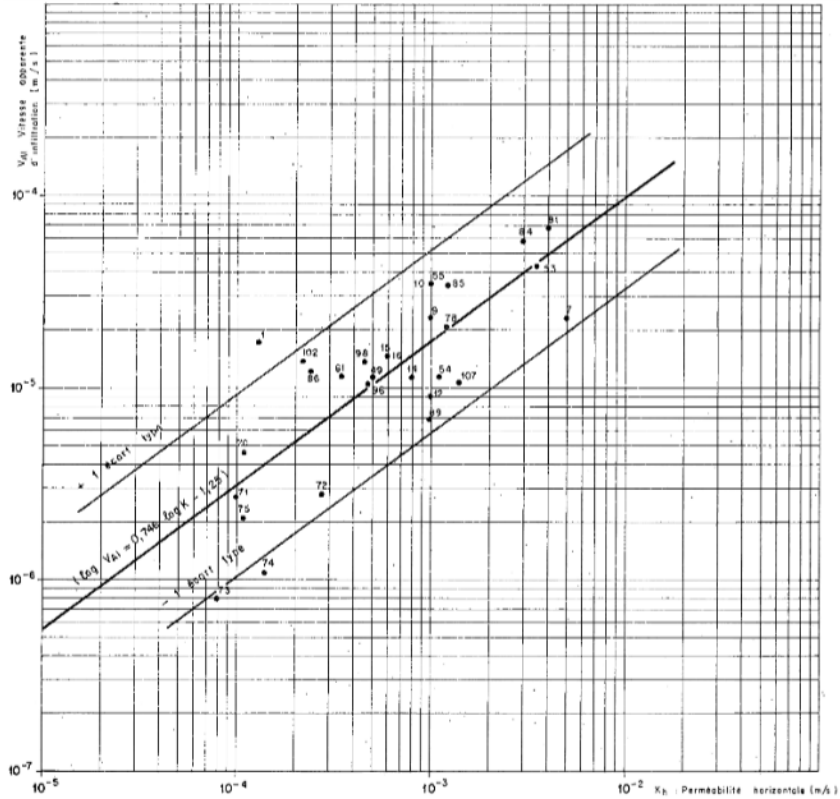


Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971

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

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).

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):

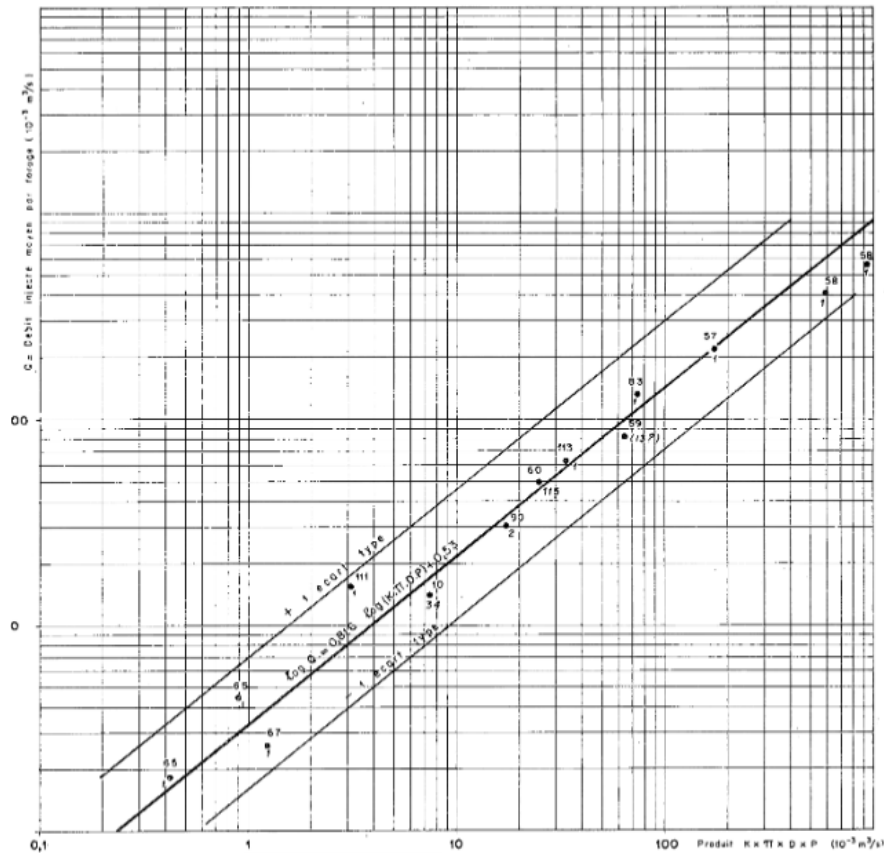


Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971

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

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, muchas ciudades alrededor del planeta comparten el problema de la escasez de agua potable; 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.

Dicho aumento en la demanda de agua y acumulación de poblaciones en centros urbanos ocurrió de la mano de un desarrollo económico inestable y de una falta de experiencia para administrar el agua como recurso. 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 de 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 se le conoce 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. En la siguiente tabla se presenta una breve descripción de los roles que juega cada uno de ellos (Grigg, 2011).

Tabla 7. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).

Sector	Roles de gestión	Roles de gobernanza
Suministro público e industrial	Proveer 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	Proveer 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 zonas irrigadas y las alimentadas por la lluvia.	Regular la asignación y el drenaje, empoderar a los sistemas de riego, supervisar las organizaciones.

Control de flujo interno	Coordinar 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	Gestionar el desarrollo y el uso de las aguas subterráneas.	Regular la extracción y protección de aguas subterráneas
Gestión de áreas y usos múltiples	Proporcionar 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 62, 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).

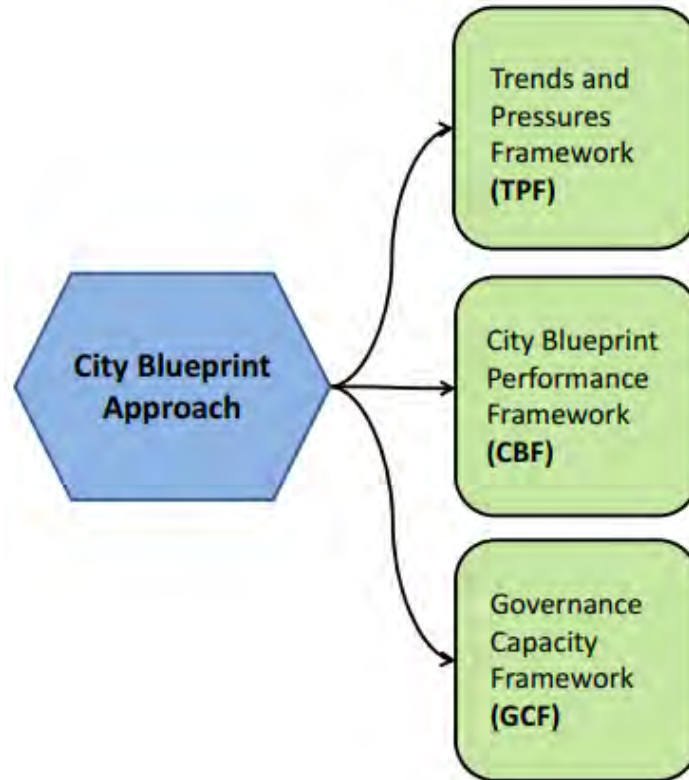


Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).

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).

Las ventajas de este tipo de sistemas son innumerables, pareciera que una de las principales es el hecho de poder tener una calificación y así poder tomar acciones para mejorar o conservar las buenas prácticas, según sea el caso. Pero no debemos perder de vista que estos sistemas también nos ayudan a recabar datos y generar mediciones importantes para futuros trabajos. La falta de información es un problema grave pero este tipo de proyectos facilita las soluciones a dichos problemas.

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 63.

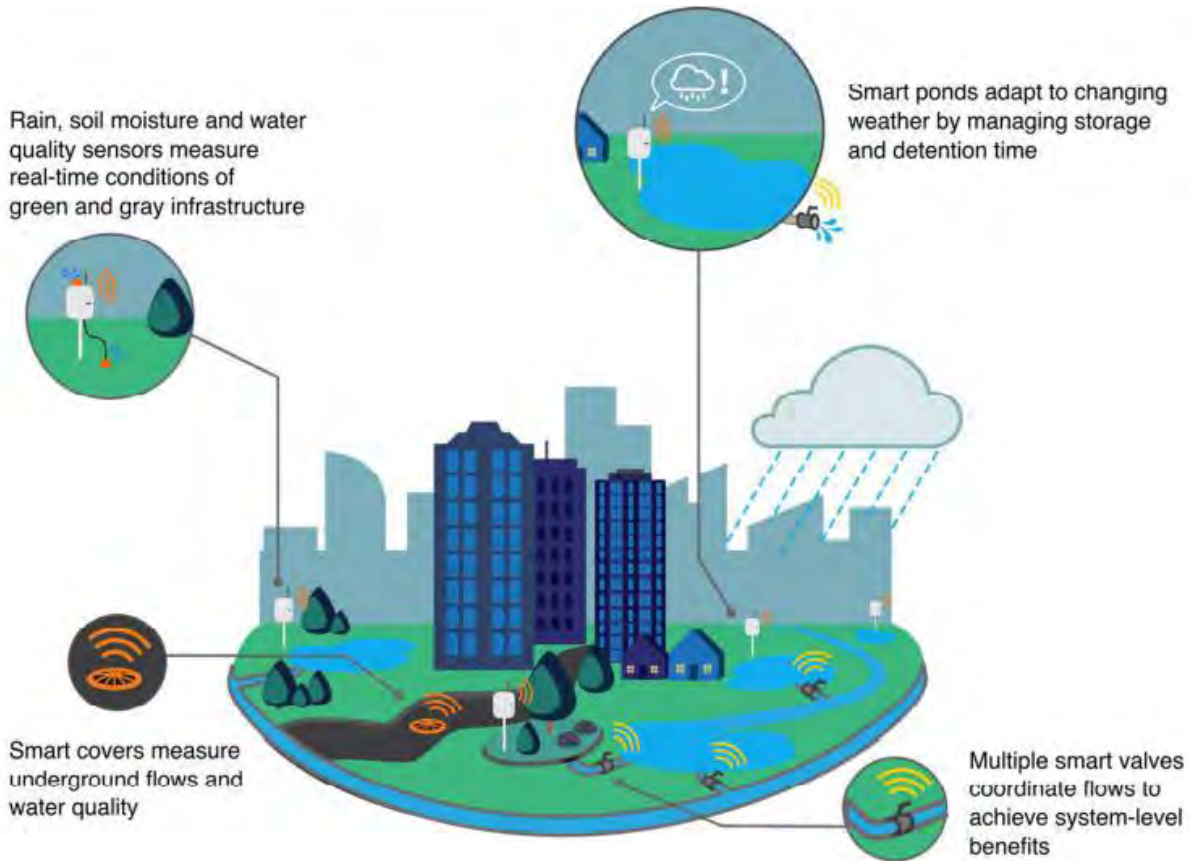


Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).

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). También entran en esta categoría el costo de los periodos de mantenimiento de los sensores y, en algunas zonas, la seguridad de estos. Si ponemos de ejemplo México, podemos decir que existen ciertas zonas donde la gente no sabe relacionarse con este tipo de tecnologías y se pudiera llegar a tener problemas de delincuencia o vandalismo.

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.



Figura 64 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016)

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). Otra de las desventajas de esta propuesta es que se necesita bastante espacio dentro de la ciudad para recolectar y almacenar la cantidad de agua solicitada, sin embargo, en ciudades “nuevas” tenemos la posibilidad de destinar, desde un inicio, espacios para este tipo de actividades.

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

3.1 San Juan de Abajo

3.1.1 Resumen Ejecutivo

San Juan de Abajo cuenta con una población de más de 11,000 personas y una economía agrícola. La implementación de sistemas de recarga es crucial para prevenir la escasez de agua para el futuro crecimiento demográfico. Para esto, se realizaron una serie de mapas utilizando SIG (Sistemas de Información Geográfica) e información recabada en campo sobre el pueblo -los mapas son presentados en este documento con sus respectivas descripciones y se busca que el lector tenga la mayor claridad sobre la hidrología de San Juan de Abajo-. Posteriormente, se estudió y entendió el comportamiento del agua en el sitio utilizando el programa de modelación "Iber". Finalmente, con los resultados obtenidos, se propusieron diversas intervenciones, considerando a la vez, factores ambientales, socioeconómicos, riesgos, y competencias legales.

3.1.2 Introducción

La hidrología desempeña un papel fundamental en la gestión sostenible de los recursos hídricos, destacando su crucial importancia en la recarga de los mantos acuíferos. Esta disciplina estudia el comportamiento, distribución y movimiento del agua en la superficie terrestre, permitiendo la comprensión de los procesos que afectan directamente la disponibilidad de agua subterránea. La recarga de los mantos acuíferos es esencial para mantener el equilibrio hídrico en las regiones. También está estrechamente relacionada con la gestión de inundaciones y prevención de sequías. Conocer los patrones de precipitación y escorrentía puede ser de gran ayuda al momento de tener escasez de agua o al verse implicado en situaciones climáticas complejas.

En San Juan de Abajo se busca la implementación de sistemas de recarga ya que, si este poblado se urbanizase o aumentara drásticamente su población en los próximos años, se corre riesgo de tener escasez de agua. Actualmente, según el INEGI (2020), San Juan tiene una población que rebasa las 11,000 personas. Los mismos habitantes han contado que, hasta el día de hoy, si se cava un hoyo en la tierra es muy probable

que se encuentre agua. Teniendo en cuenta que el crecimiento de las urbes es cada vez más rápido, se deben considerar estrategias que prevengan catástrofes. Parte de la economía del lugar está basada en la agricultura, sin agua este comercio no puede prosperar, por ende, tampoco la población. Tener un entendimiento de la hidrología del lugar es importante para proponer una infraestructura adecuada. Los ríos Huichichila y Ameca son cuerpos de agua muy cercanos al pueblo, ambos muy especiales, sin embargo, en tiempos de lluvias, sus calados aumentan considerablemente y presentan un riesgo para la población. Por esto, considerar estrategias de recarga y gestión del agua es importante. Se busca beneficiar al pueblo, lograr que no haya escasez de agua y que se tenga mayor control sobre las condiciones naturales del sitio.

3.1.3 Objetivos del Documento

El presente documento tiene el objetivo de realizar un análisis del contexto de cuenca, ocal, orográfico, litológico, de uso de suelo y vegetación, e hidrológico. Con base en lo observado se recomendarán infraestructuras a realizar y sus implicaciones ambientales, socioeconómicas, legales y de riesgos y beneficios.

3.14 Marco de Referencia

Para llevar a cabo el análisis planteado se comenzó por determinar la microcuenca de estudio correspondiente al Río Huichichila/Huastitán hasta su desembocadura con el Río Ameca (Figura 1). Dicha microcuenca está ubicada en el estado de Nayarit, en el municipio de Bahía de banderas y cuenta con una extensión de 6,804.24 ha (Figura 2). Dentro de la microcuenca de estudio es posible ubicar al poblado de San Juan de Abajo.



Figura 65. Localización de la microcuenca de estudio. Elaboración propia.



Figura 66. Localización de la microcuenca San Juan de Abajo con respecto a los límites estatales y municipales.

Una vez establecida el área de estudio, se prosiguió a determinar las características relevantes para el estudio de la hidrología de la zona. Dichas características son presentadas a continuación.

3.1.5 Contexto de cuenca

La microcuenca de San Juan de Abajo forma parte de la subcuenca de Río Ameca-Ixtapa (Figura 3), la cual cuenta con una extensión de 232,273 ha, que a su vez forma parte de la cuenca del Río Ameca-Ixtapa (Figura 4), la cual cuenta con una extensión de 444,313 ha (INEGI, 2013). Al analizar los parteaguas de la cuenca de San Juan de abajo, es posible observar que estos corresponden en la parte superior al parteaguas de la cuenca y la subcuenca Río Ameca-Ixtapa, mientras que a los costados los parteaguas corresponden a los presentados por la delimitación de microcuencas del Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO, s. f.).

Dentro de la subcuenca Ameca-Ixtapa, es posible identificar como corrientes superficiales de nivel 1 al Río Ameca y al Río los Reyes, mientras que el río Huichichila, principal Río dentro de la microcuenca de San Juan de abajo, se encuentra ubicado como una corriente superficial de nivel dos dentro del contexto hidrológico de la subcuenca.

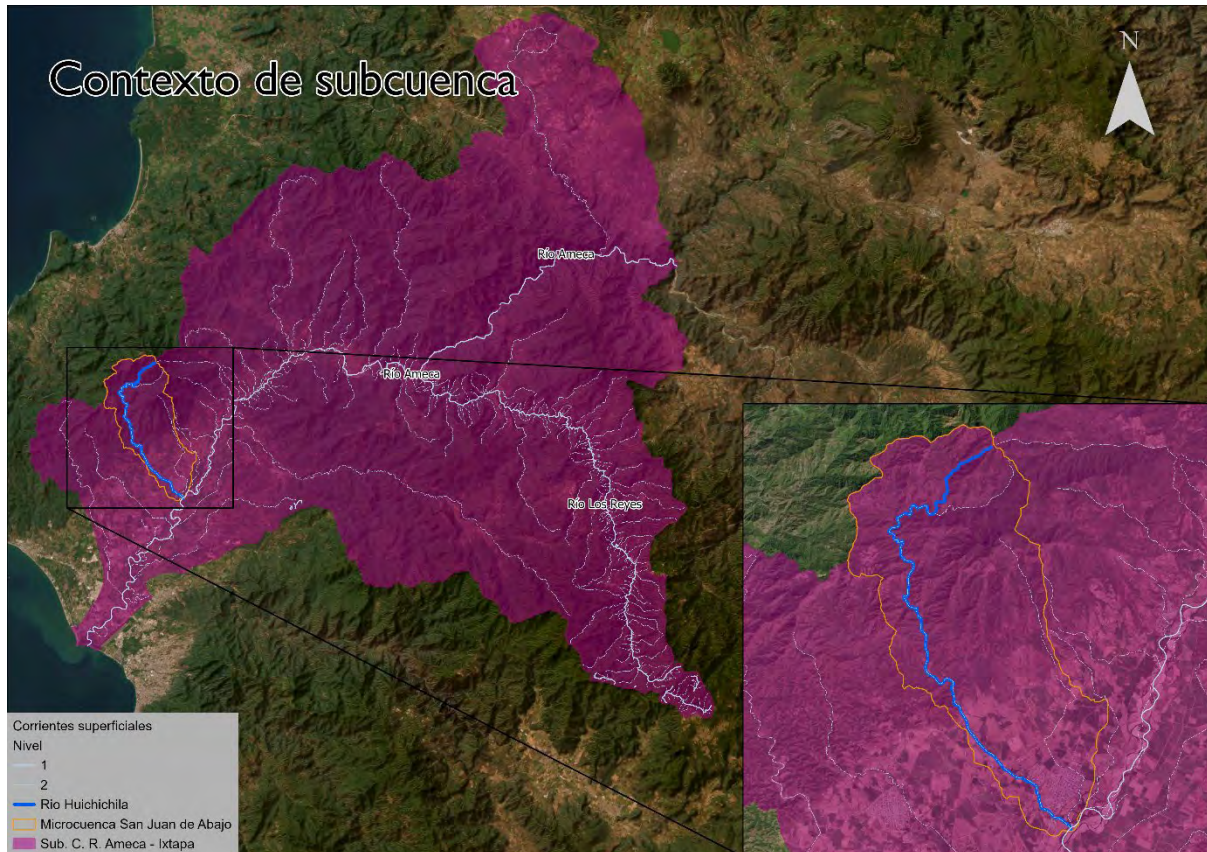


Figura 67. Localización de la microcuenca San Juan de Abajo dentro de la subcuenca Ameca-Ixtapa.

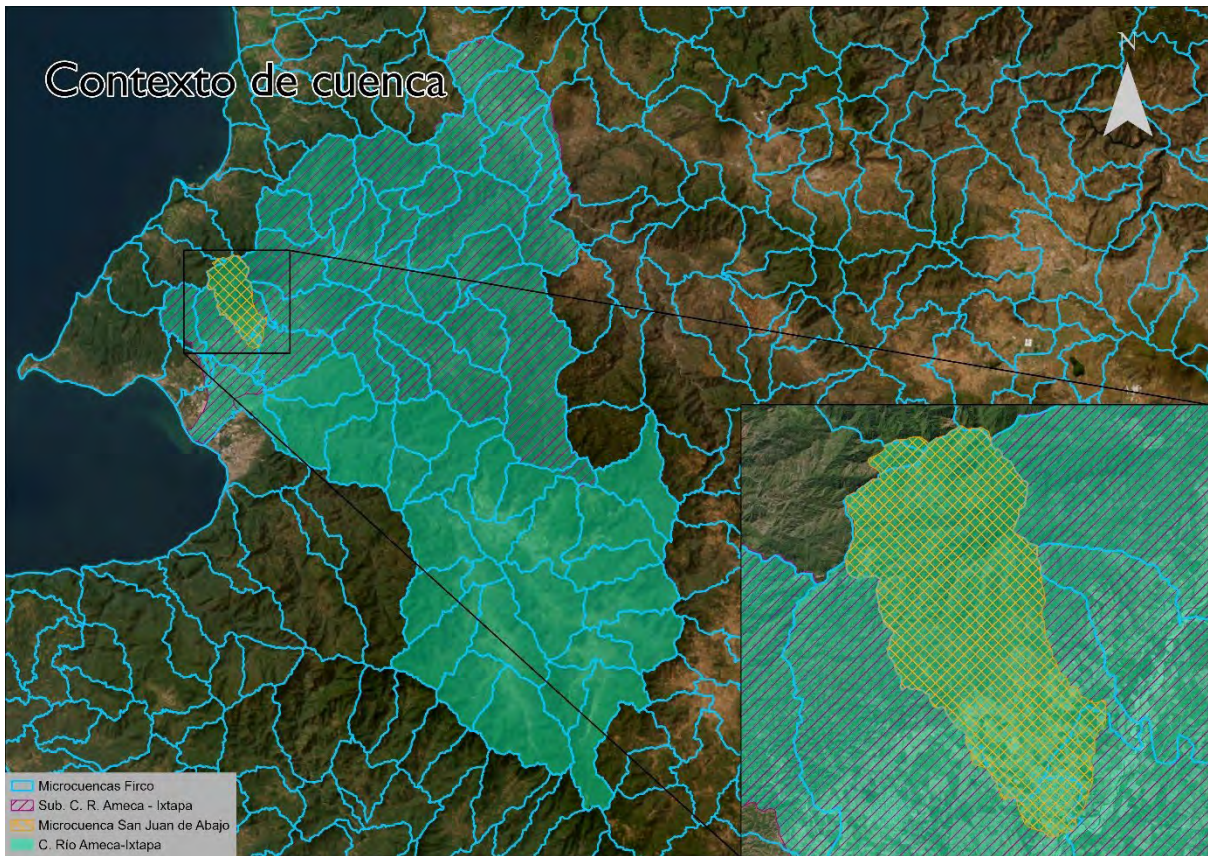


Figura 68. Localización de la microcuenca San Juan de Abajo dentro de la cuenca Ameca-Ixtapa.

Finalmente, para complementar el contexto de cuenca, se llevó a cabo un análisis a nivel microcuenca (Área de estudio). Para llevar a cabo dicho análisis se utilizó información presentada por el INEGI (2013), para determinar los flujos de agua superficiales en dicha zona Figura 5.



Figura 69. Contexto de Microcuenca San Juan de Abajo.

En la Figura 5, se presentan los órdenes de las corrientes superficiales. De esta figura es posible observar que el cauce de mayor orden y con mayor relevancia dentro de la microcuenca de estudio corresponde al Río Huichichila, dado que éste cruza la microcuenca desde la parte alta hasta la parte baja. No obstante, al noreste de la microcuenca es posible observar otro cauce relevante que drena la sección noreste de la microcuenca y que finalmente se une con el Río Huichichila previo a su descarga en el Río Ameca.

Por otro lado, el Río Ameca cobra relevancia dentro del área de estudio debido a las crecidas que este puede llevar a presentar, alterando el flujo del Río Huichichila en la parte baja.

3.1.6 Contexto local

San Juan de Abajo es una localidad ubicada en el estado de Nayarit, México. Se encuentra en la región de la Riviera Nayarit, una zona conocida por sus playas y destinos turísticos. Aunque San Juan de abajo en sí no es un destino turístico

prominente, se encuentra en una región que atrae a visitantes de todo el mundo. Al igual, muchos trabajadores de Puerto Vallarta han migrado a esta zona ya que el costo de vida es más barato.

En cuanto a las carreteras que conectan San Juan de Abajo, las principales vías de acceso son:

1. Carretera Federal 200: También conocida como la Carretera Costera del Pacífico, esta carretera es una de las principales carreteras de la región. Conecta San Juan de Abajo con otras localidades costeras de Nayarit, así como ciudades importantes como Puerto Vallarta, Jalisco, al sur y Tepic, la capital de Nayarit, al norte.
2. Carretera Estatal 200A: Esta carretera estatal conecta San Juan de Abajo con otras localidades cercanas dentro del estado de Nayarit. Proporciona acceso a áreas rurales y comunidades cercanas.

En cuanto a las actividades económicas las principales actividades económicas son las siguientes:

1. Agricultura: La agricultura es una parte importante de la economía de San Juan de Abajo. Los agricultores locales cultivan una variedad de cultivos, en su mayor parte sandía, pero también maíz, frijoles, calabazas, caña de azúcar y frutas tropicales como mangos y plátanos. Estos productos son para el consumo local y para exportación a Estados Unidos.
2. Ganadería: La cría de ganado, como vacas y cerdos, también es una actividad significativa de San Juan de Abajo. La ganadería proporciona carne y productos lácteos para la comunidad local y a veces, para los mercados regionales.
3. Pesca: Dado que San Juan de Abajo está cerca de la costa, la pesca es una actividad importante en la zona. Los pescadores salen al mar a las playas cercanas para capturar una variedad de peces y mariscos, que se venden en los mercados locales o se utilizan para el consumo de las familias locales.
4. Comercio Local: San Juan de Abajo cuenta con tiendas, mercados y pequeños negocios que ofrecen productos y servicios esenciales a la comunidad. Estos comercios incluyen tiendas de abarrotes, ferreterías, restaurantes locales y otros establecimientos comerciales.

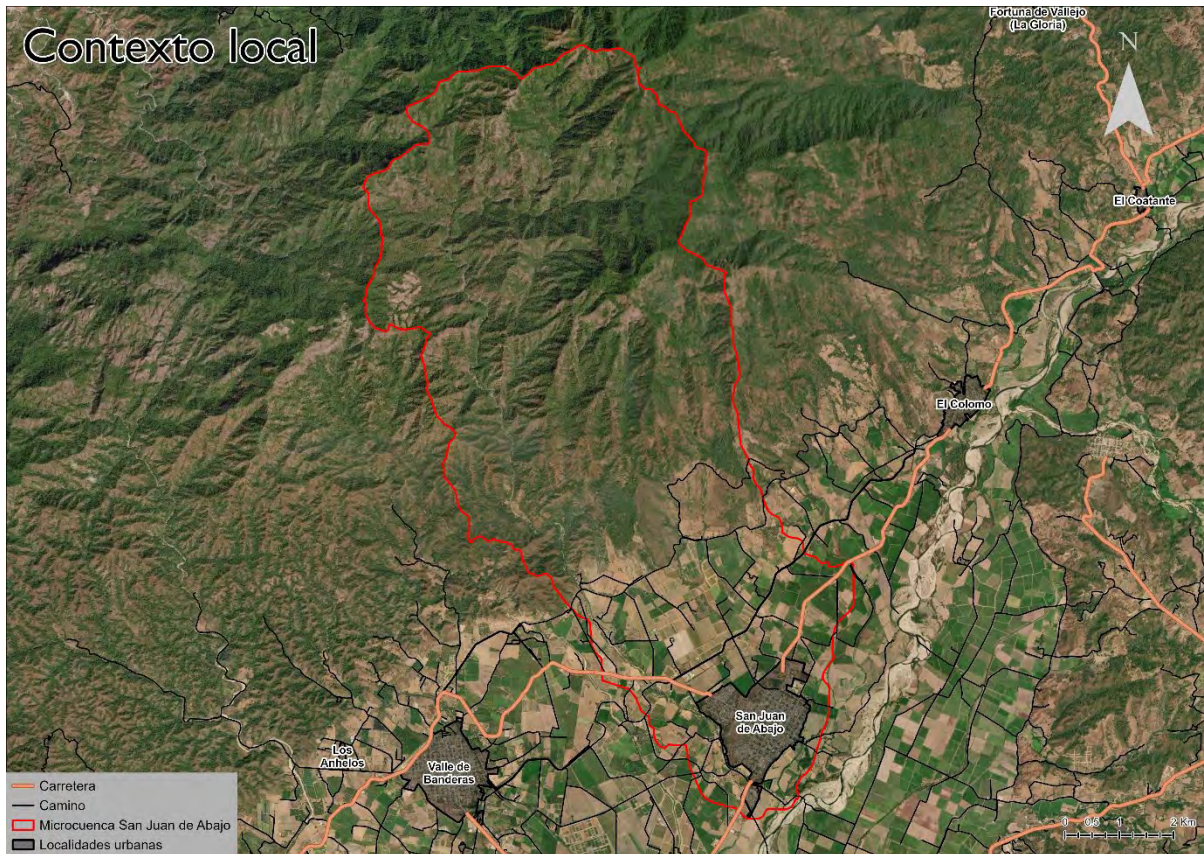


Figura 70. Contexto local.

3.1.7. Contexto orográfico

Otro de los aspectos importantes a considerar dentro del análisis de la hidrología y su funcionamiento es orografía, debido a que ésta determina en primera instancia las condiciones de drenado de una cuenca. No obstante, la relación entre la orografía y los escurrimientos involucra muchos más factores y relaciones como lo son la geomorfología, las características litológicas, la cobertura vegetal y las intervenciones humanas (Pourrut, 1995).

A partir de las curvas de nivel presentadas por el INEGI, a escala 1:10,000, se obtuvo el modelo digital de elevación (MDE) para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2014) (Figura 77). Del MDE presentado en la Figura 77 es posible observar que la podría dividirse en dos regiones, donde al norte se tiene una orografía accidentada, donde se producen cambios importantes en la altitud del terreno. Por otro lado, al sur podemos observar pendientes planas sin cambios considerables en la altitud del terreno. Por lo tanto, dado que los flujos hidrológicos superficiales fluyen de

la parte alta de una cuenca a la parte baja, se espera que los escurrimientos para el caso de la microcuenca de Juan de Abajo fluyan de la parte norte a la parte sur de la microcuenca, de una manera generalizada.

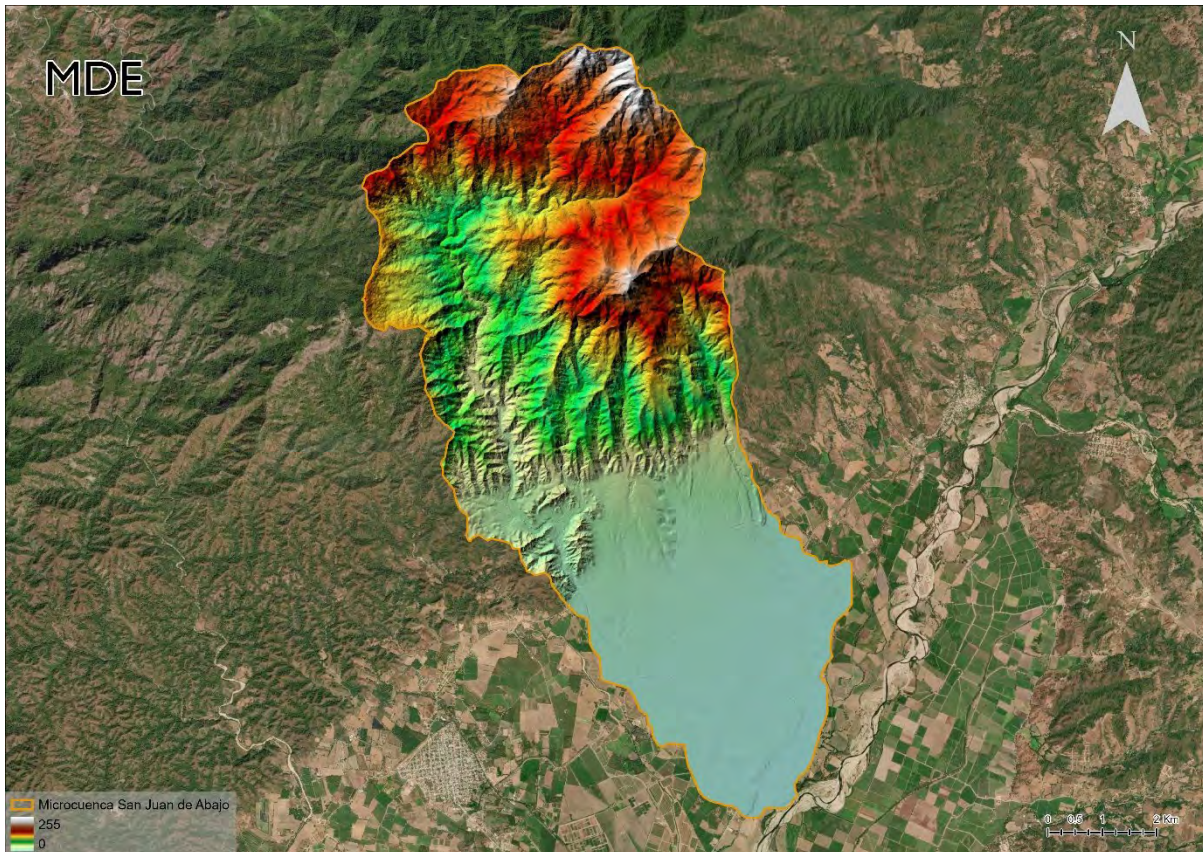


Figura 71. Modelo digital de elevación para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2014).

3.1.8 Contexto litológico.

Como se mencionó anteriormente, las características litológicas de una zona se encuentran estrechamente ligadas a la hidrología de ésta. La relación entre la litología y la hidrología surge dado que diferentes tipos de litologías determinaran la permeabilidad de un material, la facilidad con la que éste puede ser erosionado y su tasa de encharcamiento (Pourrut, 1995) (Cerdà, 1997) (Andreo et al., 2008).

Dado que, además del estudio hidrológico de la zona, también se plantea la propuesta de implementación de infraestructura hidráulica para un manejo sustentable del agua, el factor litológico es un componente fundamental debido a que este condicionará el tipo de infraestructura que es posible implementar en cada zona.

A partir de los datos geológicos presentados por el INEGI a escala 1:250, 000, se obtuvo la litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005) (Figura 88). De la Figura 88 es posible observar cómo al sur (parte baja de la microcuenca) podemos encontrar únicamente material aluvial, mientras que al norte podemos encontrar litologías como conglomerado poligénico, granito-granodiorita y toba riolítica. Además de la información litológica presentada en el Anexo 1 y Anexo 2 se adjuntan la carta geológica y la carta edafológica elaboradas por el INEGI a escala 1:20,000 para la zona de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

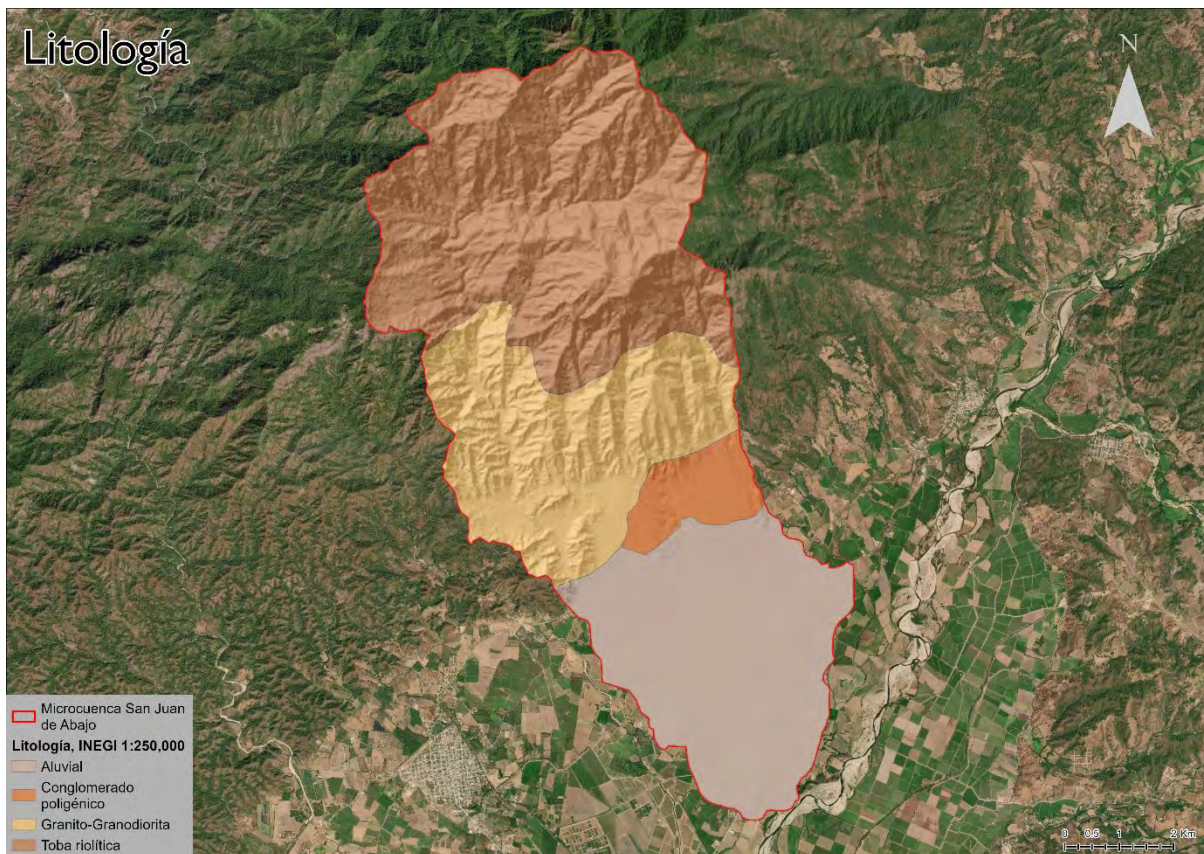


Figura 72. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

En el estudio realizado por Andreo et al. (2008), se hace una ponderación de la litología la cual relaciona el material con su permeabilidad otorgando valores que van de 1 a 10, donde 1 representa una permeabilidad baja y 10 representa una permeabilidad alta (Tabla I). No obstante, cabe aclarar que dicha metodología fue planteada para determinar la infiltración en acuíferos kársticos, sin embargo, plantea una referencia que puede utilizarse para categorizar otros tipos de acuíferos.

Tabla VIII. Ponderación según el tipo de litología y su permeabilidad (Andreo et al., 2008).

Litología	Ponderación
Calizas y dolomías kárstificadas	10 o 9
Calizas y dolomías fracturadas, ligeramente kárstificadas	8 o 7
Calizas y dolomías fisuradas	6 o 5
Gravas y arenas	4
Conglomerados	3
Rocas plutónicas y metamórficas	2
Lutitas, limos, arcillas	1

3.1.9 Contexto de uso de suelo y vegetación

Otro de los factores que Pourrut (1995) presenta como fundamentales para el estudio de los flujos hidrológicos en una cuenca es el uso de suelo y vegetación, dado que este factor estará directamente ligado con la rugosidad del suelo. Por lo tanto, en primera instancia se consultó el uso de suelo y vegetación presentado por el INEGI a escala 1:250,000 en su Serie VII. Esta primera aproximación se realizó con la finalidad de identificar los principales usos de suelo de y tipos de vegetación de la zona (Figura 99) (Geografía INEGI, 2021).

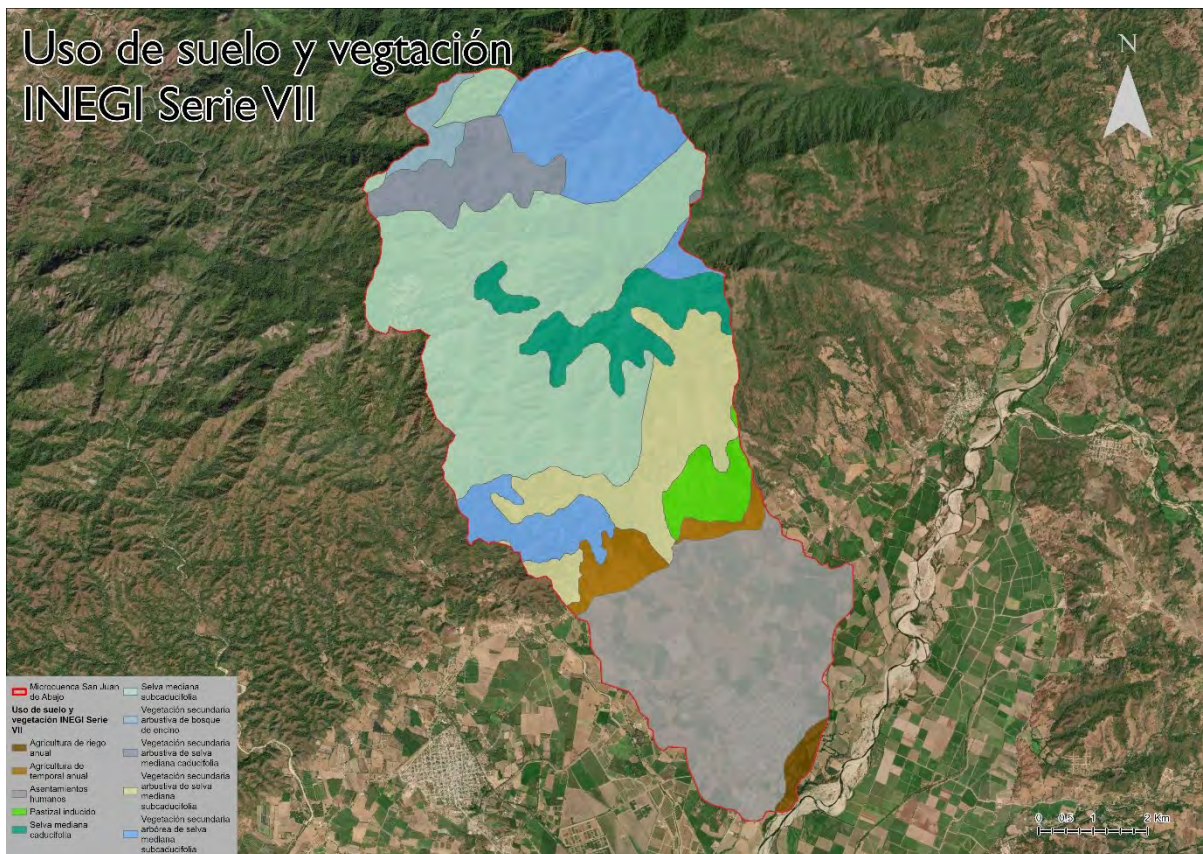


Figura 73. Uso de suelo y vegetación INEGI Serie VII (INEGI, 2021).

De la Figura 99, es posible observar que en la parte alta de la cuenca se encuentran: vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana caducifolia, vegetación secundaria arbustiva de selva mediana subcaducifolia, vegetación secundaria arbórea de selva mediana subcaducifolia y selva mediana caducifolia; mientras que en la parte baja de la cuenca es posible encontrar: pastizal inducido, agricultura de temporal anual, agricultura de riego anual y asentamientos humanos.

De esta manera es posible concluir que dentro de la cuenca es posible identificar dos zonas marcadas por la intensidad de la intervención humana, donde la parte alta presenta una intervención humana baja, mientras que la parte baja presenta una alta intervención humana.

Con la finalidad de llevar a cabo un análisis a mayor detalle de los usos de suelo y vegetación presentes en la zona se llevó a cabo una clasificación de la vegetación a partir de una imagen satelital multiespectral procedente de la plataforma PlanetScope

Monitoring, la cual cuenta con una resolución de 3.7 m por pixel y un tiempo de revisita de un día (Planet, 2023) (Figura 1010). La imagen fue obtenida para el 29 de abril de 2023, previa a la temporada de lluvias, de manera que pudieran observarse con mayor detalle las diferencias entre cada uno de los tipos de vegetación presentes en la zona.

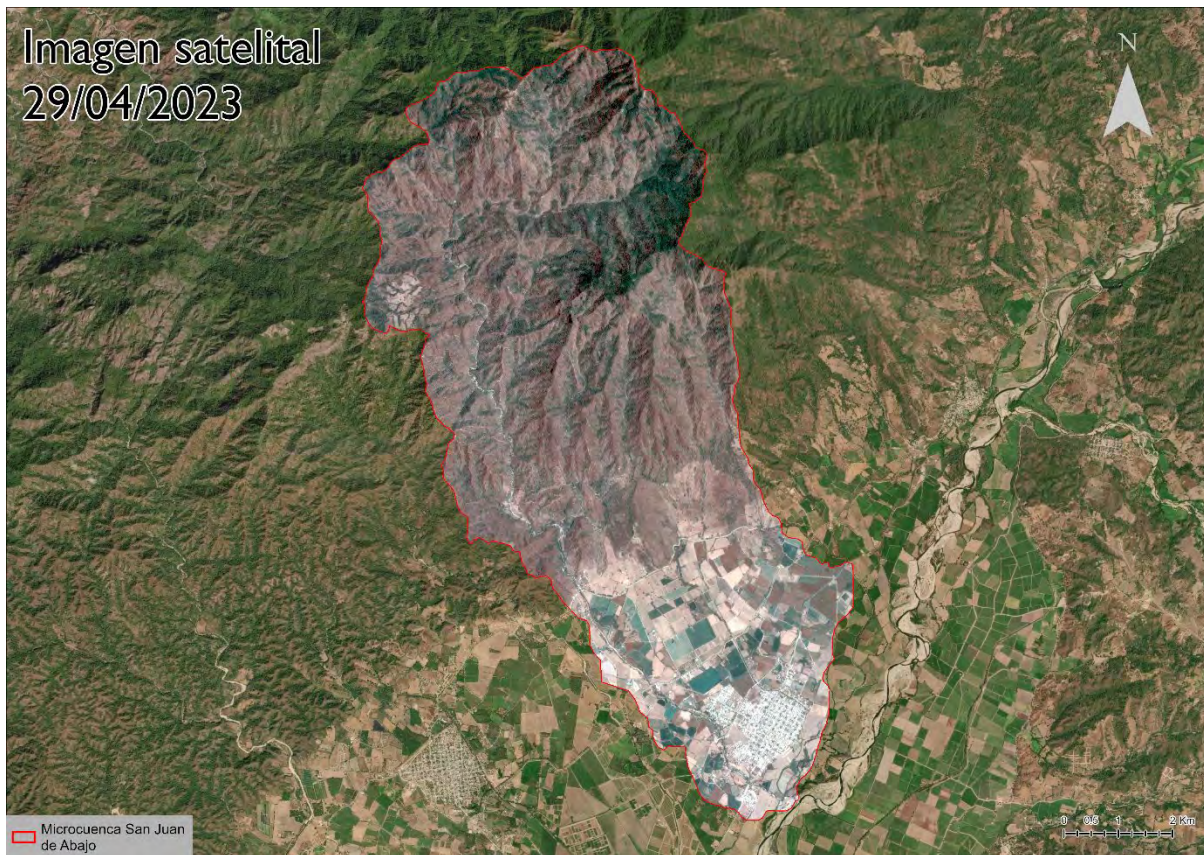


Figura 74. Imágen satelital del 29 de abril de 2023 (Planet, 2023).

Para llevar a cabo la clasificación de la imagen satelital se realizó una clasificación supervisada, mediante el uso del software ArcGIS pro. Para este proceso primero se realizaron puntos de entrenamiento de la vegetación utilizando las siguientes clases: vegetación cerrada, vegetación abierta, vegetación dispersa, desprovisto de vegetación, agricultura activa, agricultura pasiva y urbano. Una vez entrenado el modelo se corrió la clasificación supervisada de la vegetación utilizando el algoritmo de Support Vector Machine.

Posteriormente, a partir de las cartas topográficas del INEGI 1:20,000 se detalló la clasificación espectral de la vegetación generada mediante la clasificación supervisada, tras determinar las áreas establecidas como: camino, carretera, canal,

calle y manzana. Estas áreas se agregaron a la clasificación supervisada resultando en la clasificación de la vegetación presentada en la Figura 1111 (Geografía INEGI, 2016).

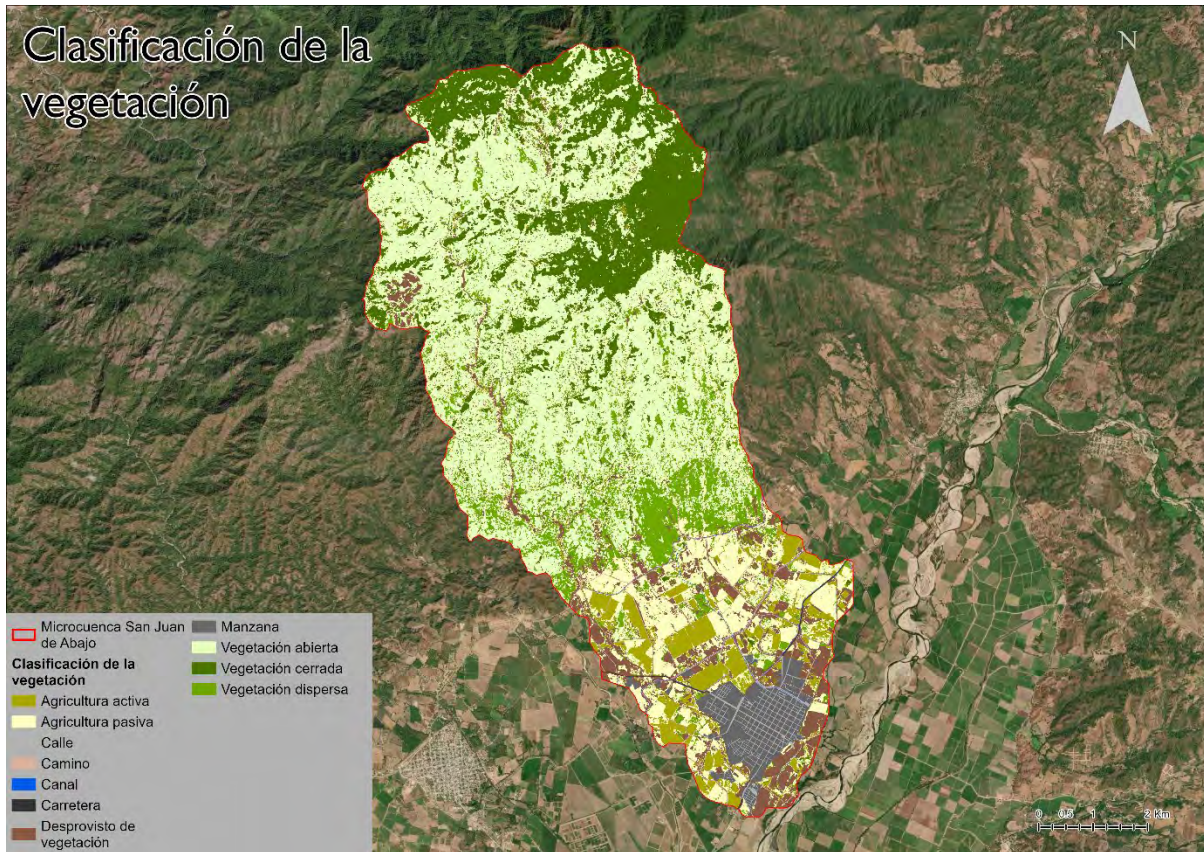


Figura 75. Clasificación de la vegetación (Elaboración propia).

De la Figura 1111 es posible observar que la tendencia de distribución presentada en el Uso de Suelo y Vegetación INEGI Serie VII se mantienen, dado que el área con mayor intervención humana puede ubicarse al sur de la cuenca y el área con una baja intervención humana se ubica al norte de la cuenca.

3.1.10 Descripción del Mapa

Finalmente, se llevó a cabo análisis hidrológico en el cual se detallan las principales características del contexto hidrológico de la zona. En primera instancia se realizó un análisis de la información hidrológica presentada por el INEGI en las cartas topográficas 1:20,000. En este primer análisis fue posible identificar: manantiales, pozos, canales, presas, puentes y cuerpos de agua.

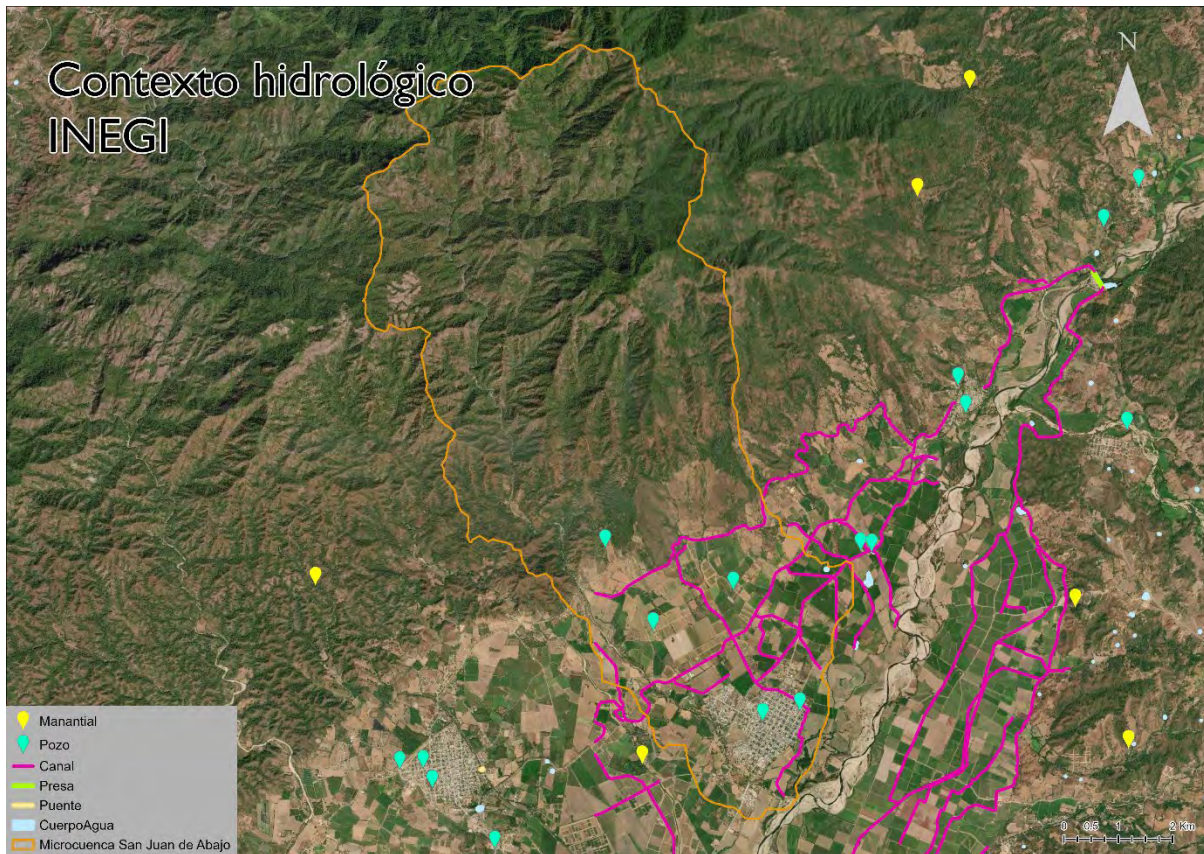


Figura 76. Contexto hidrológico INEGI.

De este primer análisis fue posible identificar que el total de la infraestructura hidráulica presente en la zona se encuentra en la parte baja de la cuenca. Se sospecha que este comportamiento tiene su consecuencia en la litología de la zona, dado que en la parte baja es posible encontrar material aluvial. Otra de las consecuencias de la distribución de la infraestructura hidráulica es la presencia en la parte sur de la cuenca de las áreas urbanas las cuales favorecen el desarrollo de dichas infraestructuras.

Dentro del área de estudio es posible identificar 5 pozos, una red de canales de riego y un cuerpo de agua, según lo presentado en la carta topográfica del INEGI a escala 1:20,000. También, es posible observar que existe una represa aguas arriba del río Ameca fuera del área de estudio de la cuenca.

3.1.11 Beneficios de considerar la hidrología en la dotación de Infraestructura Hidrológica

Aplicando diferentes intervenciones en las diferentes partes de la cuenca -alta, media, y/o baja- se espera que la velocidad del río disminuya, aminorando así el arrastre de materiales aluviales y la erosión del terreno. Otro beneficio, es el reabastecimiento de

los acuíferos, pues la falta de escorrentía superficial, y el contacto del agua con materiales permeables favorece la infiltración. Asimismo, durante la temporada de precipitación, se almacenará un mayor volumen de agua cuenca arriba, lo que amenguará las inundaciones en la zona inferior, protegiendo a su vez la infraestructura urbana. Finalmente, se garantiza la disponibilidad de agua para el uso poblacional.

3.1.12 Tipos de Infraestructura Hidrológica que se sugieren

A partir del análisis realizado anteriormente se plantean 3 áreas de intervención, cada una con diferentes objetivos (Figura 13). Para la selección de las 3 áreas de intervención se tomaron en cuenta los factores presentados en la sección de contexto, de manera que para la intervención 1 se seleccione un área sin vegetación, evitando deforestar otras áreas; que cuente con potencial para infiltración, que y que capte suficientes escurrimientos aguas arriba.

Para la selección del área de intervención 2 se buscó que la zona contara con vegetación que brindara servicios paisajísticos que generaran un mayor atractivo, que se ubicara en una corriente superficial importante garantizando un buen flujo de agua y que fuera un área actualmente utilizada por las personas con una finalidad similar a la planteada.

Para la selección de la tercera de las áreas de infiltración, se buscó que esta se ubicara aguas arriba de la cuenca en la corriente del Río Huichichila, debido a la erosión que este río genera aguas abajo. Además, se buscó que los gaviones fueran ubicados en zonas rectas del río donde se espera una mayor velocidad y poder erosivo, de manera que se relentizara el flujo en la mayor medida posible.

En la primera de las áreas de intervención se plantea la construcción de una represa y un área externa inundable la cual funcione a su vez para la producción acuícola. Esta propuesta de intervención tiene el objetivo en primera instancia, de generar una actividad económica alternativa a la siembra de sandías que se da en la zona. Esta actividad económica busca generar ingresos a lo largo de todo el año a las personas de la zona, especialmente en las temporadas en las que no se lleve a cabo la siembra de las sandías. Otro de los planteamientos de esta propuesta es que sea de dominio público de manera que las personas que no cuentan con alguna alternativa como

fuentes de ingresos puedan aprovechar los beneficios generados por la producción acuícola.

Por otro lado, esta propuesta también tendrá la función de generar recarga del acuífero de la zona al retener el agua en lagunas que estarán directamente conectadas al suelo. Si bien, según testimonios de las personas de la zona, el agua aún no representa un problema en la comunidad de San Juan de Abajo, la propuesta busca actuar de manera preventiva evitando la escasez de agua en el futuro.

La segunda área de intervención está planteada para el desarrollo de un área recreativa estilo balneario en la que las personas puedan ingresar al río de una manera segura y a su vez fomente la conservación de éste. En la zona actualmente las personas han generado gaviones en algunas secciones del río, los cuales actúan como represas que allanan el terreno y que permiten el ingreso de las personas al río. No obstante, no existe ningún tipo de regulación o mantenimiento a estas zonas por lo que a veces las personas no se hacen responsables de su basura y ésta termina por contaminar el agua del río, además de que al no existir ningún tipo de mantenimiento pudieran generarse accidentes en las zonas que las personas utilizan como áreas recreativas.

Atendiendo a las dos problemáticas anteriores, se plantea el acondicionamiento de un área recreativa pública en la que las personas puedan ingresar de una manera segura y a la que se le esté proporcionando un mantenimiento continuo con la finalidad de evitar accidentes y contaminación del río. Otra función esperada de esta área es la concientización a las personas de la importancia de mantener el río en las condiciones ambientales óptimas, para ello podrían incluirse algunos infográficos que informen a las personas de los servicios ecosistémicos brindados por el río.

Finalmente, en la tercera área de intervención, se plantea la construcción de gaviones con la finalidad de retener y alentar el flujo del agua de la parte alta de la cuenca. Esta medida permitirá que el área de intervención 2 no se vea amenazada por crecidas en el río que comprometan la integridad estructural de la intervención 2. Otra de las finalidades de la tercera intervención es frenar la velocidad del flujo de aguas debajo de la cuenca, especialmente en las áreas planteadas como erosionables por parte de las personas de la comunidad de San Juan de Abajo.

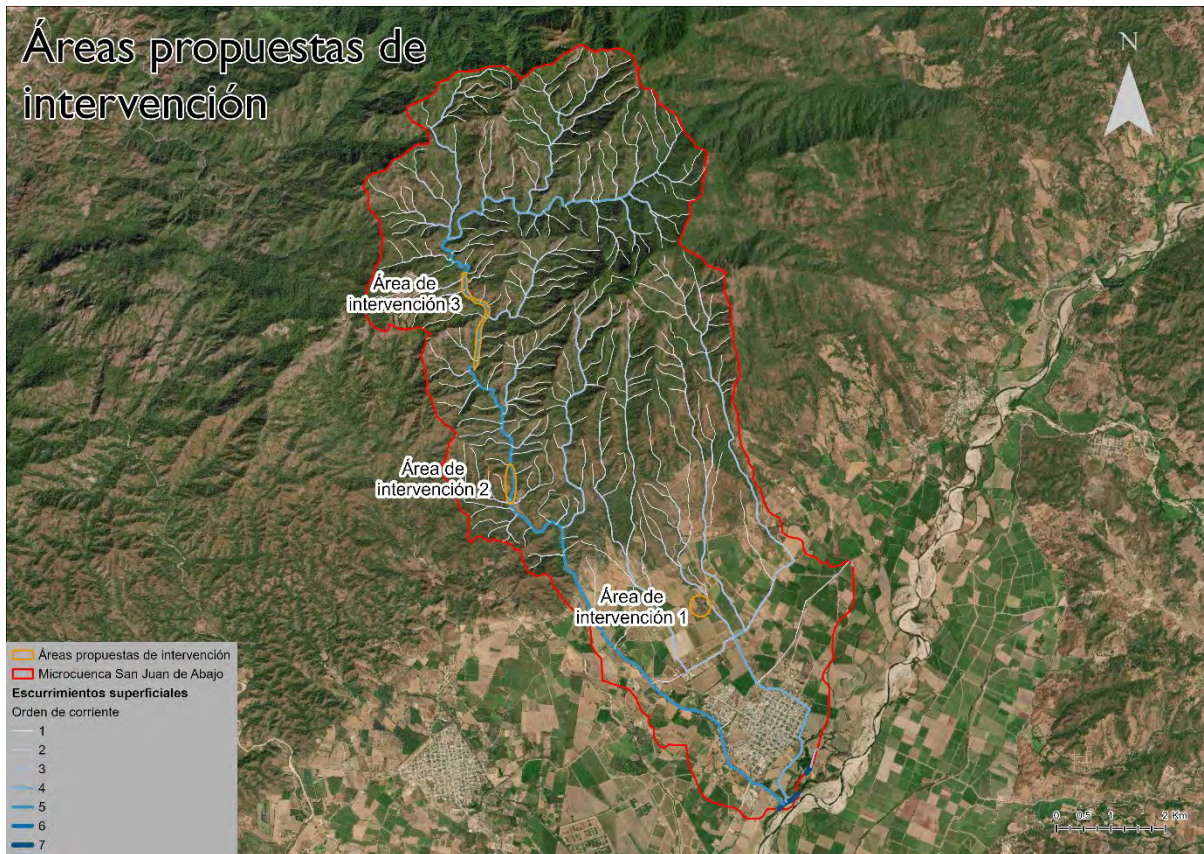


Figura 77. Áreas propuestas de intervención.

3.1.13 Consideraciones Ambientales

Las consideraciones ambientales para tomar en cuenta se relacionan directamente con las infraestructuras propuestas:

- *Presas*. En primera instancia, la presa va a causar un impacto sobre la distribución de peces a lo largo del río, pues estos ya no se van a poder mover libremente, así como otras especies acuáticas. Asimismo, la falta de arrastre de sedimentos puede tener efecto en los nutrientes que se reparten cuenca abajo sobre las parcelas de agricultura. Dependiendo de la altura que se le conceda a la presa, el agua puede llegar a inundar zonas cercanas a su construcción. Finalmente, un mal manejo del agua de la presa (con falta de aireadores), generará el estancamiento, por ende, la falta de oxígeno ocasionará la muerte de vida acuática, el crecimiento de algas, y como resultado la eutrofización del cuerpo de agua.

- *Gaviones*. Los gaviones disminuyen la erosión de los hábitats, pues su infraestructura trabaja como una barrera que evita el transporte de sedimentos. También, se pueden

desarrollar actividades acuícolas, ya que el espacio del gavión genera las condiciones adecuadas para sostener la vida de diferentes especies de peces. Los materiales de los que se conforma el gavión tienen un menor impacto en el ambiente -ya que son materiales más “naturales”- y pueden durar de 5 a 100 años, dependiendo de la salinidad del agua con la que están en contacto.

- *Balnearios naturales*. La construcción del balneario en sí puede generar contaminación auditiva; además, de que, si los residuos de construcción no son dispuestos de la manera correcta, se pueden arrastrar contaminantes en la corriente. Por otro lado, se necesitaría de una regulación adecuada y de vigilancia, para cuidar que la visita de las personas evite la contaminación del agua (por bloqueadores o el desecho de basuras). La vida marina a su vez se verá afectada, aunque puede haber una coexistencia si las personas respetan las especies del río. Finalmente, aunque fuera obvio, no se podrán poner desinfectantes (cloro, bromo, etc.) en el agua del río.

3.1.14 Factores Socioeconómicos

Uno de los factores socioeconómicos que se tienen que tomar en cuenta –con base en lo observado durante el viaje a San Juan de Abajo- es la recepción de las propuestas que se habían hecho en años pasados por parte de la población. Se pusieron de ejemplo varias propuestas que se ejecutaron, pero que con el tiempo fallaron o no cumplieron con el objetivo. Al mismo tiempo, muchos de los ciudadanos de San Juan de Abajo están en contra de las propuestas por los presupuestos que se requieren. Una opción que se puede tomar en cuenta es obtener el financiamiento a través de algún órgano gubernamental como lo es el INPLAN. Otra opción, es generar empleo para los habitantes y compartir las utilidades con inversores externos; por ejemplo: si el proyecto fuera la acuicultura, se podría conseguir financiamiento privado en un plan en donde los habitantes puedan trabajar en el acuicultivo y compartir utilidades con los financiadores. De esta manera, los habitantes estarían más abiertos a la propuesta al no tener que invertir dinero propio sino generar dinero para las mismas personas de San Juan de Abajo.

3.1.15 Evaluación de Riesgos y Beneficios

Las propuestas de infraestructura hidrológica para San Juan de Abajo, Nayarit, son un proyecto que busca abordar varias necesidades de los habitantes y desafíos de la

zona. A continuación, se analizan los componentes de nuestras propuestas y se evalúan los riesgos y beneficios asociados.

Construcción de una represa y área inundable para producción acuícola:

Beneficios:

- Generación de actividad económica alternativa a la siembra de sandías y otros cultivos, proporcionando ingresos durante todas las estaciones del año.
- Posibilidad de uso público, lo que beneficia a personas sin otras fuentes de ingresos.
- Recarga del acuífero, lo que contribuye a prevenir la escasez de agua en un futuro.

Riesgos:

- Posibles impactos ambientales en los ecosistemas locales, especialmente si no se maneja adecuadamente la acuicultura.
- Necesidad de gestión y regulación para evitar la sobreexplotación y garantizar la sostenibilidad de la actividad.
- La presa podría generar desbordamientos en caso de no estar bien diseñada, trayendo en sí problemas para los predios y el poblado encontrado aguas abajo.
- Rechazo por habitantes o comisario ejidal evitando su construcción.
- Abandono de represa o área acuícola.

Desarrollo de un área recreativa estilo balneario:

Beneficios:

- Ofrece un espacio seguro y regulado para que las personas disfruten del río.
- Fomentar la conciencia ambiental y conservación del río.
- Reducción de la contaminación del río al proporcionar mantenimiento y regulación.

Riesgos:

- Costos de mantenimiento continuo y regulación, que deben de ser sostenibles a largo plazo.

- Necesidad de educar a la comunidad sobre la importancia de mantener el área limpia.

Construcción de gaviones para retener y alentar el flujo del agua:

Beneficios:

- Protección de la intervención 2 en contra de crecidas del río, lo que garantiza su integridad estructural.
- Control de la erosión aguas abajo y la protección de áreas vulnerables.

Riesgos:

- Posibles impactos ambientales en el flujo de agua y la ecología del río.
- Requiere inversión y mantenimiento a largo plazo.

3.1.16 Consideraciones Legales y Regulatorias

De acuerdo con SIGEA (2023), en la cuenca de San Juan de Abajo se encuentra un predio llamado “Área Conservación de Vallejo” que es un área destinada voluntariamente a la conservación. Por otro lado, se tiene la unidad de gestión ambiental (UGA) “Ag 2 014 A” cuyo uso principal del suelo es agricultura. Es importante esto, pues son los territorios registrados con un uso del suelo específico, y en caso de querer implementarse alguna intervención en estos sitios, se tendría que presentar el proyecto ante la SEMADET.

Como información adicional San Juan de Abajo abastece los acuíferos de “Puerto Vallarta”, “Zacualpan – Las Varas”, y “Valle de Banderas”. De estos, el único acuífero que se encuentra sobreexplotado es el de Puerto Vallarta.

3.1.17 Recomendaciones y Acciones

San Juan de Abajo es una cuenca que tiene problemas hidrológicos debido a las inundaciones. Actualmente, no se han presentado problemas de escasez de agua, pero es posible que estos se vuelvan reales si no se tiene la infraestructura hidrológica adecuada para almacenar y distribuir el recurso a una mayor cantidad de población. Debido a su cercanía con zonas turísticas costeras, es inevitable el desarrollo urbano del pueblo.

Se espera que con la implementación de las intervenciones: gaviones en la cuenca alta, balneario natural en el transcurso del río en la zona media de la cuenca, y la presa

acuícola; se favorezca la infiltración a los acuíferos, la velocidad con la que el agua de la zona alta baje a la parte baja sea menor, y que se tenga menor cantidad o nulas inundaciones.

En caso de no se implementen las estructuras sugeridas, sí se recomienda aplicar las tecnologías adecuadas para favorecer el reabastecimiento de los acuíferos y/o para prevenir las inundaciones durante el temporal de lluvias. A su vez, lo que se construya requerirá de mantenimiento, lo que se espera genere trabajo para los habitantes de San Juan de Abajo.

3.1.17 Anexos

Los anexos 1 y 2 se adjuntan como entregables en formato PDF con la finalidad de evitar pérdidas en la calidad de la información presentada en éstos.

3.2 Arroyo Seco

3.2.1 Resumen Ejecutivo:

El análisis del contexto hidrológico es una evaluación integral de las características y tendencias del sistema hídrico en una región, es decir, las cuencas hidrográficas. También, nos habla de la revisión de datos sobre la precipitación, caudales de ríos, niveles de agua subterránea, evapotranspiración y la calidad del agua. Se debe considerar los usos del agua, impactos humanos, vulnerabilidad, modelos hidrológicos, políticas, normas y regulaciones. Este análisis es esencial para tomar decisiones informadas en la gestión del agua y la planificación de recursos hidráulicos. A continuación, se hablará del estudio hidrológico del Arroyo seco en Zapopan, Jalisco, también se mostrar mapas de referencia de los causes que se estarán estudiando.

El agua es un factor importante en la adaptación al cambio climático y un vínculo importante entre la sociedad y el medio ambiente, según los desafíos del agua de la ONU, 2 200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura. 2 000 millones de personas viven en países que sufren escasez de agua mientras que el 80% de las aguas residuales retornan al ecosistema sin ser tratadas o reutilizadas.

Según el Instituto de Recursos Mundiales México es uno de los 25 países que enfrente un mayor estrés hídrico del mundo. Dicho esto, en una investigación de la ONU, en la cuenta del Valle de México, se extrae el equivalente a 55 metros cúbicos por segundo y se recargan 25 metros cúbicos. En pocas palabras, se recarga menos de la mitad de lo que se extrae.

Según el promedio de la precipitación anual llueve 942 mm. El cual es más que suficiente para abastecer a la ciudad, incluso para usar esa misma agua y abastecer ciudades y poblados más cercanos a la ciudad. Pero por cómo ha sido planeada la ciudad y la construcción de esta, lo que hemos hecho es impermeabilizar la ciudad y el casi 80 por ciento de esta agua va a dar a colectores donde después provoca grandes inundaciones y después va a dar a las aguas residuales.

En Guadalajara, es una zona donde tenemos mucha precipitación al año y las vemos representadas con severas tormentas a lo largo del año, en su mayoría en la época de verano. Se ha registrado que precipitación de más de 25 mm/h, combinado con el severo daño que hemos provocado en la superficie, se generan estas grandes inundaciones en muchos puntos de la ciudad.

3.2.2 Introducción:

La hidrología, es una disciplina científica que estudia el ciclo del agua en el planeta Tierra, desempeña un papel esencial en la gestión sostenible en el recurso natural del agua.

Gracias a que la población, la urbanización y el cambio climático crecen, la demanda de agua aumenta, es importante entender la importancia de respetar el espacio hidrológico para garantizar la dotación adecuada para la infraestructura de recarga.

También, la hidrología nos da la información sobre la disponibilidad y la distribución del agua en la superficie terrestre, nos permite entender cómo interactúan entre si los diversos componentes del ciclo hidrológico, como la precipitación, la escorrentía, la infiltración y la recarga de los mantos acuíferos. El estudio de la hidrología es esencial para poder diseñar e implementar estrategias efectivas de la gestión hídrica que aseguren un suministro de agua sostenible para las generaciones presentes y futuras.

Uno de los aspectos más importantes de la hidrología es la infraestructura de recarga, que consiste en sistemas naturales o artificiales que permiten la recarga de los acuíferos subterráneos. Los acuíferos tienen un papel muy importante en la provisión de agua potable y en el soporte de ecosistemas acuáticos. La construcción descontrolada de infraestructuras y la alteración de cuencas hidrográficas pueden afectar negativamente la capacidad de recarga de los acuíferos, por lo que disminuye el nivel de agua subterránea y la invasión de agua salina en depósitos subterráneos.

Por lo tanto, hay que respetar el lugar de la hidrología, lo que significa considerar las características únicas de una región, como la geología, la topografía, el clima y la vegetación para diseñar proyectos de infraestructura de recarga. Esto implica evaluar la zona y su

capacidad para retener, filtrar el agua de manera natural y, en consecuencia, implementar prácticas de conservación, restauración que permitan mantener y mejorar la función de recarga de los acuíferos.

En un mundo donde el acceso al agua limpia sea seguro, esencial para vivir y el desarrollo, la hidrología y la infraestructura de recarga se convierten en herramientas esenciales para enfrentar los desafíos hídricos actuales. Al respetar el lugar de la hidrología, asegurando una dotación adecuada de infraestructura de recarga, estamos contribuyendo a la conservación de un recurso vital para la humanidad y para el equilibrio de los ecosistemas, garantizando un futuro más sostenible y resiliente.

3.2.3 Objetivos:

El propósito de una contextualización hidrológica a través de un mapa representativo es plasmar eficazmente y detalladamente las particularidades relacionadas con el flujo y distribución del agua en el territorio. En otras palabras, se busca ofrecer una representación visual y descriptiva que permita comprender con profundidad los aspectos hidrológicos que caracterizan el territorio en cuestión. Un objetivo más detallado de esta representación cartográfica es identificar y mapear las zonas de riesgo que están vinculadas a las inundaciones de la cuenca del río Garabato.

Examinar el contexto hidrológico de una región es fundamental para comprender y gestionar eficazmente los recursos hídricos de la región. Los principales objetivos de esta revisión son los siguientes:

- Gestión sostenible del agua
- Previsión de eventos extremos
- Planificación de infraestructura
- Conservación del medio ambiente
- Planificación urbana y rural
- Adaptación al cambio climático
- Optimización de recursos hídricos

- Toma de decisiones informada

3.2.4 Marco de Referencia:

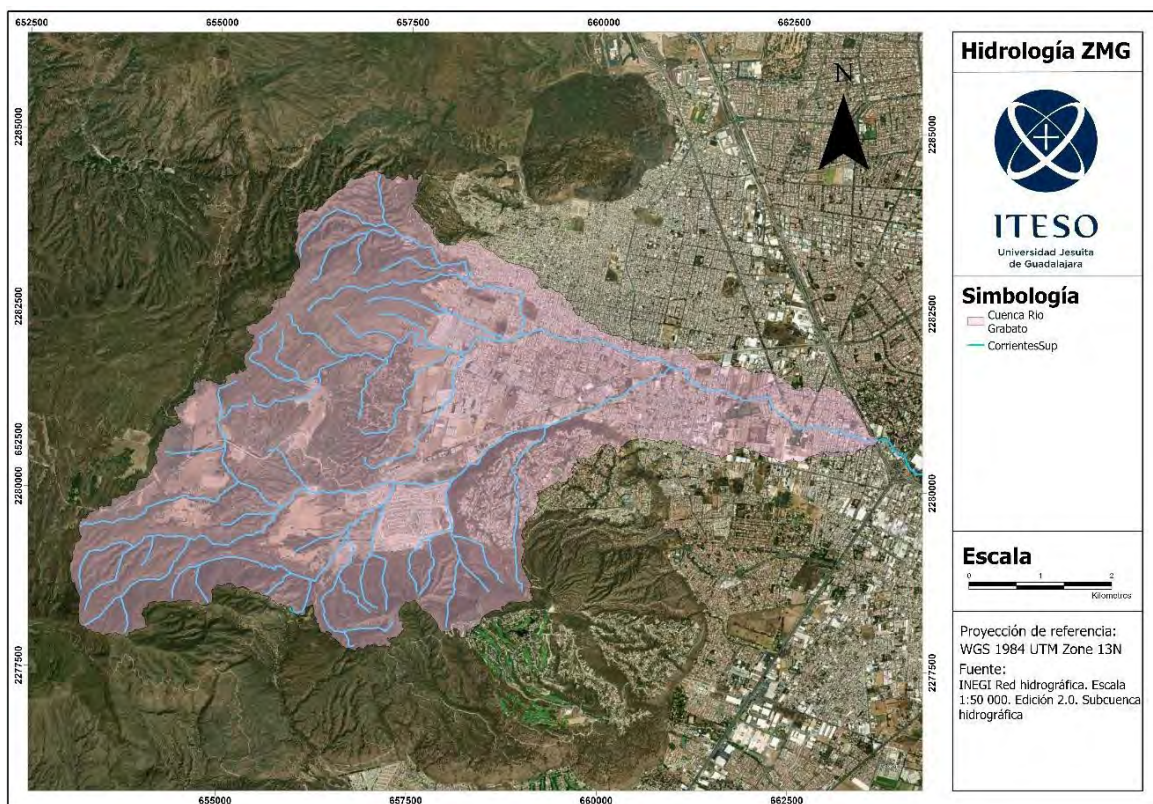
El ciclo hidrológico es un proceso natural y complejo que recorre el recurso hídrico, desde su precipitación en forma de lluvia, hasta su reincorporación a la atmósfera en forma de vapor; por evaporación desde cuerpos de agua superficial, o por transpiración de la vegetación.

- Cuenca: Una cuenca es un área geográfica definida por límites naturales, como montañas o colinas, donde toda el agua que cae en forma de lluvia o que fluye hacia un punto común, como un río, lago u océano. Las cuencas hidrográficas son fundamentales en hidrología, ya que ayudan a estudiar la distribución y el movimiento del agua en un área específica.
- Acuífero: Un acuífero es una formación geológica subterránea que actúa como un reservorio o depósito natural de agua subterránea. Está compuesto por rocas, sedimentos o materiales porosos capaces de retener y transportar agua. Los acuíferos almacenan agua de manera subterránea y pueden ser fuente de suministro de agua potable a través de pozos y manantiales.
- Nivel freático y zona vadosa; El nivel freático o zona saturada es el límite superior del agua subterránea en un acuífero, que marca la profundidad a la que el suelo o la roca subyacente está empapada de agua. Mientras que la zona vadosa o zona no saturada es la distancia entre el nivel freático y el suelo.
- Ciclo hidrológico: El ciclo hidrológico, también conocido como ciclo del agua, es un proceso natural que describe cómo el agua se mueve continuamente a través de la Tierra. Incluye la evaporación del agua desde superficies terrestres y cuerpos de agua, la condensación en nubes, la precipitación en forma de lluvia o nieve, la infiltración en el suelo, el escurrimiento hacia ríos y océanos, y la posterior repetición de este ciclo.
- Infiltración: La infiltración se refiere al proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo desde la superficie. Es un componente clave del ciclo hidrológico, ya que el

- agua que se infiltra puede recargar acuíferos, contribuir a la humedad del suelo y afectar el flujo de agua superficial.
- Precipitación en mm de lluvia; La precipitación en milímetros (mm) de lluvia se refiere a la cantidad de agua que cae en forma de lluvia en un lugar específico durante un tiempo determinado. Esta medida expresa la profundidad de agua acumulada en milímetros. Los mm de lluvia son equivalentes a 1 litro distribuido en un m².

3.2.5 Descripción del Mapa:

Mapa 1: Cuenca y cauces, para el rio garabato

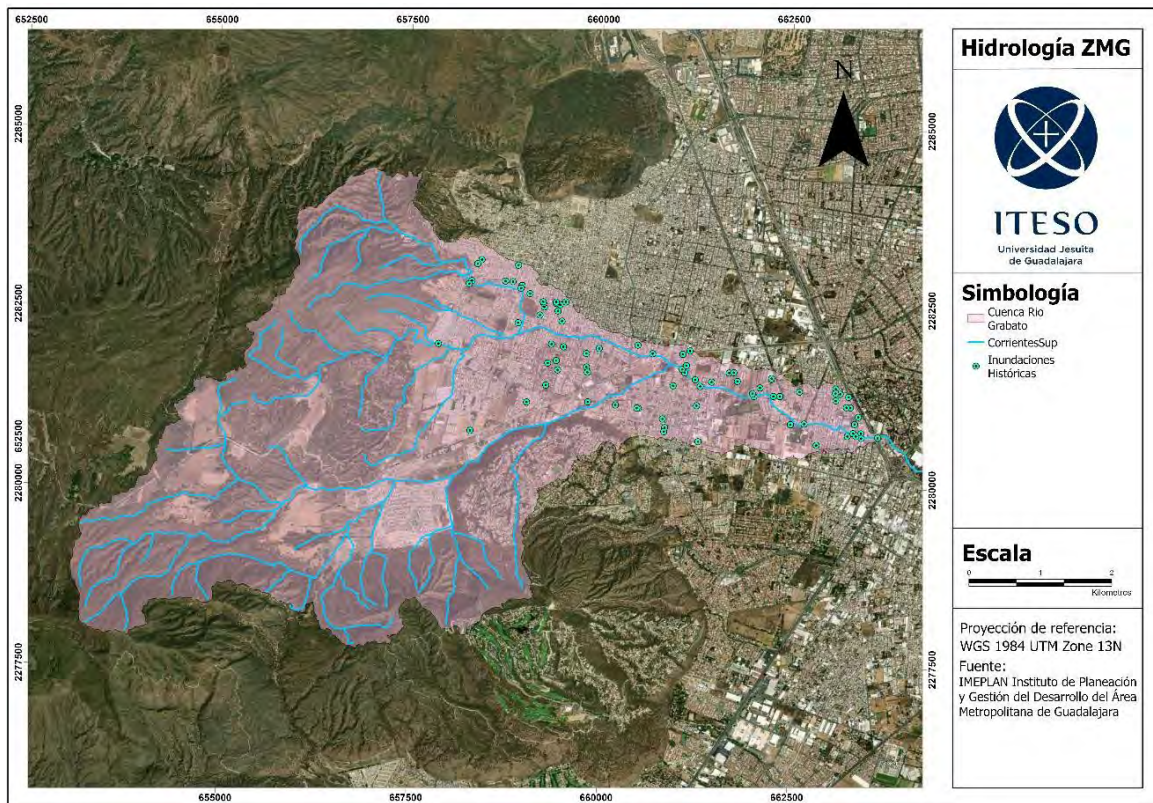


En el mapa 1, se presenta la representación de la red de hidrología superficial del río Garabato. La demarcación de esta cuenca hidrográfica se realizó mediante la utilización de las funcionalidades de hidrología y delimitación de cuencas disponibles

en el software ArcGIS Pro. La base fundamental para elaborar este mapa fue un modelo digital de elevación de tipo terreno, con una resolución de 5 metros, obtenido a partir de datos recopilados por sensores remotos satelitales en 2016.

La cuenca delimitada para este río abarca un extenso territorio de 3164.44 hectáreas, caracterizado por un río principal, el Garabato, acompañado por unos 20 afluentes tributarios intermitentes.

Mapa 2: *Sitos de inundaciones históricas*

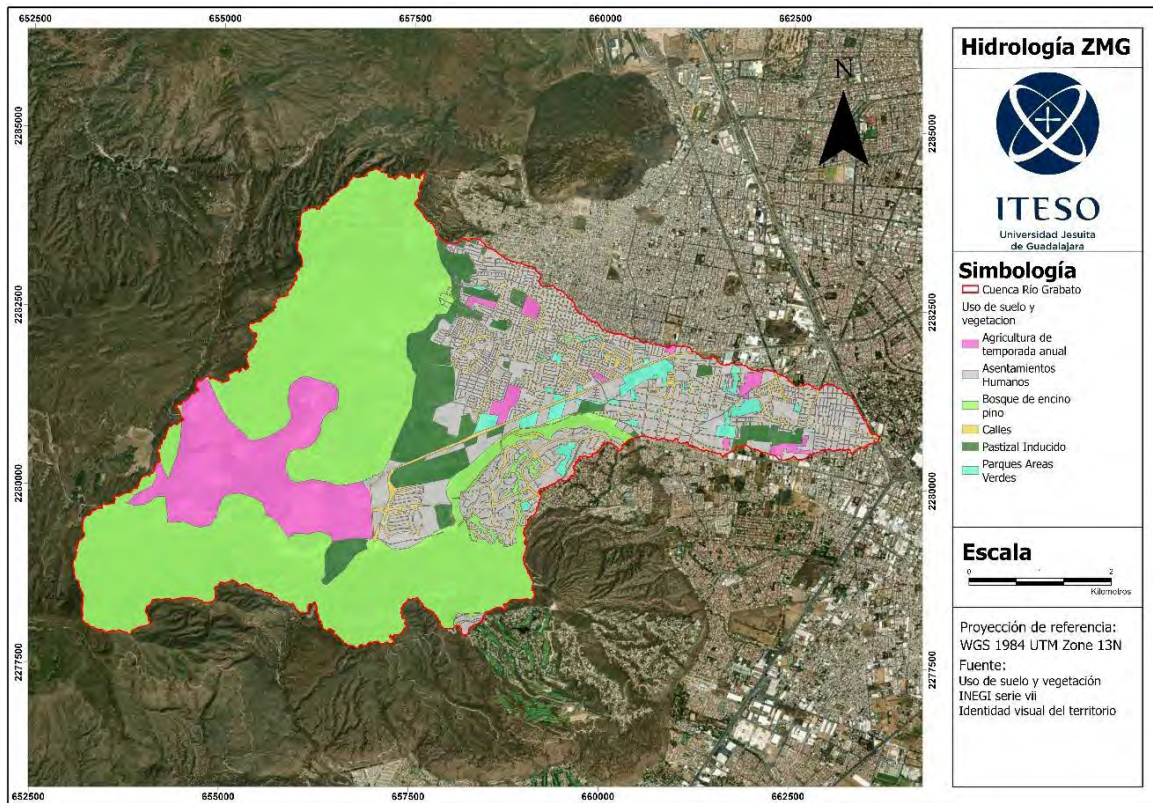


En el **mapa 2**, se presenta los sitios de inundaciones históricas, los datos se extrajeron del SIGMETRO del Mapa Único de Inundaciones (MUI), que representa de manera clara, ordenada y unificada en torno al riesgo de inundación en el área de la cuenca Río Garabato. El MUI es elaborado en el seno del Grupo de Trabajo de Inundaciones

(GTI), que reúne los actores que generan o gestionan la información oficial. El GTI reúnen los siguientes actores para generar los datos:

- Secretaría de Gestión Integral del Agua del Estado de Jalisco (SEGIA): Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA) y Comisión Estatal de Agua (CEA)
- Secretaría de Infraestructura y Obra Pública (SIOP)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA);
- Unidades de Protección Civil y Bomberos Municipales
- Unidades de Protección Civil y Bomberos Estatal
- Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del AMG (IMEPLAN):
- Dirección de Planeación Metropolitana
- Gerencia Técnica de Gestión Integral del Riesgo

Mapa 3: *Uso de suelo y vegetación para la cuenca*



El **mapa 3** presenta una representación detallada del uso del suelo y la vegetación en la región. Para confeccionar este mapa, se utilizó como punto de partida la capa proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), específicamente la Serie VII de uso del suelo y vegetación. Como la información proporcionada por el INEGI no estaba del todo actualizada para el año 2023, hubo que realizar un proceso de clasificación supervisada del territorio. Este proceso permitió la identificación de áreas urbanas desarrolladas, así como zonas de vegetación y espacios verdes dentro de la región. Esto ha contribuido significativamente a mejorar la visualización del territorio, proporcionándonos una mejor comprensión de cómo el agua de lluvia en esta cuenca puede comportarse en relación con fenómenos como la infiltración y la escorrentía superficial.

En la parte superior de la cuenca hay usos del suelo, como evidencia en el mapa, incluyendo bosques de encino y pino, y áreas destinadas a la agricultura de temporada anual. En contraste, en la parte baja de la cuenca predominan los asentamientos humanos, en su mayoría áreas urbanizadas, junto con algunas zonas verdes como parques y terrenos baldíos abandonados. La vegetación en la mayoría de estos

terrenos baldíos es escasa, mientras que los parques tienen una cobertura vegetal más abundante.

3.2.6 Beneficios de considerar la hidrología en la dotación de Infraestructura Hidrológica:

Considerar como beneficio la hidrología en la dotación de infraestructura hidráulica en la captación y gestión del agua tiene como beneficios proporcionar una base sólida para la planificación y el diseño de proyectos relacionados con el agua. A continuación, se mencionarán algunos puntos importantes de estos beneficios:

La gestión sostenible de la hidrología nos permite evaluar la disponibilidad de los recursos hidráulicos en el paso del tiempo, garantizando que los proyectos de la infraestructura hidráulica sean diseñados para aprovechar y conservar este recurso de la mejor manera. También el abastecimiento del agua potable nos ayuda a determinar la calidad y cantidad de agua disponible para abastecer las poblaciones, así se garantiza el suministro de agua potable a las zonas urbanas de manera constante. Por otro lado, al diseñar las estructuras de captación en la hidrología local, se pueden diseñar presas, pozos o sistemas de recolección de aguas pluviales para que maximicen la captación de agua.

La hidrología permite predecir las posibles inundaciones, lo que es importante para diseñar los sistemas de control de inundaciones y proteger las áreas vulnerables. La planificación agrícola hidráulica es esencial para el riego, ya que proporciona la información sobre la disponibilidad de agua en las diferentes estaciones y como puede ser lo más eficiente para la agricultura. Otra cosa importante es que se pueda mitigar la escasez del agua, ya que identificar áreas carenciadas para diseñar soluciones, como, por ejemplo, la recarga de los acuíferos es importante adoptar prácticas de gestión sostenible del agua, como para las comunidades dependientes del agua.

El tema ambiental es importante tomarlo en cuenta para la planificación de proyectos que ayuden a evaluar y minimizar los posibles impactos en los ecosistemas y por ende en la calidad del agua. Ya que, el cambio climático puede alterar el sistema hidrológico, se debe considerar la infraestructura para adaptar los impactos y condiciones ambientales, para así, que siempre haya un suministro de agua estable.

Tener en cuenta la hidrología al proporcionar infraestructura hidrológica es esencial para garantizar un uso eficiente y sostenible de los recursos hídricos. Éstos son algunos de los beneficios clave de considerar la hidrología en el diseño y planificación de la infraestructura hidrológica:

- **Gestión de recursos hídricos:** la hidrología proporciona información importante sobre la disponibilidad y distribución de los recursos hídricos en un área. Esto ayuda a planificar y gestionar eficazmente el uso del agua, garantizando que haya suficiente agua para satisfacer las necesidades humanas, agrícolas, industriales y ambientales.
- **Diseño preciso de infraestructura:** los datos hidrológicos permiten un diseño preciso de estructuras como presas, embalses, canales y sistemas de drenaje. Esto garantiza que estas infraestructuras puedan hacer frente a flujos de agua cambiantes y extremos, como inundaciones y sequías.
- **Reducir el riesgo de inundaciones:** la hidrología ayuda a identificar áreas propensas a inundaciones y diseñar infraestructura de protección contra inundaciones, como diques y compuertas, para reducir el riesgo de inundaciones catastróficas.
- **Utilización del agua:** al comprender la hidrología de una región, es posible identificar fuentes de agua subterránea y superficial adecuadas para la población y la actividad económica. Esto es esencial para garantizar el acceso al agua potable y a la agricultura.
- **Protección del Medio Ambiente:** La hidrología también contribuye a la gestión sostenible de ecosistemas acuáticos como ríos y humedales. Comprender los flujos de agua y las necesidades ecológicas permite proteger y restaurar estos importantes ecosistemas.
- **Mitigar el cambio climático:** El cambio climático está cambiando los patrones hidrológicos en todo el mundo. Considerar la hidrología en la planificación de infraestructuras puede ayudar a adaptarse a estos cambios y tomar medidas para mitigar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

- Eficiencia en el uso del agua: la gestión basada en la hidrología promueve el uso eficiente de los recursos hídricos, reduciendo así el desperdicio de este valioso recurso.
- Planificación a largo plazo: La hidrología proporciona información sobre las tendencias a largo plazo en el suministro de agua, lo que permite una planificación a largo plazo y una toma de decisiones informada sobre la infraestructura hidrológica.

En resumen, la consideración de la hidrología al proporcionar infraestructura hidrológica es esencial para garantizar la gestión sostenible de los recursos hídricos, reducir los riesgos relacionados con el agua y contribuir al desarrollo económico y ambiental de una región.

3.2.7 Tipos de Infraestructura Hidrológica que se sugieren:

Se han implementado algunas estrategias para mitigar las inundaciones 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. 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. 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.

A su vez se han empezado a implementar 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.

Otra solución 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.

La microcuenca del Arroyo Seco está en la región hidrológica RH12-E, en la zona sureste del municipio de Zapopan. Esta microcuenca abarca tanto las zonas medias como altas del municipio. Se clasifica como exorreica, ya que desemboca sus aguas en el Arroyo El Ahogado, del cual es un afluente tributario

Se proponen varios tipos de infraestructura hidrológica para el proyecto, incluyendo lagunas de infiltración, barriles rompe picos, pozos de infiltración, represas retenedoras, parques inundables, ciclovías impermeables, camellones impermeables, techos verdes, sistemas de captación de agua de lluvia, y jardines de lluvia, entre otros. Por simulaciones posteriores, se seleccionará las opciones óptimas para el proyecto. No obstante, se enfatizarán las lagunas de infiltración, pozos de infiltración y parques inundables.

Las lagunas infiltradas como se muestra en la ilustración 1, son grandes cuerpos de agua que pueden excavar o naturales, con una capacidad de almacenamiento de no más de 15 000 metros cúbicos. Su propósito principal es recoger el agua de lluvia y permitir su infiltración en los acuíferos subterráneos. Esto recarga los acuíferos y, posteriormente, se puede extraer el agua a través de pozos perforados, pozos cavados a mano o manantiales cercanos. Estas lagunas se ubican estratégicamente en áreas donde el suelo es permeable y el acuífero que necesita recargarse se encuentra en o cerca de la superficie. Las ventajas de las lagunas de infiltración incluyen:

Aumento de la humedad del suelo, lo que mejora la productividad agrícola y ayuda a combatir la sequía en el terreno circundante.

Facilitan la recarga de pozos poco profundos, pozos perforados y manantiales de poca profundidad.

Contribuyen a la reducción de la salinidad en las aguas subterráneas.

Explicación de los diferentes tipos de infraestructura de recarga que se sugieren: presas, embalses, canales, sistemas de drenaje, etc.



Ilustración 1 Laguna de infiltración

Los pozos de infiltración (como se muestra en la ilustración 2) son excavaciones en el suelo que se llena con piedras, diseñado para favorecer la filtración gradual del agua en el subsuelo. Su utilidad radica en permitir que las aguas grises sean absorbidas de manera lenta y efectiva cuando no pueden ser reutilizadas. Estos pozos son fundamental en la prevención de inundaciones en la temporada de lluvias y en la reducción del estancamiento de aguas, evitando la formación de criaderos de mosquitos y la propagación de enfermedades relacionadas. El pozo puede construirse con materiales locales fácilmente disponibles, como tambores metálicos, botes de plástico o mampostería, entre otros. Esto resulta en bajos costos tanto de inversión como de operación. Además, su diseño compacto permite su instalación en espacios reducidos. El sistema es sencillo y su mantenimiento es fácil de realizar. Esta versatilidad lo hace ideal para su implementación en terrenos propensos a inundaciones y en áreas donde los servicios básicos son limitados. En caso de

deterioro del funcionamiento del pozo de absorción, el material contenido en el pozo puede excavarse, reemplazarse y rellenar eficazmente.



Ilustración 2 Pozo de infiltración

Los parques inundables (como se muestra en la ilustración 3) forman parte de una estrategia de drenaje urbano sostenible, y su funcionamiento se asemeja al de un tanque de tormentas. Estos parques cuentan con colectores principales ubicados en las zonas propensas a inundaciones, y mediante sistemas de tuberías, las aguas pluviales son dirigidas hacia el vaso principal del parque. Esto evita la sobrecarga de la red fluvial durante eventos de lluvias intensas.



Ilustración 3 Parque inundable

Una vez que el parque se llena en un episodio de lluvias, se procede al vaciado gradual del mismo. El agua es dirigida hacia una estación depuradora, donde se somete a procesos de regeneración y limpieza. Esta agua tratada puede ser reutilizada para el riego de las áreas verdes del propio parque, contribuyendo así a la sostenibilidad del sistema.

Los objetivos ambientales de los parques inundables son múltiples. En primer lugar, se busca demostrar, a través del diseño de estos espacios, que es posible transformar la preocupación por las inundaciones en una oportunidad para crear atractivos turísticos y paisajísticos. Además, se persigue la creación de zonas verdes que fomenten la recreación de la población local y visitantes. El diseño de estos parques se hace considerando la flora y fauna del entorno como un atractivo turístico, a la vez que se promueve su conservación. Asimismo, se busca fomentar la participación de la comunidad en la preservación de los humedales y parques, ya que son fundamentales en el equilibrio y mitigación de inundaciones. Finalmente, se plantean áreas de conexión con la naturaleza, destinadas a la realización de estudios e investigaciones que contribuyan al entendimiento y preservación de estos valiosos ecosistemas.

3.2.8. Consideraciones Ambientales:

Cuando se interviene una zona hidrológicamente, ya sea mediante la construcción de infraestructura, el desarrollo urbano, la agricultura u otras actividades humanas, es crucial tener en cuenta las consideraciones ambientales para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y promover la sostenibilidad. Aquí hay algunas consideraciones ambientales clave a tener en cuenta:

- Calidad del agua
- Hábitats acuáticos y riparios
- Flujo de agua natural
- Inundaciones y sequías
- Erosión del suelo
- Hidrología urbana sostenible
- Restauración de ecosistemas
- Monitoreo y seguimiento
- Participación pública y consulta
- Cumplimiento normativo

En las diversas instalaciones relacionadas con la infraestructura hidrológica, nos encontramos con una amplia gama de tecnologías y métodos destinados a la infiltración y retención del agua, con el fin de prevenir inundaciones y gestionar adecuadamente este recurso vital. Es importante reconocer que la implementación de estas infraestructuras no está exenta de impactos en el entorno natural, como ocurre con cualquier actividad humana que modifica el entorno, aunque la magnitud de estos puede variar significativamente dependiendo de la tecnología utilizada.

Uno de los aspectos ambientales más destacados y que se ve comprometido por la infiltración artificial del agua es la calidad del agua que se introduce en el subsuelo. La infiltración de agua puede influir en la composición química y biológica del agua subterránea, lo que a su vez afecta a los ecosistemas acuáticos y terrestres conectados. La gestión de esta infiltración

es esencial para evitar la contaminación y la alteración negativa de los sistemas acuáticos subterráneos y, en última instancia, proteger la biodiversidad y la salud del entorno natural.

La creación de vasos reguladores puede tener una serie de impactos ambientales negativos, incluyendo la alteración de ecosistemas acuáticos al inundar extensas áreas de tierra, lo que conlleva la destrucción de hábitats acuáticos y terrestres, y afecta negativamente a la flora y fauna locales. Además, con frecuencia implica el desplazamiento forzado de comunidades locales, y con el tiempo, los embalses pueden llenarse de sedimentos, disminuyendo su capacidad de almacenamiento y afectando la calidad del agua. También pueden alterar la calidad del agua al modificar los patrones naturales de flujo de los ríos, lo que puede provocar problemas de eutrofización y la proliferación de algas nocivas. Además, la descomposición de la vegetación inundada en un embalse puede dar lugar a la liberación de metano, un potente gas de efecto invernadero, contribuyendo al cambio climático.

3.2.9. Factores Socioeconómicos:

El Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el año 2023 aboga por implementar un plan de rescate para beneficiar tanto a las personas como al medio ambiente. En el contexto del Objetivo 6, que se enfoca en 'Agua Limpia y Saneamiento', se busca asegurar la disponibilidad y gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

El informe destaca que, en el año 2022, aún persistían desafíos significativos en este ámbito. Se señala que 2.2 millones de personas carecían de acceso a agua potable gestionada de manera segura, mientras que 3.5 millones de individuos no disponían de saneamiento gestionado de manera segura. Además, 2.2 millones de personas no tenían acceso a instalaciones básicas para el lavado de manos. En el 2020 2.4 millones de personas vivían en países con estrés por escasez de agua.

Para abordar estos problemas, se proponen diversas medidas, incluyendo el control de la contaminación de ríos y arroyos mediante una gestión mejorada y tratamiento de desechos tanto industriales como domésticos. Asimismo, se sugiere la protección de las áreas verdes circundantes de las zonas metropolitanas para fortalecer su función como áreas de recarga de agua, además de la implementación de sistemas de captación de agua para prevenir inundaciones.

La intervención en una zona hidrológica puede implicar socioeconómicamente, ya que puede afectar tanto a las comunidades locales como a la economía. Aquí hay algunos factores socioeconómicos a considerar al intervenir en una zona hidrológica:

- Abastecimiento de agua
- Agricultura
- Industria
- Generación de energía
- Empleo
- Turismo
- Desplazamiento de comunidades
- Impacto ambiental
- Costos y beneficios a largo plazo
- Participación comunitaria

En relación con los vasos reguladores, se destaca la importancia de mejorar la gestión en áreas como Las Pintas-El Órgano y la presa Osorio-Solidaridad. También se subraya la urgente necesidad de reemplazar la infraestructura deteriorada en el sistema de alcantarillado.

Por último, se enfatiza la necesidad de mantener una comunicación efectiva, transparente y actualizada entre las diversas entidades encargadas de la gestión del agua en el estado de Jalisco, incluyendo organismos como Conagua, SIAPA y CEA. En el acceso a agua según

En el contexto del saneamiento de aguas residuales en Jalisco, se dispone de una infraestructura compuesta por 207 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con una capacidad instalada total de 16.3m³/s. Sin embargo, solamente 50 de estas plantas operan dentro de los parámetros normativos, procesando 5.44m³/s, lo que equivale al 33% de la capacidad de la infraestructura instalada. Estas plantas benefician a una población de 1,760,748 habitantes, lo que representa el 23% de la población jalisciense.

Sin embargo, con la entrada en funcionamiento de la Planta de Tratamiento Agua Prieta, que beneficiará a 3,280,000 personas, se logrará una cobertura del 67% de la población con tratamiento de aguas residuales. Según datos proporcionados por la Comisión Estatal Del Agua (CEA), actualmente se encuentran en construcción cuatro plantas y se están llevando a cabo trabajos de rehabilitación en otras cinco. Además, se estima que se requerirá la rehabilitación o mejora de otras 96 plantas para asegurar el tratamiento de las aguas dentro de los estándares normativos.

3.2.10. Evaluación de Riesgos y Beneficios:

La evaluación de riesgos es una parte crucial al momento de realizar cualquier tipo de implementación de algún sistema nuevo o existente, en este caso los “SUDS”, en donde para lograr garantizar que se obtenga un proceso exitoso y seguro es necesario tener un enfoque general de lo que se necesita para llevar a cabo cualquier tipo de evaluación de riesgos para la implementación de estos sistemas. Los “SUDS” son sistemas con ingenierías nuevas que se utilizan en el sector de medio ambiente y entornos tanto de ciudadanía como de localidades.

Es importante involucrar expertos y profesionales en el tema para asegurar que se cumplan con las regulaciones y estándares de seguridad que se plantean en cada localidad en la que se esté planeando realizar cualquier tipo de intervención, ya que si bien son sistemas que pueden aportar un beneficio muy grande a estas ciudades, si no se realiza un correcto seguimiento o correcta implementación de los mismos, estos

podrían no funcionar de la manera adecuada o en el peor de los casos podrían perjudicar la situación existente por problemas tanto constructivos como de planeación.

Algunos de los beneficios que nos brindan los sistemas “SUDS” estarán representados en la siguiente lista en donde podemos observar algunos de los más importantes a tomar en cuenta para la implementación de nuevos sistemas:

Beneficios de la implementación de SUDS:

- Gestión sostenible del agua
- Reducción de inundaciones
- Mejora de la calidad del agua
- Amenidades urbanas
- Ahorro de costos a largo plazo
- Adaptación al cambio climático

Si bien como se explicó anteriormente es bien sabido que estas implementaciones que se han ido haciendo poco a poco a lo largo de todo el mundo y en distintos países, no solo presentan beneficios ya que como se mencionó si no se realizan de la manera adecuada puede llegar a ser incluso perjudiciales, es por esto que también es importante tener en cuenta cuales podrían llegar a ser algunos de los riesgos o desafíos más representativos con los cuales nos podríamos ver envueltos mediante la implementación de los sistemas “SUDS”, los cuales estarán representados en la siguiente lista en donde podemos observar algunos de los más importantes a tomar en cuenta para la implementación de nuevos sistemas:

- Riesgos y desafíos asociados con la implementación de SUDS:
- Costos iniciales
- Requiere espacio
- Mantenimiento adecuado
- Gestión de la vegetación
- Percepción pública
- Requiere planificación integral

Considerando los beneficios y los riesgos y desafíos al realizar una planificación para nuevas mejoras y gestiones más sostenibles del agua, es donde podemos tener un enfoque integral y ecológico para gestionar el drenaje en entornos urbanos de una manera más adecuada, considerando su implementación y resultados podemos observar que ofrecen un enfoque innovador y amigable con el medio ambiente para abordar los desafíos existentes en los drenajes de ciudades actuales.

Si bien su implementación es bien sabido que requiere de una gran planificación y recursos considerables, los beneficios a largo plazo según los resultados obtenidos a lo largo de los últimos años y los sistemas implementados ya existentes, en términos de sostenibilidad, calidad de vida y resiliencia urbana hacen que estos sistemas se conviertan en una solución valiosa para las ciudades que buscan abordar y atacar los problemas de gestión del agua de una manera efectiva y responsable.

3.2.11. Recomendaciones y Acciones

Para las “Lagunas de infiltración” propuestas anteriormente, es importante considerar algunos puntos clave para su elaboración, ya que son instalaciones que quedarán a largo plazo. Para su ejecución es importante tener un diseño adecuado y una ubicación estratégica, se debe diseñar una laguna con un mantenimiento sencillo y regular, como su limpieza, ya que es importante que siempre esté en perfecto estado para que tenga una buena función. También, se debe tener un buen control del monitoreo de los niveles y calidad. Hablando de la calidad se deben tomar en cuenta la prevención de contaminantes y los sedimentos de la lluvia antes de que alcance los ríos, los cuerpos de agua, reduciendo la contaminación. Los espacios verdes que rodean las lagunas de infiltración pueden servir como hábitats para la vida silvestre, contribuyendo a la conservación de la biodiversidad. Y por último el ahorro de costos, al principio si es una inversión inicial, pero este tipo de lagunas resultan en ahorros a largo plazo al reducir la necesidad de infraestructuras de alcantarillado y tratamiento de aguas pluviales más costosas.

En los pozos de absorción se recomienda tener una ubicación estratégica, sobre todo, revisar las condiciones geológicas del suelo, diseñar pozos adecuados al caudal y la cantidad de lluvia a tratar. También, es importante que el mantenimiento sea uno que

prevenga la obstrucción para que sea eficaz y sea de largo plazo. Se debe checar el nivel del agua como el de la calidad del agua para prevenir la contaminación de esta. Se deben cumplir las normas con de las regulaciones locales y nacionales, se realizan revisiones regulares para garantizar el rendimiento. Un punto para considerar es que este tipo de elementos concientiza e involucra a la comunidad en el cuidado del agua. Los parques inundables es importante ubicar el parque en zonas que sean propensas a inundaciones, en el cual se pueda retener y absorber el agua de lluvia, crear parques con características naturales, como humedales y vegetación, que ayuden a absorber y retener el agua. Como siempre se menciona, la importancia del mantenimiento para garantizar la eficacia de la infraestructura y evitar obstrucciones. El monitoreo constante del nivel y calidad del agua. Es importante que al hablar de un parque donde se conserva una gran cantidad de agua, desarrollar un plan para gestionar inundaciones extremas y eventos climáticos extremos. Este tipo de propuestas, también, concientiza a la sociedad sobre la importancia de los parques y de la gestión del agua.

4. Metodología

4.1 San Juan de Abajo

4.1.1 Introducción

El área de estudio, San Juan de Abajo, se encuentra en la intersección de una serie de factores que hacen que el análisis de su hidrología sea de suma importancia. Para comprender el contexto general de esta área, primero debemos considerar su ubicación geográfica, topografía, clima y uso de la tierra. San Juan de Abajo, que se encuentra en Nayarit, es una región propensa a eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y tormentas, que pueden causar inundaciones y problemas de gestión de del agua

La importancia de analizar la hidrología de San Juan de Abajo radica en varios aspectos:

1. *Gestión del Agua:* El agua es un recurso vital para cualquier comunidad y su disponibilidad y gestión adecuada son esenciales para garantizar el

bienestar de la población. Analizar la hidrología de la región proporcionará información valiosa sobre los patrones de flujo del agua, la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para uso doméstico, agrícola e industrial.

2. *Riesgo de inundaciones:* San Juan de Abajo está expuesto a inundaciones debido a su topografía y la naturaleza de las precipitaciones. El análisis hidrológico nos permite comprender cómo se acumula y fluye el agua en la región, lo que es fundamental para identificar áreas propensas a inundaciones y desarrollar estrategias de mitigación.
3. *Desarrollo sostenible:* El crecimiento y desarrollo de la región deben de estar de la mano de la disponibilidad de recursos hídricos. El análisis hidrológico ayuda a determinar la capacidad de la región para soportar la expansión urbana y el desarrollo de las infraestructuras de manera sostenible.

Los objetivos del estudio de hidrología en San Juan de Abajo son los siguientes:

1. *Creación de hidrogramas y hietogramas:* Un hidrograma es la representación gráfica del agua en una cuenca o arroyo (en este caso cuenca) a lo largo del tiempo, mientras que un hietograma muestra la distribución temporal de la lluvia. Estos elementos son esenciales para poder comprender cómo las precipitaciones se convierten en escorrentía y pueden ayudar a predecir inundaciones y gestionar los recursos hídricos.
2. *Simulaciones en ArcGIS e IBER:* Utilizar herramientas de software como ArcGIS para simular eventos de lluvia permite modelar y evaluar escenarios hidrológicos en la región. Esto ayudará a visualizar cómo los cambios en el uso de la tierra o las prácticas de gestión del agua pueden afectar la hidrología local. Las propuestas hechas en el Contexto Hidrológico se podrán modelar en ArcGIS para poder ver si cumplen con los objetivos deseados.
3. *Mejora de la gestión del agua y prevención de inundaciones:* Al comprender mejor la hidrología de San Juan de Abajo, se podrán desarrollar propuestas y estrategias que ayuden a gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente y reducir el riesgo de inundaciones. Esto es fundamental para la seguridad y el bienestar de la comunidad.

4.1.2 Definición del área de estudio

El área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo) fue definida a partir de la microcuenca del Río Huichichila/Huastitán, en la que se tomó como punto de desfogue la desembocadura de dicho río sobre el río Ameca. No obstante, con la finalidad de también considerar la desembocadura del segundo de los escurrimientos de la zona se amplió el área de estudio en la parte sur de la microcuenca más allá del punto de desfogue establecido inicialmente (Figura 1). La microcuenca de estudio cuenta con una extensión de 6,804.24 ha, dentro de las cuales es posible encontrar una única localidad urbana, San Juan de Abajo.



Figura 78. Área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo).

En la Figura 1, se presentan los órdenes de las corrientes superficiales. De esta figura es posible observar que el cauce de mayor orden y con mayor relevancia dentro de la microcuenca de estudio corresponde al Río Huichichila, dado que éste cruza la microcuenca desde la parte alta hasta la parte baja. No obstante, al noreste de la microcuenca es posible observar otro cauce relevante que drena la sección noreste de

la microcuenca y que finalmente se une con el Río Huichichila previo a su descarga en el Río Ameca.

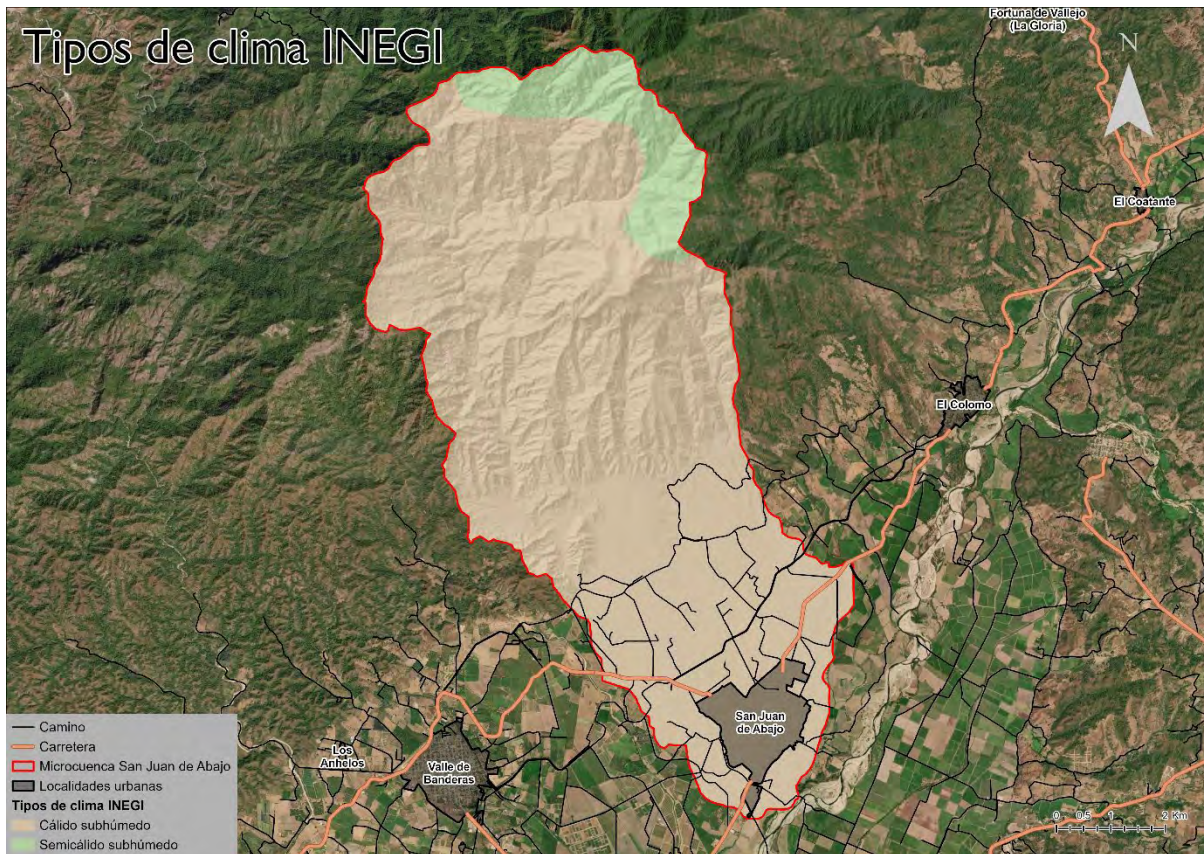


Figura 79. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).

Al analizar los tipos de clima presentados por el INEGI a escala 1:250,000 es posible observar que dentro del área de estudio se registran dos tipos de clima principalmente; al norte se tienen climas semicálidos subhúmedos, mientras que al sur se registran climas cálidos subhúmedos (Geografía INEGI, 2005).

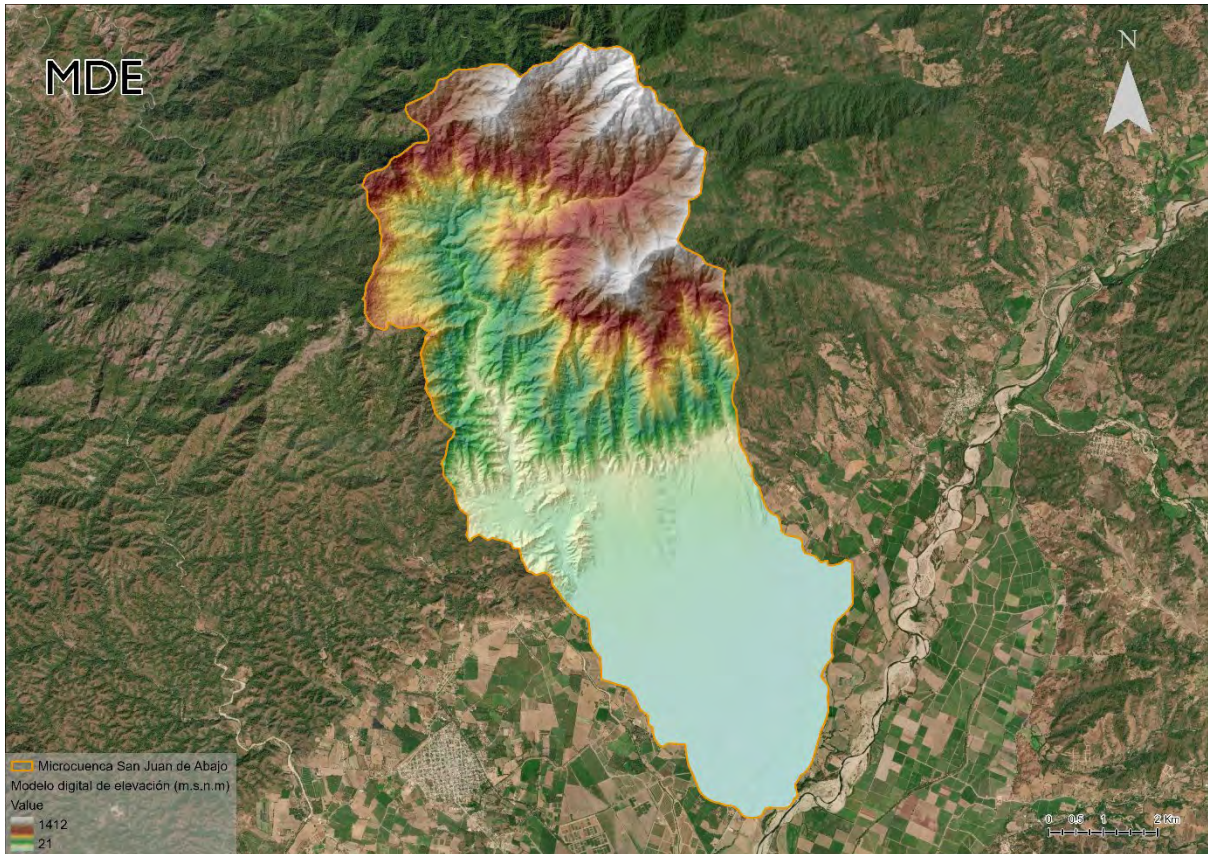


Figura 80. Modelo digital de elevación .(Geografía INEGI, 2014).

Por otro lado, al analizar la orografía de la zona a partir de la información presentada por el INEGI a escala 1:10,000 (Figura 1), es posible identificar dos zonas principales dentro del área de estudio. La primera de las zonas, ubicada al noroeste de la cuenca (parte alta) se tiene una topografía accidentada al contar con cambios abruptos en la elevación del terreno y donde se tienen pendientes pronunciadas. Por otro lado, en la parte baja de la cuenca ubicada al sureste del área de estudio, se cuenta con una topografía plana con pendientes bajas (Geografía INEGI, 2014).

4.1.3 Recopilación de datos

Para llevar a cabo el análisis hidrológico de la microcuenca de estudio fue necesario recabar y generar información como lo es: la topología, los usos del suelo, la edafología, el número de curva del SCS, la rugosidad del suelo, la lluvia de diseño para la zona de estudio y los puentes y presas presentes en la zona.

4.1.3.1 Topografía

El modelo topográfico del área de estudio fue obtenido a partir de la información presentada por el INEGI a escala 1:10,000 a través de la plataforma Espacio y datos

de México. De dicha plataforma fue posible obtener tanto el modelo digital de elevación tipo terreno, como el modelo digital tipo superficie. No obstante, la información disponible a través de esta plataforma se encuentra seccionada para el área de estudio, por lo que fue necesario obtener la información de las cartas F13C59A3, F13C59A4, F13C59D2, F13C59E1 y F13C59E3.

Una vez obtenida la información de las cartas topográficas esta fue procesada mediante la herramienta de sistemas de información geográfica ArcGIS pro, donde se llevó a cabo un mosaico de la información ráster presentada en las cartas topográficas con la finalidad de unificar la información de cada una de las capas en un ráster general para el área de estudio. Finalmente, se aplicó la herramienta “Extract by mask” de ArcGIS pro para realizar un recorte del mosaico generado a únicamente el área de estudio (Figura 1)

4.1.3.2 Usos del suelo

Para determinar los usos de suelo de la zona se llevó a cabo un análisis de la información presentada por el INEGI a escala 1:20,000 de las cartas F13C59a, F13C59b, F13C59d, F13C59e y se seleccionaron los datos correspondientes a las vialidades, caminos, carreteras, canales y manzanas, presentes en la zona de estudio. Al igual que en el caso anterior se utilizó ArcGIS pro para realizar el procesamiento de la información.

En primera instancia, con ayuda de la información concerniente a las manzanas y las vialidades se trazaron las calles y la zona urbana. No obstante, se observó que existe un desfase entre la información presentada por el INEGI y la información presentada en el “Base map” de ArcGIS pro, por lo que se llevó una corrección de la información antes planteada mediante fotointerpretación ajustando en la medida la información presentada por INEGI para que ésta correspondiera a la presentada por ArcGIS pro.

Posteriormente, se realizó un análisis de la información correspondiente a los caminos, carreteras y canales, donde se realizó un “Buffer” a la información de tipo línea. Para asignar el tamaño del “Buffer” a generar para cada entidad tipo línea, se utilizó el “Base map” de ArcGIS pro y se midieron la longitud típica de cada una de dichas entidades presentes en la zona.

Una vez realizados los análisis antes descritos, se unió la información generada en cada uno de ellos, con la finalidad de obtener una capa que condensara los polígonos de las manzanas, vialidades, caminos, carreteras y canales del área de estudio.

Por otro lado, para clasificar los usos de suelo fuera de la parte urbana se descargó una imagen satelital multiespectral, de resolución 3.7m/píxel, de la plataforma Planet; correspondiente al 29 de abril de 2023 y se realizó una clasificación supervisada. Para este proceso se definió un esquema de clasificación en el que se incluyeron las clases: agricultura activa (agricultura de riego), agricultura pasiva (agricultura de temporal), vegetación cerrada, vegetación abierta, vegetación dispersa, desprovisto de vegetación y urbano. Con ayuda de índices espectrales se asignaron entrenamientos a cada una de las clases de clasificación y se utilizó el algoritmo “Support Vector Machine” para realizar la clasificación.

Finalmente, se transformó la información generada mediante la clasificación supervisada a información tipo polígono y se unió dicha información a los polígonos de las manzanas, vialidades, caminos, carreteras y canales en el área de estudio dando como resultado los usos de suelo presentados en la (Figura 3).

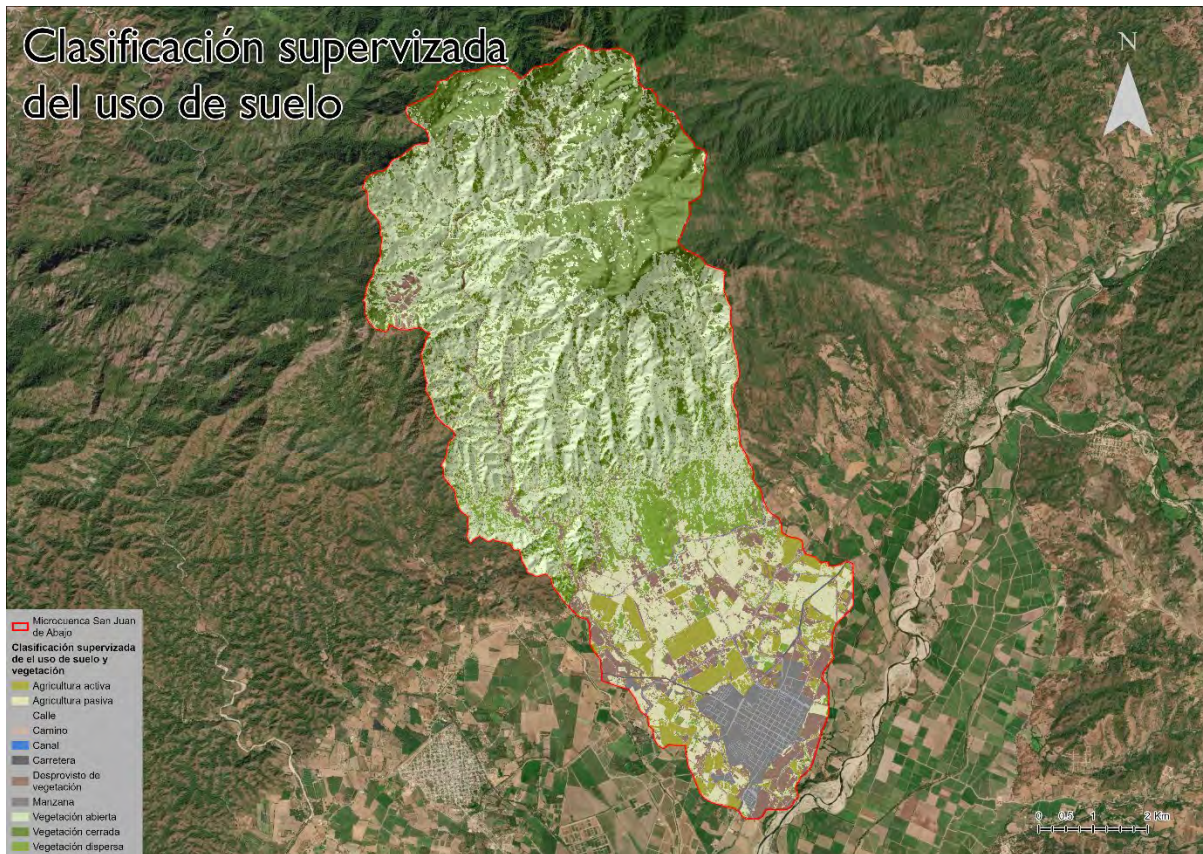


Figura 81. Clasificación supervisada de la vegetación.

4.1.3.3 Litología y edafología

Para determinar la litología presente en la zona, se consultó la información presentada por el INEGI a escala 1:250,000, en la que se presenta la carta litológica a nivel nacional en formato shapefile. Para acotar la capa de litología nacional a nivel área de estudio se utilizó la herramienta “Clip”, la cual realiza un corte en un archivo vectorial a partir de los límites de otro archivo vectorial. La capa resultante de la herramienta “Clip” conserva los atributos de la capa original para todos los archivos vectoriales que dentro de los límites de corte (Figura 4).

Además de la información presentada en la Figura 4, se consultaron las cartas geológica y edafológica elaboradas por el INEGI a escala 1:20,000 para la zona de san juan de abajo. Dicha información es presentada en los Anexos 1 y 2 con la finalidad de no perder resolución en la información (Geografía INEGI, 2005).

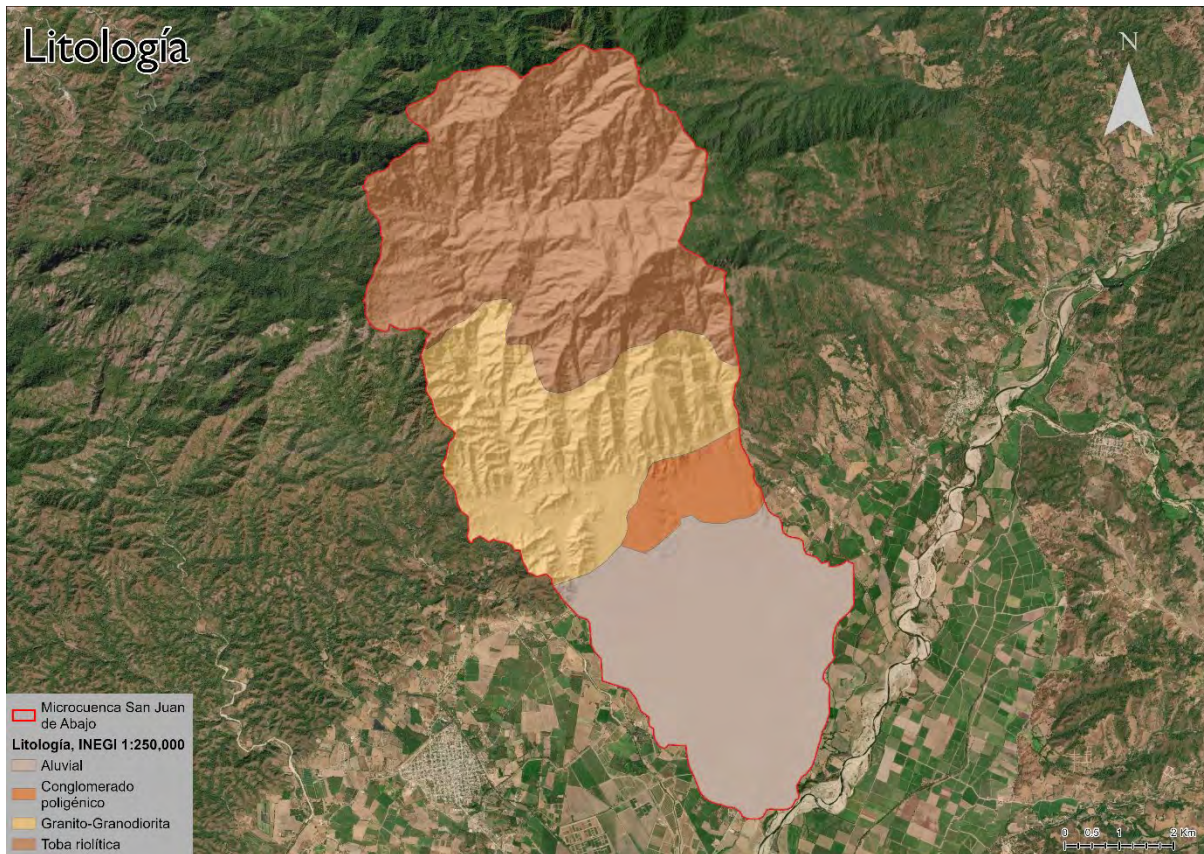


Figura 82. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

4.1.3.4 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio

Para la recopilación de información sobre los puentes fue necesario ir al sitio y medir cada uno de ellos con un longimetro de 30m. La ubicación de los puentes fue conseguida vía satélite con la utilización de Google Earth y un vehículo facilitó la llegada a cada uno de ellos. La mayoría de los puentes se encuentran dentro de San Juan de Abajo mientras que aguas arriba se encuentra uno muy largo y que al mismo tiempo ejerce la función de presa. Este último tenía una altura de tan solo 1.36m, pero una longitud de 36 metros. Se midió una cantidad total de ocho puentes, no todos cruzando sobre el Huichichila, sino que en varios casos cruzaban otro arroyo que circunda la periferia de San Juan. Para medir la longitud del puente un individuo se paraba en un extremo del puente, mientras que otro se llevaba la cinta del longimetro hasta el otro. Para la medición de la altura de los puentes se buscaba el punto más bajo y se aventaba la cinta hasta que tocara el agua. Se tomaba como referencia el lecho bajo de la losa de cada puente como altura total. En los anexos el lector podrá ver con mayor facilidad el mapeo de los puentes y sus respectivas dimensiones.

4.1.3.5 Información meteorológica

Para llevar a cabo el proceso de simulación en IBER, fue necesario la generación de una tormenta de diseño para el área de estudio. Al no contar con información de referencia de tormentas de diseño para la zona, fue necesaria la generación de una tormenta propia. Para llevar a cabo este proceso se consultó la información presentada por la CONAGUA en sus estaciones meteorológicas. Las estaciones meteorológicas utilizadas para llevar a cabo el análisis de la precipitación fueron: San José del Valle (18030), La Desembocada (14081) y Las Gaviotas (18021); de las cuales se obtuvieron sus variables normales para el periodo 1981 -2010 (CONAGUA, 2023).

A partir de la información presentada en las estaciones meteorológicas de la CONAGUA, fue posible determinar la precipitación máxima registrada por estación para el periodo de análisis. Posteriormente, se llevó a cabo una interpolación mediante el método IWD, con la cual fue posible determinar el comportamiento esperado para la precipitación en el área de estudio y determinar una precipitación máxima promedio para ésta.

Posteriormente, se definió la duración promedio de una tormenta con la mayor intensidad. Para llevar a cabo este proceso se consultó información meteorológica de la plataforma Weatherlink, de las estaciones Acuarela, Las Palmas y Vidanta, las cuales contienen registros con una resolución temporal entre los 10 y 15 minutos. El proceso de selección de las estaciones antes mencionadas consistió en identificar cuáles de las estaciones disponibles se encontraba a una menor distancia del área de estudio y además contenía la mayor cantidad de información histórica posible (Davis Instruments, 2023).

Una vez seleccionadas obtenidas las bases de datos para cada una de las estaciones meteorológicas, se llevó a cabo la clasificación de las tormentas, a partir de la programación de un código en el lenguaje Python. El código realizado tiene la función de iterar sobre cada elemento de la base de datos, identificando valores diferentes a cero y agrupándolos cuando estos sean consecutivos temporalmente. Posteriormente, se realizó una clasificación de las tormentas encontradas para cada una de las estaciones con intervalos a cada hora e identificando la precipitación máxima registrada para cada uno de los intervalos. Seguido, se determinó la intensidad máxima de lluvia para cada intervalo al dividir la precipitación máxima entre el límite superior del

intervalo. Finalmente, se definió la duración del evento de lluvia con mayor intensidad, correspondiente a 3 horas, mediante el análisis de las lluvias con mayor ocurrencia e intensidad dentro de los rangos establecidos.

4.1.4 Modelado hidrológico

Para llevar a cabo el modelado de la hidrología superficial ante un evento de lluvia extremo se utilizó el software IBER en su versión 2.6. El modelado realizado a partir de dicho software tiene varios objetivos como lo son: la identificación de las zonas en las que se presenta el mayor calado, la mayor velocidad, la máxima tensión en el fondo, la mayor peligrosidad, la identificación de posibles zonas de intervención para la instalación de infraestructura para el manejo sustentable del agua, el comportamiento esperado de los escurrimientos superficiales tras la instalación de la infraestructura propuesta y los requerimientos de diseño necesarios para la instalación de la infraestructura propuesta.

4.1.4.1 Metodología de proceso para primera iteración de simulación.

Para llevar a cabo la simulación en IBER fue necesario un preprocesamiento de la información recabada mediante el uso del software de SIG ArcGIS pro. En primera instancia se transformó la información correspondiente al modelo digital de elevación tipo superficie de formato ráster a formato ASCII, debido a que es el formato soportado por IBER. Finalmente, el modelo digital de elevación en tipo ASCII fue utilizado para generar un RTIN en la plataforma de IBER con un tamaño de malla máximo de 100 metros, un tamaño de malla mínimo de 1 m y una tolerancia de 0.6 m.

Posteriormente se llevó a cabo la asignación de las rugosidades y el número de curva de la SCS a cada uno de los tipos de suelo identificados mediante la clasificación espectral de la vegetación generada mediante la clasificación supervisada.

Para el proceso de asignación del número de curva, se generó un nuevo campo en la tabla de atributos del shapefile correspondiente a la clasificación espectral de la vegetación y se asignó a cada uno de los elementos en la tabla de atributos el número de curva correspondiente. Posteriormente se llevó a cabo un "Buffer" de -8m al área de estudio y se utilizó dicho "Buffer" como polígono de recorte de la capa con los números de curva, con la finalidad de asegurarse que todos los elementos de la malla generada contaran con un valor de número de curva. Una vez recortada la capa de los números

de curva esta fue transformada a ráster y posteriormente a ASCII. Finalmente, los numero de curva fueron asignados a cada uno de los elementos de la malla en IBER. Para el proceso de asignación de las rugosidades fue necesaria la generación de un nuevo campo en la capa de la clasificación espectral de la vegetación, enumerando cada uno de los usos del suelo del 1 al 11. Una vez enumerados los usos del suelo, se recortó la capa con el “Buffer” de -8m generado anteriormente y se llevó a cabo la trasformación de la capa a ráster y posteriormente a ASCII. Para asignar las rugosidades a cada uno de los elementos de la malla se crearon nuevos campos de rugosidad en IBER asignando a cada uno de los campos creados las rugosidades encontradas. Seguido, se creó un archivo CSV en el que se correlacionaran cada una de las rugosidades creadas con la numeración asignada a cada tipo de suelo colocando dicho archivo en la misma carpeta en el ordenador que el archivo ASCII generado. Finalmente, se asignaron las rugosidades a cada uno de los elementos de la malla. Para consultar el formato del archivo CSV generado, consultar el Anexo 3.

Seguido a los procesos previamente mencionados, fue necesario asignar las condiciones iniciales y las condiciones del contorno del sistema. La asignación de las condiciones iniciales para la primera iteración del modelo se estableció suponiendo un suelo sueco, por lo que el calado inicial del agua es cero. Por otro lado, para la asignación de las condiciones del contorno del sistema, no se establecieron entradas de agua por el contorno del sistema, de esta manera la única entrada de agua estará definida como la lluvia; mientras que para la asignación de las salidas se analizó el modelo digital de elevación, los flujos de agua superficiales, la imagen satelital y se realizó trabajo en campo, de manera que dicha salida de agua correspondiera a la salida de agua de la cuenca.

Para la definición de estructuras, en este caso puentes, respondiendo al levantamiento hecho en sitio, se colocó manualmente la información de cada puente en el programa ArcGis. Posteriormente en IBER se colocaron los puentes considerándolos como alcantarillas para que el agua pudiera correr “por debajo” de ellos,

La asignación del hietograma previamente generado se realizó un proceso el cual consiste en dos pasos principalmente. En primera instancia se definió el hietograma relacionando la intensidad de la lluvia con el tiempo en segundo formando una gráfica correspondiente al hietograma tal como se muestra en la Figura 5. Posterior a la

definición del hietograma, fue necesaria la asignación de este a los elementos de la malla. Para la primera de las iteraciones se consideró una lluvia homogénea en toda el área de estudio, al no contar con información suficiente para segmentar los modelos de lluvia para cada una de las zonas del área de estudio.

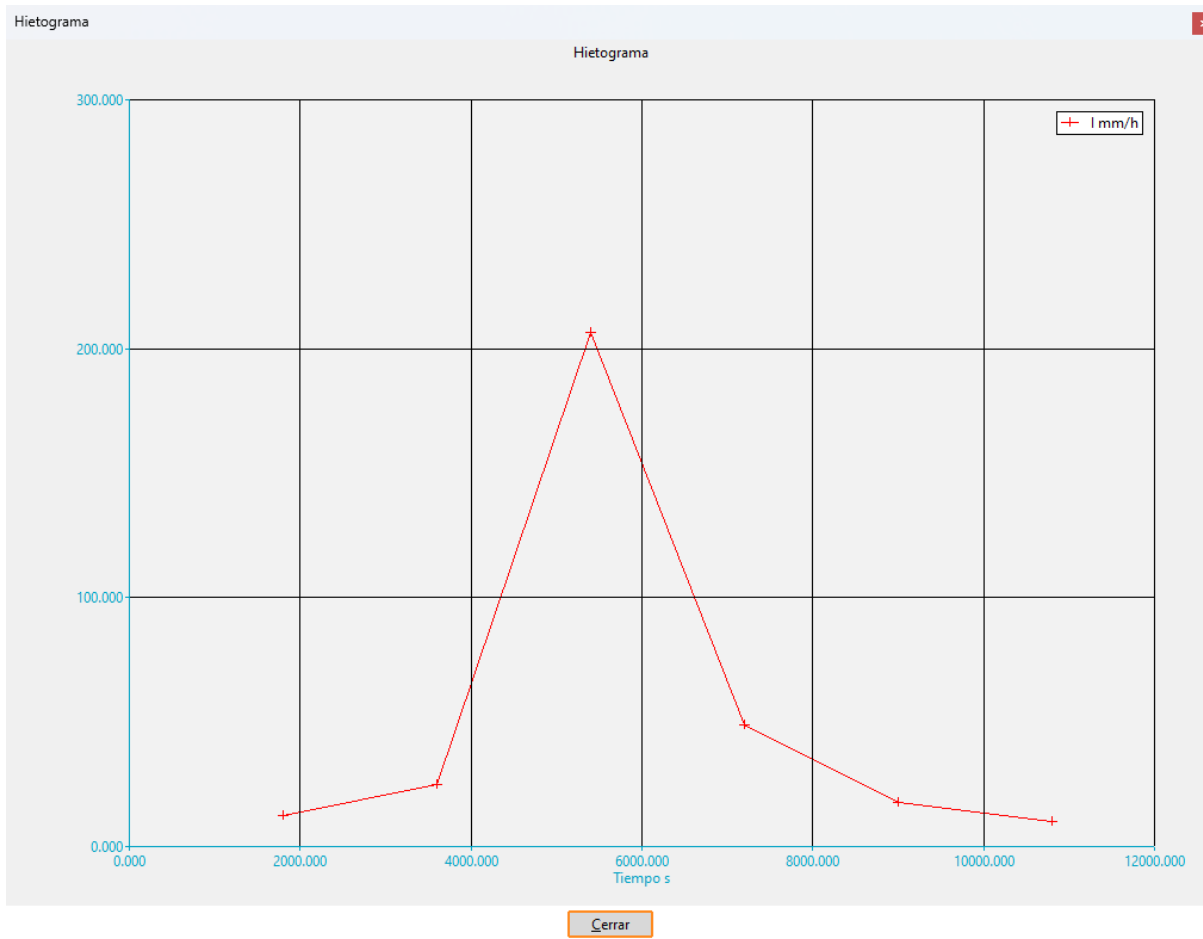


Figura 83. Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.

Finalmente, fue necesario definir los datos del problema. Para ello se tomó como instante inicial de simulación el tiempo de 0 segundos, mientras que el tiempo final de simulación fue establecido como 25,600 segundos (7 horas), con un intervalo de resultados cada 300 segundos. Los resultados de la simulación llevada a cabo se presentan a continuación.

4.1.4.2 Resultados primera iteración

A partir de la primera iteración llevada a cabo en el software IBER se obtuvieron los resultados presentados de la Figura 6 a la Figura 10.

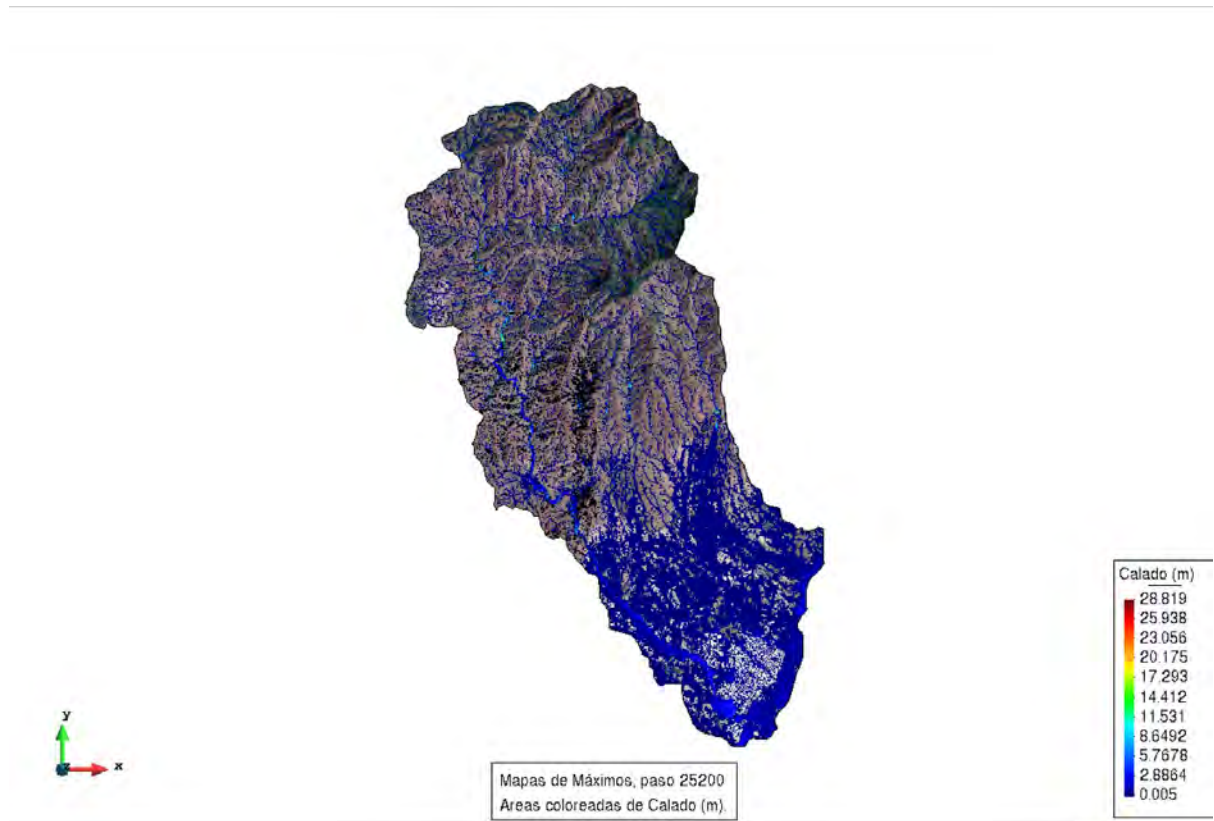


Figura 84. Mapa de máximo calado en el área de estudio.

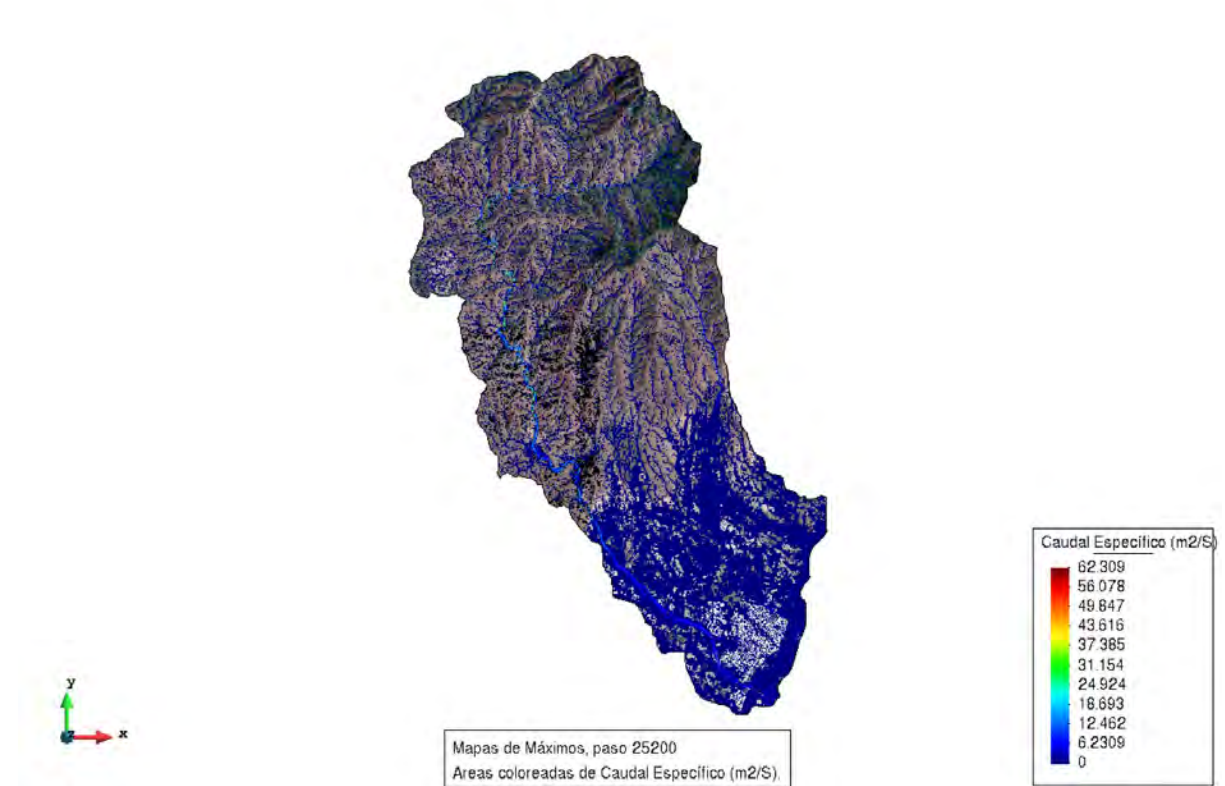


Figura 85. Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio.

A partir de los resultados presentados en la Figura 6 y Figura 7, es posible identificar las zonas con mayor calado y caudal específico, al presentarse un evento de lluvia como el definido en la Figura 5. De este primer resultado es posible identificar como la zona alta de la cuenca (Norte), presenta cauces más definidos dada su topografía accidentada; mientras que la zona baja de la cuenca (Sur), que se encuentra en una planicie, es más propensa a generar inundaciones. Otro aspecto importante evidenciado a partir de esta primera iteración es la identificación de las zonas más propensas a inundaciones dentro del poblado de San Juan de abajo, la cual se presenta en una franja de Noroeste a Sureste.

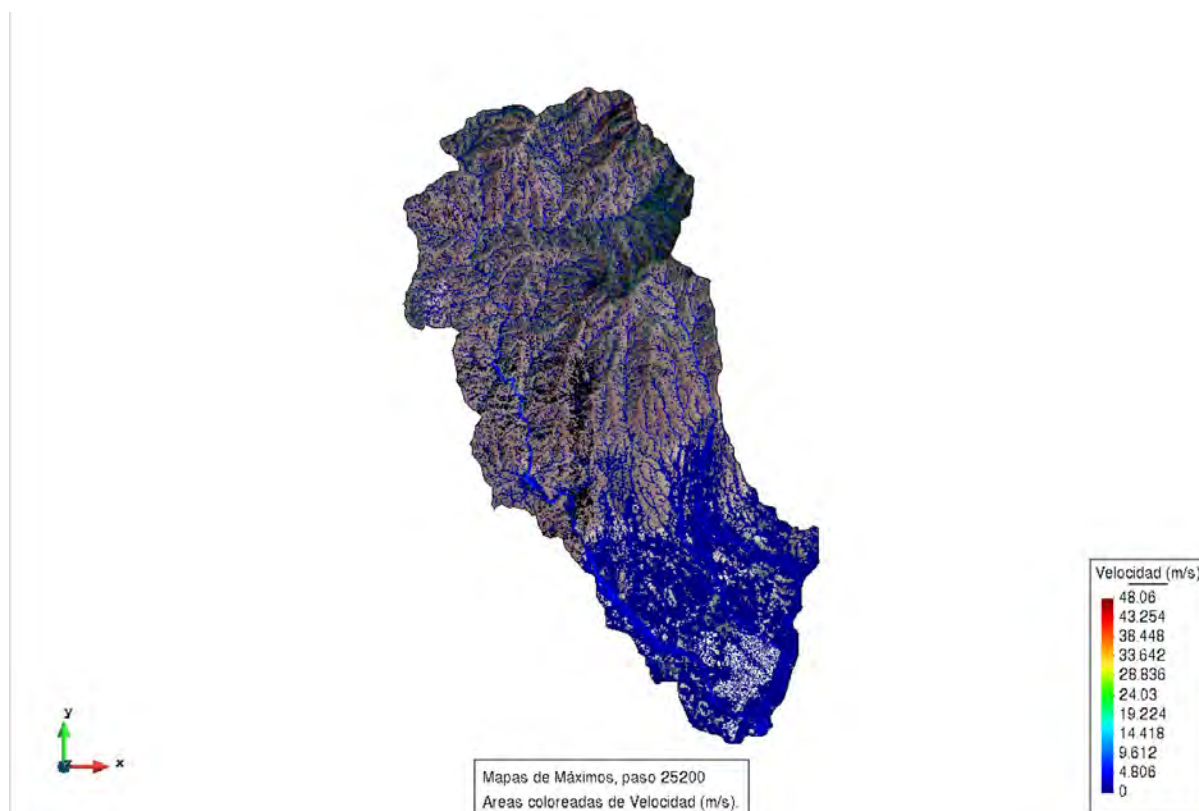


Figura 86. Mapa de máxima velocidad en el área de estudio.

A partir de los resultados presentados en la Figura 8, es posible observar la velocidad de los flujos de agua dentro del área de estudio. Al analizar detalladamente la figura antes mencionada es posible observar cómo los perfiles de velocidad siguen los mismos patrones que las figuras del máximo calado y el máximo caudal específico.

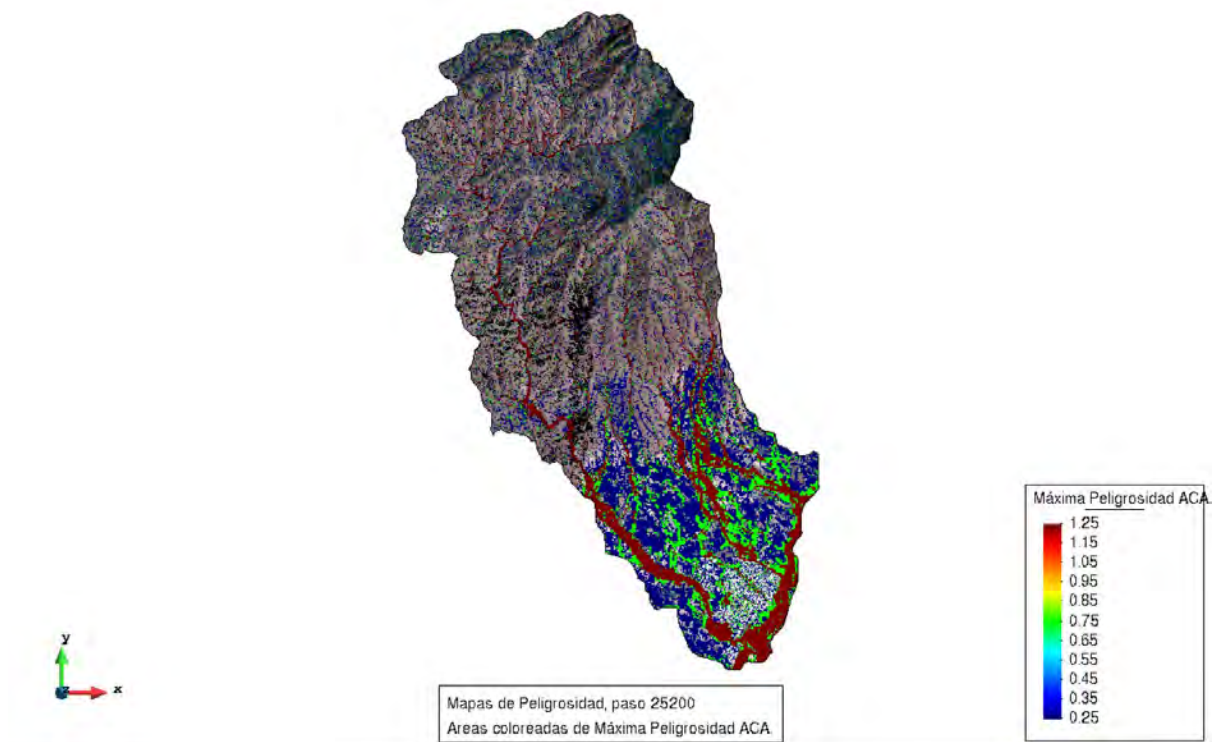


Figura 87. Mapa de máxima peligrosidad ACA.

Finalmente, en la Figura 9, es posible observar la máxima peligrosidad basada en la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA). La metodología propuesta por la ACA tiene la finalidad de caracterizar la gravedad de las características del flujo en cuanto a cómo este puede impactar la seguridad de las personas y los bienes materiales. Para llevar a cabo dicha caracterización de la gravedad la ACA relaciona la velocidad el flujo y su calado tal como se muestra en la Figura 10. Al analizar los resultados presentados en la Figura 9 se observa que las zonas de mayor peligrosidad corresponden en su mayoría a los cauces principales dentro de la cuenca, sin embargo, también es posible identificar zonas con una peligrosidad muy alta dentro del poblado de San Juan de Abajo (Gracia et al., 2010).

Gravedad	Descripción	Rango	Factor de Gravedad
Extrema	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 4 metros, una velocidad mayor que 6 m/s o el producto de ambas superior a 2 m ² /s	$c > 4m$ $v > 6 \text{ m/s}$ $c \cdot v > 2m^2/s$	6.0
Muy alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 2 y 4 metros, una velocidad entre 3,5 y 6 m/s o el producto de ambas superior a 1 m ² /s	$2 < c < 4m$ $3,5 < v < 6 \text{ m/s}$ $1 < c \cdot v < 2m^2/s$	4.0
Alta	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado entre 1 y 2 metros, una velocidad entre 1 y 3,5 m/s o el producto de ambas superior a 0,5 m ² /s	$1 < c < 2m$ $1 < v < 3,5 \text{ m/s}$ $0,5 < c \cdot v < 1m^2/s$	2.0
Moderada	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado superior a 0,4 metros, una velocidad mayor a 0,4 m/s y el producto de ambas superior a 0,08 m ² /s	$0,4 < c < 1m$ $0,4 < v < 1 \text{ m/s}$ $0,08 < c \cdot v < 0,5m^2/s$	1.0
Baja	Zona donde las condiciones hidráulicas presentan un calado inferior a 0,4 metros, una velocidad menor a 0,4 m/s y el producto de ambas menor que 0,08 m ² /s	$c \leq 0,4m$ $v \leq 0,4 \text{ m/s}$ $c \cdot v \leq 0,08m^2/s$	0.5

Figura 88. Determinación de peligrosidad ACA (Gracia et al., 2010).

4.1.5 Caracterización territorial

4.1.5.1 Topografía

Los datos topográficos obtenidos en INEGI y procesados con ArcGIS Pro muestran que el territorio de la cuenca se compone de dos zonas: la zona alta (Sierra de Vallejo) y la zona baja (Pueblo San Juan de Abajo y áreas de agricultura). Esto se puede ver claramente en el Modelo Digital de Elevación (Figura 2). La zona alta es un terreno muy accidentado, con distintas elevaciones y, juzgando por una visita del sitio e imágenes satelitales, una cantidad importante de vegetación. El nacimiento del río Huichichila viene desde uno de los puntos más elevados de la cuenca. En el Modelo Digital de Elevación se ve claramente el cauce del río iniciando en la parte alta de la cuenca hasta llegar a su desembocadura con el río Ameca en la parte baja.

La zona baja es prácticamente plana ya que se encuentra a unos cuantos kilómetros del Océano Pacífico. El pueblo San Juan de Abajo está posicionado al Sureste de la cuenca y se encuentra muy cercano al río Ameca. Debido a la topografía plana de la zona baja de la cuenca, el pueblo se encuentra en riesgo de enfrentar aumentos del caudal del río Ameca y del Huichichila en temporales de lluvia. El Modelo Digital de Elevación muestra que el terreno accidentado de la zona alta de la cuenca genera otras cuencas más pequeñas en las cuales la lluvia puede escurrir y llegar hasta la zona baja. Esto sugiere que sin la existencia de vegetación en la sierra que detenga el paso

del agua, el pueblo se encontraría en alto riesgo de inundación ya que en la parte baja no hay obstáculos ni vegetativos ni geográficos que la detengan fácilmente.

4.1.5.2 Hidrología

Los datos hidrológicos fueron recuperados de INEGI. La hidrología de la cuenca es muy interesante ya que existen cuerpos de agua importantes y que influyen directamente en la población de San Juan de Abajo: el río Huichichila y el río Ameca. Ambos ríos a lo largo del año siempre llevan agua, sin embargo, en temporales de lluvia, sus caudales aumentan y pueden presentar un riesgo para la población de San Juan. Al norte del pueblo también hay otro río más pequeño que igualmente nace en la zona alta de la cuenca y desemboca hacia el Ameca.

El río Huichichila nace en lo alto de la sierra, en una de las zonas más altas de la cuenca. Durante temporales de lluvia, el Huichichila puede llegar a velocidades considerables y convertirse en un riesgo para los pobladores de San Juan. Esto fue confirmado por los propios habitantes del pueblo. Declararon que en efecto el río Huichichila puede llegar a ser muy violento cuando hay lluvias fuertes. Si se considera que este río desemboca un uno más grande (el Ameca), se entiende que existe un área de riesgo en la zona baja de la cuenca. En el año 2015 un huracán llegó hacia la costa y se puede ver en imágenes satelitales cómo el cauce del río Ameca se desvió y llegó a tocar áreas muy cercanas al pueblo.

En una visita realizada en el sitio, fue posible observar el recorrido del río Huichichila y entender cómo es actualmente. Por ejemplo, se pudo ver cómo el río Huchichila, en una de las zonas más cercanas a su desembocadura con el río Ameca, logró erosionar un territorio muy cercano a un plantío de sandía. Se comentó que el propietario tuvo que rellenar con una cantidad enorme de tierra y piedras dicha área deslavada con el fin de que el agua no se llevara parte de su terreno y de su cerca. Esto muestra que realmente el cauce del río puede tener rangos de peligrosidad importantes. De igual manera, la primera iteración realizada en IBER, se pudo confirmar que dicha zona se puede clasificar con una mayor peligrosidad que otras.

4.1.5.3 Litología

El contexto litológico de la cuenca es importante ya que ayuda a entender cómo son los suelos. Los datos geológicos del INEGI (Geografía INEGI, 2005) muestran una

relación interesante de la litología del lugar con el Modelo Digital de Elevación. En la zona baja de la cuenca se tiene una litología aluvial. Después, más cercano a la sierra, se encuentran litologías de conglomerado poligénico y granito granodiorita. En la parte más alta de la cuenca se encuentra toba riolítica. El hecho que la parte baja de la cuenca se clasifique como aluvial es muy interesante. Esto demuestra que en efecto la cuenca tiene una tendencia de traer el agua (y todo lo que viene con ella) a las cercanías de San Juan de Abajo y sus territorios adyacentes. Lo aluvial se utiliza como espacio urbanizado y espacio de agricultura, mientras que las demás categorías que se encuentra en lo alto de la sierra pertenecen a su contexto y permiten que el agua escurra sobre ellas.

4.1.5.4 Uso de suelo

El INEGI proporciona información sobre el uso de suelo en la cuenca, sin embargo, no parecía suficiente para hacer un modelo así que la información de uso de suelo se determinó a través del análisis de información obtenida del INEGI y la plataforma Planet. Se hizo una clasificación supervisada de la imagen satelital con el software ArcGis Pro. Se determinaron los usos de suelo: agricultura activa, agricultura pasiva, zonas urbanizadas (camino, calle, carretera, manzanas, canal), vegetación abierta, vegetación cerrada, vegetación dispersa y desprovisto de vegetación. A cada uno de estos usos se le asignó un número de curva de la SCS y una rugosidad. De esta manera, la simulación en IBER puede ser lo más realista posible.

Todos los usos de suelo dentro de la cuenca son importantes, pero podría parecer que el uso de suelo de la zona más baja de la cuenca (es decir San Juan de Abajo y su territorio adyacente) da mucho de qué hablar. Al tener prácticas de agricultura que están en constante cambio, que son activas y pasivas, el suelo puede llegar a verse desprovisto de vegetación y al tener un escenario drástico (un huracán o una lluvia fuerte), el suelo permitiría que el agua escurriera con mucha facilidad por el territorio hasta que elementos construidos le detengan, o quizá hasta que se unifique con el río Ameca. Esto indica que hay vulnerabilidad de la población al momento de pensar en escenarios riesgosos, porque toda el agua siempre irá “en contra” de San Juan ya que su cauce natural le lleva hacia el Ameca y lo único que hay entre la Sierra y dicho río es el pueblo. Las zonas con más presencia de seres humanos y de urbanización siempre serán las más vulnerables. Cuando la agricultura está en acción, el agua

siempre se detendrá con mayor facilidad entre las raíces de la vegetación. Los suelos serán más rugosos y esto beneficia a todos, sin embargo, no siempre puede ser así. Otro aspecto importante que se debe mencionar es el hecho de que, en la sierra, en la parte alta de la cuenca, hay ciertos espacios que se pueden clasificar como desprovistos de vegetación. Esto se debe a que, según habitantes de San Juan, hay vacas que suben a la sierra a pastar e intervienen con el ecosistema, dejando desnudos a los suelos y ocasionando que se pierda rugosidad y que el agua baje con mayor velocidad.

4.1.6 Evaluación de la hidrología superficial

La tabla que se ve abajo integra los cuerpos de agua -principalmente ríos- superficiales que se encuentran en la zona de estudio.

Tabla IX. Cuerpos de agua superficiales de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).

<i>Tipo</i>	<i>Nombre del río</i>	<i>Clasificación</i>	<i>Longitud del río (m)</i>
Canales de irrigación	Canal Guastitán	Canal	5,979.9
Canales de irrigación		Canal	1,033.53
Canales de irrigación		Canal	1,445.81
Canales de irrigación		Canal	8,005.19
Canales de irrigación		Canal	8,706.29
Canales de irrigación		Canal	13,798.84
Canales de irrigación		Canal	5,572.34
Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	6,217.74

Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	11,841.25
Ríos y límites de corrientes de perenes dobles	Río Ameca	Corriente perenne	9,260.17
Arroyos y de corrientes intermitentes	A. Guastitán	Corriente intermitente	8,782.22
Arroyos y de corrientes intermitentes		Corriente intermitente	

Teniendo en cuenta la primera iteración de IBER, fue posible observar que, por ejemplo, el río Huichichila tiene partes donde el calado es de tamaños reducidos (2m a 5m), sin embargo, en una zona muy cercana al río Ameca parece ser mayor a los 5m. De igual forma en la zona alta de la cuenca hay calados de hasta 10m. En una vista general, los calados siempre se mantienen entre los rangos mencionados.

La peligrosidad de la hidrología superficial se encuentra en la parte más baja de la cuenca, justo en las intersecciones de los ríos Ameca y Huichichila. El modelo de IBER indicó una peligrosidad de 1.25. También a lo largo de todo el cauce del río Huichichila vemos un índice de peligrosidad de 1.25. Hay zonas dentro del pueblo de San Juan que indican igualmente una cifra elevada lo cual podría sugerir que hay riesgo de inundación y áreas en las que el agua escurre de manera peligrosa.

Hablando sobre la calidad del agua del Huichichila, basándose en una visita del sitio, se puede decir que es buena. En la parte alta de la cuenca, el agua es clara y no parece indicar signos de contaminantes. En este punto, el agua viene en un cauce sin intervenciones, sin urbanización y muy poca presencia de seres humanos. Mientras más se acerca a la desembocadura con el río Ameca, es decir mientras más se acerca al pueblo San Juan de Abajo, el agua pierde parte de su claridad y comienza a contaminarse. Fue posible ubicar en el sitio algunas descargas de aguas negras provenientes de casas que se encuentran cercanas a las orillas del río. Esto no

presenta una gran problemática debido a que es muy poco lo que se está contaminando y la solución puede ser tan fácil como desviar dichas descargas a la red municipal. Esto nos dice que la calidad del agua de dicho río, con el tratamiento adecuado del entorno, puede estar siempre limpia.

4.1.7 Análisis de la hidrología subterránea

La microcuenca de “San Juan de Abajo” se encuentra en tres acuíferos: “Puerto Vallarta”, “Zacualpan – Las Varas”, “Valle de Banderas”. Las características de cada acuífero se mencionan en la tabla 2:

Tabla X. Características de los acuíferos pertenecientes a la microcuenca de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).

Clave del acuífero	Nombre del acuífero	Disponibilidad	Fecha D.O.F.	¿Sobre explotado?	Superficie del acuífero (Ha)	Superficie de la geometría (m ²)	Superficie de incidencia (m ²)
1427	Puerto Vallarta.	Sin disponibilidad	17/09/2020	Sí	1,572.521	68,042,409.06	24,274.872
1806	Zacualpan – Las Varas	Con disponibilidad		No	137,383.927		2'351,616.845
1807	Valle de Banderas	Con disponibilidad		No	118,058.122		65'666,517.343

Dos de los tres acuíferos que inciden en la zona de estudio se encuentran con un buen abasto de agua, a excepción del de “Puerto Vallarta”. A su vez, de la tabla 2, se puede saber que “Valle de Banderas” abastece el 96.50% de la cuenca, “Zacualpan” el 3.46%, y “Puerto Vallarta” el 0.04%. Es importante notar que los acuíferos que tienen una mayor carga de abastecimiento no se encuentran sobreexplotados.

La precipitación de la zona es favorable para el constante flujo de aguas superficiales, mismo que tiene efecto sobre el agua subterránea mediante procesos de infiltración e intercambio con los ríos (mismo que se mencionan en la tabla 1). La instalación de tecnologías, como gaviones, compuertas, balsas de acuicultura, etc.; disminuyen la velocidad con la que fluye el agua superficial, beneficiando la infiltración y el reabastecimiento de los acuíferos.

Existen varias concesiones dentro de la zona de San Juan de Abajo que se relacionan directamente con la extracción de agua de los acuíferos. Éstas se resumen en la tabla 3.

Tabla III. Concesiones subterráneas. (PNT, 2023)

Estado	Municipio	Cuenca	Acuífero	Clave de acuífero	Volumen anual en m ³
Nayarit	Bahía de Banderas	Río Ameca-Ixtapa	Valle de Banderas	7	78,351
					206,186
					144,330
					149,828
					127,835
					180,069
					116,838
					203,436
					185,568
					141,581
					89,347
					45,361
					114,089
					166,323
					156,701
					123,711
					65,979
					104,467

De acuerdo con la *tabla 3*, se tiene un total de 2'400,000 m³ de extracción de agua por concesiones registradas. En total se tiene información de 18 concesiones. La *tabla 2* no presente información de la cantidad de agua disponible en el acuífero, solo que sí se tiene disponibilidad; no obstante, el volumen de extracción es relativamente menor al área del acuífero, suponiendo que hay una relación entre el área y el volumen de agua disponible, se podría decir que la extracción de ésta no supone un problema de sobreexplotación.

4.1.8 Estudio de eventos extremos

Para llevar a cabo el estudio de los eventos extremos en la zona de estudio, en primera instancia se desarrolló la tormenta de diseño mediante el planteamiento establecido en la sección 3.7 del presente documento. La tormenta de diseño tiene la finalidad de analizar la información meteorológica histórica para identificar los eventos con mayor precipitación dentro de un periodo de análisis y establecer la duración de la tormenta más probable con mayor intensidad. Posteriormente, a partir de la tormenta de diseño generada, se plantearon escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno, con la finalidad de analizar cuál sería el comportamiento esperado en la zona.

La siguiente variable a considerar para el estudio de eventos extremos es la cobertura del suelo y la humedad de éste. Debido a que la cobertura se encuentra directamente asociada a la rugosidad del suelo y número de curva de la SCS (coeficiente de pérdidas). Por lo que, al llevar a cabo un cambio de uso de suelo, de manera que se tenga una menor rugosidad y un mayor número de curva, los escurrimientos ocurrirán a una mayor velocidad y por lo tanto ocasionaran eventos más desfavorables como inundaciones o sequías.

Otro de los factores a considerar para el análisis de eventos extremos, es la ocurrencia de eventos de precipitación consecutivos, en consecuencia, de que, el suelo al tener mayor contenido de humedad tiene un menor potencial de infiltración y, por lo tanto, se propicia el aumento de los escurrimientos superficiales generando inundaciones en la zona de estudio.

Durante la primera iteración del modelo realizado en IBER, no se toman en cuenta los factores de análisis de eventos extremos en su totalidad, por lo que será necesario generar nuevos modelos en los que se incluyan los factores antes mencionados.

4.1.9 Validación y calibración

El modelo no es comparable con datos medidos, pues se trata de una proyección de precipitación con un tiempo de retorno definido. En otras palabras, se simula para tormentas de máxima intensidad que no han pasado en el presente.

No obstante, una de las formas de validar los resultados es la comparación de éstos con lluvias que han sucedido en el pasado. Si se remite a la *figura 8* se puede notar que las lluvias tienen un calado máximo en la zona inferior de la cuenca, que es donde el área de estudio coincide con el Río Ameca. En el 2015 hubo una tormenta de 180

intensidad tal que generó el desalojamiento de más de doscientas personas, debido al desbordamiento de dicho río (Hernández, 2015). Es el último desbordamiento del que se tiene datos, pero este afirma que la inundación de la cuenca se lleva a cabo en la zona inferior cercana a los cuerpos de agua superficiales.

A su vez, el modelo toma en cuenta los escenarios de precipitación extrema que puede generar consecuencias semejantes en los otros ríos y cuerpos de agua superficiales que se encuentran en el área de estudio.

4.1.10 Evaluación de impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros

Las intervenciones planeadas para San Juan de Abajo son:

- Construcción de barreras con geocostales.
- La creación de albercas naturales con la implementación de barreras en el transcurso del Río Huichichila.
- Acuicultura en un terreno baldío de la zona este de la cuenca.

Los impactos que cada una de estas propuestas puede tener se relacionan directamente con el método de construcción (disposición de residuos, movimiento de la fauna, contaminación auditiva de las herramientas de trabajo, ...), el mantenimiento (retirar los sedimentos que se acumulen durante la temporada seca, recolocar y cuidar el posicionamiento de las barreras, mantener un flujo constante de agua en la acuicultura para garantizar el movimiento del oxígeno, etc.), y los impactos sociales que se deriven de la presencia de la población en la zona (contar con espacios designados para poner los residuos como empaques, tener un reglamento que establezca el cuidado que se debe tener si las personas se meten en el agua del río, establecer las medidas de seguridad y caminos que permitan el paso, y más).

Se espera que con la implementación de las medidas, se reduzca la velocidad de escorrentía y se favorezca la infiltración; y que la comunidad adquiera una cultura de cuidado del agua, y que pueda aprovechar responsablemente los espacios recreativos naturales.

4.1.11 Anexos.

Los anexos 1, 2 y 3 se adjuntan como entregables en formato PDF con la finalidad de evitar pérdidas en la calidad de la información presentada en éstos.

4.2 Arroyo Seco

4.2.1 Planteamiento Metodológico para un Análisis Hidrológico

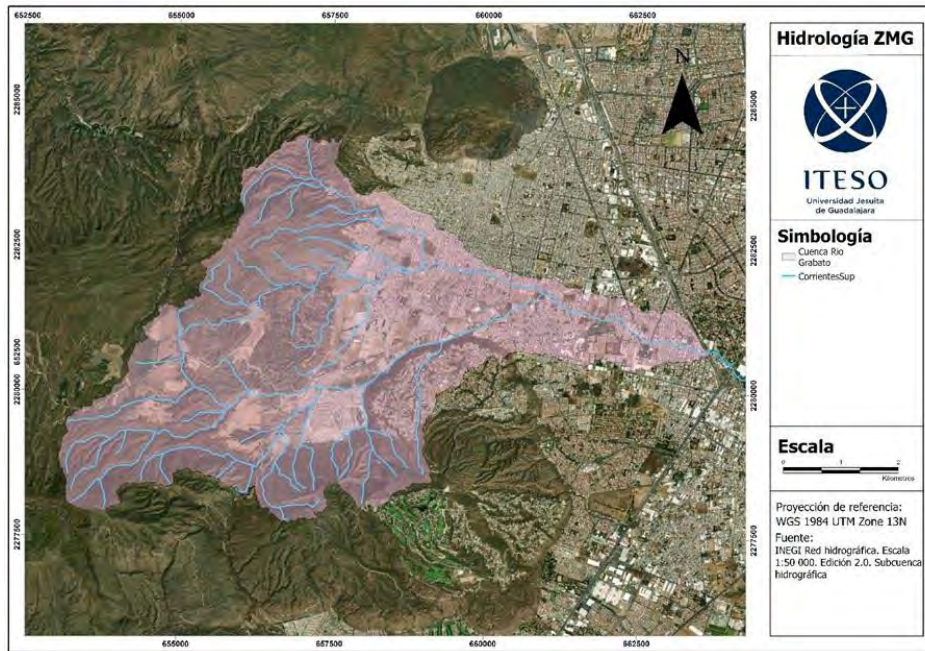
El planteamiento metodológico para un análisis hidrológico es esencial para guiar la investigación y el estudio de los procesos relacionados con el ciclo del agua en una determinada área geográfica. A continuación, se presenta una estructura base que describe los contenidos que deben formar parte de un planteamiento metodológico integral para un análisis hidrológico.

4.2.2. Introducción

La investigación se centra en la delimitación y caracterización del área de estudio, focalizándose en la cuenca y cauces del Río Garabato, ubicado en el estado de Jalisco, México. A pesar de la urbanización predominante en la región, la presencia de áreas boscosas aún persiste, aunque se ve amenazada por el continuo proceso de urbanización. Este río y su cuenca, abarcando 3164.44 hectáreas, presentan desafíos significativos relacionados con la gestión del agua y la influencia del cambio climático, particularmente evidenciado por la falta de lluvias en el último año y la continua urbanización. El clima templado y las características geográficas juegan un papel crucial en la hidrología de la región. Este estudio no solo recopila datos mediante investigaciones geográficas, visitas de campo y herramientas como IBER para modelar hidrológicamente la cuenca, sino que también aborda la evaluación de la hidrología superficial y subterránea, análisis de eventos extremos y propuestas de intervención para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la gestión del agua en esta área. La validación y calibración del modelo hidrológico, así como la evaluación de impactos y la anticipación de escenarios futuros, completan un enfoque integral para comprender y abordar los complejos problemas hidrológicos en la cuenca del Río Garabato.

4.2.3. Definición del Área de Estudio

A continuación, se mostrará un mapa de la delimitación del área geográfica de la cuenca y cauces del Río Garabato.



Mapa de la cuenca y cauces del río garabato.

El río garabato está localizado en el estado de Jalisco, México, se encuentra en las faldas del cerro del Bosque de la Primavera. La zona de estudio está en su mayoría urbanizada, aunque todavía hay área de bosque, muchos de los cauces han desaparecido gracias a la urbanización, sigue en proceso de seguirse urbanizando.

El clima es templado (semiseco-semihúmedo con lluvias en verano), mostrando una temperatura media de 19.2°C, la temperatura máxima es de 29 °C y la mínima de 21.1°C. Los meses julio y agosto, son los meses de intensas lluvias, el último año casi no tuvo lluvias, el cambio climático va a seguir cambiando gracias a que se sigue urbanizando hacia las áreas naturales.

La cuenca delimitada para este río abarca un extenso territorio de 3164.44 hectáreas, caracterizado por un río principal, el Garabato, acompañado por unos 20 afluentes tributarios intermitentes.

No hay mucha información acerca de este río.

4.2.4. Recopilación de Datos

La recopilación de datos del Arroyo Seco se obtuvo en la realización de una profunda investigación de datos geográficos, para posteriormente hacer mapas con curvas de

nivel en ArcGIS e Iber para comprender el comportamiento de la hidrología de las cuencas del Arroyo Garabato. La información cuantitativa geográfica se obtuvo de INEGI, IIEG, etc. para entender los flujos de agua del río que bajan desde el cerro del Bosque de la Primavera hasta el Río Santiago, pero el área de estudio solamente abarca el Arroyo seco.

También, se realizaron visitas de campo en una parte del Río Garabato para analizar un poco del contexto de lo que es el canal actualmente para comprender mejor la realidad del canal, solo se visitaron algunos puntos, principalmente en los puentes. Se observó que hay deformaciones en el canal, como, por ejemplo, la urbanización creciente que no respeta el cauce, lo que genera que el canal se recorra dañando casas vecinas ya existentes. No hay tal información cuantitativa exacta de la hidrológica de este arroyo, pero cada año hay desbordamientos y destroces por la cantidad de agua que corre, sobre todo en temporadas de lluvia, generando que el agua no se capte ni gestione de la manera correcta, el resto del año el canal suele estar seco.

4.2.5. Modelado Hidrológico

Para la realización del modelado hidrológico y el comportamiento de los cuerpos de agua superficiales de la cuenca delimitada y mencionada anteriormente que abarca algunos de los cauces más importantes del área de Zapopan, como lo son el arroyo teinstique y el arroyo grande entre otros, los cuales fueron los cauces que se utilizaron para para añadir la información al software de IBER. Con el cual, se revisaron y analizaron las zonas de riesgo para de esta manera observar en que sitios de la ciudad se nos presentan los mayores problemas tanto de inundaciones como de posibles zonas de peligrosidad por acumulación de agua, a su vez se obtuvieron tirantes y velocidades de escorrentías las cuales nos ayudan a definir cuanta es la cantidad de agua que pasa a través de estos cauces y que tan rápido se desaloja hacia las zonas más bajas de la ciudad.

IBER es una herramienta de modelación matemática bidimensional para la simulación del flujo del agua en lamina 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 esta manera nos ayuda a poder predecir los valores de las variables hidráulicas 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. Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos de microcuencas urbanas se siguieron una serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER, la cual se basó en:

1. Manejo de datos en SIG
2. Preproceso
3. Realización de intervenciones en el modelo

Es importante recalcar que previo al proceso de simulación, intervenciones y modelo numérico que se realizó por computadora, se realizaron distintas actividades para el manejo de datos en el sistema de información geográfica. Dentro de estas actividades se ingresaron distintos datos a nuestro modelo de IBER como lo son:

1. Rugosidad del Suelo
2. Depende de las variaciones de uso de suelo asignado a esa área de la ciudad, si es área urbanizada, no urbanizada, protegida, vegetación, pavimento, arbustos, etc.
3. Numero de Curva
4. Este 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 número de curva.

4.2.6. Modelo Digital de Elevaciones

Este modelo representa una representación gráfica y matemática de la variación de altura del territorio respecto al nivel del mar y presenta visualmente las formas del relieve y los elementos presentes en el mismo como las áreas urbanizadas, casas, edificios, calles, etc.

Antes de iniciar el proceso de modelación fue necesario realizar una recolección de información en ArcGIS, donde 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 número de curva y el tercero con el modelo digital de elevación del límite de la cuenca. El número de curva es la metodología de pérdidas que se seleccionó para trabajar con las simulaciones, donde la información recolectada salió de la Universidad Americana de Beirut quien publicó un mapeo de celdas de 250 m con números de curva para tres diferentes condiciones del suelo, seco, mojado y promedio, y con base a este mapeo buscamos celdas que se aproximaran al uso de suelo de nuestras cuencas para después establecer el número de curva para cada uso de suelo que se tenía en cada cuenca.

Para poder realizar los archivos ASCII se obtuvo información vectorial 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 2017 con escala 1:10,000 y curvas a cada 5 m.

Para los modelos de las tres zonas de estudio se tomaron los valores de rugosidades y número de curva obtenidos mediante la clasificación del suelo que se realizó a lo largo del proyecto. Según los criterios del software de IBER, se determinaron las rugosidades de los distintos tipos de suelo. El número de curva y la rugosidad del uso del suelo están estrechamente ligados, es necesario mantener un orden de asignar estos valores para que ambos datos correspondan al área seleccionada según su tipo de suelo.

En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), para determinar correctamente los parámetros necesarios para estimar el número de curva. De igual manera se analizaron las cartas edafológicas de la región para caracterizar la

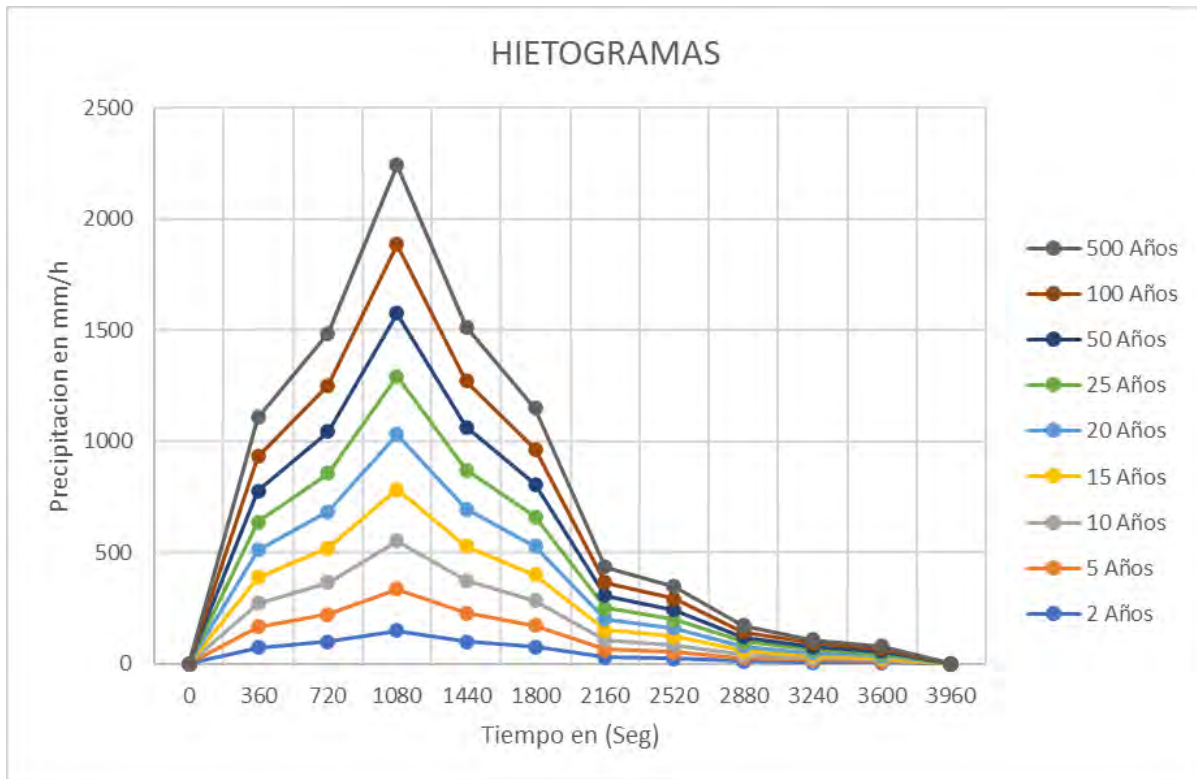
composición del suelo, así como también se utilizó Google Earth para estimar la condición hidrológica que se tenía en cada tipo de suelo dentro del área de captación.

Uso de suelo Coeficiente de Manning	
Bosque	0.12
Arbustos	0.05
Arboles	0.12
Vegetación Urbana	0.032
Hormigón	0.018
Residencial	0.15

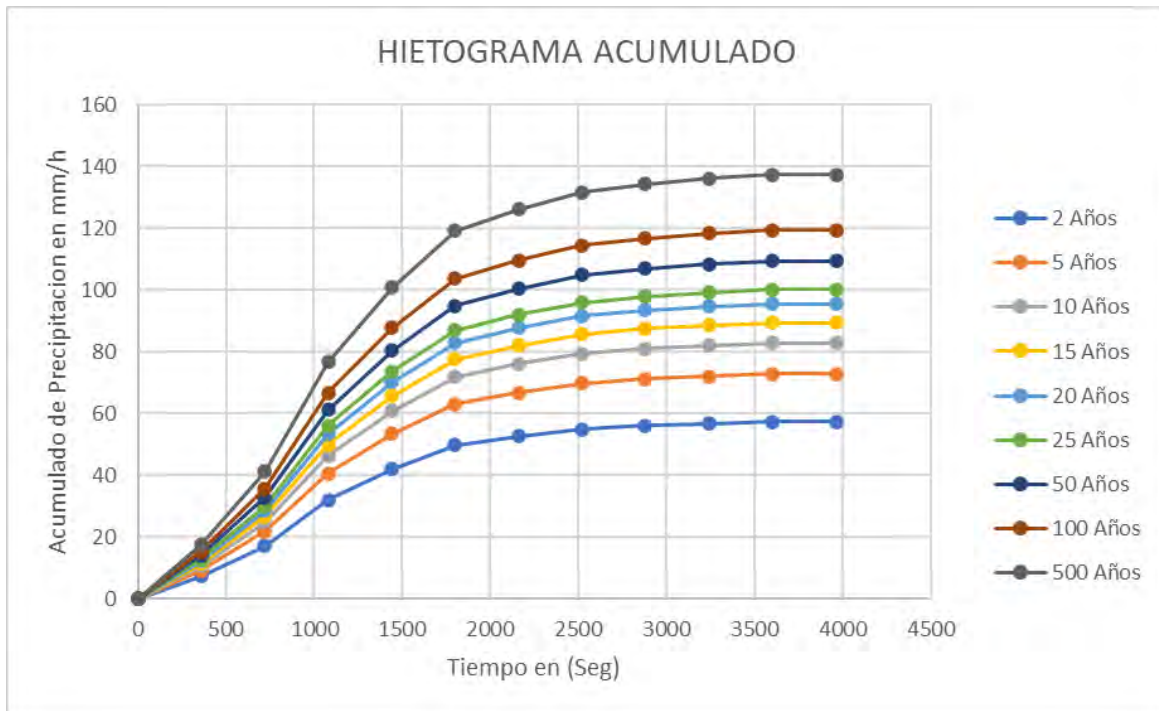
Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación los archivos shapefile de las manzanas, calles y la delimitación de la cuenca que se está estudiando, para posteriormente crear una malla la cual hará referencia a pequeñas porciones del terreno a las cuales se les asignaran las elevaciones formando puntos mediante triángulos, por lo cual en IBER se creó un nuevo archivo donde se importaron las elevaciones de la cuenca mediante el relieve; se utilizó una tolerancia de 20 metros para el área del bosque de la primavera en donde no es necesario tener una malla tan refinada ya que los datos tendrán menos variación porque es el mismo tipo de terreno y la elevación no varía a grandes escalas, por otro lado dentro del área urbana se asignó una malla de 5 metros la cual tendría más definición para poder ver de manera más real la elevación de las áreas pavimentadas, calles, casas, fraccionamientos, plazas, etc. 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. 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 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación; los cuales se presentan en la

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



Hietogramas de diseño en segundos para 1 Hora por precipitación en mm/h



Hietogramas acumulados de diseño en segundos para 1 Hora por precipitación en mm/h

Posteriormente, se asignó un valor de rugosidad y número de curva a toda el área mediante los archivos que se habían generado anteriormente donde ya se habían obtenido estos datos para de esta manera finalmente pasar al proceso de simulación en donde se inició el tiempo de simulación en (0 segundos) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 300 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.

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. El tiempo de concentración es el de equilibrio para que el cuerpo de agua se estabilice tras una precipitación, es decir, el tiempo que tarda en llegar la gota de agua en el punto más lejano de la cuenca hasta el mientro de la cuenca (Vélez & Botero, 2010). A continuación, se presentan en la siguiente tabla:

Área de Captación	Tiempo de Concentración (Min)
Arroyo Chicalote	240
Arroyo Seco	156
Arroyo Teinstique	57

4.2.7. Caracterización territorial

Se detalla cómo se obtuvo y analizó la información territorial en la región (topografía, hidrología, edafología, uso de suelo, y otra cartografía), dado que este factor influye significativamente en la dinámica hidrológica.

La caracterización territorial se llevó a cabo principalmente utilizando los recursos disponibles en el portal del INEGI eh IMEPLAN. A través de este portal, pudimos recopilar información esencial para nuestro análisis territorial.

En primer lugar, se obtuvo datos topográficos del relieve mediante un modelo digital de elevación con una resolución de 5 metros. Este modelo proporcionó una representación detallada de la topografía de la cuenca del río Garabato, permitiéndonos comprender la configuración geográfica del área de estudio.

Además, se recopiló información sobre el uso del suelo en la cuenca. Identificamos varios tipos de usos del suelo, que incluyen asentamientos humanos (áreas urbanas), pastizales inducidos, agricultura de temporada anual, bosques de pino y encino, así como infraestructuras como calles y áreas verdes. Para verificar y complementar la información proporcionada por el INEGI sobre el uso del suelo, realizamos una caracterización visual utilizando imágenes satelitales. Esto nos permitió confirmar la precisión de los datos proporcionados por el INEGI y también nos ayudó a identificar y mapear áreas específicas con los tipos de uso del suelo mencionados anteriormente.

Por último para obtener una comprensión más precisa de los patrones de escorrentía en el área de estudio, hicimos uso de la información proporcionada por el INEGI sobre los ríos existentes

en la región. Además, consultamos los registros históricos de áreas propensas a inundaciones proporcionados por el IMEPLAN.

En el caso de los ríos, llevamos a cabo una verificación visual de los cauces superficiales de agua en el área de estudio, ya que los datos proporcionados por el INEGI no estaban actualizados debido a las modificaciones en los cauces causadas por el desarrollo urbano en Guadalajara.

4.2.8. Evaluación de la Hidrología Superficial

La evaluación hidrológica del área se llevó a cabo mediante el empleo del modelo Iber, un software de simulación numérica que utiliza un modelo bidimensional para simular el flujo superficial libre en ríos. Iber resuelve las ecuaciones completas de aguas poco profundas, promediadas para calcular tanto la profundidad del agua como los dos componentes horizontales de la velocidad promediada en profundidad. Estas ecuaciones se resuelven mediante un solucionador de volúmenes finitos no estructurado y explícito en el tiempo. Los algoritmos implementados en el modelo se han validado y aplicado en estudios anteriores relacionados con inundaciones fluviales y corrientes de marea en estuarios y ríos.

En particular, Iber utiliza las ecuaciones de simulación 2D de Saint Venant, un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas que describen el flujo debajo de una superficie de presión en un fluido. A través de este software, se logró determinar variables cruciales como los caudales en puntos específicos y las cotas del agua, proporcionando así una comprensión detallada de la hidrología del territorio evaluado.

Además, se llevó a cabo una evaluación cualitativa mediante observación visual en la cuenca de análisis. En la visita realizada, se analizó el comportamiento de la cuenca durante las lluvias, interactuando con las personas para saber sobre posibles desbordamientos recientes en los arroyos y para comprender su comportamiento histórico en el tiempo.

4.2.9. Análisis de la Hidrología Subterránea

La recarga de acuíferos implica la aplicación de diversos métodos. El análisis de precipitación examina la cantidad y distribución de las lluvias en la región de interés, mientras que los modelos de infiltración emplean herramientas matemáticas para simular cómo el agua de lluvia se infiltra en el suelo y recarga el acuífero. Los estudios de suelo analizan las propiedades físicas y químicas del suelo, considerando la textura y presencia de capas impermeables. Los marcadores trazadores se utilizan para rastrear el movimiento del agua y evaluar patrones de

infiltración, y el monitoreo regular de los niveles freáticos proporciona información sobre cambios estacionales. Estos métodos combinados ofrecen una visión integral de la recarga de acuíferos, siendo esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos y la prevención de la sobreexplotación.

La descarga de acuíferos implica la aplicación de diversas técnicas. El análisis de extracción de aguas subterráneas se centra en monitorear la cantidad de agua extraída de pozos, proporcionando información sobre la tasa de extracción y su influencia en la descarga del acuífero. Los estudios de flujo de aguas subterráneas utilizan modelos hidrogeológicos para comprender la dirección y velocidad del flujo, identificando áreas donde el agua subterránea se descarga naturalmente hacia cuerpos de agua superficiales. El monitoreo de descargas naturales, como caudales en ríos y manantiales, también contribuye a entender los patrones de descarga. Además, el análisis de propiedades químicas del agua subterránea cerca de las zonas de descarga y el uso de imágenes satelitales para detectar cambios en la vegetación completan el enfoque integral. Estos métodos son esenciales para una gestión efectiva de los recursos hídricos subterráneos y para mantener el equilibrio entre la extracción y la conservación de los acuíferos.

La obtención de datos precisos sobre la recarga de acuíferos en la ciudad de Guadalajara presenta desafíos debido a la limitada profundidad de los estudios realizados hasta ahora. La falta de información detallada se debe a la escasa exploración en la zona. Según los datos disponibles, los niveles de aguas freáticas en la región varían entre 60 y 100 metros de profundidad. El análisis de los tipos de suelo predominantes en la zona, como jal, jaltepe, tepejal y tepetate, revela que su capacidad de absorción alcanza el 30%, lo que indica una aceptable capacidad de recarga para el área. Pese a la escasa información actual, estos indicios sugieren que la recarga de acuíferos podría hacerse factible en la región de Guadalajara. Sin embargo, se requieren estudios más exhaustivos para obtener datos más completos y respaldar estrategias de gestión hídrica sustentables.

4.2.10. Estudio de Eventos Extremos

Las inundaciones pueden ocurrir debido a lluvias intensas, desbordamiento de ríos, deslizamientos de tierra u otros eventos climáticos extremos. En Guadalajara, como en muchas otras ciudades, el desarrollo urbano, la topografía y la infraestructura de drenaje pueden influir

en la susceptibilidad a inundaciones. Los eventos extremos de lluvias pueden provocar desafíos significativos en términos de evacuación de personas, daños a la propiedad y la infraestructura. El análisis de fenómenos climáticos extremos como inundaciones o sequías implica una combinación de métodos y técnicas interdisciplinarios. A continuación, se muestran algunas técnicas comunes utilizadas para analizar estos eventos:

- Observación y recogida de datos
Utilice estaciones meteorológicas para recopilar datos sobre precipitación, temperatura y otros parámetros climáticos. Utilice imágenes satelitales para observar patrones climáticos y cambios en la cobertura del suelo a gran escala.
- Modelos climáticos
Aplicar modelos climáticos para simular y predecir patrones climáticos. Esto puede ayudar a comprender la probabilidad de eventos extremos en función de las condiciones climáticas actuales y futuras.
- Hidrología y modelos hidráulicos
Utilice modelos hidrológicos para comprender cómo las precipitaciones afectan los ríos y las cuencas. Los modelos hidráulicos simulan el comportamiento del agua durante las inundaciones y evalúan zonas de riesgo
- Análisis de series de tiempo
Estudie datos a lo largo del tiempo para identificar tendencias y cambios en los patrones climáticos y eventos extremos
- Índice climático
El alcance y la duración de las sequías se cuantifican utilizando índices climáticos como el Índice de Severidad de la Sequía (SPI) o el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).
- Tecnología de teledetección
Utilice tecnología de teledetección para monitorear los cambios en la vegetación, la temperatura de la superficie del mar y otros indicadores relacionados.
- Evaluación de Impacto y Vulnerabilidad
Analice cómo los fenómenos meteorológicos extremos impactan a las comunidades, la agricultura, los recursos hídricos y la infraestructura.
- Análisis estadístico

Aplicar técnicas estadísticas para evaluar la probabilidad de eventos extremos e identificar tendencias importantes.

- Sistema de Información Geográfica (SIG)

Integre datos espaciales para mapear áreas propensas a inundaciones o sequías, identificar vulnerabilidades y planificar medidas de mitigación.

- Monitoreo en tiempo real

Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para monitorear de cerca las condiciones climáticas y brindar alertas tempranas. La combinación de estas tecnologías puede proporcionar una comprensión más completa de los fenómenos meteorológicos extremos y permitir una planificación y respuesta eficaces a las emergencias.

En conclusión, el análisis de eventos climáticos extremos, como inundaciones o sequías, es un proceso complejo que implica una variedad de técnicas y enfoques. La combinación de observación de datos, modelos climáticos, análisis hidrológicos, teledetección y evaluación de impacto es crucial para comprender la magnitud, frecuencia e impacto de estos eventos. Los modelos estadísticos y series temporales proporcionan herramientas valiosas para identificar tendencias a lo largo del tiempo, mientras que los sistemas de información geográfica (SIG) permiten visualizar y mapear áreas vulnerables.

La aplicación de estas técnicas no solo contribuye a una comprensión más profunda de los eventos climáticos extremos, sino que también facilita la toma de decisiones informada para la gestión de riesgos y la planificación de la adaptación. La integración de tecnologías modernas, como la teledetección y los sistemas de monitoreo en tiempo real, mejora la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia al proporcionar alertas tempranas.

Por último, pero no menos importante, el análisis exhaustivo de eventos climáticos extremos es esencial para abordar los desafíos asociados con el cambio climático y desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación. La colaboración entre científicos, autoridades gubernamentales, y la sociedad en general es crucial para enfrentar estos desafíos y construir resiliencia frente a eventos climáticos extremos.

4.2.11 Validación y Calibración

La validez del modelo hidrológico, como ya se mencionó, se mostrará con la realización de modelos de simulaciones en Iber, lo que se añadió al programa fueron los puntos críticos, que se consideraron en la visita a campo al canal del río Garabato y del hidrograma, esto para poder hacer proposiciones que ayuden a la gestión y captación del agua. Las propuestas son arroyos de infiltración, parques inundables, pozos de absorción y vaso reguladores. Lo que se muestra en la simulación de Iber como punto crítico coincide con los puntos y puentes que se observaron de la misma manera como críticos en la visita de campo, ya que se observaron alteraciones y deformación en los mismos puentes, generando que el agua que corre por el río sea desbordada o que la capacidad del mismo canal no sea suficiente.

4.2.12 Evaluación de Impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros

La zona de estudio está mayormente urbanizada, aunque la zona del cerro de la primavera hacia el poniente sigue siendo bosque. Lo que se observa para las próximas décadas es, que se seguirá urbanizando hacia el mismo cerro, por lo que, va a seguir afectando al cambio climático cada vez más. Estos cambios futuros generarán más lluvias inusuales, como, más escasez de lluvia, más intensificación de eventos extremos como huracanes, cambio de temporada de lluvia e incremento de evaporación de agua lo que puede generar sequías.

Se realizaron simulaciones en el programa Iber, como se mencionó en la evaluación de la hidrología, en este apartado se hicieron simulaciones con hietogramas e hidrogramas para analizar lo que sería la precipitación pluvial y el flujo de agua en años futuros, se simuló para 2, 10 y 25 años.

Los hidrogramas nos son útiles para entender y gestionar el comportamiento del agua en una cuenca hidrográfica y son herramientas valiosas para la predicción de inundaciones, la gestión del agua y la planificación de proyectos hidrológicos, esto para poder realizar propuestas que ayuden a mejorar la captación y gestión del agua por los años futuros.

5. Resultados y discusiones

5.1 Propuestas de desarrollo tecnológico para una mejor gestión del agua

5.1.1 Captación pluvial con lagunas de oxidación

Yoshiro Azano

5.1.1.1 Resumen Ejecutivo:

La propuesta de implementar una planta de tratamiento con lagunas de estabilización representa un enfoque crucial para abordar los desafíos relacionados con la gestión de aguas residuales. Su importancia radica en su capacidad para proporcionar una solución sostenible y económicamente eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas.

5.1.1.2 Objetivos: Captación pluvial

Purificación del Agua: El objetivo principal de esta planta es purificar las aguas residuales, eliminando contaminantes orgánicos e inorgánicos, sólidos suspendidos y patógenos. Esto es esencial para garantizar la protección de la salud pública y la conservación del medio ambiente.

Cumplimiento Normativo: La planta tiene como objetivo cumplir con las regulaciones ambientales y de calidad del agua vigentes, garantizando que los efluentes liberados cumplan con los estándares establecidos por las autoridades competentes.

Sostenibilidad: Se busca fomentar la sostenibilidad al utilizar procesos naturales y biológicos para el tratamiento de aguas residuales, reduciendo así la dependencia de productos químicos costosos y recursos energéticos.

5.1.1.3 Beneficios:

Protección Ambiental: La planta de lagunas de estabilización contribuye significativamente a la protección del medio ambiente al reducir la carga contaminante de las aguas residuales antes de su liberación en cuerpos de agua naturales. Esto ayuda a preservar la biodiversidad acuática y los ecosistemas circundantes.

Económico: La inversión inicial en la construcción de una planta de lagunas de estabilización suele ser más baja en comparación con otros sistemas de tratamiento más complejos. Además,

los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos, lo que lo convierte en una opción rentable a largo plazo.

Adaptabilidad: Estas plantas son adaptables a diferentes entornos y condiciones climáticas, lo que las hace adecuadas para regiones con recursos limitados o infraestructura de tratamiento de aguas menos desarrollada.

Reducción de Patógenos: La exposición a la radiación solar y la acción de microorganismos contribuyen a la reducción de patógenos en el agua tratada, lo que mejora la seguridad para su posterior uso o liberación.

Seguridad Sanitaria: Al eliminar contaminantes, se mejora la calidad del agua, lo que a su vez reduce los riesgos para la salud pública, especialmente en comunidades que dependen de fuentes de agua cercanas.

La implementación de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es una propuesta de gran importancia debido a su capacidad para abordar desafíos críticos en la gestión de aguas residuales, cumplir con objetivos ambientales y brindar una serie de beneficios económicos y de salud pública a las comunidades y al medio ambiente en general.

5.1.1.4. Introducción:

La gestión de aguas pluviales es un tema de importancia crítica en México debido a varios factores que han exacerbado los problemas relacionados con las inundaciones, la erosión y la contaminación de las aguas superficiales. A continuación, se ofrece una contextualización de la problemática y la necesidad de implementar sistemas de infiltración pluvial u otras intervenciones en México:

1. Cambio Climático: El cambio climático ha aumentado la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y tormentas. Esto ha provocado inundaciones en áreas urbanas y rurales, causando daños a la infraestructura y pérdidas económicas.

2. Urbanización: El crecimiento rápido y desordenado de las ciudades mexicanas ha resultado en la impermeabilización del suelo debido a la construcción de carreteras, edificios y áreas pavimentadas. Esto limita la capacidad natural del suelo para absorber y drenar el agua de lluvia, lo que aumenta el riesgo de inundaciones.

3. Contaminación: El escurrimiento de aguas pluviales en áreas urbanas suele recoger contaminantes como aceites, productos químicos, metales pesados y sedimentos, lo que contribuye a la contaminación de cuerpos de agua locales y afecta la calidad del agua.

4. Erosión del Suelo: Las lluvias intensas y la falta de vegetación adecuada para retener el suelo han llevado a la erosión del suelo, lo que puede afectar la fertilidad de la tierra y causar problemas en áreas agrícolas.

5. Escasez de Agua: Aunque México puede experimentar lluvias intensas en algunas regiones, también enfrenta escasez de agua en otras. La gestión ineficiente de las aguas pluviales contribuye a la pérdida de agua dulce valiosa que podría reciclarse o almacenarse para su uso posterior.

Para abordar esta problemática, se hace evidente la necesidad de implementar sistemas de infiltración pluvial y otras intervenciones que promuevan una gestión sostenible de las aguas pluviales en México:

- **Sistemas de Infiltración Pluvial:** Estos sistemas permiten que el agua de lluvia se filtre naturalmente en el suelo, recargando acuíferos subterráneos y reduciendo el riesgo de inundaciones. Pueden incluir técnicas como la construcción de pozos de infiltración, pavimentos permeables y áreas verdes.
- **Mejor Planificación Urbana:** Se necesita una planificación urbana más sostenible que considere la gestión de aguas pluviales desde el inicio, promoviendo la creación de espacios verdes y áreas permeables en las ciudades.
- **Educación y Conciencia:** Se debe concienciar a la población sobre la importancia de la gestión adecuada de las aguas pluviales y fomentar prácticas como la recolección de aguas pluviales para su reutilización.

5.1.1.5. Descripción de la Tecnología Propuesta:

Una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es un sistema de tratamiento de aguas residuales que emplea un enfoque natural y sostenible para purificar las aguas contaminadas antes de devolverlas al medio ambiente. A continuación, se describen los detalles sobre la tecnología propuesta, incluyendo su funcionamiento, componentes clave y ventajas:

5.1.1.6. Funcionamiento:

Ingreso de Aguas Residuales: El proceso comienza con la entrada de aguas residuales crudas en la planta. Estas aguas pueden contener contaminantes orgánicos e inorgánicos, sólidos suspendidos y microorganismos patógenos.

Lagunas Primarias: Las aguas residuales se dirigen a las lagunas primarias, donde se permite que los sólidos suspendidos se sedimenten. Esto reduce la carga de sólidos en el agua y mejora su claridad.

Lagunas de Estabilización: El agua tratada en las lagunas primarias fluye a través de las lagunas de estabilización. Estas lagunas son piscinas poco profundas y extensas que están diseñadas para fomentar la descomposición biológica de la materia orgánica. Los microorganismos presentes en el agua se alimentan de los contaminantes, lo que resulta en una reducción significativa de la carga orgánica.

Tratamiento Natural: Las lagunas de estabilización aprovechan la acción de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos para descomponer los contaminantes. La luz solar también juega un papel importante en la eliminación de patógenos a través de la exposición a la radiación ultravioleta.

Lagunas Secundarias (Opcional): En algunos sistemas, se pueden incluir lagunas secundarias para un tratamiento adicional o para eliminar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Esto puede ser necesario para cumplir con los estándares de calidad del agua más estrictos.

Decantación Final: Después de pasar por las lagunas de estabilización y, si es necesario, las lagunas secundarias, el agua tratada se somete a una decantación final para eliminar cualquier sólido restante. El agua clarificada se puede liberar de manera segura en cuerpos de agua superficiales o utilizarse para riego agrícola, según las regulaciones locales.

5.1.1.7. Componentes Clave:

Lagunas de Estabilización: Son el componente central de la planta y se dividen en lagunas anaeróbicas y lagunas facultativas, cada una con su función específica en el tratamiento.

Sistemas de Distribución y Recolección: Se utilizan canales y tuberías para dirigir el flujo de agua a través de las diferentes etapas del proceso.

Decantadores: Estos dispositivos permiten la separación de sólidos sedimentados del agua tratada antes de su liberación.

Ventajas:

Bajo Costo de Operación y Mantenimiento: Las lagunas de estabilización requieren menos energía y suministros químicos en comparación con otros sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Mínimo Impacto Ambiental: Este enfoque de tratamiento es respetuoso con el medio ambiente, ya que utiliza procesos naturales y no requiere productos químicos costosos o contaminantes.

Robustez: Las lagunas de estabilización son resistentes a fluctuaciones de carga y condiciones climáticas adversas, lo que las hace adecuadas para aplicaciones en áreas remotas o con recursos limitados.

Eliminación de Patógenos: La exposición a la luz solar y la actividad biológica reducen eficazmente la presencia de microorganismos patógenos, mejorando la seguridad del agua tratada.

Cumplimiento Regulatorio: Cuando se diseñan y operan adecuadamente, estas plantas pueden cumplir con los estándares de calidad del agua establecidos por las autoridades reguladoras.

En resumen, una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es una tecnología eficaz y sostenible para purificar aguas residuales, ofreciendo ventajas económicas y ambientales significativas. Su funcionamiento se basa en procesos naturales y microbiológicos, lo que la convierte en una opción viable para diversas aplicaciones de tratamiento de aguas residuales.

5.1.1.8. Estado del arte:

Qué tecnologías similares existen en el mercado y en qué se diferencia respecto a ellos.

La tecnología de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es una opción de tratamiento de aguas residuales que se encuentra en el mercado junto con otras tecnologías similares. Aquí te menciono algunas tecnologías similares y cómo se diferencian respecto a las lagunas de estabilización:

Lagunas Aeróbicas de Aireación: Estas lagunas utilizan la aireación mecánica para proporcionar oxígeno a los microorganismos que descomponen los contaminantes orgánicos en el agua. A diferencia de las lagunas de estabilización, requieren una inversión y operación mayores debido a los costos de energía asociados con la aireación.

Plantas de Lodos Activados: Estos sistemas emplean un proceso biológico activo en el que los microorganismos en suspensión se mezclan con el agua residual. Aunque son altamente efectivos en la eliminación de contaminantes, requieren equipos y procesos más complejos y costosos en comparación con las lagunas de estabilización.

Filtros Verdes o Jardines Filtrantes: Estos sistemas utilizan vegetación y suelos especialmente diseñados para filtrar y purificar las aguas residuales de forma natural. Son similares a las lagunas de estabilización en su enfoque en procesos naturales, pero pueden requerir un espacio mayor y no son adecuados para todas las condiciones climáticas.

Sistemas de Humedales Constructivos: Estos sistemas imitan los procesos naturales de humedales para purificar las aguas residuales. Son eficaces en la eliminación de contaminantes, pero también pueden ser más costosos de implementar y mantener en comparación con las lagunas de estabilización.

Diferencias clave con las Lagunas de Estabilización:

Requerimientos de Energía: Las lagunas de estabilización son sistemas de bajo consumo energético, mientras que tecnologías como las lagunas aeróbicas de aireación y las plantas de lodos activados requieren más energía para operar debido a la aireación constante.

Simplicidad de Operación: Las lagunas de estabilización son relativamente fáciles de operar y mantener en comparación con sistemas más complejos como las plantas de lodos activados.

Costos Iniciales: Las lagunas de estabilización tienden a tener costos iniciales más bajos que algunas tecnologías alternativas, lo que las hace atractivas para regiones con presupuestos limitados.

Adaptabilidad: Las lagunas de estabilización son resistentes a las fluctuaciones de carga y condiciones climáticas adversas, lo que las hace adecuadas para una amplia gama de entornos.

Calidad del Agua Final: Las lagunas de estabilización pueden no ser tan efectivas como algunas tecnologías avanzadas en la eliminación de nutrientes, como el nitrógeno y el fósforo, por lo que pueden requerir tratamientos adicionales si se necesitan cumplir con estándares de calidad del agua más estrictos.

5.1.1.9. Metodología:

El desarrollo de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización implica varios pasos, desde el diseño conceptual hasta la implementación y pruebas. A continuación, se proporciona una explicación detallada de estos pasos:

1. Diseño Conceptual:

Evaluación de Requerimientos: Comienza por identificar los objetivos y requisitos del proyecto, como la capacidad de tratamiento necesaria, los estándares de calidad del agua, el presupuesto y los plazos.

Selección del Tipo de Lagunas: Decidir entre lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración según las necesidades del proyecto y las características del agua residual.

Ubicación del Sitio: Seleccionar un sitio adecuado para la planta, considerando aspectos como la topografía, el acceso, la proximidad a fuentes de aguas residuales y la posibilidad de expansión futura.

2. Diseño Detallado:

Diseño Hidráulico y de Proceso: Definir los flujos de agua, tiempos de retención y dimensiones de las lagunas de estabilización. Esto implica calcular el volumen requerido y el número de lagunas.

Infraestructura Civil: Diseñar las estructuras físicas, como canales de entrada y salida, sistemas de drenaje, pozos de inspección y la infraestructura de lagunas propiamente dicha.

Sistema de Distribución y Control: Diseñar el sistema de distribución de agua residual hacia las lagunas, así como los dispositivos de control para ajustar el flujo y la circulación dentro de las lagunas.

Recolección de Efluentes: Planificar la recogida y conducción de los efluentes tratados hacia su punto de liberación o disposición final.

3. Construcción:

Excavación y Preparación del Sitio: Preparar el terreno, realizar excavaciones y construir las estructuras necesarias de acuerdo con el diseño detallado.

Instalación de Infraestructura: Construir canales, muros, compuertas, tuberías y otros componentes de la planta de tratamiento.

Sellado y Revestimiento: En las lagunas anaeróbicas, es importante sellar y revestir las lagunas para evitar la infiltración y la pérdida de agua.

4. Puesta en Marcha:

Llenado de las Lagunas: Comenzar a llenar las lagunas con agua residual y permitir que el proceso biológico comience a desarrollarse.

Ajuste y Calibración: Asegurarse de que los sistemas de distribución y control funcionen correctamente y realizar ajustes según sea necesario.

Monitoreo y Control de Calidad: Establecer un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua para asegurarse de que se cumplan los estándares establecidos.

5. Operación y Mantenimiento:

Operación Continua: Operar la planta de manera regular, controlando los niveles de agua, la circulación y los tiempos de retención.

Mantenimiento Preventivo: Realizar inspecciones y mantenimiento preventivo de la infraestructura y los equipos, como la limpieza de canales y la reparación de compuertas.

6. Pruebas y Evaluación:

Monitoreo a Largo Plazo: Realizar un seguimiento continuo de la eficiencia del tratamiento y la calidad del agua tratada a lo largo del tiempo.

Ajustes y Optimización: Si es necesario, realizar ajustes en el diseño o la operación para mejorar la eficiencia del tratamiento.

7. Cumplimiento Normativo:

Cumplimiento Regulatorio: Asegurarse de que la planta cumpla con todas las regulaciones ambientales y de calidad del agua establecidas por las autoridades competentes.

El proceso de desarrollo de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es un proyecto complejo que requiere experiencia en ingeniería civil y ambiental, así como coordinación con las autoridades reguladoras. Un diseño y operación adecuados son esenciales para lograr una eficiente purificación de las aguas residuales y la protección del medio ambiente.

5.1.1.10. Beneficios y ventajas:

Beneficios Ambientales:

Reducción de la Contaminación del Agua: El tratamiento efectivo de las aguas residuales reduce la carga de contaminantes en los cuerpos de agua, lo que mejora la calidad del agua y protege la vida acuática.

Protección de Ecosistemas Acuáticos: La eliminación de patógenos y contaminantes evita daños a los ecosistemas acuáticos, preservando la biodiversidad y la salud de los hábitats acuáticos.

Recarga de Acuíferos: El uso de lagunas de estabilización puede permitir la recarga de acuíferos subterráneos al permitir que parte del agua tratada se filtre naturalmente en el suelo.

Menor Consumo de Energía: Las lagunas de estabilización requieren menos energía para operar en comparación con sistemas más complejos de tratamiento de aguas residuales, lo que reduce la huella de carbono.

Sostenibilidad: Al utilizar procesos naturales y biológicos, las lagunas de estabilización promueven un enfoque sostenible para el tratamiento de aguas residuales.

Beneficios Sociales:

Mejora de la Salud Pública: Al eliminar patógenos y contaminantes, se reduce el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua, lo que beneficia la salud pública en las comunidades servidas.

Calidad de Vida: La reducción de olores desagradables y cuerpos de agua contaminados mejora la calidad de vida de las personas que viven cerca de la planta y de quienes utilizan los recursos hídricos locales.

Seguridad Hídrica: La gestión adecuada de las aguas residuales contribuye a la seguridad hídrica al prevenir la contaminación de fuentes de agua potable.

Beneficios Económicos:

Costos de Operación y Mantenimiento Bajos: Las lagunas de estabilización suelen tener costos de operación y mantenimiento más bajos en comparación con tecnologías más avanzadas, lo que reduce la carga financiera para las autoridades locales.

Ahorro de Energía: La menor demanda de energía reduce los costos operativos y disminuye la dependencia de fuentes de energía costosas.

Promoción del Turismo: La mejora de la calidad del agua en áreas turísticas puede aumentar los ingresos del turismo y promover el desarrollo económico local.

Valor de la Propiedad: Las propiedades cercanas a cuerpos de agua limpios y saludables pueden experimentar un aumento en su valor.

Cumplimiento Normativo: El cumplimiento de los estándares ambientales y de calidad del agua puede evitar multas y sanciones regulatorias, lo que protege los recursos financieros de las autoridades locales.

5.1.1.11. Diseño y Especificaciones Técnicas:

Una planta de tratamiento con lagunas de estabilización es un sistema de tratamiento de aguas residuales que utiliza procesos naturales y biológicos para purificar las aguas.

Componentes y Características Técnicas:

Lagunas Anaeróbicas: Las lagunas de estabilización generalmente constan de dos o tres lagunas secuenciales. La primera laguna es anaeróbica y está diseñada para la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Las lagunas anaeróbicas son más profundas y tienen una capacidad de retención más larga, lo que permite que los sólidos se sedimenten y se descompongan.

Lagunas Facultativas: La segunda laguna es facultativa, lo que significa que contiene una mezcla de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos. Esta laguna proporciona una zona de

transición donde se continúa la descomposición de la materia orgánica. Las lagunas facultativas son menos profundas que las anaeróbicas.

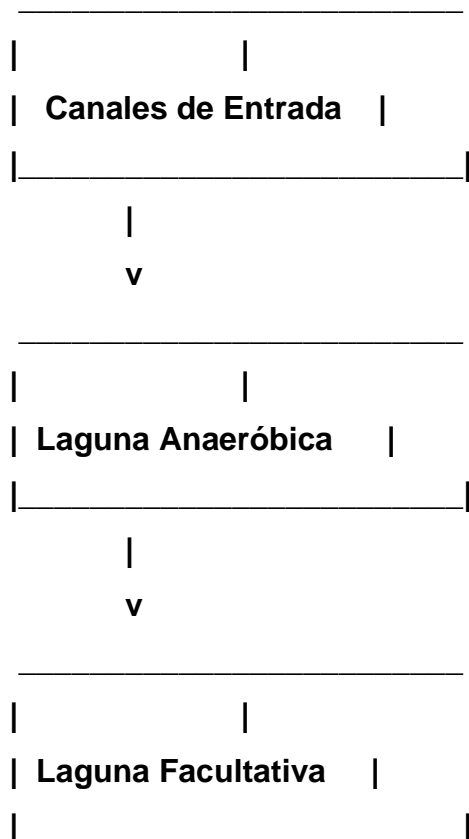
Lagunas de Maduración (Opcional): En algunos sistemas, se utiliza una tercera laguna de maduración. Estas lagunas son principalmente aeróbicas y permiten la finalización del proceso de tratamiento y la desinfección adicional.

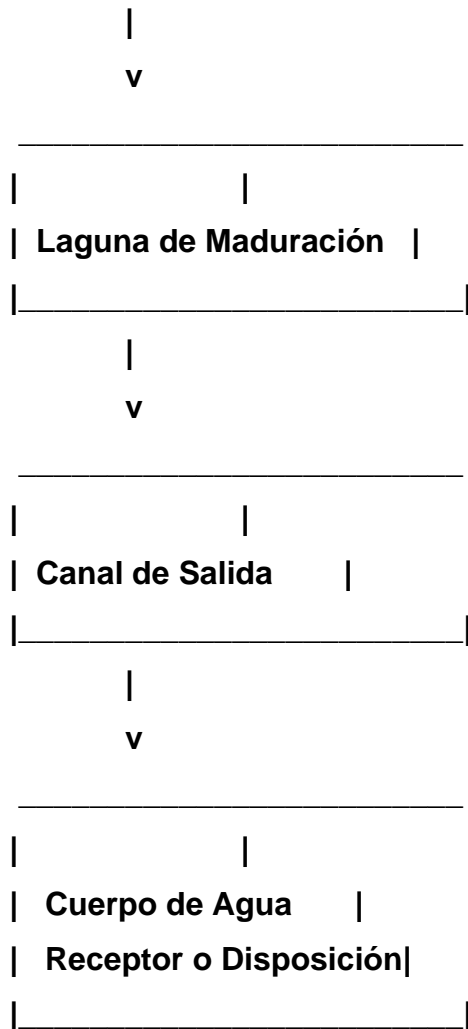
Entrada y Distribución: Las aguas residuales ingresan a la planta a través de canales de entrada, donde se pueden ajustar los flujos y la distribución de manera controlada hacia las lagunas.

Compuertas y Canales de Salida: Las compuertas y los canales de salida controlan la salida del agua tratada de las lagunas hacia su destino final, que puede ser un cuerpo de agua receptor o un sistema de disposición adecuado.

Control de Insectos y Fauna: Se pueden utilizar dispositivos para evitar la entrada de insectos y aves en las lagunas, lo que podría alterar el proceso de tratamiento.

Esquema General de una Planta de Tratamiento con Lagunas de Estabilización:





Materiales de Construcción: Los diques y paredes de las lagunas se pueden construir con materiales locales, como el suelo del sitio, revestidos con geomembranas impermeables cuando sea necesario. También se utilizan materiales de concreto o bloques de cemento en ciertas áreas.

Dimensiones: Las dimensiones de las lagunas varían según el diseño específico y la capacidad requerida. Las lagunas anaeróbicas suelen ser más profundas, con una profundidad típica de 3 a 5 metros, mientras que las facultativas son menos profundas, con una profundidad de 1 a 2 metros. Las dimensiones horizontales varían según la capacidad de tratamiento deseada.

Capacidades de Infiltración: La capacidad de infiltración de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización depende de varios factores, incluyendo el diseño de las lagunas, el tipo de suelo subyacente y las tasas de carga de aguas residuales. La infiltración generalmente

ocurre en lagunas facultativas y de maduración, donde el agua tratada se filtra lentamente a través del suelo o se retiene en la laguna para su evaporación.

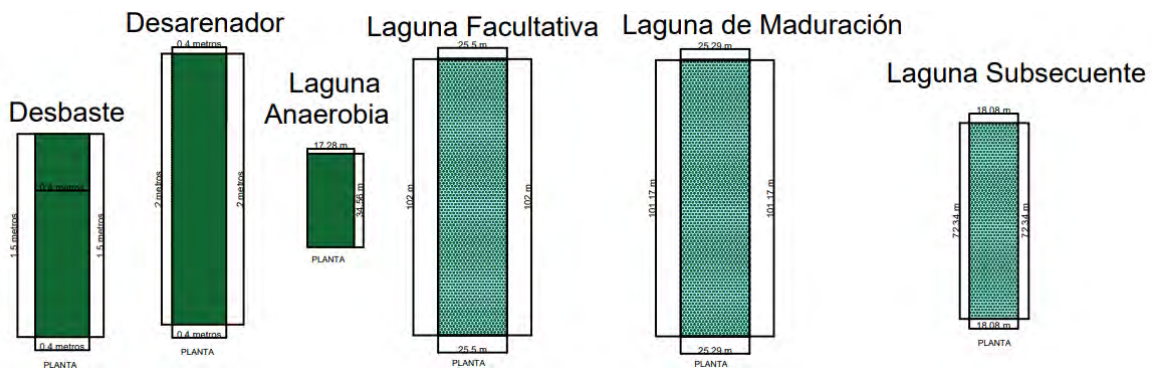
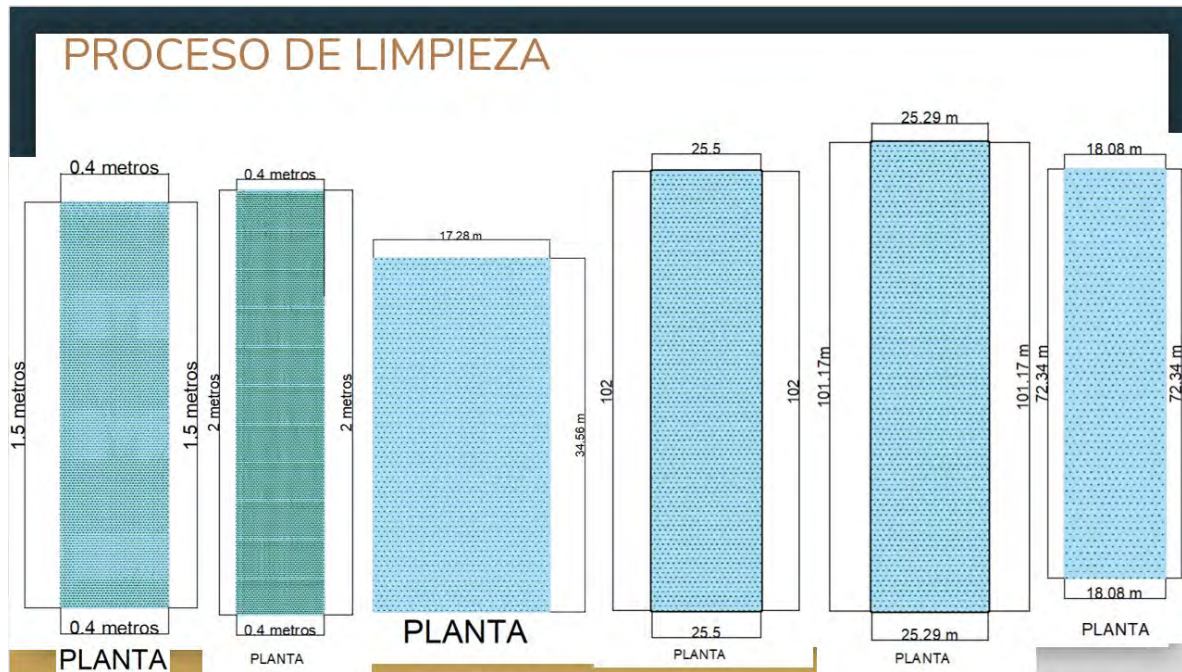
Es importante tener en cuenta que las capacidades de infiltración pueden variar considerablemente según las condiciones locales, y se deben realizar pruebas de infiltración en el sitio para determinar la capacidad específica de una planta de tratamiento con lagunas de estabilización en particular.

5.1.1.12. Implementación y Despliegue:

El plan pensado para la implementación de plantas de tratamientos con lagunas de estabilización está pensado hacerse desde la captación de agua en vivienda (cotos y pueblos), a través de canaletas para desagüe implementadas en las azoteas de las viviendas, en donde se recolectaría toda el agua y se llevaría a un punto céntrico en algún área libre de construcción. En esta área se implementarían pequeñas o grandes lagunas, dependiendo de la demanda y de la calidad de agua que se quiera lograr a llegar. Para la preparación del terreno no se necesitaría más que excavar las dimensiones de cada laguna que se implementaría (anaeróbica, facultativa, maduración). Sobre las mismas excavaciones se haría un paso de una laguna a otra para poder estar pasando el agua de una laguna a otra cada vez que el agua haya terminado su proceso.

El mantenimiento es relativamente bajo ya que consta de limpieza de superficies por sólidos acumulados en el fondo y las paredes, sedimentos y materia flotante. El control de la vegetación también es importante en las lagunas de estabilización ya que ellas pueden obstruir los canales de flujo y las áreas de retención. Si las lagunas están cercanas a las viviendas posiblemente tendrán un mal olor, por lo cual se recomendaría usar cubiertas flotantes o dispositivos de dispersión de olores. Por último, inspeccionar la estructura de la planta, como canales, compuertas, tubería para cerciorarse que no hayan fugadas en la laguna.

5.1.1.13 Anexos:



5.1.2. Infiltración en camellones

Sofía Limón

5.1.2.1 Resumen Ejecutivo:

La propuesta se centra en la implementación de un sistema innovador de gestión de aguas pluviales en áreas urbanas. Mediante la combinación de jardines de lluvia en camellones con pozos de absorción estratégicamente ubicados, se busca mejorar la calidad del agua, reducir

inundaciones y aumentar las áreas verdes en la ciudad. Esta tecnología es fundamental para abordar los desafíos de la gestión del agua en entornos urbanos, brindando beneficios ambientales y de resiliencia.

5.1.2.2 Introducción:

La gestión de aguas pluviales se ha convertido en una preocupación ambiental y urbana de creciente relevancia en la actualidad, debido a diversos desafíos que enfrentamos. Estos desafíos son variados e incluyen el impacto del cambio climático, que ha incrementado la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, como lluvias intensas, lo que requiere una mejor gestión del agua de lluvia. A su vez, el cambio climático también ha contribuido al aumento de las sequías, lo que hace que la gestión de las aguas pluviales sea aún más crucial, aprovechando al máximo este recurso.

La expansión de áreas urbanas es otro desafío importante, ya que ha llevado a una mayor impermeabilización del suelo debido a la construcción de edificios, carreteras y pavimentos. Esto impide que el agua de lluvia se infiltre de manera natural en el suelo, lo que aumenta el riesgo de inundaciones y la escorrentía de agua superficial contaminada

La calidad del agua también se ve afectada, ya que las aguas pluviales arrastran contaminantes que pueden terminar en cuerpos de agua, dañando la calidad del agua y el ecosistema acuático. Las inundaciones urbanas son un problema que ha ido en aumento, en parte debido al crecimiento de las áreas urbanas y a la incapacidad de gestionar adecuadamente el exceso de agua de lluvia. Esto puede resultar en la pérdida de vidas y en costosos esfuerzos de recuperación.

Por último, la mala gestión de las aguas pluviales contribuye al estrés hídrico, ya que el agua limpia de lluvia se desperdicia en lugar de ser utilizada para recargar acuíferos, abastecer a las comunidades o ser devuelta a cuerpos de agua.

En resumen, la gestión de aguas pluviales es una problemática cada vez más importante debido al cambio climático, la urbanización y sus impactos ambientales. La implementación de sistemas de infiltración pluvial y otras intervenciones es esencial para mitigar estos problemas y garantizar un manejo sostenible del recurso hídrico.

5.1.2.3 Descripción de la Tecnología Propuesta:

La tecnología de zanja de infiltración con jardín de lluvia en la parte superior conectada a pozo de absorción en puntos estratégicos (en los puntos más bajos del camellón o de las zonas más bajas en donde se implemente). Esta tecnología se hace primeramente poniendo en camellones de la ciudad un jardín de lluvia en la parte superior que funciona de la siguiente manera: recibir agua que se escurre en las vialidades y con los espacios en los machuelos de las banquetas se logra recibir agua de la vialidad a cada 10 metros se encuentra un espacio entre la banqueta. Al ingresar el agua al sistema se filtra en el sustrato de tierra, el agua que se filtra ya entra al subsuelo limpio sin material contaminante arrastrado por las aguas pluviales que escurren en las calles funcionando como filtro. Posteriormente se pasa a la siguiente capa que hay arena de río (20 cm de espesor), luego grava de 2" (40 cm de espesor), grava 4" (40 cm de espesor) y finalmente un pozo de absorción de ademe PVC hidráulico ranurado a partir de 2 metros de profundidad. Teniendo un pozo de 10 metros de puede absorber 100 litros por segundo, un pozo de 50 metros de profundidad se puede absorber 1 metro cubico por segundo.

Esta tecnología aprovecha los espacios no usados correctamente como son los camellones, ya que se puede tener un hermoso jardín de lluvia en la parte superior y en la parte inferior se puede infiltrar el agua en los pozos de absorción en las partes más bajas y en donde se concentra más agua. Los pozos solo se colocan en lugares de encharcamiento pronunciado con un estudio hidrológico previo, ya que con el puro jardín de lluvia en la zanja se puede infiltrar de manera correcta el agua. Teniendo una calidad de agua mejor y aumentar los espacios verdes en la ciudad.

5.1.2.4 Estado del arte:

El análisis de zanja de infiltración con jardín de lluvia en la parte superior conectada a pozo de absorción en puntos estratégicos tiene diferenciador que es hacer recarga de agua limpia al subsuelo ya que tiene una serie de filtros en la parte superior. También se puede ver estético la parte de arriba ya que cuenta con un jardín de lluvia en la parte superior. A continuación, se muestran unos ejemplos encontrados en GOOGLE PATENTS que se asemejan.

1. Concrete road surface structure permeates wáter (CN 211571235 U)- Este modelo de utilidad se refiere a una estructura de superficie de carretera de concreto que permite la permeación del agua. Incluye una base de carretera compuesta por una capa de suelo y una capa de metal, con una capa de concreto permeable al agua sobre el metal. La base de

carretera tiene múltiples tuberías de drenaje en dirección horizontal, con aberturas de lavado en la superficie superior de las tuberías de drenaje y conexiones de aguas residuales en ambos extremos para garantizar la estabilidad del lecho de la carretera y permitir que el concreto permeable al agua drene eficazmente.

2. Novel rainwater filtration system suitable for sponge city (CN110627313A)- Esta invención es un novedoso sistema de filtrado de aguas pluviales adecuado para una ciudad esponja. Está ubicado en el borde de una carretera urbana y consta de una zona de retención biológica en la capa superior, un depósito debajo de esta zona, seguido de una capa de suelo para plantas, arena gruesa, una capa de grava y un sistema de drenaje con tres filtros en serie. Este sistema permite la reutilización del agua de forma cíclica y evita el riesgo de inundaciones urbanas.
3. Rainwater blocking system for driveway (KR102018462B1)- Esta invención es un sistema de bloqueo de aguas pluviales que previene que el agua de lluvia se introduzca en una carretera en un terreno más bajo desde una acera en un terreno más alto. El sistema incluye una zanja en la zona fronteriza entre el terreno más alto y el terreno más bajo, junto con una barrera flotante que se eleva según el nivel del agua de lluvia en la zanja, evitando que el agua de lluvia fluya desde el terreno más alto al terreno más bajo. Esto ayuda a controlar eficazmente el flujo de agua de lluvia desde zonas elevadas hacia zonas más bajas durante las lluvias.
4. Novel farmland waterlogging prevention and treatment device and applied technology thereof (CN102031768B)- Esta invención se trata de un dispositivo y tecnología para prevenir y tratar inundaciones en terrenos agrícolas. El dispositivo incluye una zanja de drenaje, tuberías de absorción de agua, una tubería de recolección de agua, una tubería de drenaje, un pozo de recolección de agua y más. Utiliza un sistema en forma de "T" o de carácter "FENG" con zanjas pequeñas y una tubería de recolección de agua para drenar el agua de campos inundados y recoger agua contaminada. Esto reduce la cantidad de trabajo y la superficie ocupada en comparación con los canales de drenaje tradicionales, ahorra tierra cultivable y controla el nivel freático con un dispositivo de control de nivel de agua. Ayuda a prevenir inundaciones y sequías, optimiza el uso del agua y permite ajustar el nivel freático según el crecimiento de los cultivos

5. Interim drainage system of foundation ditch (CN212835459U)- El sistema de drenaje provisional para zanjas de cimentación consiste en una bomba de succión en la parte superior de la zanja de cimentación que evacua el agua hacia una tubería de drenaje en el fondo de la zanja. Además, se emplean zanjas de drenaje en la parte superior para controlar el flujo y reducir la carga de trabajo, aumentando la eficiencia y la estabilidad del sistema de drenaje en la construcción de cimientos.

6. Road rainwater system for conserving water resources (CN202969202U)- Este modelo de utilidad se refiere a un sistema de carretera para la conservación de los recursos hídricos. El sistema consta de una carretera, una zanja de vegetación y un pozo negativo. La zanja de vegetación se encuentra en el borde de la carretera y es más baja que el pavimento de la misma. Se excava un pozo negativo al final de cada sección de la zanja de vegetación, con una entrada de agua para introducir recursos hídricos desde la zanja de vegetación. Este sistema reduce la carga en el sistema de drenaje urbano, conserva los recursos hídricos y permite almacenar agua para riego en estaciones secas o para lavar el pavimento.

7. Multifunctional trough infiltration trench system and rainwater management method using the same (KR20090090987A)- Se trata de un sistema de zanja multifuncional que mejora la gestión de aguas pluviales en áreas urbanas. Captura y purifica el agua de lluvia que fluye desde superficies impermeables a través de áreas verdes, utilizando canales subterráneos. Esto promueve la circulación del agua y mejora la sostenibilidad urbana.

8. Rainwater bioretention device for multi-rainwater city (CN210439438U)- El modelo de utilidad describe un dispositivo biológico para la detención y purificación de aguas pluviales en áreas urbanas. El dispositivo consta de una zona de filtrado de agua y una zona de circulación subterránea, que incluye capas de almacenamiento de agua, cubierta de corteza, sustrato para vegetación, capa de empaque artificial, capa de grava y tubería de drenaje con orificios permeables. El sistema resuelve problemas de estabilidad estructural durante lluvias intensas, insuficiente retención de agua, baja supervivencia de plantas y altos costos de mantenimiento posterior.

9. Ecological retention belt applied to municipal engineering and installation method (CN111827457B)- La invención presenta una banda ecológica de detención utilizada en proyectos municipales y su método de instalación. Esta banda combina un mecanismo de filtración ecológica de aguas pluviales con un mecanismo de drenaje eficiente para prevenir inundaciones. Durante la instalación, las piezas se ensamblan mediante un dispositivo de bloqueo, lo que facilita su implementación en proyectos municipales y presenta un amplio potencial de desarrollo futuro en este campo.
10. Removable catch basin filter insert and lifting apparatus (US11096386B2)-Este dispositivo de filtro para sumidero desmontable incluye un contenedor de filtro que se ajusta en un sumidero en el suelo, donde las aguas pluviales entran al sistema de alcantarillado. El filtro captura contaminantes y puede limpiarse fácilmente. Tiene una cubierta articulada en la parte superior para evacuar los contaminantes y una puerta trampa en la parte inferior. Al atrapar los contaminantes antes de que lleguen al sistema de drenaje principal, se contribuye a mantener sistemas de drenaje más limpios y cuerpos de agua más saludables.
11. Novel groundwater recharge structure and construction process (CN111877461A)- La invención se enfoca en la construcción de pozos de cimentación y presenta dos modos de recarga de aguas subterráneas: uno combina pozos de recarga con zanjas de infiltración, y el otro utiliza pozos de recarga junto con tubos de succión. Ambos métodos aumentan la cantidad de recarga y mejoran la eficiencia. El modo con pozos y zanjas ofrece una alta cantidad de recarga con eficiencia económica, mientras que el modo con pozos y tubos de succión resuelve problemas de contaminación entre capas acuíferas, permitiendo una mayor recarga.

5.1.2.5 Beneficios y ventajas:

Beneficios de la propuesta de tecnología de zanja de infiltración con jardín de lluvia en la parte superior conectada a pozo de absorción en puntos estratégicos es una tecnología de gestión sostenible del agua que se enfoca en la infiltración y el aprovechamiento de aguas pluviales en áreas urbanas, especialmente en camellones y zonas bajas. A continuación, se detallan algunos de los beneficios que esta tecnología podría ofrecer:

1. Mitigación de inundaciones: Al infiltrar y retener el agua de lluvia en los camellones y áreas bajas, esta tecnología puede ayudar a reducir el riesgo de inundaciones en áreas urbanas propensas a acumulación de agua durante eventos pluviales intensos.
2. Mejora de la calidad del agua: El proceso de filtración a través de diferentes capas de sustrato, arena y grava ayuda a eliminar contaminantes y partículas suspendidas, lo que resulta en una mejora de la calidad del agua antes de que se recargue al subsuelo. Esto contribuye a la protección de acuíferos subterráneos.
3. Aumento de áreas verdes: La tecnología incorpora jardines de lluvia en los camellones, lo que aumenta la cantidad de áreas verdes en la ciudad. Esto no solo mejora la estética urbana sino también promueve la biodiversidad y la absorción de dióxido de carbono.
4. Aprovechamiento sostenible del agua: Al recargar los acuíferos subterráneos con agua de lluvia, esta tecnología ayuda a conservar recursos hídricos, reduciendo la dependencia de fuentes de agua potable convencionales.
5. Eficiencia en el uso de espacios urbanos: Aprovechar áreas subutilizadas como los camellones para la gestión del agua y la creación de jardines de lluvia permite una utilización más eficiente del espacio en entornos urbanos.
6. Reducción de costos de infraestructura: En comparación con soluciones tradicionales de drenaje pluvial que requieren sistemas de alcantarillado costosos, esta tecnología puede resultar en una infraestructura más económica y sostenible.
7. Personalización según las necesidades: La colocación estratégica de pozos de absorción en áreas propensas al encharcamiento asegura que la tecnología sea adaptada a las necesidades específicas de cada ubicación, evitando el desperdicio de recursos.
8. Resiliencia ante el cambio climático: Esta tecnología puede ayudar a las ciudades a prepararse para los efectos del cambio climático, incluyendo eventos climáticos extremos y la escasez de agua.

En resumen, la tecnología de zanja de infiltración con jardines de lluvia y pozos de absorción tiene el potencial de ofrecer una serie de beneficios significativos, incluyendo la mitigación de inundaciones, la mejora de la calidad del agua, el aumento de áreas verdes y el uso eficiente del espacio urbano, al tiempo que contribuye a la sostenibilidad y la resiliencia en entornos urbanos.

5.1.2.6 Diseño y Especificaciones Técnicas:

En la ilustración 1 podemos observar la vista en corte de la propuesta tecnológica, podemos observar las capas y especificaciones con medidas de cada una de ellas. En las ilustraciones 2 y 3 se muestra la propuesta vista en 3D de como quedaría en la calle.

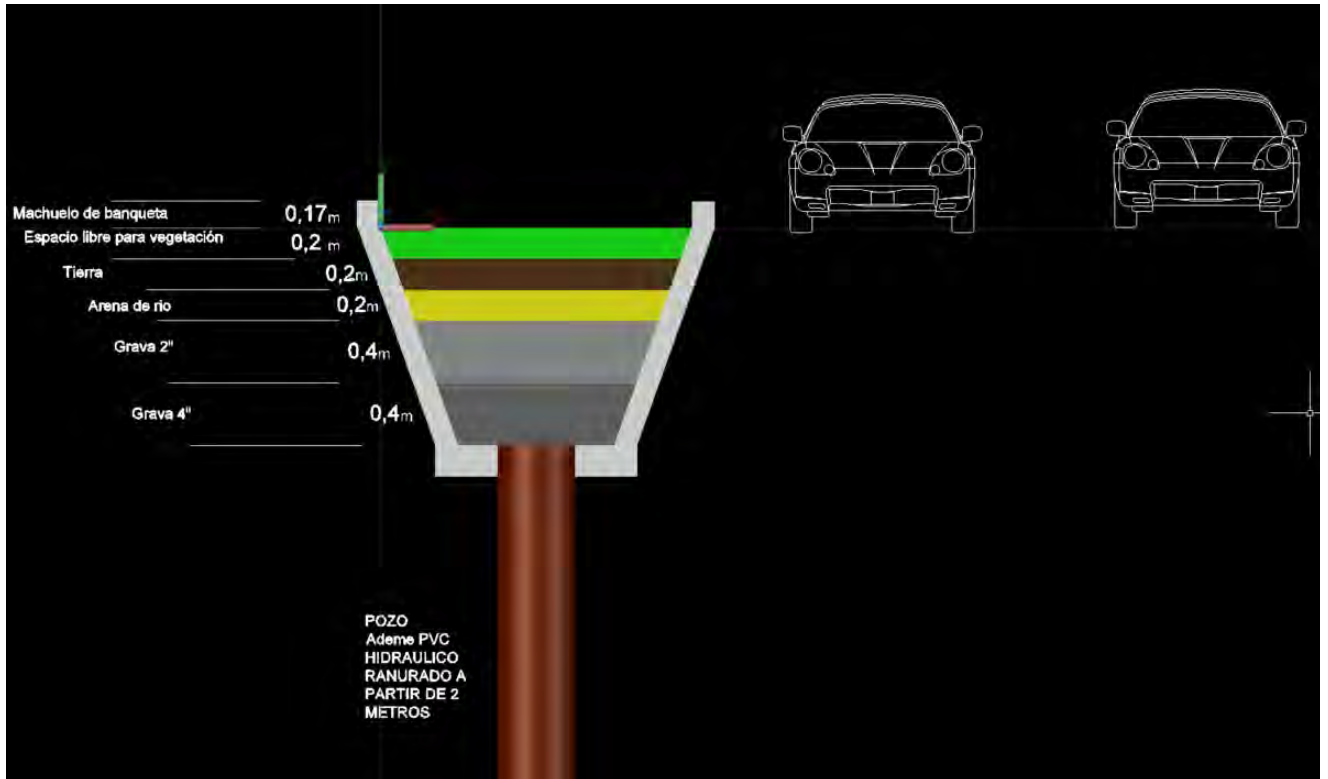


Ilustración 1

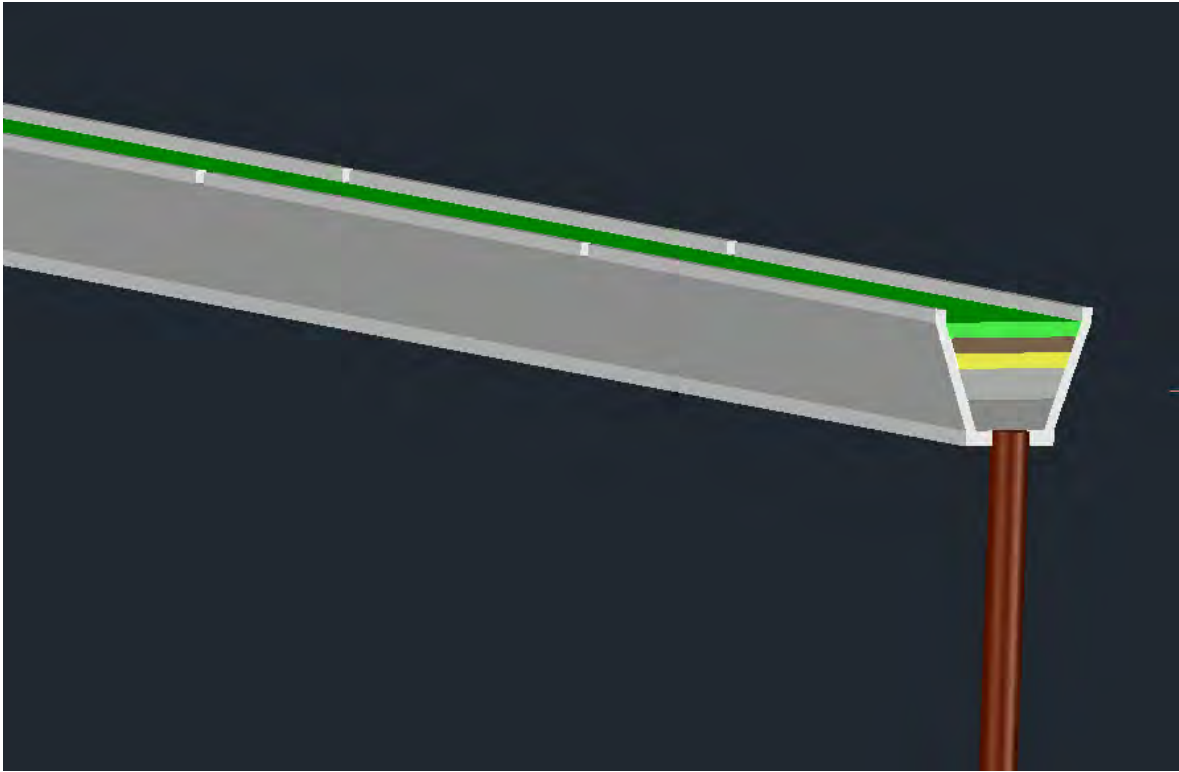


Ilustración 2

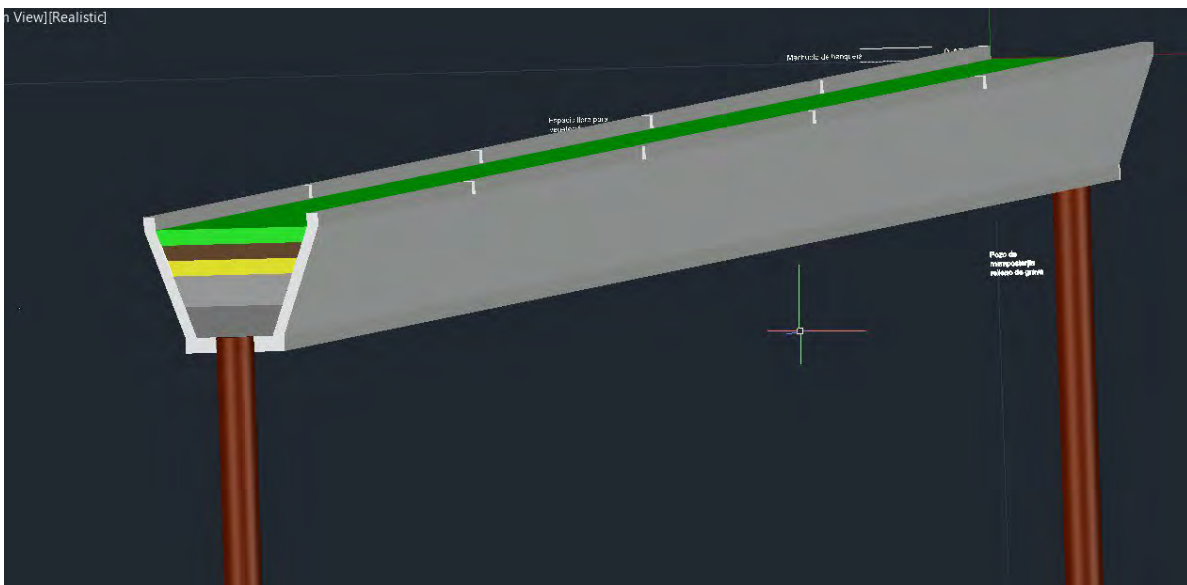


Ilustración 3

5.1.2.7 Implementación y Despliegue:

La implementación de esta tecnología esta principalmente propuesta para implementarlo en los camellones de las vialidades y banquetas, pero es un modelo genérico que se puede implementar en cualquier lugar ya que no se requiere de muchas especificaciones técnicas. Ya que con sus tres principales componentes que son el jardín de lluvia (capa vegetal), filtro de varias capas y pozos verticales en puntos estratégicos no es muy costosa la infraestructura.

La instalación de esta propuesta cuesta aproximadamente 204 pesos mexicanos el metro cuadrado, ya que estos costos incluyen la mano de obra, herramienta y equipo. El mantenimiento igualmente no es costoso ya que sería solamente antes del temporal de lluvia que le den limpieza. Y que el flujo de agua epigenética (que es los hoyos entre la banqueta para que entre el agua) no este obstruido por basura, ya que si esta obstruido es más difícil que el agua entre.

5.1.2.8 Evaluación de Impacto Ambiental

La implementación de esta tecnología de gestión de aguas pluviales tiene varios impactos ambientales positivos:

1. Mejora de la calidad del agua: El sistema actúa como un filtro natural, eliminando contaminantes y partículas suspendidas del agua de lluvia antes de que entre al subsuelo. Esto contribuye a la mejora de la calidad del agua en la ciudad.
2. Conservación de recursos hídricos: Recargar los acuíferos subterráneos con agua de lluvia reduce la dependencia de fuentes de agua potable convencionales, lo que es beneficioso para la conservación de los recursos hídricos.
3. Mitigación de inundaciones: La tecnología reduce el riesgo de inundaciones al infiltrar y retener agua de lluvia en los camellones y zonas bajas, lo que ayuda a proteger las áreas urbanas de eventos pluviales intensos.
4. Aumento de áreas verdes: La creación de jardines de lluvia en los camellones aumenta la cantidad de áreas verdes en la ciudad, promoviendo la biodiversidad y la absorción de dióxido de carbono.

5. Uso eficiente del espacio urbano: Aprovechar áreas subutilizadas como los camellones para la gestión del agua y la creación de jardines de lluvia permite una utilización más eficiente del espacio en entornos urbanos.
6. Resiliencia al cambio climático: La tecnología ayuda a las ciudades a prepararse para los efectos del cambio climático al gestionar de manera más efectiva las aguas pluviales y mejorar la capacidad de infiltración en el suelo.

En resumen, esta tecnología tiene un impacto ambiental positivo al mejorar la calidad del agua, conservar recursos hídricos, reducir inundaciones, promover áreas verdes y mejorar la resiliencia ante el cambio climático en entornos urbanos.

5.1.2.9 Anexos:

Los planos que respaldan la propuesta se encuentran en los anexos con las medidas y especificaciones como vienen en las imágenes.

5.1.3 Parque lineal educativo

Ana Karen Madrigal

5.1.3.1 Resumen ejecutivo:

La creación de parques lineales para la captación de aguas pluviales provenientes de áreas montañosas es importante porque ayuda a controlar inundaciones, protege la calidad del agua, promueve la biodiversidad, proporciona espacios recreativos y culturales, y contribuye a la mitigación del cambio climático. Estos parques lineales son ejemplos de una planificación urbana sostenible que beneficia tanto al medio ambiente como a las comunidades locales.

La creación de estos para la captación de aguas pluviales que provienen de las zonas montañosas, como los cerros, tiene varias ventajas y beneficios significativos para el medio ambiente y las comunidades locales. Esto genera un control de inundaciones ya que los parques lineales pueden actuar como zonas de amortiguamiento para las aguas pluviales que descienden de las áreas montañosas. Esto ayuda a reducir el riesgo de inundaciones repentinas y la erosión del suelo, ya que permiten que el agua se acumule

gradualmente y se absorba en el suelo en lugar de fluir rápidamente por las calles y carreteras. Recarga los acuíferos ya que pueden contribuir a la recarga de acuíferos subterráneos al permitir que el agua de lluvia se filtre lentamente en el suelo. Esto es especialmente importante en regiones donde el suministro de agua subterránea es una fuente crucial de abastecimiento de agua potable. Mejora de la calidad del agua, cuando las aguas pluviales se infiltran en el suelo a través de parques lineales, tienden a someterse a procesos naturales de purificación, lo que resulta en una mejora en la calidad del agua antes de que alcance ríos, arroyos y cuerpos de agua cercanos. La creación de parques lineales con vegetación y hábitats naturales ayuda a promover la biodiversidad y proporciona refugio a diversas especies de plantas y animales. Estos espacios verdes pueden actuar como corredores ecológicos, permitiendo que la fauna se mueva entre diferentes áreas naturales. Los espacios de recreación y ocio generados por los parques lineales brindan oportunidades recreativas y de ocio para la comunidad local, ya que pueden incluir senderos para caminar, carriles para bicicletas, áreas de juego y zonas de picnic, lo que mejora la calidad de vida de las personas y promueve un estilo de vida activo y saludable. Aparte de que los parques lineales mejoran la estética de las áreas urbanas y proporcionan espacios verdes que pueden utilizarse para actividades culturales, educativas y comunitarias. Esto fortalece el sentido de pertenencia y la conexión de las personas con su entorno. Por último, los parques lineales con vegetación contribuyen a la mitigación del cambio climático al absorber dióxido de carbono (CO₂) y proporcionar sombra, lo que ayuda a mejorar la calidad del aire.

5.1.3.2 Introducción:

La gestión de la captación de aguas pluviales puede ser algo de que preocuparnos en áreas sobre todo en las zonas urbanas y rurales, que es siempre genera ciertos problemas y desafíos. A continuación, expondré los problemas más comunes de la algunos de los problemas más comunes asociados con la gestión de aguas pluviales. Las inundaciones generadas por lluvias intensas pueden llegar a provocar inundaciones por lo general en zonas urbanas y en la rurales, causando daños a la propiedad e incluso poner en riesgo la vida humana. La erosión del suelo gestionadas por el flujo de las aguas pluviales, esto ya el flujo del agua puede dar lugar a la pérdida

de tierra fértil y degradación del paisaje. La contaminación del agua puede ser ya que el flujo del agua puede arrastrar contaminantes como aceites, metales pesados y simplemente productos químicos, esto afectando negativamente la calidad del agua de los ríos y arroyos. Los problemas de drenajes se generan al colocar infraestructuras de drenaje inadecuado, llevando a la acumulación de agua en calles y áreas urbanas, lo que hace más difícil la movilidad causando daños a la infraestructura. El cambio climático puede generar aumentación de la intensidad y frecuencia de lluvias intensas agravando los problemas de gestión de aguas pluviales. Por último, el impacto en el medio ambiente, la alteración del ciclo del agua por las inadecuadas aguas pluviales es mal gestionada en el impacto de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

5.1.3.3 Descripción de la tecnología propuesta.

Para tener un buen desarrollo de infiltración y captación de aguas pluviales se requiere una gestión adecuada de las aguas pluviales que incluya sistemas de drenaje sostenibles, infraestructuras de almacenamiento y retención de agua, prácticas de desarrollo urbano que promuevan la permeabilidad del suelo, y la implementación de tecnologías de tratamiento de aguas pluviales para reducir la contaminación. Además, la educación pública sobre la importancia de la gestión sostenible de las aguas pluviales también desempeña un papel crucial en la mitigación de estos problemas.

Este proyecto consta de la captación de agua mediante la elaboración de zanjas en cerros que desembocan en parques lineales, es decir, las zanjas estarán puestas en el cerro para reubicar las causas del agua y sigan el camino propuesto, esto para que, sea una manera eficiente de recolectar una buena cantidad de agua para, que, con ella se pueda hacer un uso correcto. La propuesta de poner parques lineales es crear un espacio agradable en conjunto con las bajantes de zanjas y así, este espacio tenga dos objetivos, salvaguardar el agua y hacer espacios recreativos, es decir, fusión de ingeniería con arte. También, las zanjas están diseñadas para que cuando el agua baje hagan un movimiento en zigzag para reducir la velocidad en que esta baja, en cada cambiante de nivel del zigzag, estarán instalados molinos hidráulicos, esto para tomar provecho del movimiento del agua y, por otro lado, hacer energía y solventar temas de electricidad ya sea en el parque lineal, entre otros lugares y otras situaciones. En el momento en que el agua cae en el parque lineal seguirá el cauce de una manera más

recta y directa, esto para se puedan poner pozos de absorción a cierta distancia y el agua se pueda ubicar en un mismo sitio almacenada, después esa agua podrá solventar las casas, negocios, etc. de la zona. El agua que no sea absorbida por estos posos, el agua desembocará en un lago (artificial) mediante vasos reguladores, este lago sigue siendo parte del parque lineal.

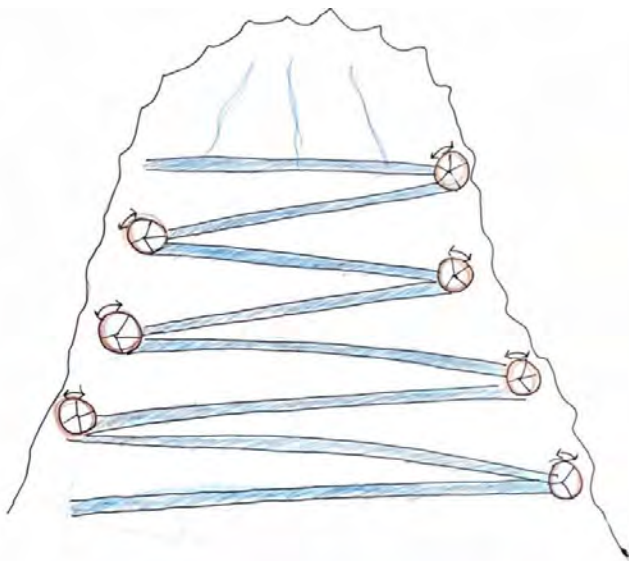
Este parque está diseñado de esta manera para fomentar la educación de la captación del agua pluvial y el respeto de los arroyos que la naturaleza misma hace, creo que somos ignorantes al entender que el agua al final de cuentas seguirá su propio curso y cómo podemos ahora nosotros ponernos del lado de la misma naturaleza para tomar provecho de manera correcta de ella, también el tema de la sustentabilidad, creo que la naturaleza misma nos enseña cómo podemos sobrevivir con los recursos naturales básicos, incluso siglos atrás las personas sobrevivían con lo que la naturaleza les daba, hoy en día hay demasiada tecnología como para no hacer algo al respecto con la sustentabilidad.

5.1.3.4 Diseño de propuesta:

A continuación, explicaré mi propuesta en bocetos de mi desarrollo tecnológico para infiltración de agua pluvial por partes:

Parte 1:

El arroyo sigue su cause sobre zanjas en zigzag bajando de un cerro.



Boceto en prototipo de la simulación de como bajaría el agua sobre el cerro

En este boceto simula el cómo bajará en agua del cerro guiada por las zanjas, la manera en que cae el agua es en movimiento de zigzag, en cada cambio de dirección de zanja



hay molinos hidráulicos que sirven para generar energía tomando provecho del mismo movimiento de agua, para también, generar una reducción de la velocidad del agua al bajar haciéndolo dinámico. Existe la posibilidad de que haya una tormenta, la cantidad y el flujo de agua sea más

grande, habrá un mecanismo, como vaso regulador que se activara a partir de que detecta cierta cantidad de agua y almacenará el agua en una cisterna, mientras que cuando no haya tanta cantidad de agua, el agua podrá seguir el curso de bajar por las zanjas.

Nota: este tipo de propuesta funcionaria en una zona propensa a la lluvia para que se pueda tomar provecho a este tipo de mecanismo.

Parte 2:

En la falda del cerro se guiará la zanja en un parque lineal en la cual hay un canal de agua a lo largo del parque que cuenta con coladeras circulares a cada 15metros de distancia.

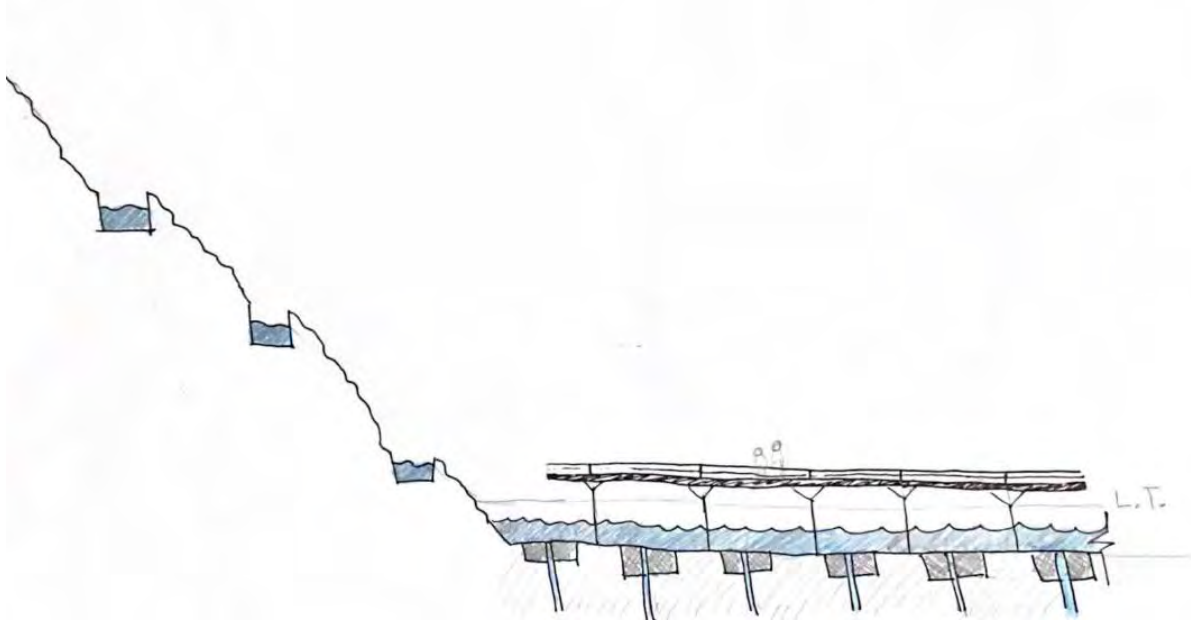
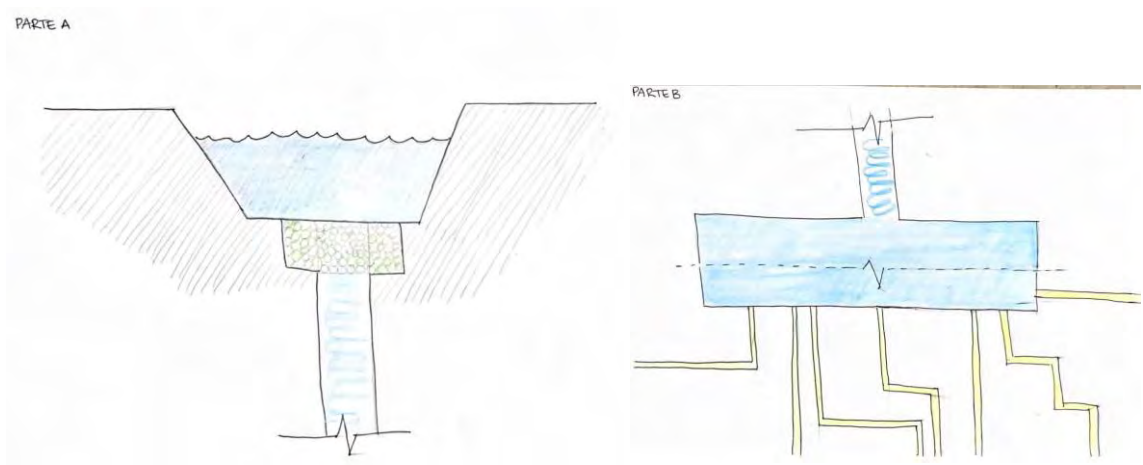


Imagen a prototipo que muestra un corte de cómo sería la dinámica del canal de agua con las coladeras.

A continuación, pondré una imagen en corte de un pocito de absorción.



Las coladeras contarán con un tipo de filtrado de piedras de minerales, el agua se supone que viene limpia porque estará recién filtrada con la vegetación del cerro, pero

si en dado caso el agua en su transcurso le ace basurita o plantas, etc se pueda filtrar para que caiga lo más limpia posible.

Esta agua caerá en un lugar de almacenamiento para distribución de agua para solventar las necesidades la comunidad que vive en la zona.

Parte 3:

El canal de agua desembocará en un lago artificial que será regulado por un vaso regulador para que el lago no se desborde.

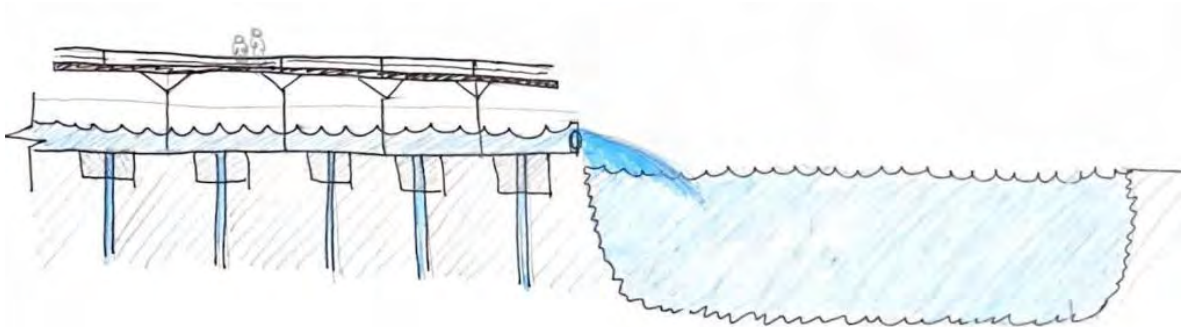


Imagen prototipo en corte de como desembocaría el final al agua al final del parque.

Por otro lado, parte del parque lineal estará sobre el canal, habrá unas tarimas que servirán de andador, la gente podrá pasear por ahí, estas estarán sobre el canal de agua a una distancia de 2 metros de altura sobre el nivel de tierra.

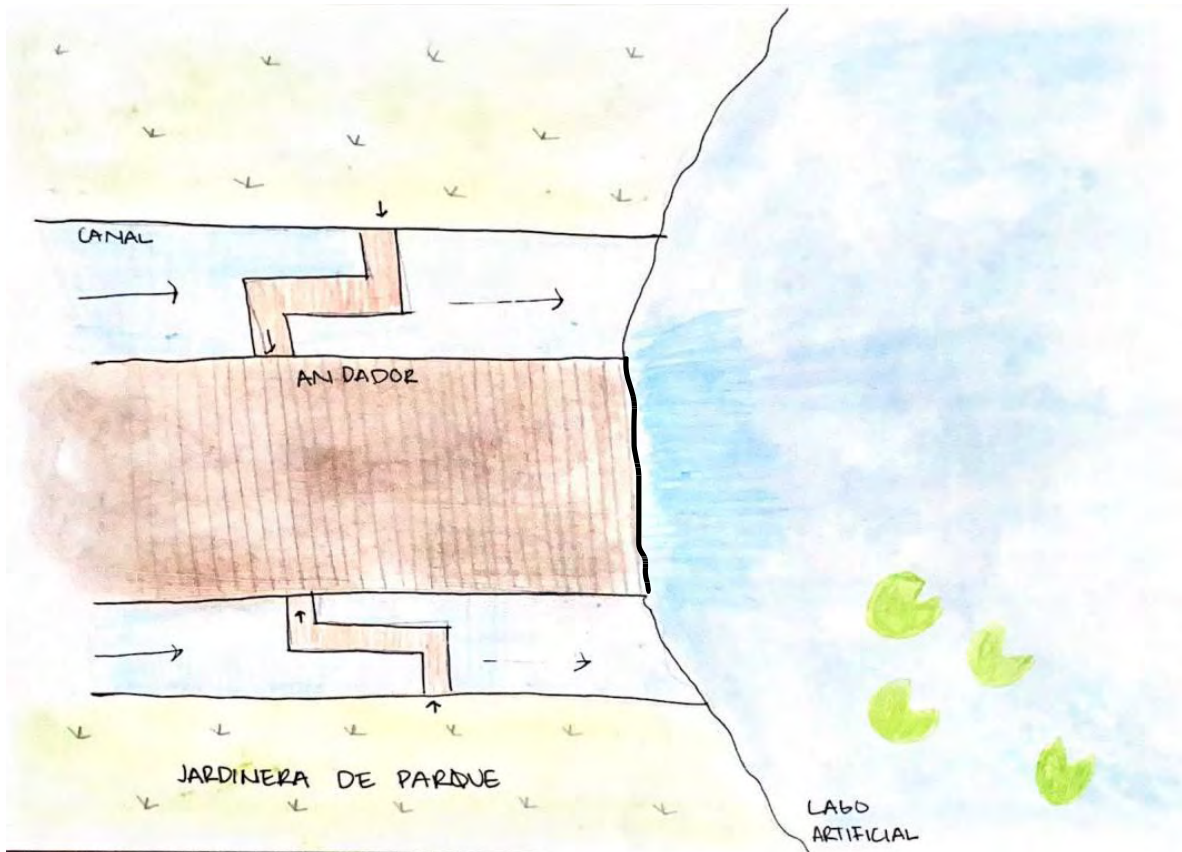


Imagen de cómo sería el final del canal y del parque lineal en planta. La distancia que tendrá el parque lineal es de 10 km de longitud.

El área del andador estará protegida para evitar cualquier tipo de accidentes, pero sobre todo para darle un buen uso a el objetivo de este proyecto como lo es el agua.

5.1.3.5 Estado del arte:

Hoy en día se conocen varios proyectos similares, sobre todo, el de los parques lineales, el fusionar los ríos o elementos naturales, ríos como en ese caso con espacios de recreación, aprovechar los espacios que la naturaleza ya no da siempre y cuando no la dañemos. A continuación, pondré dos ejemplos de lo que es un parque lineal con ríos.



Imagen de Madrid Río, esta zona se intervino hace poco, antes era una zona con avenida que cruzaban y no le daban prioridad al río, hoy en día esta como en la imagen, es muy agradable el parque para pasear y sobre todo concientizar del cuidado del río y del medio ambiente.

Madrid Río, Madrid España,



Imagen del Rio Tizates ubicado en la costa de Nayarit, este río desemboca en el océano pacífico, tiene 120 km de largo. Drena aguas de diversas zonas montañosas antes de ser desembocados al océano.

Río Tizate, Nayarit México.

5.1.3.6 Ventajas y beneficios

La creación de parques lineales para la captación de aguas pluviales ofrece una serie de beneficios que ayudan a mejorar la calidad de vida de las comunidades, contribuir a la sostenibilidad y disminuir el impacto que genera muchas veces las áreas urbanas.

Beneficios Ambientales, como ya lo mencioné en la introducción, controla y reduce el riesgo de inundaciones al permitir que el agua de lluvia se acumule y se absorba en el suelo en lugar de fluir rápidamente por las calles, generando una protección al área urbana. También, infiltra el agua de lluvia en el suelo a través de este tipo de parques contribuyendo a la recarga de los acuíferos manteniendo niveles adecuados de agua

subterránea generando un abastecimiento correcto de agua potable. Otro beneficio, mejora la calidad del agua cuando esta es infiltrada en el suelo por estos parques lineales, ya que se someten a procesos naturales de purificación de agua, limpiándola antes de que llegue al uso humano, incluso para los mismos ecosistemas.

Beneficios Sociales: hablando del tema social, son espacios de recreación y ocio sano, ya que ofrece oportunidades para actividades al aire libre, como caminatas, ciclismo, picnics, observación de aves, etc. mejorando la calidad de vida, de la comunidad, también promueve la salud y el bienestar de las personas. También, la creación de espacios verdes en áreas urbanas y suburbanas a través de parques lineales mejora la estética de la comunidad y puede proporcionar lugares para eventos comunitarios. También fomenta un sentido de pertenencia y conexión con la naturaleza. También, son lugares donde las personas pueden reunirse para socializar y fortalecer la comunidad, son espacios inclusivos que pueden servir como lugares de reunión para las personas de todas las edades y condiciones.

Beneficios Económicos: con esto se aumenta el valor de la propiedad, los parques lineales y áreas verdes en una comunidad puede aumentar el valor de las propiedades de la zona, lo que beneficia a los propietarios de viviendas y a la economía local. También, puede generar empleo con la planificación, diseño y mantenimiento de este tipo de parques, que generan empleo en las áreas locales, desde paisajistas hasta trabajadores de la construcción y personal de mantenimiento. También, el turismo y recreación, ya que los parques lineales pueden atraer a visitantes y turistas, lo que puede impulsar la economía local a través del gasto en hoteles, restaurantes y actividades relacionadas con el turismo.

5.1.3.7 Implementación:

La implementación de parques lineales que guíen el curso de una bajante del cerro es un proyecto que requiere una buena planificación y consideración de diversos factores para asegurar su éxito. A continuación, mencionaré puntos a considerar:

Evaluación del sitio y estudio de viabilidad, se debe identificar el área específica donde se planea crear el parque lineal y evalúa su topografía, características geológicas, hidrología y vegetación existente. También, revisar si no se está afectando el medio

ambiente esta propuesta. En la planificación y diseño, se deben tomar en cuenta trabajar con arquitectos paisajistas, ingenieros hidráulicos y otros expertos para diseñar el parque lineal. El diseño debe considerar la dirección natural de la bajante del cerro, también, tener en cuenta elementos de diseño como senderos, áreas de descanso, vegetación nativa, estructuras de manejo de agua (como estanques) y medidas de control de erosión.

Para la construcción se deben implementar las medidas de manejo de aguas pluviales, como la creación de zanjas de infiltración, estanques de retención y sistemas de drenaje adecuados para guiar el flujo de agua de manera controlada.

Reforestación y restauración ecológica, la planta vegetación nativa en el área del parque lineal para restaurar hábitats naturales y mejorar la biodiversidad para no generar un impacto negativo realiza medidas de control de erosión, como la siembra de vegetación de cobertura del suelo.

Algo que es importante mencionar es fomentar la participación y concientización activa de la comunidad en el proyecto, incluyendo la planificación y el mantenimiento del parque lineal, realizando programas de educación ambiental para concientizar a la comunidad sobre la importancia de la gestión sostenible del agua y la conservación del entorno, como no tirar basura y mantener los espacios lo más limpios posibles, ya que la basura terminara en el agua, tapando drenajes o simplemente ensuciando el agua dándole una mala apariencia y uso.

En el mantenimiento, se debe establecer un plan de mantenimiento regular para garantizar la preservación y el funcionamiento adecuado del parque lineal monitoreando la calidad del agua, la vegetación y la infraestructura para abordar cualquier problema a tiempo. Se debe hacer un seguimiento constante de la efectividad del parque lineal en la gestión de aguas

pluviales y su impacto en el entorno, ajustar el diseño y las operaciones según sea necesario para abordar desafíos emergentes.

La implementación de la fusión de parques lineales que guíen el curso de una bajante del cerro es un proyecto integral que puede proporcionar numerosos beneficios ambientales, sociales y económicos.

La instalación de molinos hidráulicos en las bajantes de cerros es una técnica que se ha usa para aprovechar la energía del flujo de agua descendente y convertirla en energía mecánica.

Se debe Identificar la ubicación adecuada en la bajante del cerro donde haya un flujo constante de agua descendente, como un arroyo o una corriente natural. Se evalúa la cantidad de agua disponible y la variabilidad estacional para determinar la viabilidad del proyecto. Se diseña el molino hidráulico de acuerdo con las características del flujo de agua, la velocidad y la altura de caída disponible. Se considera la selección del tipo de molino adecuado para que los mecanismos de transmisión adecuados para convertir la energía hidráulica en energía mecánica.

La energía mecánica generada por el molino para llevar a cabo la tarea de producción de electricidad a través de un generador, la extracción de agua para riego o cualquier otra aplicación deseada.

Se establece un mantenimiento regular para garantizar el funcionamiento continuo y eficiente del molino hidráulico, proporcionando capacitación a las personas encargadas de operar y mantener el molino. Se debe considera la implementación de medidas para regular el flujo de agua, como presas o canalizaciones, para asegurar un flujo constante y controlado hacia el molino hidráulico.

5.1.3.8 Imágenes de referencia:



5.1.4 Tratamiento de aguas de escorrentía

Joaquín Sainz

5.1.4.1 Resumen ejecutivo

La propuesta tecnológica parte de un tren de procesos para el tratamiento de las escorrentías de aguas pluviales urbanas. En el tren de proceso se contarán con 2 tecnologías diferentes de tratamientos de agua; tratamiento biológico y tratamiento mecánico. Estas aguas tienen como objetivo llegar a infiltrarse en el subsuelo mediante la ayuda de un pozo de infiltración. A través de la implementación de estas propuestas tecnológicas, se garantizará que el agua que se infiltre en el subsuelo cumpla con estándares de calidad aceptables, lo que resultará en beneficios significativos para numerosos

habitantes de la zona metropolitana de Guadalajara. La mejora en la calidad del agua subterránea no solo preservará este recurso valioso, sino que también contribuirá a proporcionar agua potable segura y confiable para el consumo humano y a respaldar la sustentabilidad de la agricultura, mejorando así la calidad de vida y el bienestar general de la comunidad local.

La recarga de los acuíferos tiene beneficios ambientales clave, como la preservación de ecosistemas acuáticos, la regulación de los caudales de los ríos y arroyos, resiliencia ante el cambio climático como un aislante de temperatura, la reducción del riesgo de sequías y la mejora de la calidad del agua. Además, ayuda a mantener el equilibrio de los ecosistemas acuáticos y a conservar la biodiversidad, contribuyendo así a la salud y la sostenibilidad del medio ambiente.

5.1.4.2 Introducción

La gestión del recurso hídrico en el estado de Jalisco se ha convertido en un desafío de proporciones significativas, particularmente en las regiones más susceptibles, como el Área Metropolitana de Guadalajara y los Altos de Jalisco. En los últimos años, tanto el consumo industrial como el doméstico de agua han experimentado un incremento constante, lo que ha llevado a una explotación excesiva de las fuentes de agua superficial y de los acuíferos. Este aumento en la demanda de agua se atribuye en gran medida a la expansión urbana en la ciudad, que ha resultado en la eliminación de elementos que tradicionalmente ayudaban a la gestión adecuada del recurso hídrico, como la capacidad de infiltración del suelo. Como resultado, se ha observado una disminución en la recarga natural de los acuíferos y un mayor estrés en los cuerpos de agua superficiales, lo que amenaza la disponibilidad a largo plazo de agua de calidad para la población y las actividades económicas en la región. *Gobierno del Estado de Jalisco. (2021)*

Esta problemática se ve agravada por el cambio en los patrones temporales de lluvia, que ha llevado a la ocurrencia cada vez más frecuente de precipitaciones extraordinarias en Guadalajara. Estas lluvias inusuales tienen como consecuencia la aparición de inundaciones en la ciudad, lo que a su vez genera una cascada de problemas tanto de índole social como económica que afectan profundamente a la comunidad y la económica local.

En respuesta a esta gran problemática, se hace necesario la implementación de tecnologías innovadoras orientadas a la gestión del agua. Estas tecnologías no solo tienen el potencial

de mitigar las inundaciones al facilitar la gestión más efectiva de los flujos de agua pluvial, sino que también desempeñan un papel fundamental en la preservación y la sostenibilidad del recurso hídrico en la región. Además, fomentan la infiltración adecuada del agua en el suelo, contribuyendo a recargar los acuíferos y mantener un equilibrio en el ciclo hidrológico.

5.1.4.3 Descripción de la Tecnología Propuesta

Para el desarrollo de esta tecnología se plantea la implementación de distintos sistemas que le den un tratamiento a el agua de las escorrentías pluviales urbanas, las cuales tiene como fin infiltrarse en el subsuelo mediante un pozo de absorción o pozo de infiltración.

Estos sistemas de tratamiento se pueden dividir en 2 tipos, tratamientos biológicos y tratamientos mecánicos.

El tratamiento biológico consta de los conceptos de biorretención y fitorremediación. Mediante este proceso las escorrentías pluviales se van a someter a pasar por un humedal artificial el cual tendrá plantas que tengan características de realizar los conceptos previamente mencionados. Existen muchas plantas acuáticas capaces de realizar estos procesos, aunque hay algunas específicas para retener distintos tipos de contaminantes (metales pesados, materia orgánica, micro plásticos, hidrocarburos etc.). Para la selección de plantas es necesario analizar una muestra de las escorrentías de las aguas pluviales para así tomar una mejor decisión sobre que tipo de plantas utilizar.

El tratamiento mecánico va a consistir en los conceptos de sedimentación y diferencia de densidades de elementos encontrados en el agua. Para este proceso se va a someter el agua pasar por un tanque el cual la entrada y salida de agua tendrán una diferencia de altura, en la cual la salida va a estar por arriba de la entrada. De esta manera el agua sedimentara elementos suspendidos que se encuentren en el agua y la salida de agua presentara una mejor calidad que la de entrada. En este mismo tanque tendrá una trampa de grasa la cual retendrá la grasa que se encuentre en esta agua.

Estas tecnologías se implementarían como un tren de procesos en el cual el fin serio dar al pozo de infiltración. La manera en la que se plantearía esto seria que se consta de una red de captación de las escorrentías de aguas pluviales mediante bocas de tormenta las cuales estarían conectadas al tren de proceso y llegando al final al pozo.

5.1.4.4 Diseño y especificaciones técnicas

Figura 1: Tratamiento Biológico

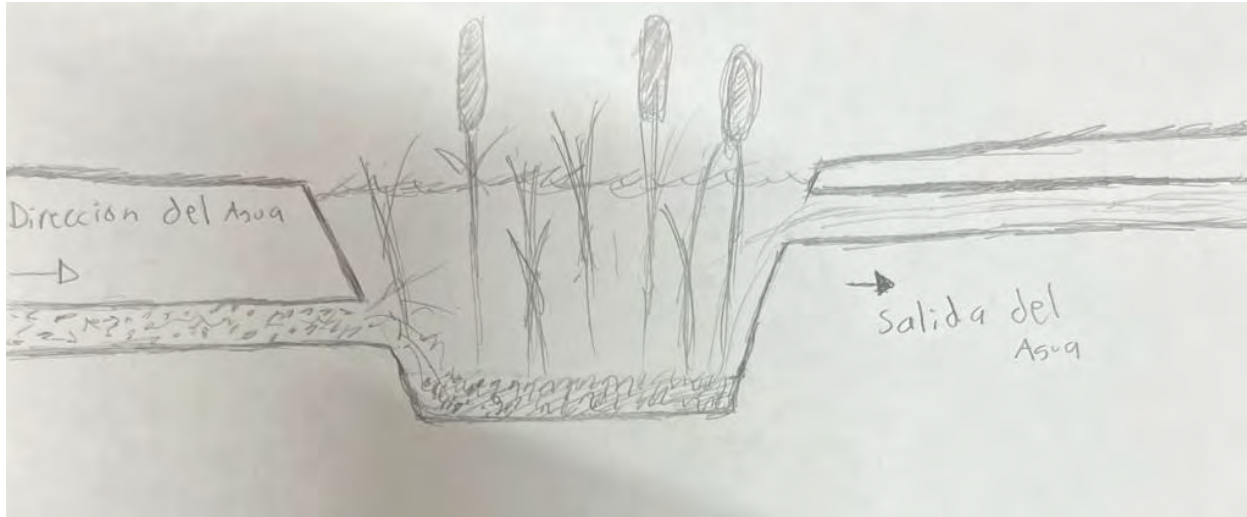
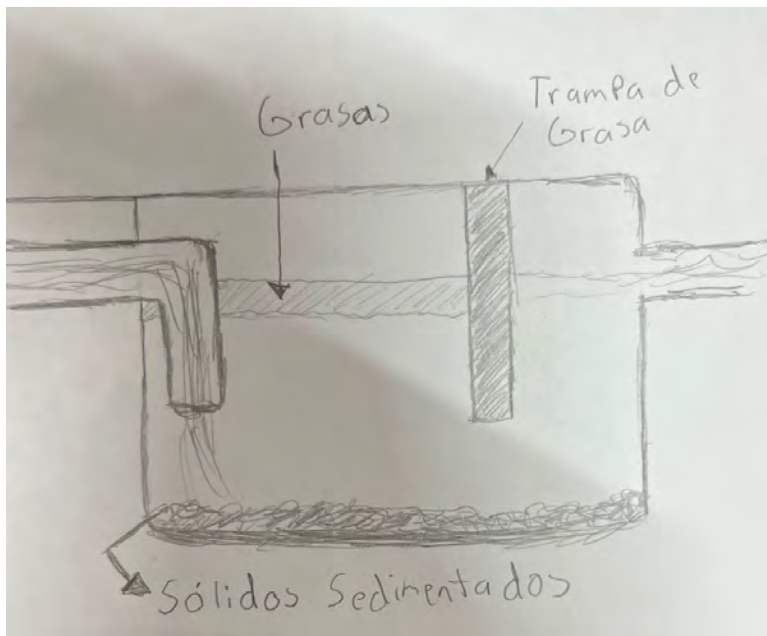
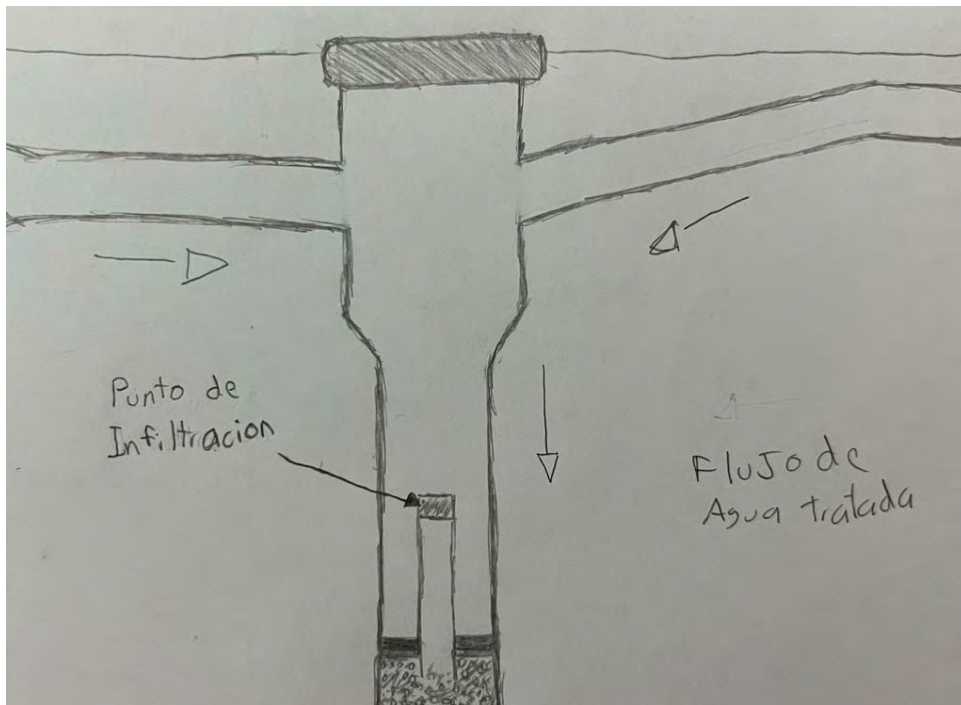


Figura 2: Tratamiento mecánico



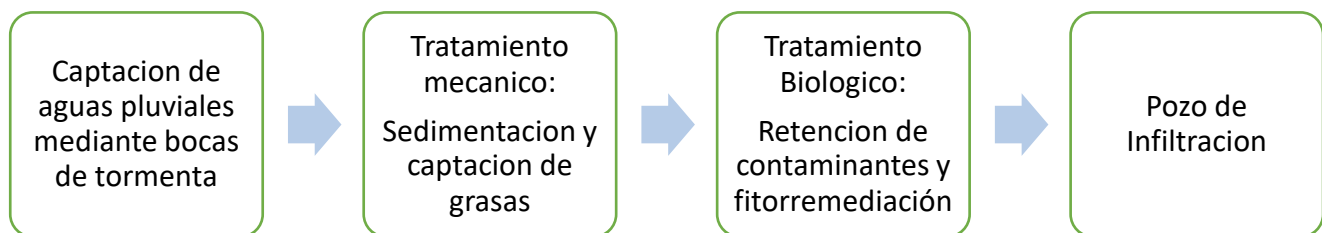
En este proceso debido a la diferencia de densidades entre el agua y las grasas, estas quedarán atrapadas por la trampa de grasas y debido a la diferencia de alturas entre la entrada y la salida, los sólidos suspendidos quedarán en el fondo de este tanque.

Figura 3: Pozo de absorción



A comparación de otros pozos de infiltración, todas sus paredes serán impermeables y solo tendrá un punto de infiltración el cual será mas alto que el punto más bajo del pozo. Esto con el fin de sedimentar cualquier elemento que no se allá removido en el tren del proceso de tratamiento.

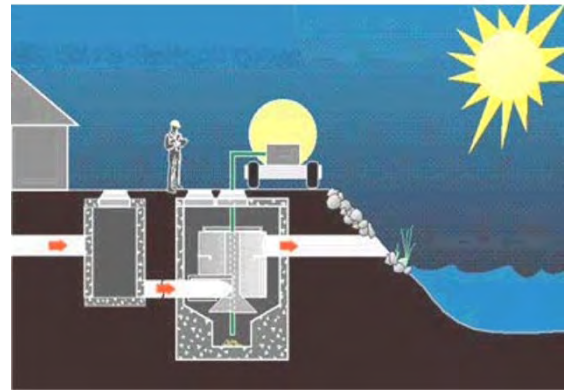
Diagrama del proceso



5.1.4.5 Estado del arte

Existen distintas tecnologías para el tratamiento de escorrentías de aguas pluviales urbanas, suelen ser muy efectivas y prometedoras para un contexto urbano como la ciudad de Guadalajara. El problema de estas tecnologías es que la mayoría son muy complejas y tienen un mantenimiento y una instalación costosos.

Para mi propuesta tecnológica me basé en estas tecnologías aunque con un modelo más sencillo y con una implementación y mantenimiento menos costoso. Esto para que estas propuestas de tecnología estén fáciles de implementar en ciudades como Guadalajara.

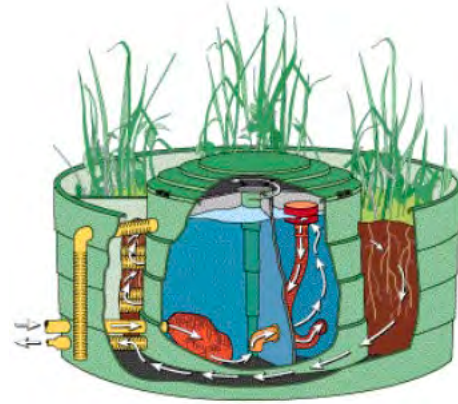


Downstream Defender

El "Downstream Defender" es un dispositivo de tratamiento que maximiza la separación de sólidos y líquidos al combinar las fuerzas gravitacionales con las fuerzas de vórtice. La geometría de sus componentes internos y la disposición de las tuberías de entrada y salida están diseñadas para guiar el flujo en un camino predeterminado a través del dispositivo. El agua de lluvia se introduce tangencialmente en el lateral del dispositivo y comienza a girar alrededor del perímetro, lo que permite que el aceite y los elementos flotantes se eleven a la superficie y queden atrapados. A medida que el flujo continúa rotando alrededor del eje vertical, se desplaza hacia la parte inferior de la placa de inmersión. Los sedimentos son dirigidos hacia el centro y la base del dispositivo, donde se acumulan en una instalación de almacenamiento de sedimentos, ubicada debajo de la cámara de vórtice. El cono central protege los sedimentos almacenados y redirige el flujo principal hacia arriba y hacia el interior. Cuando el flujo alcanza la parte superior del dispositivo, prácticamente está libre de sólidos y se descarga a través de la tubería de salida. *Lapointe, M., Rochman, C. M., & Tufenkji, N. (2022).*

StormTreat

El Sistema StormTreat consiste en una serie de seis cámaras de sedimentación y un humedal construido, que se encuentran contenidos dentro de un tanque modular. El agua de entrada (influyente) es dirigida hacia las cámaras de sedimentación, donde se eliminan los sólidos de mayor diámetro. Las cámaras internas de sedimentación contienen una serie de dispositivos (skimmers) que decantan la parte superior de las cuencas



de sedimentos de aguas pluviales, dejando atrás las aguas más turbias en la parte inferior. Luego de pasar a través de las cámaras internas, el agua de tormenta parcialmente tratada fluye hacia el humedal construido circundante a través de una serie de tuberías de PVC ranuradas. El humedal está compuesto por un sustrato de grava plantado con juncos y otras plantas apropiadas para humedales. StormTreat canaliza el agua de tormenta hacia el subsuelo del humedal y a través de la zona de raíces, donde ocurre la atenuación de la contaminación mediante procesos como la filtración, la adsorción y las reacciones bioquímicas.

Lapointe, M., Rochman, C. M., & Tufenkji, N. (2022).

5.1.4.6 Beneficios y ventajas

A comparación de otras técnicas de infiltración de agua, los pozos de infiltración presentan una ventaja considerable debido a su capacidad para permitir una rápida y efectiva infiltración de grandes volúmenes de agua en un período de tiempo relativamente corto. Esta eficacia se deriva principalmente de su profundidad en el subsuelo, lo que les otorga una notable ventaja en términos de capacidad de absorción.

Esta cualidad se torna especialmente relevante en zonas urbanas, como Guadalajara, donde las precipitaciones pluviales se presentan en lluvias extraordinarias de alta intensidad. En estas circunstancias, los pozos de infiltración destacan por su capacidad para manejar y absorber de manera eficiente considerables cantidades de agua en un tiempo reducido. En consecuencia, este enfoque de gestión de agua puede desempeñar un papel fundamental en la mitigación de los problemas asociados con las inundaciones urbanas, al proporcionar una solución efectiva para el rápido drenaje y la infiltración de las precipitaciones excesivas.

Con la aplicación de los sistemas de tratamiento propuestos, se logrará un nivel de calidad óptimo en el agua que se infiltra en el subsuelo. Esta mejora sustancial en la calidad del agua se traduce en la posibilidad de aprovecharla de manera efectiva y versátil, tanto en aplicaciones industriales como en usos domésticos.

En lo que respecta a los beneficios ambientales de la infiltración del agua, uno de los aspectos notables es el control de la temperatura. Cuando el suelo se satura de agua, este adquiere la capacidad de actuar como un regulador térmico eficaz, aprovechando la alta capacidad calorífica del agua. Este fenómeno tiene repercusiones significativas tanto en los ecosistemas naturales como en la calidad de vida de las áreas urbanas circundantes.

En primer lugar, el agua, con su capacidad calorífica elevada, actúa como un amortiguador de cambios bruscos de temperatura. Durante el día, cuando la temperatura ambiente se eleva, el agua infiltrada en el suelo absorbe parte de ese calor, lo que contribuye a mantener temperaturas más frescas en el entorno circundante. Por la noche, cuando la temperatura desciende, el agua liberará gradualmente ese calor almacenado, evitando que la temperatura caiga en exceso. Esto resulta en un microclima más estable y cómodo en áreas que experimentan la infiltración del agua, lo que puede ser especialmente beneficioso para la flora y fauna locales.

5.1.4.7 Implementación y despliegue

Para llevar a cabo la implementación de esta tecnología, es esencial realizar un análisis detallado de los lugares propensos a inundaciones. Identificar y mapear estos lugares de riesgo es el primer paso crucial. Una vez que se han identificado estos sitios, es necesario planificar con precisión la ubicación de las tecnologías de tratamiento, ya que cada una de ellas ocupa un espacio específico y requiere de ciertas especificaciones técnicas.

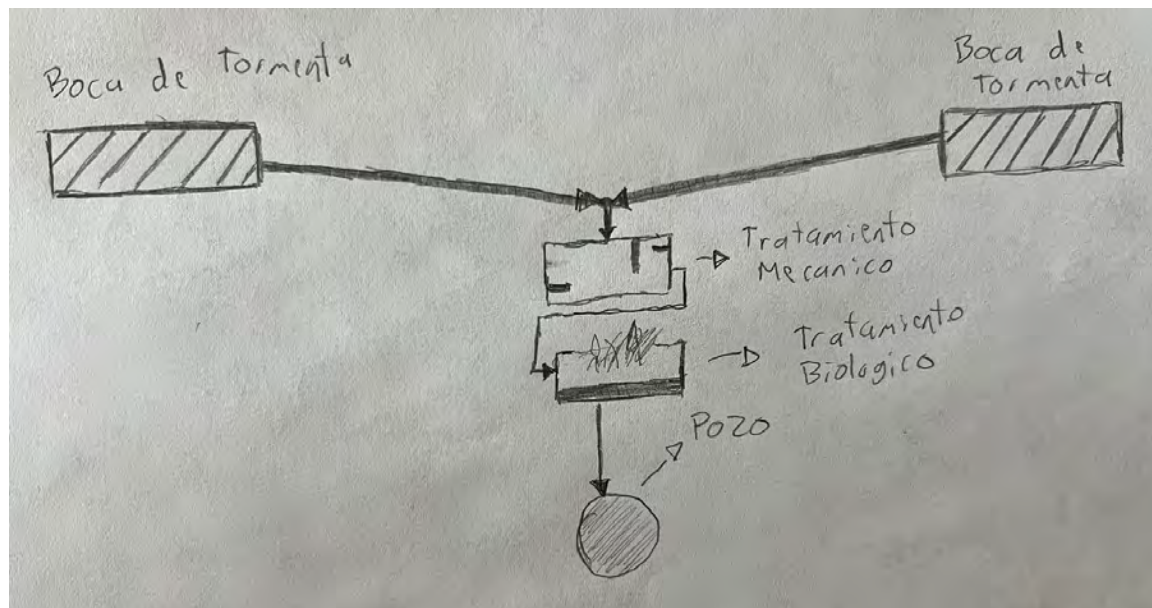
En el caso del tratamiento biológico, una estrategia efectiva puede ser la instalación en áreas verdes o parques lineales. Esto tiene la ventaja de aprovechar la vegetación existente en el sitio, lo que puede contribuir al proceso de tratamiento biológico y, al mismo tiempo, proporcionar un entorno agradable para la comunidad.

Por otro lado, para la implementación del tratamiento mecánico, es necesario llevar a cabo una obra civil. Esta obra civil implica la excavación de un área específica y la adecuación de la infraestructura de tuberías necesaria para el flujo eficiente del agua. Este paso es crítico

para garantizar que el tratamiento mecánico se realice de manera efectiva y que el agua contaminada se dirija correctamente hacia el proceso de tratamiento.

Es importante destacar que ambas tecnologías deben ubicarse aguas arriba en relación con el flujo de agua, de manera que los contaminantes sean capturados y tratados antes de que lleguen a zonas vulnerables o de interés ambiental. Esta disposición aguas arriba garantiza que el agua tratada se dirija de manera controlada hacia un pozo de infiltración, donde se puede recargar el acuífero de manera segura y reducir el riesgo de inundaciones en áreas bajas. Esto se puede analizar en el siguiente diagrama:

Diagrama visual del proceso



5.1.5. Captación en estaciones de Autobus

Diego Seidel

5.1.5.1 Resumen ejecutivo

La propuesta de paradas de autobús como infraestructura para la recarga de mantos acuíferos en el Área Metropolitana de Guadalajara se destaca por su simplicidad y eficacia. Conformada por perfiles estructurales de acero y una cubierta de concreto, la parada canaliza el agua de lluvia hacia un depósito subterráneo lleno de gravas y arenas, donde se filtra antes de ser conducida al subsuelo, cumpliendo así con la recarga de los mantos. Esta propuesta modular ofrece la flexibilidad de adaptarse a un contexto urbano donde la disponibilidad de

239

espacio puede ser limitada. Su capacidad para replicarse fácilmente y generar un sistema de recarga extenso destaca su viabilidad a escala metropolitana.

5.1.5.2 Introducción

El Área Metropolitana de Guadalajara se encuentra sobre dos grandes acuíferos, el Atemajac al norte y el Toluquilla al sur. Datos de CONAGUA (2020) muestran que la disponibilidad media anual de agua subterránea en ambos acuíferos es de -12.03 hm³/año y -75.6 hm³/año respectivamente. En total de ambos acuíferos, anualmente se extraen 255.98 hm³ y se cuenta con una recarga media anual de 196.4 hm³. Comparando estos números con acuíferos de zonas menos urbanizadas del Estado, como por ejemplo el acuífero de Colotlán, al norte de Jalisco, hay una disponibilidad media anual de 1.13 hm³/año y extracción anual de 8.9 hm³. La cantidad de agua que se extrae es inmensa y la cantidad de recarga no es suficiente para disminuir el déficit de dichos acuíferos.

La pérdida de capacidad de los mantos acuíferos es preocupante. Cada vez se tiene que cavar más profundo con el fin de extraer agua de los suelos. Esto se debe a los procesos inconscientes de urbanización. Tan solo en el municipio de Zapopan, se calcula que la precipitación media anual es de 943 mm (IIEG 2021), sin embargo, esta cantidad de agua no se aprovecha y gran mayoría del agua es enviada a las líneas de drenaje. El suelo de la ciudad está impermeabilizado por metros y metros cúbicos de concreto, poca agua es capaz de infiltrarse a nuestros mantos.

Recargar los mantos acuíferos actualmente parece una prioridad no solo climática y sustentable, sino también social. Es muy común escuchar entre vecinos que hay escasez de agua, se tienen que ordenar pipas a domicilio con el fin de abastecer las necesidades básicas de la ciudad. En 2021 el SIAPA comunicó que la Presa Calderón, la cual abastece agua a una parte importante del Área Metropolitana de Guadalajara, cesó su funcionamiento debido a que no tenía agua (SIAPA 2021). Tal fue el problema que la organización tuvo que realizar distribución de agua con pipas a distintos municipios del AMG. El periódico Mural reportó a finales del mes de agosto del 2023 que dicha presa, a pesar del temporal de lluvias, nuevamente disminuyó su nivel.

Pensar en la recarga de los mantos es importante en un contexto urbano como el AMG. Se pueden generar sistemas de infiltración y recarga muy sencillos que tengan una relación directa con el entorno urbanizado. Se propone la creación de una parada de autobús modular capaz de replicarse en varios sitios de la ciudad. Se trata de una cubierta que atrape el agua de lluvia, la lleve a una cisterna y con tubos de pvc perforado el agua llegue al subsuelo con el fin de recargar una pequeña porción. Un solo módulo no tiene gran beneficio, pero

planteando la propuesta como un sistema de recarga urbano (es decir generar una red de paradas de autobús con esta función), distintas partes de la ciudad pueden ir recargando os acuíferos. De esta manera el agua de lluvia no irá a parar al drenaje, sino a donde debería de estar originalmente.

5.1.5.3 Descripción de la tecnología propuesta

La parada de autobús se compone de perfiles estructurales de acero que soportan una cubierta de concreto. Al llover, la cubierta hace que el agua ingrese a un tubo por medio de gravedad para llegar a un depósito subterráneo lleno de gravas y arenas, poco a poco el agua es filtrada y finalmente conducida a través de tubos de entre 2m y 3m de profundidad. El agua se infiltra al subsuelo y se cumple con la recarga de los mantos freáticos. Se pueden considerar distintas profundidades de recarga, en este caso, por ser un contexto urbano, la profundidad no tiene que ser mucha.

Esta propuesta tiene la posibilidad de replicarse fácilmente y generar un sistema de recarga a lo largo del Área Metropolitana de Guadalajara (o cualquier otra ciudad). Si se considera que a lo largo de las avenidas importantes siempre hay paradas de autobús, no es difícil pensar en la facilidad de colocar las cubiertas y sus respectivos depósitos. La propuesta tipo tiene un área de 15 m², sin embargo, dependiendo del sitio en el que se instale, siempre y cuando se cuente con la existencia de una cubierta que dirija el agua pluvial hacia un depósito filtrante, se cumplirá con la función de recarga.

También se puede considerar en trabajar con los escurrimientos que van sobre las calles y banquetas para la recarga. Para ese caso, los sustratos dentro del depósito de recarga tendrían que ser distintos a los que solamente filtran agua pluvial. En zonas donde hay mucha escorrentía se puede considerar esta posibilidad y en otros casos solamente se trabaje con el agua captada con la cubierta.

5.1.5.4 Estado del arte

La infiltración y recarga ya suceden como un proceso natural. En términos de infiltración inducida por las manos del hombre, podemos tomar en cuenta a los pozos de absorción que son ejemplos muy comunes de recarga inducida en la ciudad. La CONAGUA (2020) realizó un cálculo de la recarga inducida promedio anual del acuífero de Atemajac, considerando una cantidad de 6000 pozos de absorción y 60 lluvias de 30 minutos, resultando en 2.9 hm³/año. Tomando en cuenta esto, la propuesta de la parada de autobús tiene cierta similitud con los clásicos pozos. Se toma el agua de lluvia y se infiltra a profundidades de máximo 8 metros.

5.1.5.5 Beneficios y ventajas

- Recarga de los mantos acuíferos
- Fácil de replicar
- Generación de un sistema de recarga
- Adaptable a su contexto inmediato
- Capacidad de captar agua pluvial y escorrentías
- Filtración de agua para que esté más limpia al llegar al subsuelo
- Generación de un espacio de sombra para los que esperan un camión
- Creación de infraestructura urbana

5.1.5.6 Diseño y especificaciones técnicas

Imagen 1.0: Alzado de parada de autobús

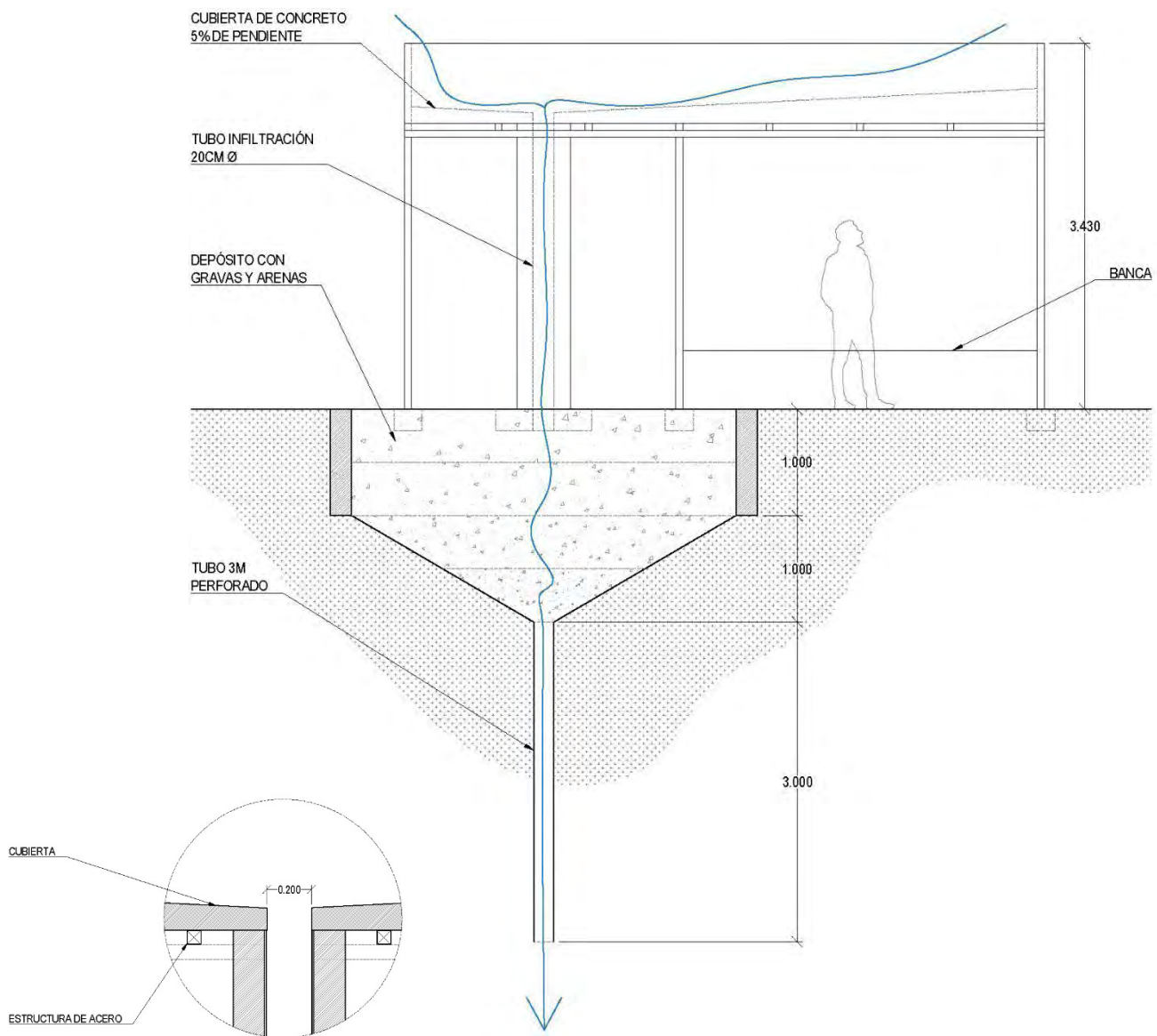
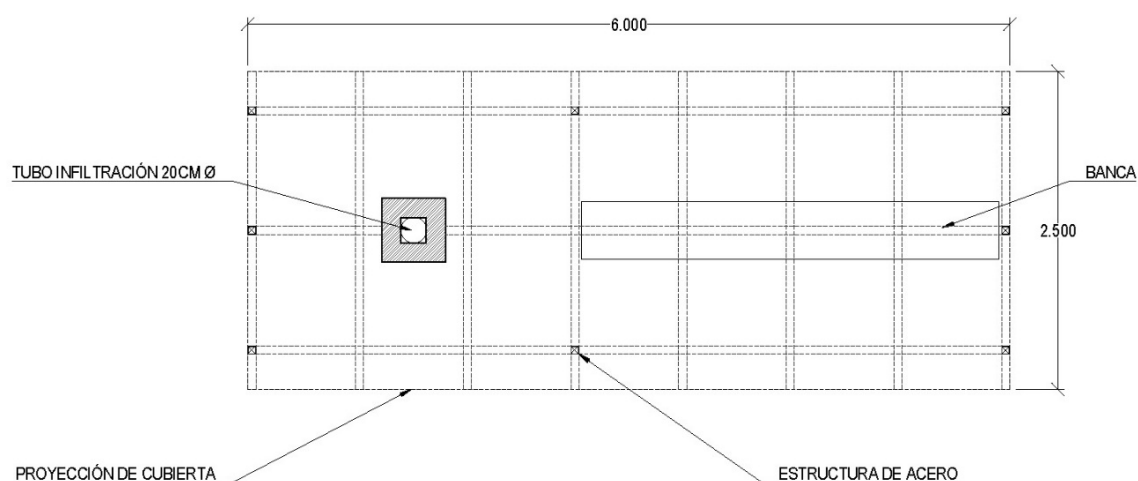


Imagen 2.0: Planta de parada de autobús



En la imagen 1.0 se aprecia un alzado de la propuesta de parada de autobús. Del lado derecho se encuentra el espacio de espera, delimitado por una banca y la estructura de acero. En línea de proyección se observa la cubierta de concreto por la cual el agua escurrirá para llegar al tubo de infiltración de 20 cm de diámetro. Con una línea azul se ejemplifica el camino que tendría el agua al caer sobre la cubierta. Bajo la parada se encuentra el depósito donde se almacenará y filtrará el agua para llegar finalmente a otro tubo que llega a los tres metros de profundidad. En total la profundidad de infiltración, contando la del depósito, es de 5 m. Toda el agua que caiga sobre la cubierta irá directamente al suelo, no se contaminará con el entorno urbano

En la imagen 2.0 se muestra la planta de parada de autobús. Se observa que el tubo principal, el que lleva el agua de la cubierta al depósito, está rodeado por un elemento estructural ya sea de concreto armado o de material. Toda la superficie (15 m²) que se encuentra bajo la cubierta es espacio útil de espera y de sombra (o protección de lluvia).

5.1.5.6 Implementación y despliegue

Primero se haría la excavación para hacer el depósito y cimentación. Se colocaría el tubo perforado de 3m de longitud en la parte más baja y se suministrarían las gravas y arenas necesarias para la filtración del agua. Se prosigue con la colocación de las columnas y armado de la estructura, incluyendo el tubo que lleva el agua de la cubierta al depósito. Se hace el

colado de la cubierta de concreto y del firme sobre el depósito. Finalmente se construye una banca de material.

5.1.6. Pozos de infiltración conectados a cisternas de captación de agua

Miguel Ángel Valenzuela

5.1.6.1 Descripción de la propuesta

En esta propuesta buscamos crear un sistema en conjunto de distintos sistemas ya existentes que por si solos tienen la capacidad de aportar beneficios pero buscamos unir estos sistemas para crear un sistema integral de gestión, filtración y recarga completo, en donde podremos obtener mejor los asentamientos urbanos ya existentes proponiendo la creación de parques inundables no solo en áreas verdes ya existentes si no que buscar la manera de incluso crear parques inundables de captación de agua a doble altura por encima de algunas vialidades, estacionamientos y pasos subterráneos en donde se puede aprovechar todo este espacio ya construido para crear un ambiente menos urbano y más en unión con el medio ambiente y la naturaleza, al crear estos nuevos parques inundables o trabajar los ya existentes lo que se busca es evitar la implementación de filtros artificiales para el agua ya que estos mismos parques, plantas y suelo natural realizarán la función de filtración del agua de lluvia que caiga sobre el área urbana, filtrándola y limpiándola a través del subsuelo, en donde después llegará a alguna canaleta o tubo el cual recibirá esta agua ya filtrada y a través de algunas rejillas para evitar que pasen partículas más grandes y obtener únicamente el agua filtrada, estas tuberías redirijan el agua hacia una cisterna de captación de agua la cual funcionará como un tanque de gestión del agua para regularla y apoyar a sedimentar todas las partículas que logren pasar por las rejillas de filtración. Al momento en el que estas cisternas lleguen casi al máximo de su capacidad el agua llegará a un nivel más alto donde se colocará otro tubo el cual funcionará como redirección del agua filtrada ya captada hacia un pozo de infiltración el cual mandará el agua directamente al subsuelo para la recarga directa de los acuíferos.

Esta técnica es una técnica utilizada en la gestión sostenible del agua, especialmente en áreas donde el acceso a fuentes de agua confiable es limitado. Este sistema tiene como objetivo recoger y almacenar agua de lluvia en cisternas y luego permitir que parte de esta agua se infiltre en el suelo a través de pozos de infiltración.

5.1.6.2 Importancia

Estos sistemas integrados tienen una serie de objetivos y beneficios significativos en términos de conservación y uso sostenible del agua. Estas soluciones innovadoras y sostenibles enfrentan desafíos asociados a las inundaciones y al mismo tiempo proporcionan beneficios ambientales y sociales los cuales se encuentran dentro de la importancia de estos sistemas en los cuales podemos señalar algunos de los más importantes:

- Conservación del Agua
 - Estas instalaciones permiten recolectar y almacenar agua de lluvia, lo que ayuda a conservar el agua potable al reducir la demanda sobre los recursos hídricos tradicionales.
- Reducción de la Escorrentía Superficial
 - Al captar el agua de lluvia, se reducen las escorrentías superficiales, disminuyendo así la erosión del suelo y minimizando la carga de contaminantes que llegan a los cuerpos de agua locales.
- Recarga de Acuíferos
 - La conexión de las cisternas a pozos de infiltración permite recargar los acuíferos subterráneos con agua de lluvia ya filtrada, ayudando a mantener los niveles de agua subterránea y asegurando la disponibilidad a largo plazo.
- Mitigación de Inundaciones
 - Al retener y gestionar adecuadamente el agua de lluvia, estos sistemas contribuyen a mitigar inundaciones en áreas urbanas al reducir la cantidad de agua que ingresa rápidamente al sistema de drenaje.
- Mejora del Entorno Urbano
 - Estos sistemas aportan espacios verdes y zonas de recreación para la comunidad mejorando así la calidad de vida de los residentes urbanos, fomentando la actividad física, el bienestar y la conexión con la naturaleza en entornos urbanos, dándole plusvalía a las ciudades al generar áreas verdes para las comunidades que se encuentran dentro de su radio de impacto.
- Educación y Conciencia Ambiental

- Estos sistemas pueden ser herramientas educativas valiosas para concienciar a la comunidad sobre la importancia de la gestión del agua, la conservación del entorno natural y la mitigación de desastres naturales.
- Gestión Sostenible del Agua
 - Al retener y liberar gradualmente el agua durante y después de un evento de inundación, estos sistemas contribuyen a una gestión mas sostenible del agua, permitiendo la recarga directa de acuíferos subterráneos y mejoran la calidad del agua al filtrar contaminantes antes de que lleguen a los cuerpos de agua.

5.1.6.3 Objetivos

Estos distintos puntos forman parte de algunas de las importancias mas relevantes de iniciar con la implementación de nuevos sistemas tanto de recargas subterráneas de los acuíferos como de mejoramientos urbanos y concienciación de la población. Estos sistemas a su vez generan algunos objetivos más específicos e importantes que se buscan cumplir mediante acciones en la sociedad como lo son los siguientes ejemplos:

- Optimización de Recursos
 - Utilizar de manera eficiente y optima el recurso hídrico, aprovechando el agua de lluvia que de lo contrario se perdería como escorrentía superficial fluyendo directamente a los drenajes pluviales.
- Sostenibilidad Hídrica
 - Fomentar practicas sostenibles de manejo del agua al almacenar y reutilizar el agua de lluvia, reduciendo así la presión sobre las fuentes convencionales del agua.
- Gestión Integrada de Aguas Pluviales
 - Integrar de forma efectiva la captación de agua de lluvia, el almacenamiento y la infiltración para gestionar las aguas pluviales de manera sostenible y disminuir el impacto en el entorno.
- Resiliencia Ambiental
 - Contribuir a la resiliencia ambiental al minimizar el estrés en los sistemas de drenaje y conservar los recursos hídricos, promoviendo un enfoque mas sostenible para la gestión del agua.

5.1.6.4 Funcionamiento y detalles que se propone

El proceso de este sistema inicia con las lluvias cayendo sobre los parques inundables los cuales servirán como proceso de filtración del agua provocando que esta agua pueda ser limpiada antes de llegar a la cisterna de captación, la cual únicamente funcionara como reserva de esta agua limpia para facilitar la infiltración del pozo de infiltración y reducir su mantenimiento, ya que utilizando las cisternas se planea buscar que el mantenimiento se realice directamente a la cisterna.

Dentro del proceso de captación de agua en la cisterna, esta llevara una serie de filtros para evitar que la tierra y otras partículas no deseadas pasen a través de las tapas y que lo único que pase a la cisterna sea el agua ya filtrada y así reducir los costos de mantenimientos de la cisterna, la cual llevara unos tubos en la parte superior para que en el momento que la cisterna este llena de agua, esta agua empiece a pasar al pozo de infiltración evitando que las partículas que puedan pasar a través de las rejillas lleguen al pozo de infiltración y se queden sedimentadas en la parte inferior de la cisterna de captación.

Dentro de la cisterna de captación lo que se busca es un proceso similar al de las plantas de tratamiento donde se entra en una etapa de sedimentación para que las partículas más densas que logren atravesar las rejillas se queden en la parte inferior de la cisterna, lo que evitara su paso directo al pozo de infiltración evitando que este se llegue a tapar y reduciendo su mantenimiento.

Finalmente, en la última fase del sistema el agua pasara a través del tubo superior de la cisterna hacia el pozo de infiltración, el cual a su vez contendrá distintas rejillas para evitar el paso de partículas no deseadas y que el pozo únicamente infiltre el agua ya filtrada por la tierra y los parques inundables, logrando así una infiltración al subsuelo de una manera más rápida, eficiente, y sin necesidad de procesos de limpieza ya que el agua será filtrada por el suelo.

5.1.6.5 Tecnologías similares y diferencia entre este sistema

Parques inundables

Estos sistemas son áreas específicamente diseñadas para recibir y retener agua durante eventos de lluvia intensa o inundaciones, planificados de manera que, en caso de inundaciones estos puedan almacenar temporalmente grandes cantidades de agua y luego liberarla de manera controlada, principalmente mediante la infiltración de esta misma. Estos

parques están contruidos utilizando técnicas de planificación y diseño dependiendo el área que se tenga disponible y la selección de ubicación adecuada para el mismo. En el proceso de construcción de estos sistemas se construyen sistemas de drenajes subterráneos para recolectar y almacenar el agua de lluvia, a su vez construyendo senderos, áreas de recreación y otras características asegurándose de que estas estén diseñadas para resistir inundaciones y sean fáciles de limpiar y mantener después de algún evento de inundación.

Cisternas de captación de agua de lluvia

Estos sistemas son estructuras diseñadas para recolectar, almacenar y gestionar el agua de lluvia que cae en las superficies de captación, como techos y superficies pavimentadas, estas están diseñadas para almacenar temporalmente el agua recolectada y utilizarla posteriormente para diversos fines, reduciendo la demanda sobre las fuentes de agua convencionales. Se diseñan generalmente para captación de agua pluvial en techos instalando canalones en el techo y conductos para guiar el agua de lluvia hacia la cisterna, en donde en algunos sistemas se le añaden sistemas de filtración y purificación para garantizar que el agua almacenada este limpia y segura para su uso.

Pozos de infiltración

Son estructuras diseñadas para permitir que el agua superficial o subterránea se filtre gradualmente en el suelo y recargue el acuífero subterráneo. Estos pozos se construyen de manera que faciliten la absorción y dispersión de grandes cantidades de agua de manera controlada y sostenible, teniendo en cuenta la permeabilidad del suelo donde se planea implementar este sistema, mediante una excavación y preparación del fondo del pozo con material filtrante como grava o piedras para mejorar la capacidad de infiltración y evitar la obstrucción. Estos funcionan como sistemas de recarga gradual de acuíferos subterráneos, control de inundaciones, alivio de sistemas de alcantarillado y gestión sostenible de agua.

Estos sistemas por si solos ya existen en la actualidad, pero una de las principales cosas que buscamos con la implementación de estos sistemas es unir mas de uno de los mismos para crear un sistema integral mas eficiente con el apoyo de distintos sistemas ya existentes como lo son los parques inundables, cisternas de captación de agua pluvial y pozos de infiltración. Lo que buscamos principalmente es que al crear un sistema en conjunto mediante la utilización de todos estos recursos para poder tener un impacto mas grande en la gestión del agua y su infiltración.

Por eso es por lo que el plan de acción principal es modificar un poco la manera en la que estos sistemas funcionan individualmente para poder realizar un único sistema integral en donde estos 3 sistemas funcionen como uno solo ayudando cada sistema a distintas áreas y aportando los beneficios de cada uno de ellos para obtener beneficios mayores.

5.1.6.6 Metodología

Explicación detallada de los pasos a seguir para desarrollar la tecnología

Beneficios y Ventajas

Gracias a estos objetivos y la definición de la importancia de la integración de estos sistemas innovadores y no convencionales podemos obtener distintos beneficios importantes tanto para las comunidades como para las gestiones del agua como lo son los siguientes:

- Reducción de Costos
 - Al utilizar agua de lluvia para aplicaciones no potables, como riego de jardines o limpieza, se reducen costos asociados con el uso de agua potable.
- Sostenibilidad
 - Contribuyen a la sostenibilidad ambiental al reducir la dependencia de fuentes de agua no renovables y al fomentar practicas más responsables de uso del agua.
- Alivio de la Demanda de Agua Potable
 - Al usar agua recolectada para aplicaciones no potables, disminuye la demanda de agua potable, ayudando a preservar este recurso para usos esenciales.
- Conservación del Ecosistema
 - Al reducir la escorrentía superficial y filtrar el agua a través de los pozos de infiltración, se protege la calidad del agua y se conservan los ecosistemas acuáticos cercanos.
- Adaptación al Cambio Climático
 - Estos sistemas contribuyen a la adaptación al cambio climático al manejar de manera eficiente las precipitaciones extremas y las variaciones en los patrones de lluvia.

En resumen, la implementación de estos sistemas en conjunto tiene como objetivo fundamental la gestión sostenible del agua, promoviendo la conservación, la reutilización y

la reducción del impacto ambiental, brindando así múltiples beneficios para la comunidad y el medio ambiente.

5.1.7. *Luis Xavier Villaseñor*

5.1.7.1 Resumen Ejecutivo

La propuesta de infiltración de agua presenta una solución técnica integral para abordar la erosión del suelo y la gestión hídrica en la cuenca baja. La tecnología se compone de tres elementos clave: terrazas de infiltración de agua, zanjas de infiltración con filtros de grava y la adaptación de un pozo de extracción abandonado como pozo de infiltración o construcción de un nuevo pozo de infiltración. Esta propuesta tiene como objetivos principales mitigar la erosión, mejorar la infiltración del agua y controlar la sedimentación en cuerpos de agua cercanos. Los beneficios abarcan aspectos ambientales, sociales y económicos, incluyendo la conservación del suelo, la protección de los recursos hídricos, el aumento de la productividad agrícola y el valor agregado a las propiedades locales. Su implementación promete un impacto positivo en la sostenibilidad y calidad de vida de la comunidad.

5.1.7.1 Introducción

La deforestación, entendida como la eliminación a gran escala de la cobertura forestal, ha sido una práctica común en muchas partes del mundo debido a diversas razones, como la expansión agrícola y la expansión de los centros urbanos. Sin embargo, este proceso tiene graves consecuencias para el medio ambiente, ya que los bosques desempeñan un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua y el ciclo de carbono. Los árboles actúan como sumideros naturales de carbono y ayudan a mantener la humedad en el suelo, lo que reduce los escurrimientos superficiales y la erosión del suelo (Foley et al., 2005).

La eliminación de grandes extensiones de bosques conduce a un aumento en los escurrimientos superficiales, lo que a su vez provoca la erosión del suelo y la sedimentación de ríos y arroyos. Este proceso puede tener consecuencias devastadoras, como la pérdida de suelos fértiles, la degradación de tierras agrícolas, la pérdida de servicios ecosistémicos y la destrucción de hábitats naturales. Además, los escurrimientos excesivos pueden

provocar inundaciones, lo que representa un riesgo para las comunidades humanas que viven cerca de áreas deforestadas (Foley et al., 2005).

Como se mencionó anteriormente los terrenos agrícolas y los pastizales son una de las principales causas del aumento en la deforestación dado al gran aumento en la superficie dedicada a estos usos del suelo. Durante los últimos 40 años la superficie destinada a la agricultura de riego experimentó un crecimiento de alrededor del 700% (Foley et al., 2005). Según el estudio realizado por López et al., (2013), se encontró que tras el análisis de la erosión hídrica por 5 años en zonas agrícolas dedicadas principalmente a la producción de agave y maíz, se encontró que la mayor pérdida de suelo se registraba en el agave tequilero y suelo desnudo, seguido por una erosión media en el suelo cultivado por maíz y por último una erosión baja en suelo cubierto por pasto. En la Tabla I se presentan los resultados de dicho estudio.

Tabla XI. Erosión hídrica según el uso de suelo (López et al., 2013).

Año	Edad del agave (años)	Precipitación (mm)	Erosión hídrica (kg/ha)			
			Suelo desnudo	Agave tequilero	Maíz	Pasto
2011	1	545.6	5,862.80	10,239.10	4,536.90	51.9
2010	0	354.7	5,768.00	4,709.50	1,707.50	30.2
2009	8	854.4	7,509.60	2,576.40	4,403.40	162.7
2003	2	1043.2	35,127.80	36,587.60	11,620.20	379.8
2002	1	802.7	24,925.60	27,036.80	13,342.10	503.8

No obstante, este mismo estudio registró que el agave tequilero generaba una mayor erosión en algunas etapas de su vida, con respecto al suelo desnudo. Este mayor grado de erosión en cultivos de agave es generado debido a la morfología de las hojas de la planta de agave, las cuales están diseñadas para captar el agua y conducirla a la raíz de la planta generando un flujo concentrado que propicia la erosión del suelo cuando las raíces del agave no generan una retención del suelo (López et al., 2013).

Dada la relación existente entre la erosión y los escurrimientos superficiales se espera que al tener una mayor erosión dentro de un mismo terreno el escurrimiento superficial sea mayor y por lo tanto la cantidad de agua infiltrada sea menor (Foley et al., 2005). Por consiguiente, continuación se plantea una propuesta de desarrollo tecnológico orientada a zonas dedicadas a la producción agrícola de agave tequilero con el objetivo de evitar la erosión del suelo, generar infiltración de agua y disminuir la velocidad de los escurrimientos superficiales.

5.1.7.2 Descripción de la Tecnología Propuesta

La tecnología propuesta para una mejor gestión del agua consta de los elementos descritos a continuación:

5.1.7.3 Terrazas de Infiltración de Agua

Las terrazas de infiltración son estructuras diseñadas para abordar la erosión del suelo y fomentar la infiltración del agua en la cuenca baja. Se ubicarán estratégicamente aguas arriba de pozos abandonados o en zonas erosionadas no destinadas a la agricultura. Cada terraza estará equipada con estructuras de contención, incluyendo muros de piedra y gravas sostenidas por malla electrosoldada. Estas estructuras cumplirán cuatro funciones esenciales: retendrán temporalmente el agua de lluvia, prevendrán la erosión del suelo y permitirán la deposición de sedimentos aguas arriba de la terraza, y facilitarán la infiltración gradual del agua en el terreno.

5.1.7.4 Zanjas de Infiltración con filtros de grava

Las zanjas de infiltración son elementos fundamentales en la gestión hídrica. Su propósito es captar y dirigir los escurrimientos superficiales hacia un proceso de filtración antes de la infiltración en el suelo. Se propone construir estas zanjas de manera continua aguas abajo de las terrazas de infiltración. Las zanjas recolectarán el agua infiltrada desde las terrazas y la dirigirán hacia un pozo de infiltración ubicado al final de la zanja.

Para evitar la erosión en la zanja se utilizará grava rodeada con malla electrosoldada, la cual actuará como soporte. Esta zanja además de permitir la infiltración de agua actuará como primer filtro para evitar el azolve del pozo de infiltración ubicado al final de la zanja.

5.1.7.5 Pozo de absorción

Como parte final del sistema de gestión del agua planteado, se propone la rehabilitación de un pozo de extracción abandonado como pozo de infiltración. El pozo de infiltración será adaptado de manera que sea lo suficientemente profundo como para evitar la erosión del subsuelo y se reforzarán sus paredes, en caso de ser necesario, con materiales como PVC para evitar derrumbes al interior del pozo. No obstante, también puede llevarse a cabo la construcción de un nuevo pozo de infiltración que cumpla con los requisitos de ser lo suficientemente profundo evitando la erosión de subsuelo y el reforzamiento de sus paredes evitando derrumbes en su interior.

A manera de filtro, se plantea la implementación en la superficie del pozo un cubo relleno de gravas y arenas gruesas que retengan las arcillas y sólidos que lograron atravesar tanto las

terrazas de infiltración como la zanja de infiltración, evitando el azolve del pozo en la medida de lo posible. Al final de este filtro se colocará una malla en una reja metálica que solo permita el paso del agua.

Previo al filtro en forma de cubo se plantea una compuerta con una doble función. Primero, que permita la derivación de los escurrimientos excedentes. Segundo, el bloqueo del flujo para realizar mantenimientos por azolves en el pozo de infiltración.

5.1.7.6 Mantenimiento y Limpieza Programada

La efectividad a largo plazo de este sistema depende en gran medida del mantenimiento y la limpieza regulares. Aquí se describen las tareas de mantenimiento:

- **Remoción de Sedimentos:** Se realizará la extracción periódica de los sedimentos acumulados en las terrazas y zanjas. Esto se llevará a cabo para mantener su capacidad de infiltración óptima, evitando obstrucciones en los canales de filtración.
- **Reemplazo de Materiales de Filtración:** Cuando se observe un deterioro significativo de los materiales de filtración utilizados en las terrazas, se procederá al reemplazo de estos materiales. Esto asegurará una filtración eficiente y evitará la obstrucción.
- **Reparación de Estructuras:** Cualquier daño o deterioro en las estructuras, como muros de contención o canales de drenaje, se abordará de manera oportuna. Las reparaciones serán cruciales para mantener la integridad y el funcionamiento adecuado de las terrazas y zanjas.

5.1.7.7 Estado del arte

Algunas tecnologías similares que existen en el mercado son:

Un dispositivo hidrofóbico de guía de agua para construcción de zanjas de cimentación

El dispositivo se compone de zanjas de drenaje, un pozo de recolección de agua, bombas de succión y tuberías de succión. Las zanjas de drenaje cumplen la función de capturar y dirigir el agua acumulada en el pozo hacia el pozo de recolección de agua. En el interior del pozo de recolección, se ha implementado un sistema de filtración que se basa en una estructura de caja con una red exterior e interior, una capa de grava y una capa de arena gruesa. Este diseño permite que los sedimentos suspendidos en el agua se depositen en el fondo del pozo sin que esto afecte adversamente la eficiencia del proceso de drenaje y guía del agua, mejorando así la calidad del agua en el proceso. Además de esto, se han incorporado características adicionales, como un dado de soporte y una tubería de infiltración, que tienen el propósito de fortalecer la estructura del pozo de recolección y

mejorar su capacidad de gestionar las aguas subterráneas de manera efectiva (何畏洪祖勇, 2021).

La ventaja clave de esta tecnología reside en su capacidad para llevar a cabo la filtración del sedimento de manera eficaz, asegurando al mismo tiempo una alta eficiencia en la gestión del agua en el contexto de la construcción de pozos de cimentación. El sistema de filtración presente en el pozo de recolección garantiza que los sedimentos se depositen de forma controlada en el fondo del pozo sin obstaculizar el flujo de agua, lo que, en última instancia, contribuye a mejorar la calidad del agua resultante. Además, las características adicionales, como el dado de soporte y la tubería de infiltración, aportan una mayor robustez y eficiencia al sistema en su conjunto. En resumen, esta tecnología aborda con eficacia los desafíos inherentes a la gestión del agua en la construcción de pozos de cimentación, asegurando una operación más eficiente y la obtención de agua de mayor calidad (何畏洪祖勇, 2021).

La propuesta de zanja de infiltración que se presenta funciona de manera similar a la propuesta mencionada anteriormente, pero hay dos diferencias fundamentales. En primer lugar, el propósito del agua recolectada difiere, ya que, en la zanja propuesta, el agua recolectada se dirige hacia pozos de infiltración que recargan el acuífero. En cambio, en la propuesta anterior, el agua se envía a un pozo de recolección que no está conectado al subsuelo, sino a una bomba que extrae el agua para su uso.

En segundo lugar, la estructura de la zanja varía significativamente en cuanto a su conexión con el pozo de infiltración. En la propuesta actual, se construirá una compuerta de derivación del agua excedente que también permitirá la limpieza del pozo de infiltración. Por otro lado, la propuesta del dispositivo hidrofóbico de guía de agua para construcción de zanjas de cimentación plantea una conexión directa al pozo de aprovechamiento de agua.

Pozos de absorción PERCOT

Los pozos de absorción planteados por PERCOT, constan de un cámara de almacenamiento de agua cuadrada, la cual tiene la función de almacenar rápidamente el agua que entra al pozo para después ser conducida hacia el subsuelo. Dentro de la cámara de almacenamiento de agua es posible encontrar una tubería de Ademe tipo Canastilla, la cual permite el paso del agua, pero a su vez también actúa como filtro de agua, además a la entrada del pozo existe una trampa para sedimento que actúa como primer filtro. Dicha tubería se encuentra conectada con una tubería lisa de acero la cual conduce el agua hacia

el subsuelo, dicha tubería de acero se encuentra rodeada de un material aislante. En la parte final inferior del pozo se encuentra otra tubería de Ademe tipo Canastilla rodeada de grava la cual permite el ingreso del agua de infiltración al acuífero (Figura 1) (PERCOT, s. f.).

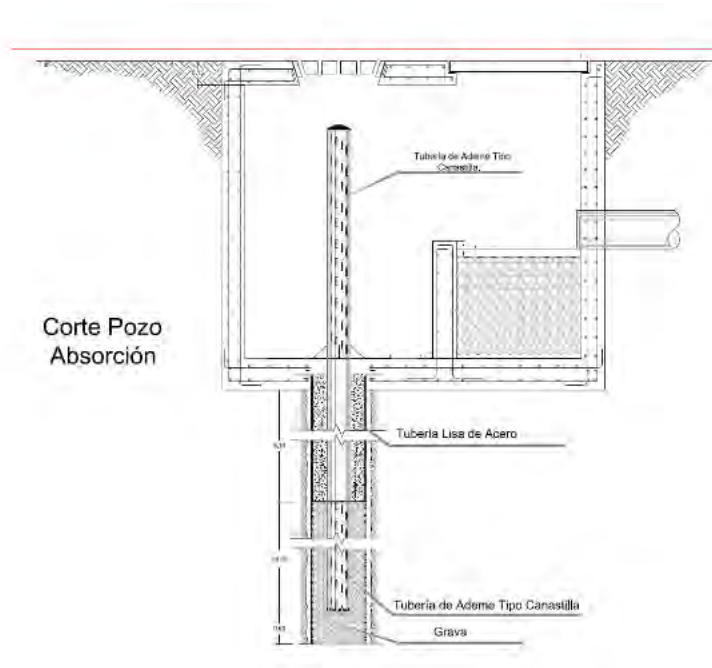


Figura 89. Pozo de absorción PERCOT (PERCOT, s. f.)

El pozo de absorción planteado se diferencia del pozo PERCOT en los siguientes aspectos:

- Únicamente contendrá una entrada por la parte lateral.
- Previa a la entrada del pozo se encontrará una compuerta de derivación que controlará el flujo que ingresa al pozo y facilitará sus procesos de limpieza.
- La cámara cubica donde ingresará el agua se encontrará llena de grava gruesa en su superficie y gravas más finas junto con arenas en su parte inferior que actuarán como filtro de arcilla.
- En la parte inferior del pozo continuo a la grava se encontrará una rejilla metálica cubierta por malla que impida el pazo de la grava filtro.

5.1.7.8 Beneficios y ventajas

Beneficios Ambientales

- Mitigación de la Erosión: Las terrazas de infiltración y las zanjas de infiltración contribuirán significativamente a la reducción de la erosión del suelo al retener temporalmente el agua de lluvia y prevenir la pérdida de tierra agrícola. Esto tendrá un impacto positivo en la conservación de la calidad del suelo y la biodiversidad local.

- **Mejora de la Infiltración:** La implementación de estas estructuras promoverá la infiltración del agua en el subsuelo, lo que resultará en la recarga de los acuíferos subterráneos y un aumento en la disponibilidad de recursos hídricos para la vegetación y el ecosistema circundante.
- **Control de Sedimentos:** Las estructuras de filtración en las zanjas y el pozo de infiltración actuarán como filtros altamente efectivos, atrapando partículas de arcilla y sólidos, lo que se traducirá en una reducción significativa de la sedimentación en los cuerpos de agua cercanos.
- **Prevención del Azolve:** La utilización de materiales de filtración adecuados y estructuras diseñadas de manera apropiada en el pozo de infiltración evitará el azolve, asegurando la efectividad a largo plazo de esta tecnología.

Beneficios Sociales

- **Protección de los Recursos Hídricos:** La gestión sostenible del agua beneficia directamente a las comunidades locales al garantizar la disponibilidad de agua de calidad para el consumo humano y las actividades agrícolas.
- **Estabilidad del Suelo:** La reducción de la erosión y la preservación del suelo son beneficiosas para los agricultores locales al mantener la productividad de la tierra y asegurar la seguridad alimentaria de la comunidad.
- **Participación Comunitaria:** La implementación de estas tecnologías puede involucrar a la comunidad en la planificación y el mantenimiento, lo que fomenta la conciencia ambiental y el sentido de pertenencia de la población local.

Beneficios Económicos

- **Mayor Productividad Agrícola:** La conservación del suelo y la mejora de la disponibilidad de agua pueden aumentar la productividad de la agricultura local, lo que se traduce en ingresos económicos más elevados para los agricultores.
- **Tecnología de bajo costo:** para la implementación de esta tecnología se plantea el uso de materiales de bajo costo además de la rehabilitación de un pozo de extracción abandonado.
- **Reducción de Costos de Mantenimiento:** A pesar de requerir una inversión inicial, el mantenimiento regular y la limpieza programada reducirán los costos a largo plazo al prevenir daños significativos y costosos en las estructuras.

- Valor de Propiedad: La mejora del entorno y la gestión sostenible del agua pueden aumentar el valor de las propiedades en la zona, lo que beneficia a los propietarios locales.

5.1.7.9. Diseño y Especificaciones Técnicas:

Los componentes del sistema de infiltración de agua propuesto constan, en primera instancia, de una terraza de infiltración de agua la cual termina con un gavión hecho con rocas de alrededor de 20 cm de diámetro y grava de alrededor de 7 cm de diámetro. Estos gaviones además cuentan con una cobertura de malla electrosoldada de 5 cm de apertura. La función de la terraza de infiltración disminuir la velocidad del flujo de agua actuar como filtro de retención de suelo erosionado, además de evitar que el suelo en suspensión genere azolves en los sistemas de infiltración siguientes.

El siguiente componente del sistema de infiltración de agua es la zanja de infiltración. Dicha zanja de infiltración recibirá el agua excedente de la terraza de infiltración. Para evitar la erosión en la zanja, esta puede reforzarse con grava de alrededor de 10 cm de diámetro, la cual permita el paso del agua para su infiltración y evite la erosión. La función secundaria de esta zanja de infiltración es conducir el agua excedente hacia un pozo de infiltración ubicado en el extremo bajo de la zanja.

Previo al pozo de infiltración, se plantea la construcción de una compuerta de derivación de agua la cual tendrá la función principal de desviar el flujo de agua proveniente de la zanja de infiltración, con la finalidad de permitir trabajos de mantenimiento y desazolve en el pozo de infiltración. Esta compuerta también puede tener como propósito secundario actuar como sistema de derivación de excedentes de agua.

Como componente final del sistema de infiltración de agua se propone la construcción de un pozo de infiltración de agua. Dicho puede ser implementado a partir de la rehabilitación y adaptación de un pozo de extracción abandonado dada la gran cantidad de pozos de extracción abandonados en las zonas rurales.

Para llevar a cabo la adaptación del pozo de extracción a un pozo de infiltración será necesario generar una cámara de almacenamiento temporal del agua la cual esté cubierta por una rejilla metálica la cual, a su vez, permita el paso del agua. Esta cámara de almacenamiento temporal tiene la finalidad de conducir el agua hacia abajo y hacerla ingresar al pozo de infiltración.

El pozo de infiltración propuesto se encuentra dividido en 3 secciones principales. La primera de las secciones consta de un primer sistema de filtrado de arcillas a partir de una barrera de retención y un filtro de grava. Este sistema busca reducir la velocidad del flujo de entrada para evitar el azolve de la parte del pozo que se encuentra conectada con el subsuelo.

Posteriormente el agua pasa a una segunda etapa en la que el agua pasa por un filtro de grava fina (5 cm de diámetro) antes de ingresar en el subsuelo. Esta grava es separada de la siguiente sección del pozo mediante una reja metálica cubierta por una malla metálica de 2 cm de diámetro. Este último filtro busca eliminar la mayoría de sólidos suspendidos restantes en el agua alargando la vida útil del pozo de infiltración. Además, estas últimas dos etapas contarán con un acceso por medio de una compuerta para llevar a cabo labores de mantenimiento.

Finalmente, el agua será conducida hacia el subsuelo mediante pozo rehabilitado. Al llevar a cabo la rehabilitación de este último pozo tendrá que considerarse un reforzamiento de sus paredes laterales de manera que se eviten derrumbes al interior de dicho pozo. La rehabilitación del pozo puede llevarse a cabo mediante un tubo ranurado en su extremo inferior que conduzca el agua hacia abajo en el subsuelo y colocando un filtro de grava en su extremo, para las zonas donde se busca evitar la infiltración se debe colocar un material aislante en dicha sección, como lo es la bentonita.

En la Figura 2 y Figura 3 se ilustra el funcionamiento general del sistema de infiltración de agua de lluvia planteado.

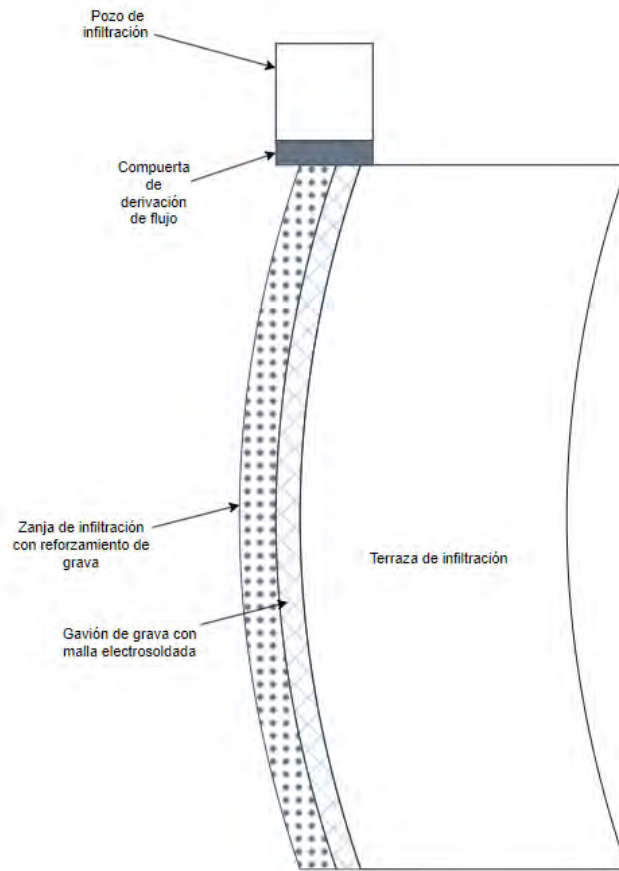


Figura 90. Vista general del sistema de infiltración.

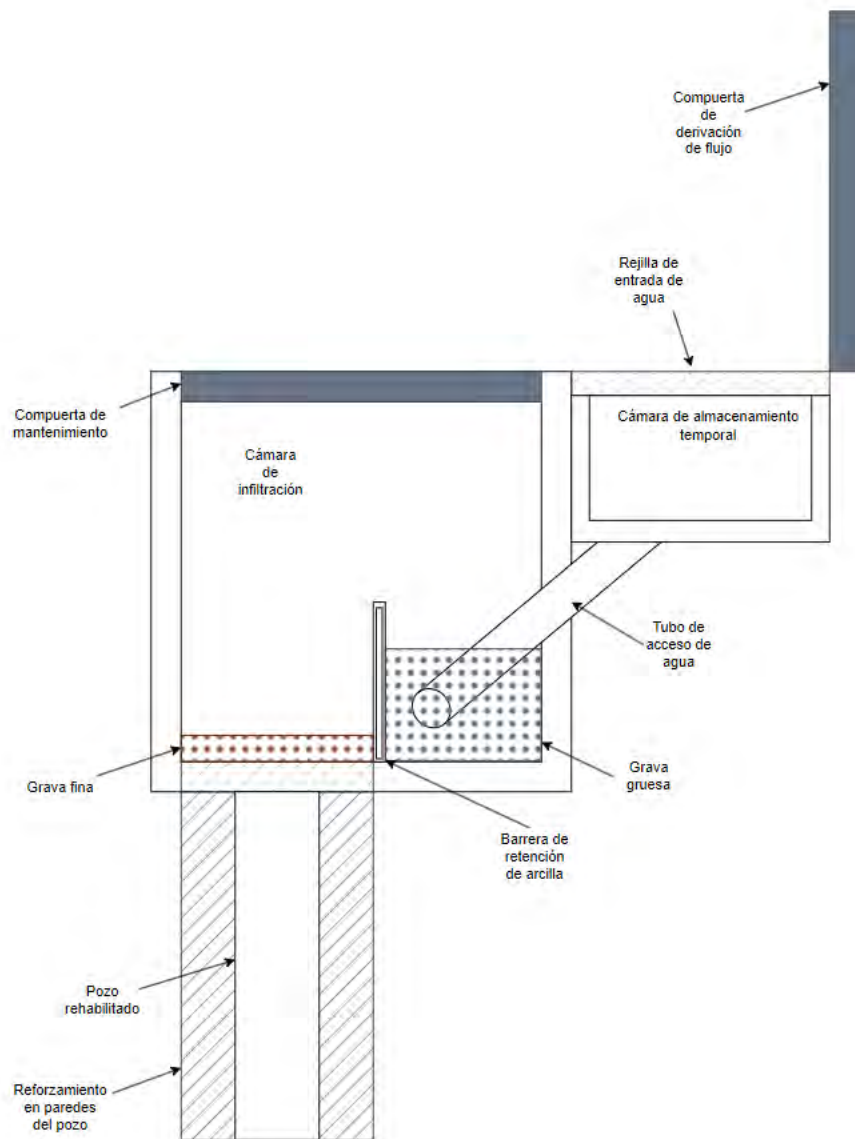


Figura 91. Vista de corte lateral en el pozo de infiltración.

La cantidad de agua infiltrada dependerá de las dimensiones la terraza de infiltración, las dimensiones de la zanja de infiltración, el tipo de suelo y materiales presentes en la zona y el diámetro del pozo de infiltración. Sin embargo, las dimensiones de los componentes del sistema a su vez estarán en función del área disponible para la terraza de infiltración, las dimensiones del pozo a rehabilitar y los requerimientos del sistema a implementar.

Descripción técnica de los componentes y características de la tecnología, incluyendo un esquema, materiales, dimensiones, capacidades de infiltración, etc.

5.1.7.10. Implementación y Despliegue:

1. Ubicación:

Identificar áreas propensas a problemas de erosión y escorrentía de agua, preferiblemente en zonas rurales con acceso a pozos de extracción abandonados.

Realizar un estudio de viabilidad para asegurarse de que la implementación de este sistema sea adecuada en la ubicación elegida.

2. Preparación del Terreno:

Realizar un estudio detallado del terreno para determinar la pendiente y las características del suelo.

Preparar y nivelar el terreno donde se construirán las terrazas de infiltración y las zanjas.

Obtener los permisos necesarios de las autoridades locales antes de comenzar la construcción.

3. Instalación de los Componentes:

Terrazas de Infiltración:

Cubrir los gaviones de las terrazas de infiltración con rocas de alrededor de 20 cm de diámetro y grava de alrededor de 7 cm de diámetro y recubrirlos con una malla electrosoldada de 5 cm de apertura.

Asegurarse de que las terrazas estén diseñadas para disminuir la velocidad del flujo de agua y evitar la generación de azolves en los sistemas de infiltración siguientes.

Zanja de Infiltración:

Colocar seguidamente a la terraza de infiltración la zanja de infiltración con la finalidad de recoger el agua excedente de las terrazas de infiltración.

Reforzar la zanja con grava (10 cm de diámetro) en caso de ser necesario para permitir la infiltración del agua y prevenir la erosión.

Diseñar la zanja para que dirija el agua hacia el pozo de infiltración ubicado en el extremo inferior.

Compuerta de Derivación:

Construir una compuerta de derivación antes del pozo de infiltración.

Esta compuerta debe permitir desviar el flujo de agua de la zanja de infiltración cuando sea necesario para realizar trabajos de mantenimiento y desazolve.

Pozo de Infiltración:

Adaptar un pozo de extracción abandonado para convertirlo en un pozo de infiltración.

Construir una cámara de almacenamiento temporal cubierta por una rejilla metálica que permita el paso del agua y que conduzca ésta hacia la primera sección del pozo de infiltración.

Instalar un sistema de filtrado de arcillas con una barrera de retención y un filtro de grava para reducir la velocidad del flujo de entrada y evitar el azolve en la parte conectada con el subsuelo.

Colocar un filtro de grava fina (5 cm de diámetro) antes de que el agua ingrese al subsuelo separando esta sección del resto del pozo con una reja metálica cubierta por una malla metálica de 2 cm de diámetro.

Construir una compuerta de acceso que permita el mantenimiento de las dos secciones antes planteadas.

Rehabilitar el pozo con un tubo ranurado en su extremo inferior para conducir el agua hacia el subsuelo.

Colocar un filtro de grava en el extremo del tubo en caso de ser necesario y reforzar las paredes laterales del pozo para evitar derrumbes.

4. Mantenimiento:

Establecer un programa de mantenimiento regular que incluya la limpieza de las terrazas, zanjas y pozos, y la inspección de las compuertas de derivación.

Capacitar al personal encargado del mantenimiento en procedimientos seguros.

5. Monitoreo:

Implementar un sistema de monitoreo para evaluar la eficacia del sistema de infiltración y detectar problemas a tiempo.

Realizar análisis de agua periódicos para garantizar la calidad del agua infiltrada.

6. Evaluación Continua:

Evaluar el rendimiento del sistema de infiltración a lo largo del tiempo y realizar ajustes según sea necesario para mejorar su eficiencia.

Mantener registros detallados de la operación y el rendimiento para futuras referencias.

5.2 San Juan de Abajo

El área de estudio, San Juan de Abajo, se encuentra en la intersección de una serie de factores que hacen que el análisis de su hidrología sea de suma importancia. Para comprender el contexto general de esta área, primero debemos considerar su ubicación geográfica, topografía, clima y uso de la tierra. San Juan de Abajo, que se encuentra en Nayarit, es una región propensa a eventos climáticos extremos, como lluvias intensas y tormentas, que pueden causar inundaciones y problemas de gestión de del agua

La importancia de analizar la hidrología de San Juan de Abajo radica en varios aspectos:

- 1 *Gestión del Agua:* El agua es un recurso vital para cualquier comunidad y su disponibilidad y gestión adecuada son esenciales para garantizar el bienestar de la población. Analizar la hidrología de la región proporcionará información valiosa sobre los patrones de flujo del agua, la recarga de acuíferos y la disponibilidad de agua para uso doméstico, agrícola e industrial.
- 2 *Riesgo de inundaciones:* San Juan de Abajo está expuesto a inundaciones debido a su topografía y la naturaleza de las precipitaciones. El análisis hidrológico nos permite comprender cómo se acumula y fluye el agua en la región, lo que es fundamental para identificar áreas propensas a inundaciones y desarrollar estrategias de mitigación.
- 3 *Desarrollo sostenible:* El crecimiento y desarrollo de la región deben de estar de la mano de la disponibilidad de recursos hídricos. El análisis hidrológico ayuda a terminar la capacidad de la región para soportar la expansión urbana y el desarrollo de las infraestructuras de manera sostenible.

Los objetivos del estudio de hidrología en San Juan de Abajo son los siguientes:

- 1 *Creación de hidrogramas y hietogramas:* Un hidrograma es la representación gráfica del agua en una cuenca o arroyo (en este caso cuenca) a lo largo del tiempo, mientras que un hietograma muestra la distribución temporal de la lluvia. Estos elementos son esenciales para poder comprender cómo las precipitaciones se convierten en escorrentía y pueden ayudar a predecir inundaciones y gestionar los recursos hídricos.
- 2 *Simulaciones en ArcGIS e IBER:* Utilizar herramientas de software como ArcGIS para simular eventos de lluvia permite modelar y evaluar escenarios hidrológicos en la región. Esto ayudará a visualizar cómo los cambios en el uso de la tierra o las prácticas de gestión del agua pueden afectar la hidrología local. Las propuestas hechas en el

- 3 Contexto Hidrológico se podrán modelar en ArcGIS para poder ver si cumplen con los objetivos deseados.
- 4 *Mejora de la gestión del agua y prevención de inundaciones:* Al comprender mejor la hidrología de San Juan de Abajo, se podrán desarrollar propuestas y estrategias que ayuden a gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente y reducir el riesgo de inundaciones. Esto es fundamental para la seguridad y el bienestar de la comunidad.

2.5.1 Definición del área de estudio

El área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo) fue definida a partir de la microcuenca del Río Huichichila/Huastitán, en la que se tomó como punto de desfogue la desembocadura de dicho río sobre el río Ameca. No obstante, con la finalidad de también considerar la desembocadura del segundo de los escurrimientos de la zona se amplió el área de estudio en la parte sur de la microcuenca más allá del punto de desfogue establecido inicialmente (Figura 1). La microcuenca de estudio cuenta con una extensión de 6,804.24 ha, dentro de las cuales es posible encontrar una única localidad urbana, San Juan de Abajo.



Figura 1. Área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo).

En la Figura 1, se presentan los órdenes de las corrientes superficiales. De esta figura es posible observar que el cauce de mayor orden y con mayor relevancia dentro de la microcuenca de

estudio corresponde al Río Huichichila, dado que éste cruza la microcuenca desde la parte alta hasta la parte baja. No obstante, al noreste de la microcuenca es posible observar otro cauce relevante que drena la sección noreste de la microcuenca y que finalmente se une con el Río Huichichila previo a su descarga en el Río Ameca.

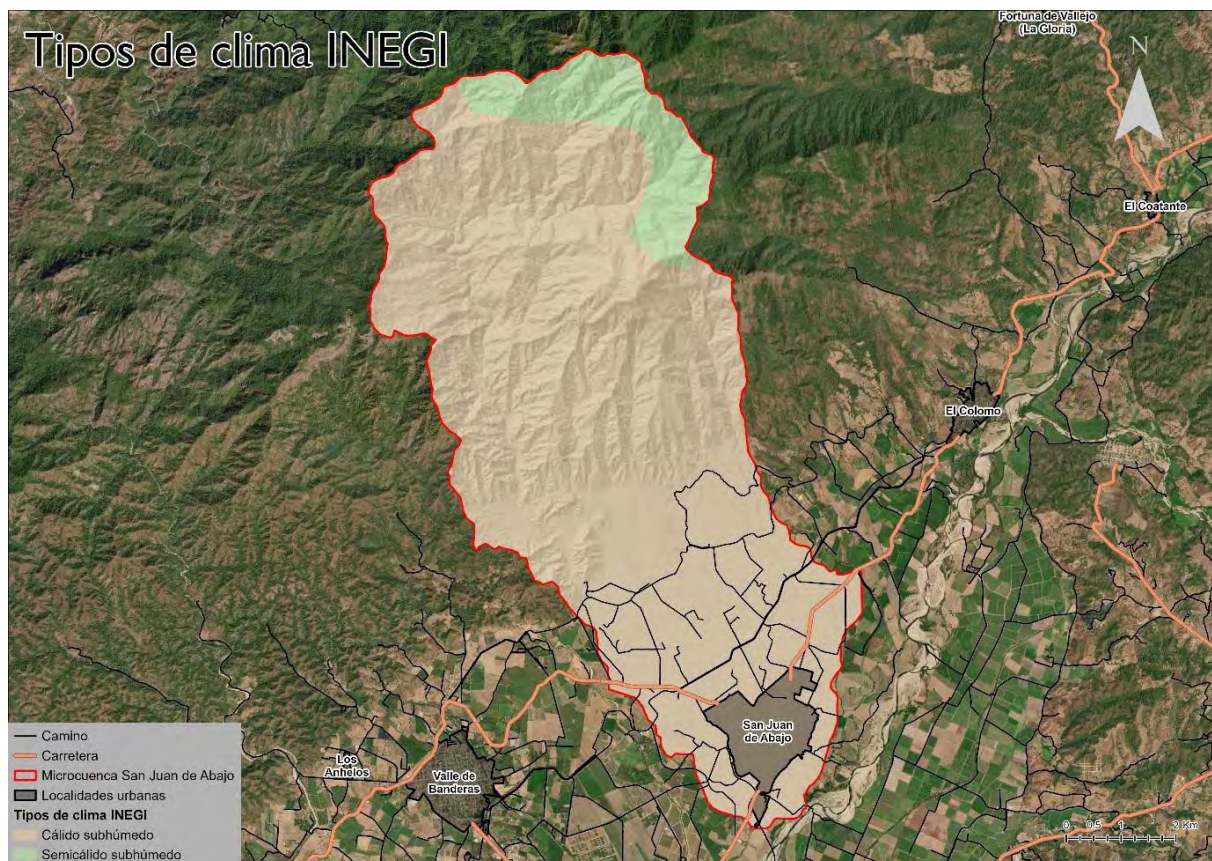


Figura 2. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).

Al analizar los tipos de clima presentados por el INEGI a escala 1:250,000 es posible observar que dentro del área de estudio se registran dos tipos de clima principalmente; al norte se tienen climas semicálidos subhúmedos, mientras que al sur se registran climas cálidos subhúmedos (Geografía INEGI, 2005).

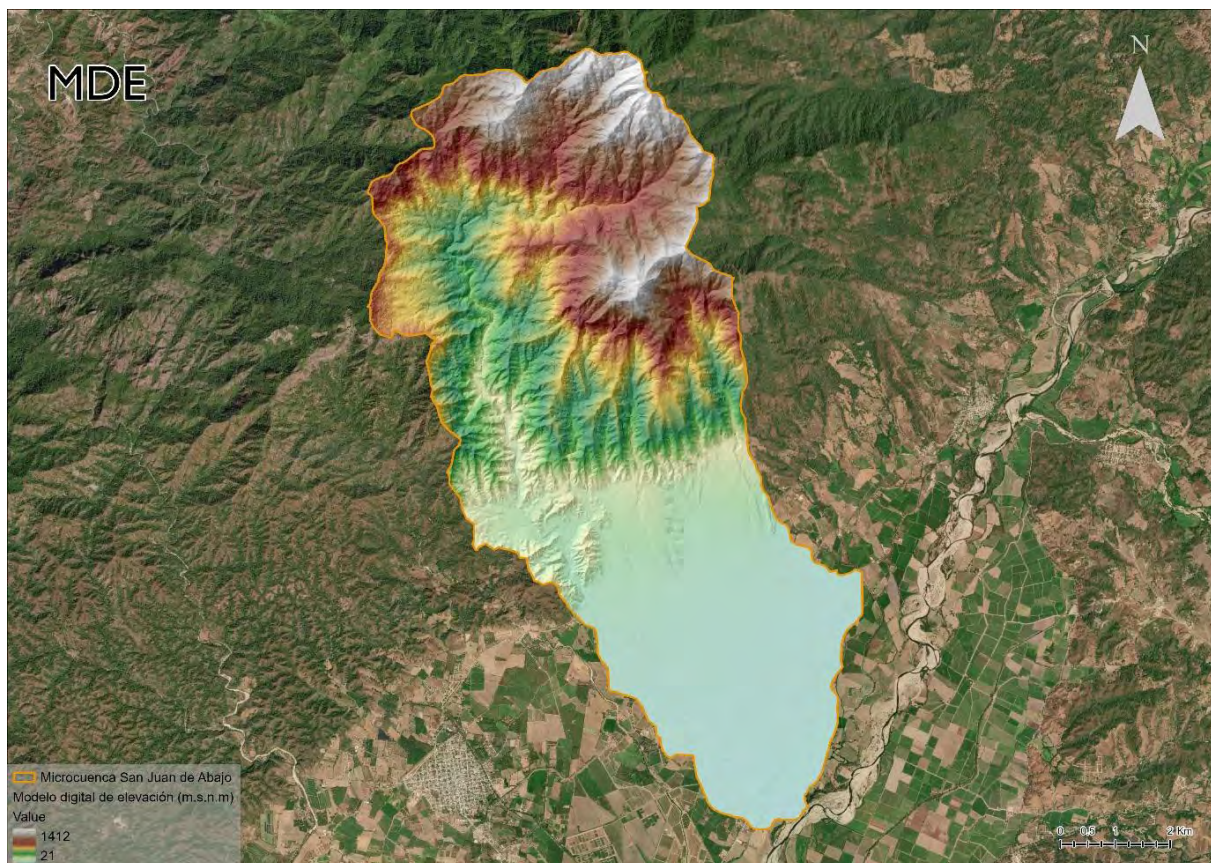


Figura 3. Modelo digital de elevación (Geografía INEGI, 2014).

Por otro lado, al analizar la orografía de la zona a partir de la información presentada por el INEGI a escala 1:10,000 (Figura 1), es posible identificar dos zonas principales dentro del área de estudio. La primera de las zonas, ubicada al noroeste de la cuenca (parte alta) se tiene una topografía accidentada al contar con cambios abruptos en la elevación del terreno y donde se tienen pendientes pronunciadas. Por otro lado, en la parte baja de la cuenca ubicada al sureste del área de estudio, se cuenta con una topografía plana con pendientes bajas (Geografía INEGI, 2014).

5.2.2. Recopilación y preparación de datos

Para llevar a cabo el análisis hidrológico de la microcuenca de estudio fue necesario recabar y generar información como lo es: la topología, los usos del suelo, la edafología, el número de curva del SCS, la rugosidad del suelo, la lluvia de diseño para la zona de estudio y los puentes y presas presentes en la zona.

5.2.2.1 Topografía

El modelo topográfico del área de estudio fue obtenido a partir de la información presentada por el INEGI a escala 1:10,000 a través de la plataforma Espacio y datos de México. De dicha

plataforma fue posible obtener tanto el modelo digital de elevación tipo terreno, como el modelo digital tipo superficie. No obstante, la información disponible a través de esta plataforma se encuentra seccionada para el área de estudio, por lo que fue necesario obtener la información de las cartas F13C59A3, F13C59A4, F13C59D2, F13C59E1 y F13C59E3.

Una vez obtenida la información de las cartas topográficas esta fue procesada mediante la herramienta de sistemas de información geográfica ArcGIS pro, donde se llevó a cabo un mosaico de la información ráster presentada en las cartas topográficas con la finalidad de unificar la información de cada una de las capas en un ráster general para el área de estudio. Finalmente, se aplicó la herramienta “Extract by mask” de ArcGIS pro para realizar un recorte del mosaico generado a únicamente el área de estudio (Figura 1).

5.2.2.2 Usos del suelo

Para determinar los usos de suelo de la zona se llevó a cabo un análisis de la información presentada por el INEGI a escala 1:20,000 de las cartas F13C59a, F13C59b, F13C59d, F13C59e y se seleccionaron los datos correspondientes a las vialidades, caminos, carreteras, canales y manzanas, presentes en la zona de estudio. Al igual que en el caso anterior se utilizó ArcGIS pro para realizar el procesamiento de la información.

En primera instancia, con ayuda de la información concerniente a las manzanas y las vialidades se trazaron las calles y la zona urbana. No obstante, se observó que existe un desfase entre la información presentada por el INEGI y la información presentada en el “Base map” de ArcGIS pro, por lo que se llevó una corrección de la información antes planteada mediante fotointerpretación ajustando en la medida la información presentada por INEGI para que ésta correspondiera a la presentada por ArcGIS pro.

Posteriormente, se realizó un análisis de la información correspondiente a los caminos, carreteras y canales, donde se realizó un “Buffer” a la información de tipo línea. Para asignar el tamaño del “Buffer” a generar para cada entidad tipo línea, se utilizó el “Base map” de ArcGIS pro y se midieron la longitud típica de cada una de dichas entidades presentes en la zona.

Una vez realizados los análisis antes descritos, se unió la información generada en cada uno de ellos, con la finalidad de obtener una capa que condensara los polígonos de las manzanas, vialidades, caminos, carreteras y canales del área de estudio.

Por otro lado, para clasificar los usos de suelo fuera de la parte urbana se descargó una imagen satelital multiespectral, de resolución 3.7m/píxel, de la plataforma Planet; correspondiente al

29 de abril de 2023 y se realizó una clasificación supervisada. Para este proceso se definió un esquema de clasificación en el que se incluyeron las clases: agricultura activa (agricultura de riego), agricultura pasiva (agricultura de temporal), vegetación cerrada, vegetación abierta, vegetación dispersa, desprovisto de vegetación y urbano. Con ayuda de índices espectrales se asignaron entrenamientos a cada una de las clases de clasificación y se utilizó el algoritmo “Support Vector Machine” para realizar la clasificación.

Finalmente, se transformó la información generada mediante la clasificación supervisada a información tipo polígono y se unió dicha información a los polígonos de las manzanas, vialidades, caminos, carreteras y canales en el área de estudio dando como resultado los usos de suelo presentados en la (Figura 4).

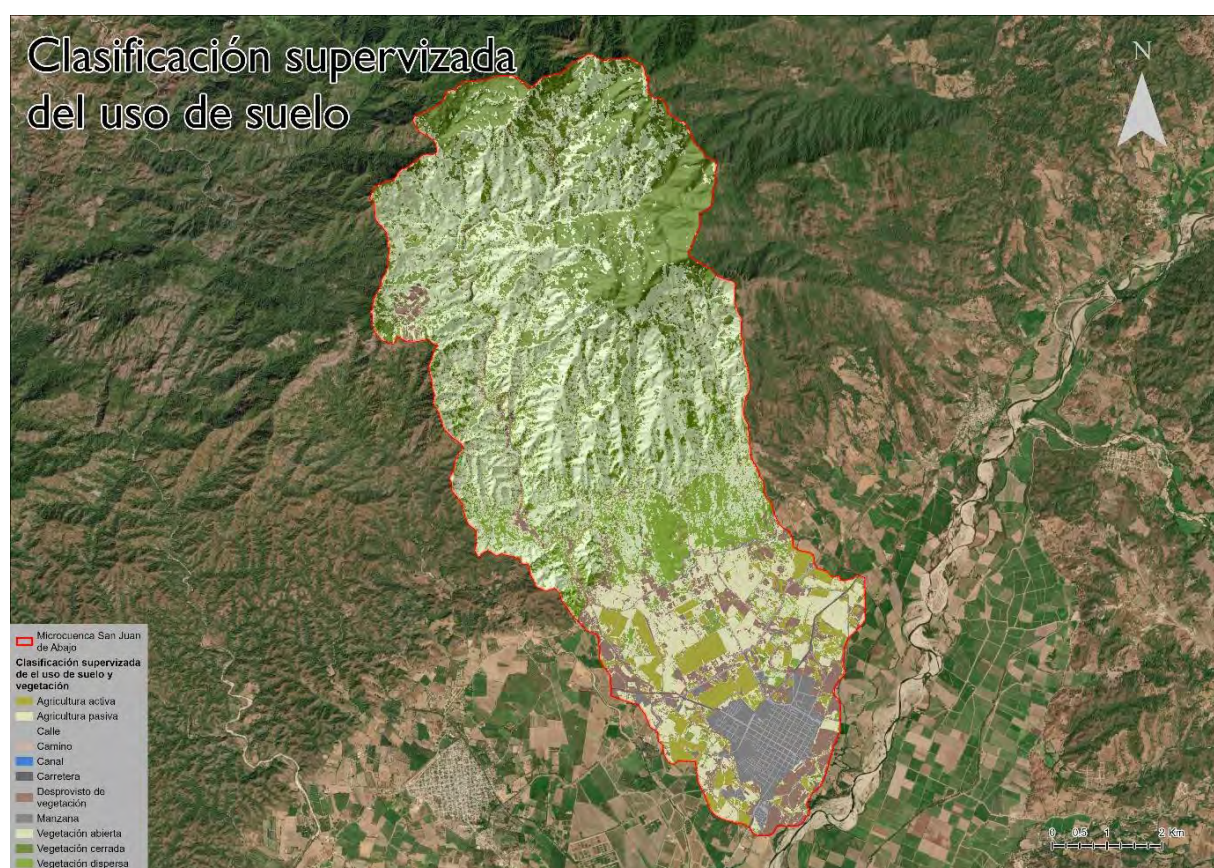


Figura 4. Clasificación supervisada de la vegetación.

5.2.2.3 Litología y edafología

Para determinar la litología presente en la zona, se consultó la información presentada por el INEGI a escala 1:250,000, en la que se presenta la carta litológica a nivel nacional en formato shapefile. Para acotar la capa de litología nacional a nivel área de estudio se utilizó la herramienta “Clip”, la cual realiza un corte en un archivo vectorial a partir de los límites de

otro archivo vectorial. La capa resultante de la herramienta “Clip” conserva los atributos de la capa original para todos los archivos vectoriales que dentro de los límites de corte (Figura 5). Además de la información presentada en la Figura 5, se consultaron las cartas geológica y edafológica elaboradas por el INEGI a escala 1:20,000 para la zona de san juan de abajo. Dicha información es presentada en los Anexos 1 y 2 con la finalidad de no perder resolución en la información (Geografía INEGI, 2005).

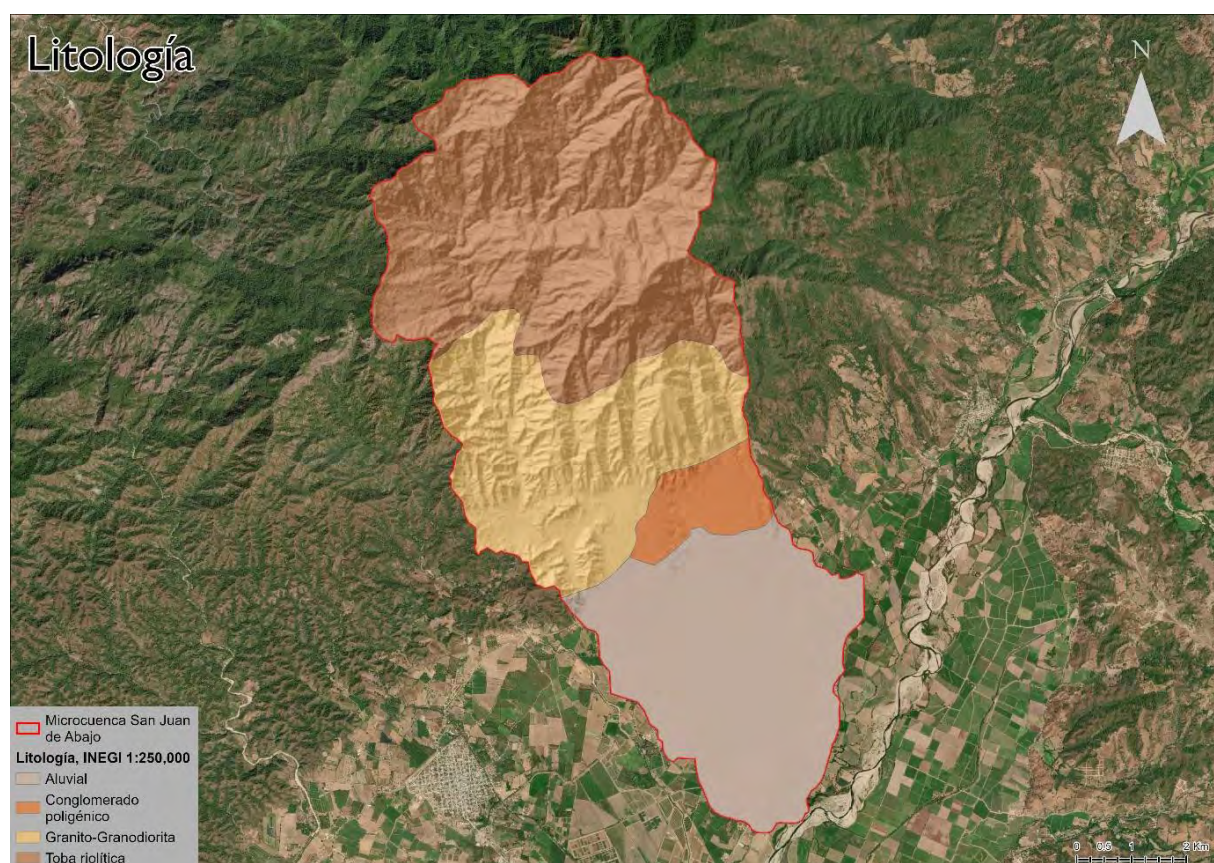


Figura 5. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

5.2.3 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio

Para la recopilación de información sobre los puentes fue necesario ir al sitio y medir cada uno de ellos con un longimetro de 30m. La ubicación de los puentes fue conseguida vía satélite con la utilización de Google Earth y un vehículo facilitó la llegada a cada uno de ellos. La mayoría de los puentes se encuentran dentro de San Juan de Abajo mientras que aguas arriba se encuentra uno muy largo y que al mismo tiempo ejerce la función de presa. Este último tenía una altura de tan solo 1.36m, pero una longitud de 36 metros. Se midió una cantidad total de ocho puentes, no todos cruzando sobre el Huichichila, sino que en varios casos cruzaban otro arroyo que circunda la periferia de San Juan. Para medir la longitud del puente un individuo se paraba en un extremo del puente, mientras que otro se llevaba la cinta del longimetro hasta el otro. Para la medición de la altura de los puentes se buscaba el punto más bajo y se aventaba la

cinta hasta que tocara el agua. Se tomaba como referencia el lecho bajo de la losa de cada puente como altura total. En los anexos el lector podrá ver con mayor facilidad el mapeo de los puentes y sus respectivas dimensiones.

5.2.4 Información meteorológica

Para llevar a cabo el proceso de simulación en IBER, fue necesario la generación de una tormenta de diseño para el área de estudio. Al no contar con información de referencia de tormentas de diseño para la zona, fue necesaria la generación de una tormenta propia. Para llevar a cabo este proceso se consultó la información presentada por la CONAGUA en sus estaciones meteorológicas. Las estaciones meteorológicas utilizadas para llevar a cabo el análisis de la precipitación fueron: San José del Valle (18030), La Desembocada (14081) y Las Gaviotas (18021); de las cuales se obtuvieron sus variables normales para el periodo 1981 - 2010 (CONAGUA, 2023).

A partir de la información presentada en las estaciones meteorológicas de la CONAGUA, fue posible determinar la precipitación máxima registrada por estación para el periodo de análisis. Posteriormente, se llevó a cabo una interpolación mediante el método IWD, con la cual fue posible determinar el comportamiento esperado para la precipitación en el área de estudio y determinar una precipitación máxima promedio para ésta.

Posteriormente, se definió la duración promedio de una tormenta con la mayor intensidad. Para llevar a cabo este proceso se consultó información meteorológica de la plataforma Weatherlink, de las estaciones Acuarela, Las Palmas y Vidanta, las cuales contienen registros con una resolución temporal entre los 10 y 15 minutos. El proceso de selección de las estaciones antes mencionadas consistió en identificar cuáles de las estaciones disponibles se encontraba a una menor distancia del área de estudio y además contenía la mayor cantidad de información histórica posible (Davis Instruments, 2023).

Una vez seleccionadas obtenidas las bases de datos para cada una de las estaciones meteorológicas, se llevó a cabo la clasificación de las tormentas, a partir de la programación de un código en el lenguaje Python (Anexo #). El código realizado tiene la función de iterar sobre cada elemento de la base de datos, identificando valores diferentes a cero y agrupándolos cuando estos sean consecutivos temporalmente. Posteriormente, se realizó una clasificación de las tormentas encontradas para cada una de las estaciones con intervalos a cada hora e identificando la precipitación máxima registrada para cada uno de los intervalos. Seguido, se determinó la intensidad máxima de lluvia para cada intervalo al dividir la precipitación máxima entre el límite superior del intervalo. Finalmente, se definió la duración del evento de lluvia

con mayor intensidad, correspondiente a 3 horas, mediante el análisis de las lluvias con mayor ocurrencia e intensidad dentro de los rangos establecidos.

Descripción de la generación de la tormenta de diseño

Para consultar los hietogramas establecidos para cada periodo de retorno consultar el **Anexo #**

1 Rugosidad del suelo

2 Numero de curva

5.2.5 Parametrización del modelo

El modelo hidrológico seleccionado para llevar a cabo la simulación conjunta toda la información recopilada, con el objetivo de emular las condiciones naturales del área de estudio que influyen en los flujos de agua superficial y determinar cuál será su comportamiento ante un evento de lluvia esperado en un determinado periodo de retorno.

Para llevar a cabo la parametrización del modelo hidrológico seleccionado se comenzó por generar una malla a partir del modelo digital de superficie en el área de estudio, la cual funcionaría como unidad de cálculo del modelo hidrológico. No obstante, con la finalidad de evitar la generación de una malla a la cual no fuera posible asignar atributos, dado que los demás atributos de la malla se encuentran definidos únicamente al área de estudio, se realizó un recorte de 8 metros al modelo digital de elevación tipo superficie a partir de los límites del área de estudio, mediante la herramienta buffer de ArcGIS pro.

Esta malla fue generada de manera automática con una tolerancia de 0.6 metros, un tamaño de celda mínimo de 1 metro y un tamaño de celda máximo de 100 metros; los tamaños de celda más pequeños eran generados en las zonas más accidentadas topográficamente, mientras que las celdas de mayor tamaño eran generadas en zonas planas. Este comportamiento de la generación de la malla busca optimizar el procesamiento del modelo generando más detalle en las zonas que así lo requieren y disminuyendo la resolución de cálculo en las zonas que se espera compartan las mismas características.

Posteriormente, se definieron las condiciones del contorno y condiciones iniciales del modelo, donde las primeras corresponden a las salidas de agua del sistema, ubicadas en la parte baja de la cuenca, mientras que las segundas corresponden a la altura inicial del agua en la simulación.

Las condiciones del contorno del sistema fueron asignadas según la revisión de los flujos de agua superficiales presentes en la zona de estudio y mediante el trabajo en campo. Por otro lado, las condiciones iniciales del sistema fueron asignadas según el escenario en el cual la cuenca no contiene agua al inicio de la simulación.

Como paso siguiente, se llevó a cabo la asignación del número de curva y la rugosidad al modelo. Este procedimiento se realizó, asignando a cada uno de los usos del suelo, establecidos mediante la clasificación espectral de la vegetación, su rugosidad y número de curva de la SCS correspondiente, mediante el software ArcGIS pro. Estos números de curva y rugosidades fueron asignados de manera automática en el software IBER a partir de archivos ASCII. Cabe aclarar que, para la asignación de la rugosidad, además fue necesario generar un archivo CSV en el que se correlaciona cada rugosidad creada con la numeración asignada a cada tipo de suelo, colocando dicho archivo en la misma carpeta en el ordenador que el archivo ASCII generado. Para consultar el archivo CSV generado revisar el **Anexo 3**.

El siguiente proceso realizado, para llevar a cabo la parametrización del modelo, fue la asignación de las estructuras (puentes y presas). Este proceso fue realizado de manera manual en el software IBER colocando cada uno de los puentes como alcantarillas. Este proceso consistía en generar una línea perpendicular a la estructura en dirección al cauce donde se encuentran instalados y asignar los atributos de las dimensiones registradas en campo.

Para la asignación de los hietogramas IBER, se realizó un proceso el cual consiste en dos pasos principalmente. En primera instancia se definieron dichos hietogramas en el sistema, relacionado la intensidad de lluvia con el tiempo transcurrido en segundos formando una gráfica, tal como se muestra en la Figura 6. Posterior a la definición de los hietogramas, se realizó la asignación de cada uno de estos a los elementos de la malla, según cada uno de los escenarios de simulación a modelar.

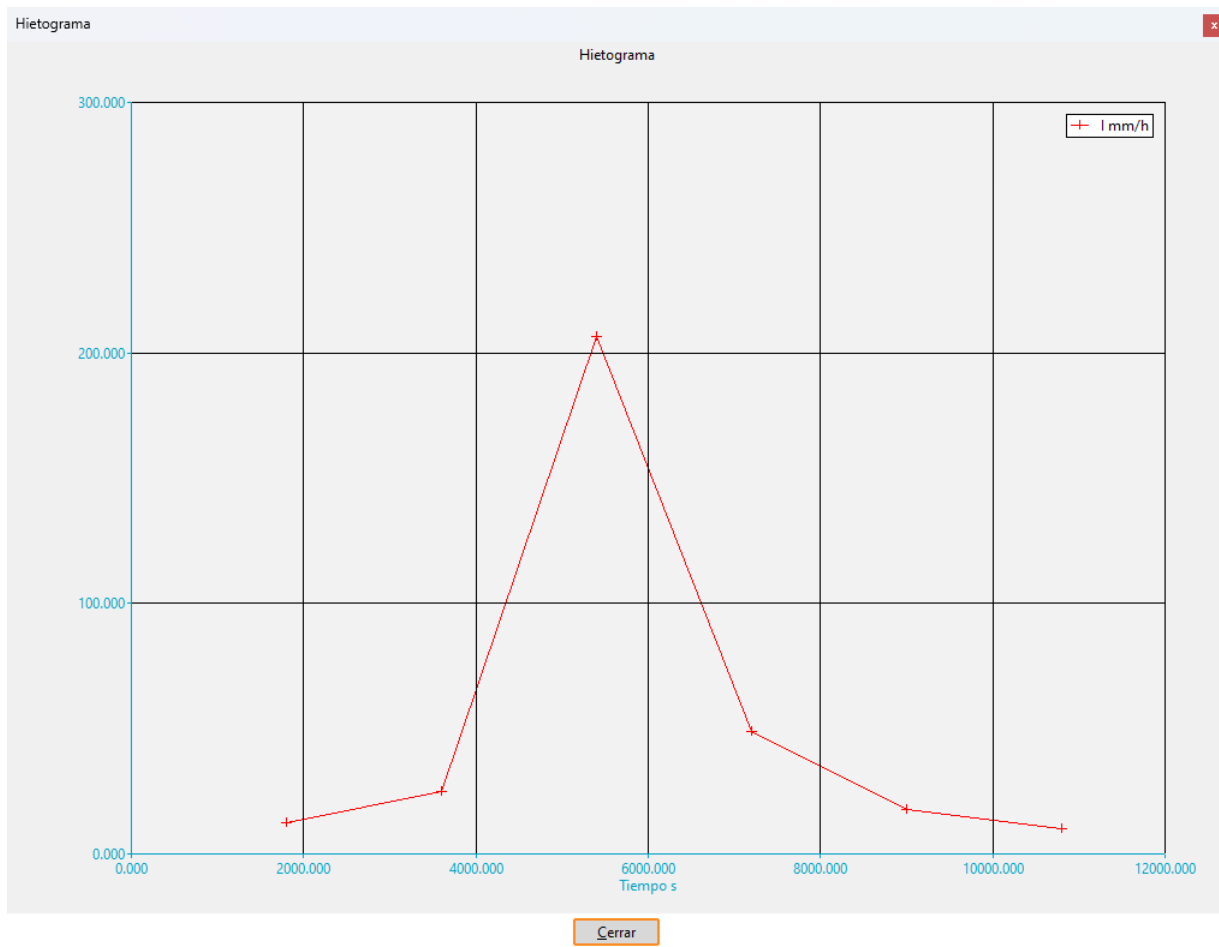


Figura 6. Ejemplo de definición de histograma en IBER.

Una vez establecido lo anterior, se llevó a cabo el cálculo del tiempo de retención hidráulica del modelo a partir del Plugin “Time of concentration and Lag Time” de QGIS. Esta herramienta aplica diferentes ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración hidráulica de la cuenca, a partir de datos establecidos por el usuario. En la Tabla I se presentan algunos de los parámetros necesario para el calculo de cada una de las ecuaciones empíricas utilizadas por el Plugin de QGIS (Maldonado, 2019).

Tabla I. Variables necesarias para el cálculo del tiempo de retención hidráulica por medio de cada ecuación empírica (Maldonado, 2019).

Ecuación para el cálculo del tiempo de concentración hidráulica	Ecuación	parámetros	Tiempo de concentración hidráulica (h)
Williams	$Tc = \frac{L * A^{0.4}}{D * S^{0.25}}$	- Área de la cuenca principal - Longitud del cauce principal - Pendiente promedio de la cuenca	4.7
Kirpich	$Tc = 0.06628 * \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}}\right)^{0.77}$		1.3
Clarck	$Tc = (0.335 * (A * \sqrt{S}))^{0.593}$		2.5
Temez	$Tc = 0.3 * \left(\frac{L}{S_0^{0.25}}\right)^{0.76}$		1.9
Pilgrim	$Tc = 0.76 * A^{0.38}$		3.8

Ecuación para el cálculo del tiempo de concentración hidráulica	Ecuación	parámetros	Tiempo de concentración hidráulica (h)
Valencia y Zuluaga	$T_c = 0.30 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75}$		2.6
Venturas - Heras	$T_c = 0.2426L * \left(\frac{1}{A^{0.1} S^{0.1}}\right)$		2.0
Bransby - Williams	$T_c = \frac{0.0136 * L^{0.8} * \left(\left(\frac{100}{CN} - 9\right)^{0.7}\right)}{S^{0.5}}$		2.4
SCS	$T_c = 0.87019 * \left(\frac{L}{C_{MAX} - C_{MIN}}\right)^{0.385}$	<ul style="list-style-type: none"> - Área de la cuenca - Longitud del cauce principal - Pendiente promedio de la cuenca - Número de curva 	4.1

A partir del máximo tiempo de concentración hidráulica establecido en la Tabla I (4.7 horas), se definió el tiempo de simulación, donde fueron asignadas dos horas extra a este tiempo máximo, con la finalidad de evitar la pérdida de resultados importantes. Por lo tanto, dentro de los datos del problema se definió como instante inicial de simulación el tiempo de 0 segundos, mientras que el tiempo final de simulación fue establecido como 25,600 segundos (7 horas), con un intervalo de resultados cada 300 segundos.

Finalmente, para llevar a cabo la parametrización de los modelos realizados con las estructuras de infiltración se establecieron estas, dada su naturaleza, como vertederos. Este proceso se realizó en el software IBER asignando a cada uno de los vertederos la cota a superar por el agua.

5.2.6 Escenarios de simulación

Las simulaciones llevadas a cabo tienen la finalidad generar información para analizar los comportamientos de los flujos de agua superficial en la zona de estudio. Para llevar a cabo este análisis se establecieron diferentes escenarios de simulación, determinando de esta manera el comportamiento de la cuenca ante diferentes eventos de lluvia. En la Tabla II se presenta un resumen de las simulaciones llevadas a cabo, así como el objetivo de cada una de ellas.

Tabla II. Resumen de escenarios de simulación realizados.

Escenario de simulación	Descripción de escenario	Objetivo(s)
Lluvia con periodo de retorno de 100 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 100 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Definir máximos calados esperados en la cuenca. Definir máxima peligrosidad en la mayor cantidad de área. Plantear áreas con potencial para urbanización. Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 50 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 50 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	- Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 20 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 20 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	- Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 10 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Definir máximo calado en escenario de simulación. Definir máxima peligrosidad en escenario de simulación. Definir máxima velocidad del agua en escenario de simulación. Generar un análisis comparativo entre los demás escenarios de simulación. Establecer la zona federal de la cuenca.

Lluvia con periodo de retorno de 5 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 5 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 2 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia con periodo de retorno de 2 años, generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas). Establecer el escenario de lluvia con mayor ocurrencia en la cuenca de San Juan de Abajo Definir máximo calado en escenario de simulación. Definir máxima peligrosidad en escenario de simulación.

Escenario de simulación	Descripción de escenario	Objetivo(s)
Lluvia con periodo de retorno de 10 años con estructuras propuestas	Modelación de las condiciones hidrológicas esperadas en la cuenca tras la instalación de las propuestas de intervención planteadas.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas). Determinar el calado máximo esperado tras la instalación de las propuestas de intervención. Determinar la velocidad máxima del agua esperada tras la instalación de las propuestas de intervención. Determinar la máxima peligrosidad del agua

		esperada tras la instalación de las propuestas de intervención.
--	--	---

5.2.7 Resultados y análisis

5.2.7.1 Escenario para lluvia con periodo de retorno de 100 años

En el primero de escenarios de simulación se analiza el comportamiento de la cuenca para la lluvia con periodo de retorno de 100 años. Este escenario al tener la tormenta con mayor periodo de retorno generada busca identificar la mayor cantidad de zonas vulnerables dentro de la cuenca al asignar el peor evento de lluvia. Por su contraparte, este escenario nos permite además identificar las zonas menos vulnerables de la cuenca para definir a su vez las áreas con mayor potencial para crecimiento urbano. En la Figura 7 y Figura 8, se presentan los resultados de máximo calado y máxima peligrosidad (según la ACA).

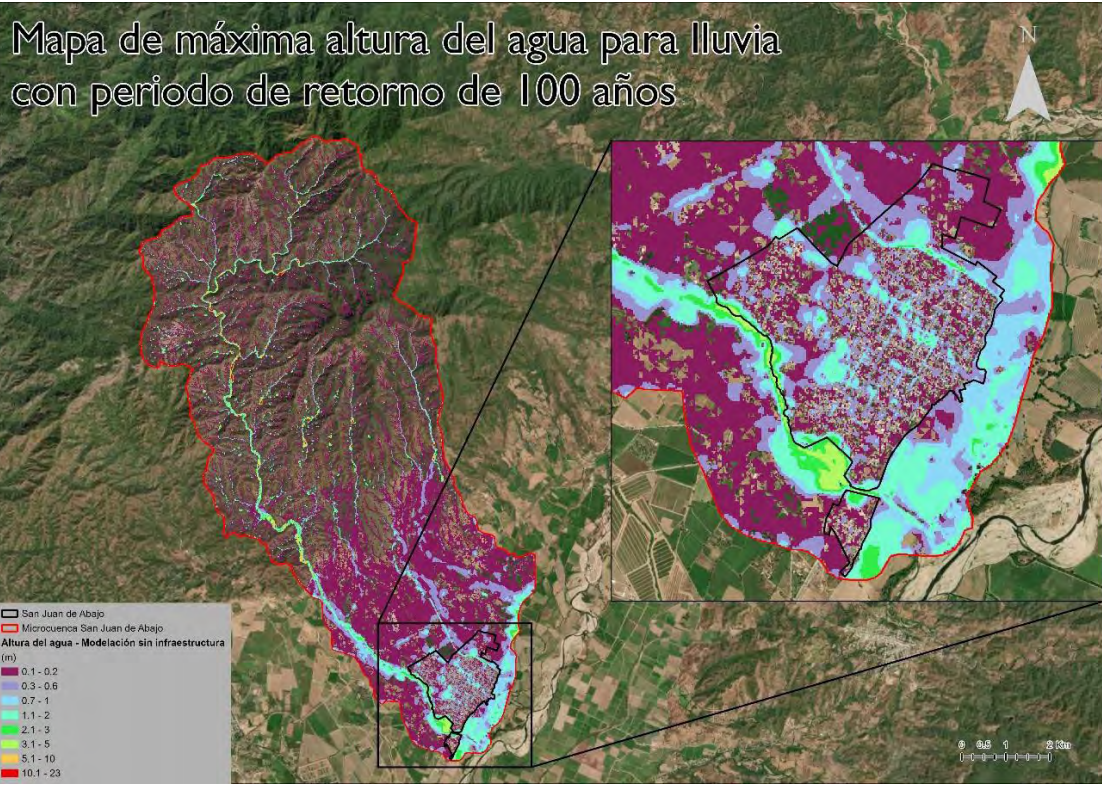


Figura 7. Máximo calado del agua - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 100 años.

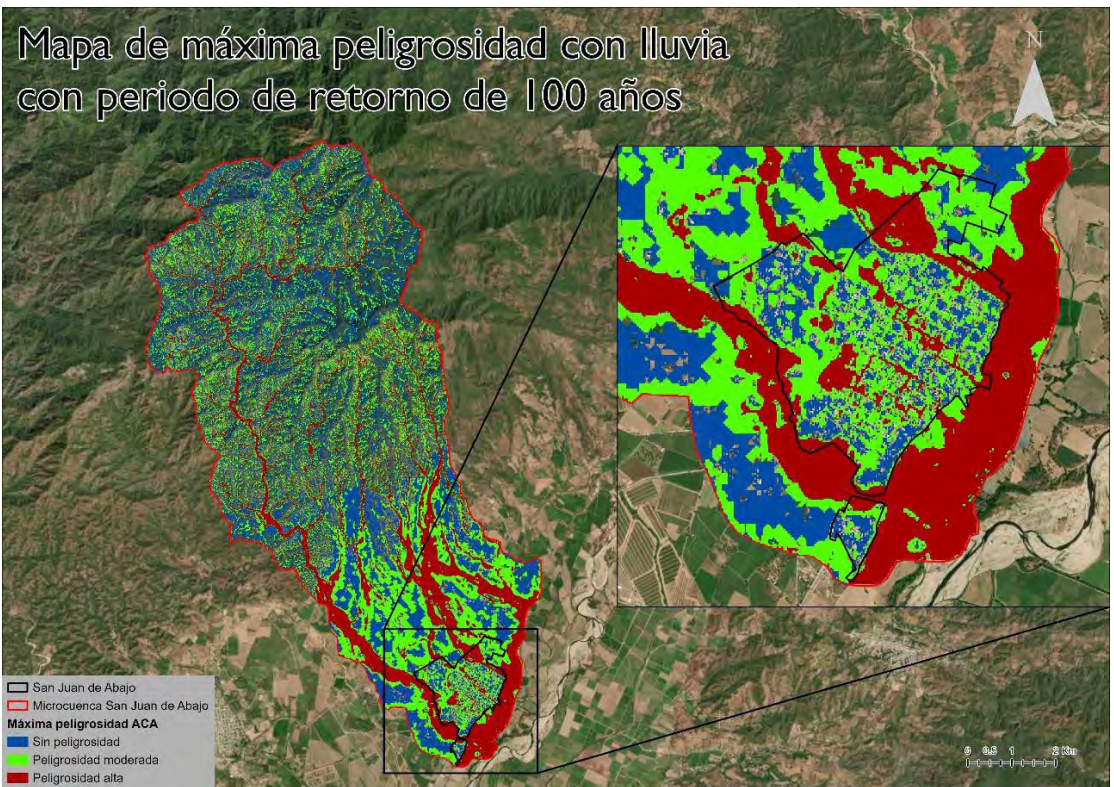


Figura 8. Máxima peligrosidad ACA - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 100 años.

De la Figura 7 es posible observar que el máximo calado del agua, para la parte baja de la cuenca, se encuentra en el cauce del río Huichichila con hasta entre 3 y 5 metros de altura. Por otro lado, también es posible observar dos franjas de inundación dentro del poblado de San

Juan de Abajo en dirección Noroeste -Sureste, con calados ubicados en el rango de 1.1 y 2 metros de altura. Mientras que, la Figura 8 es posible observar que, a los costados del Río Huichichila, El Canal y el Río Ameca, es posible identificar zonas con una peligrosidad alta, correspondientes a las zonas con mayor calado. Además, también es posible observar que, también las zonas de inundación dentro del poblado de San Juan de Abajo cuentan con una alta peligrosidad.

De la Figura 7 y Figura 8, también es posible identificar las zonas con potencial para la urbanización correspondientes a las zonas con una baja peligrosidad o con calados entre 0.1 y 0.2 metros.

No obstante, las zonas con una baja peligrosidad deberían ser consideradas como prioritarias para la urbanización, con respecto a las zonas con calados entre 0.1 y 0.2 metros.

5.2.7.2 Escenario de simulación para lluvia con periodo de retorno de 2 años.

Con la finalidad de llevar a cabo un análisis del impacto de un evento de lluvia con una alta ocurrencia en la zona, se planteó el análisis, por medio de la simulación en IBER, de un evento de lluvia con periodo de retorno de 2 años. Este análisis tiene la finalidad de identificar cuáles son las implicaciones hidrológicas en el área de estudio tras llevarse a cabo un evento de lluvia con alta ocurrencia. Los resultados de el máximo calado y la máxima peligrosidad para este escenario de simulación se presentan en la Figura 9 y Figura 10 respectivamente.

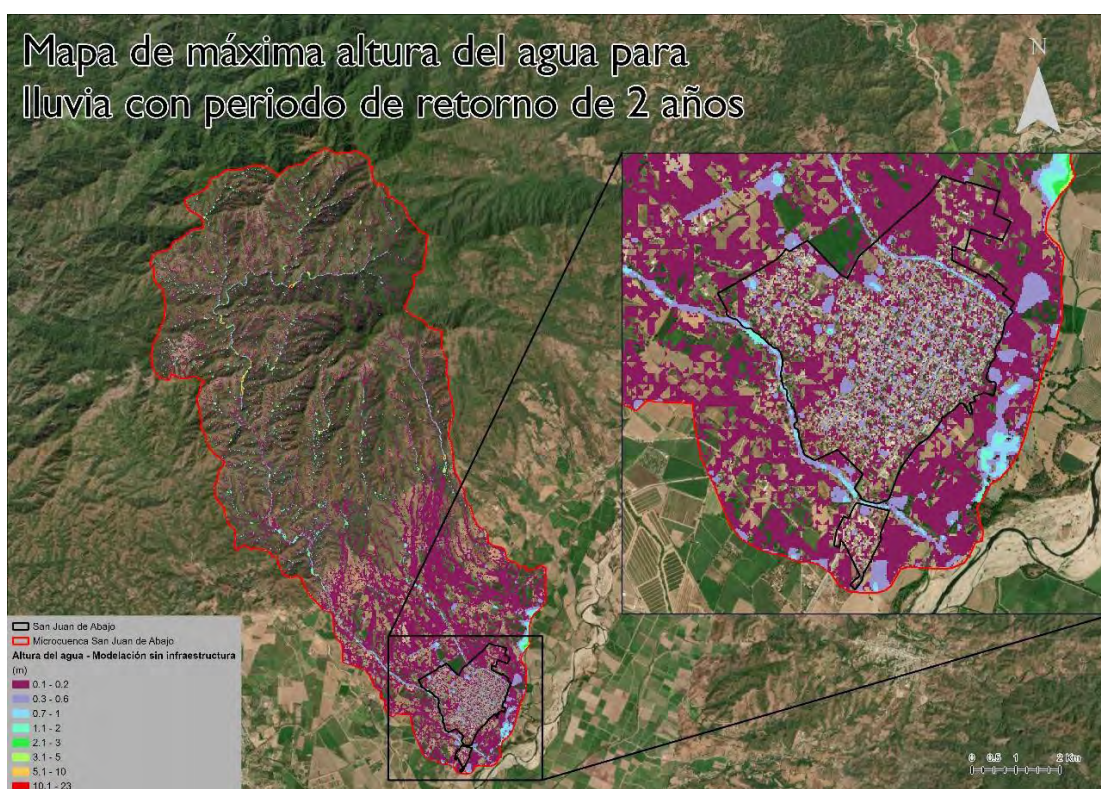


Figura 9. Máximo calado del agua - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 2 años.

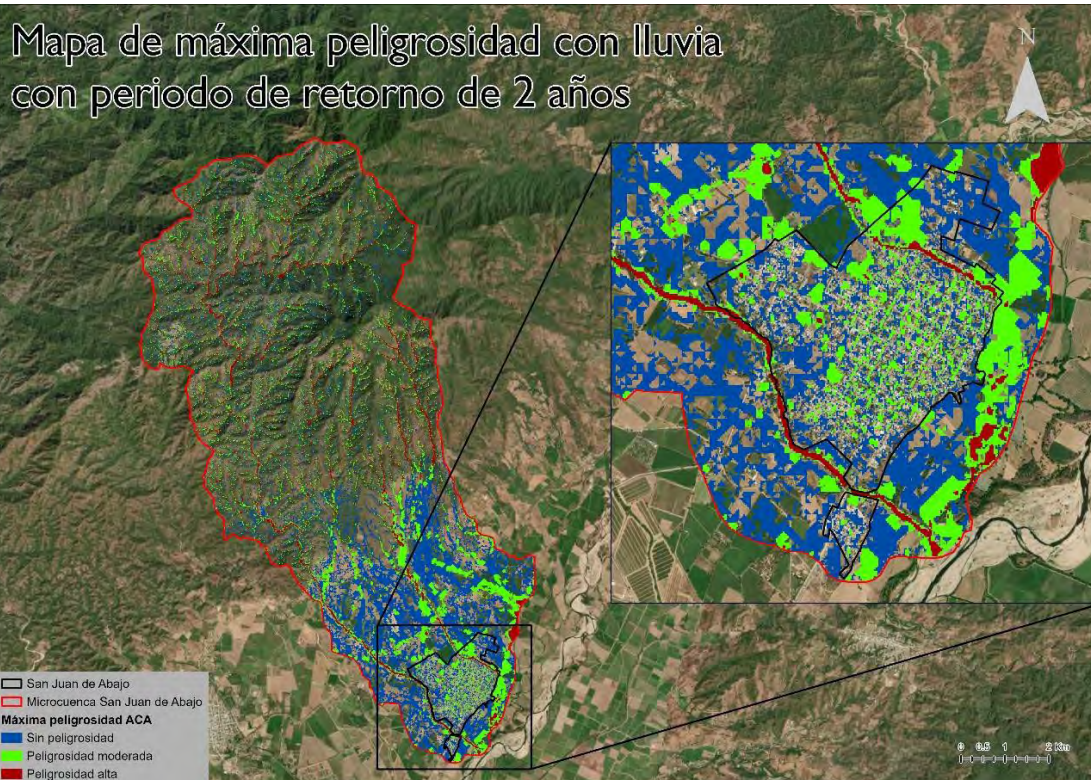


Figura 10. Máxima peligrosidad ACA - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 2 años.

Al analizar los resultados presentados en la Figura 9 es posible identificar una disminución considerable en el calado tanto del Río Huichichila como del Canal, con respecto a los resultados presentados para la lluvia con periodo de retorno de 100 años (Figura 7). Para este escenario de simulación, el calado para la parte baja de la cuenca está contenido en hasta 1 metro de altura, además de que no se cuenta con inundaciones considerables dentro del poblado de San Juan de Abajo.

Por otro lado, al analizar los resultados presentados en la Figura 10, es posible observar que las zonas de peligrosidad también han disminuido de una manera considerable, con respecto a los resultados presentados para la lluvia con periodo de retorno de 100 años (Figura 8); de manera que para el escenario de 2 años las zonas con peligrosidad alta se encuentran contenidas, en su mayoría, en los cauces de los escurrimientos del área de estudio. Al analizar de manera más detallada la información dentro del poblado de San Juan de Abajo, es posible observar que no existen zonas relevantes con peligrosidad alta.

5.2.7.3 Escenario de simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años.

En este escenario se analiza el comportamiento hidrológico de la cuenca para la lluvia con periodo de retorno de 10 años. Este escenario de simulación fue utilizado para la delimitación de la zona federal al no contar con un nivel de aguas máximas ordinarias establecido por “la comisión” o por el Organismo de cuenca, tomando lo estipulado en la Ley de Aguas Nacionales

(LAN), donde se menciona que para cauces con anchura no mayor a cinco metros el nivel del agua máxima ordinaria deberá calcularse a partir de la media de los gastos máximos anuales producidos en un periodo de 10 años. No obstante, cabe recalcar que el ancho de los cauces del Río Huichichilam, El Canal y el Río Ameca supera los 5 metros estipulados por la LAN (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2016).

Para llevar a cabo la delimitación de la zona federal se tomó el resultado del máximo calado y se exportó a ArcGIS pro en formato ASCII. Posteriormente se aplicó un preprocesamiento a la capa ráster exportada, en el que se descartaron todos los calados máximos menores a 10 cm, con la finalidad de obtener únicamente los calados máximos correspondientes a los flujos de agua superficiales. Como paso siguiente se llevó a cabo una conversión del ráster resultante del proceso anterior, a formato vectorial y se generó un buffer de 10 metros. Finalmente se realizó una selección por ubicación del buffer resultante con la capa de escurrimientos superficiales y se realizó una depuración de los polígonos correspondientes a canales de riego y a zonas de inundación dentro del poblado de San Juan de Abajo, dando como resultado el mapa de zona federal presentado en la Figura 11.

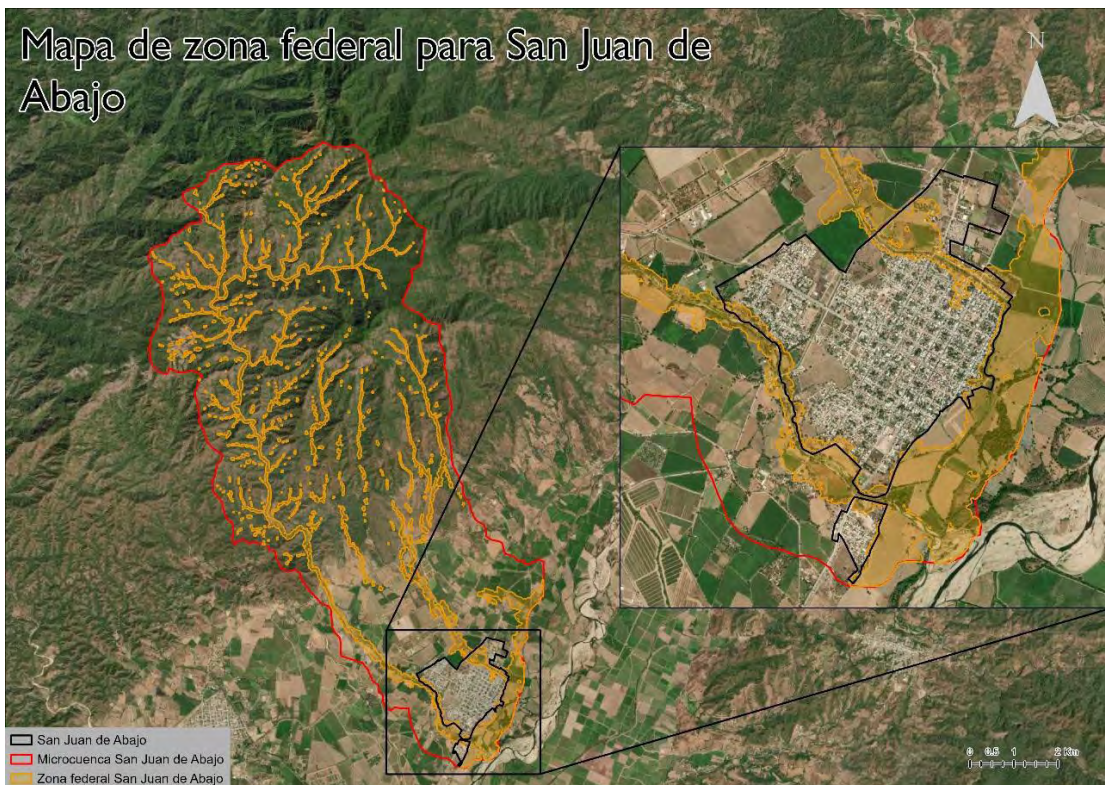


Figura 11. Mapa de zona federal para San Juan de Abajo.

Dentro de la simulación realizada también fue posible obtener el mapa de la máxima peligrosidad ACA, el máximo calado y la máxima velocidad del agua los cuales se presentan en la Figura 12, Figura 13 y Figura 14.

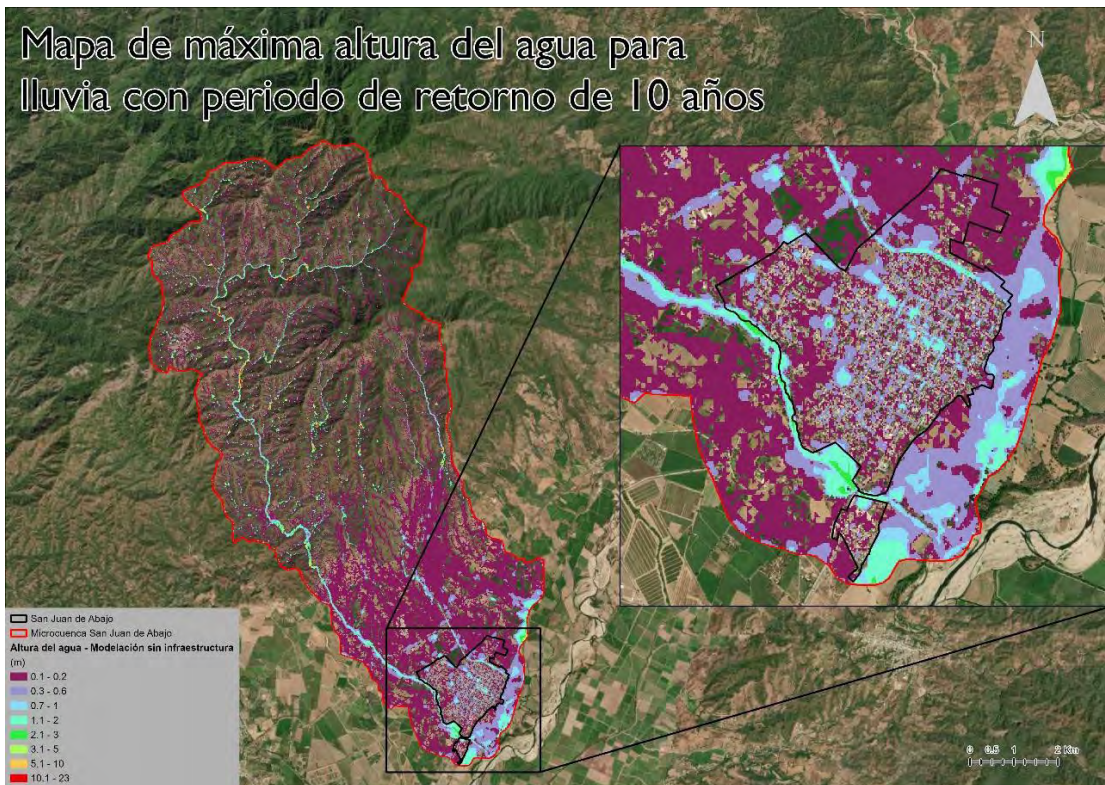


Figura 12. Máximo calado del agua - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años.

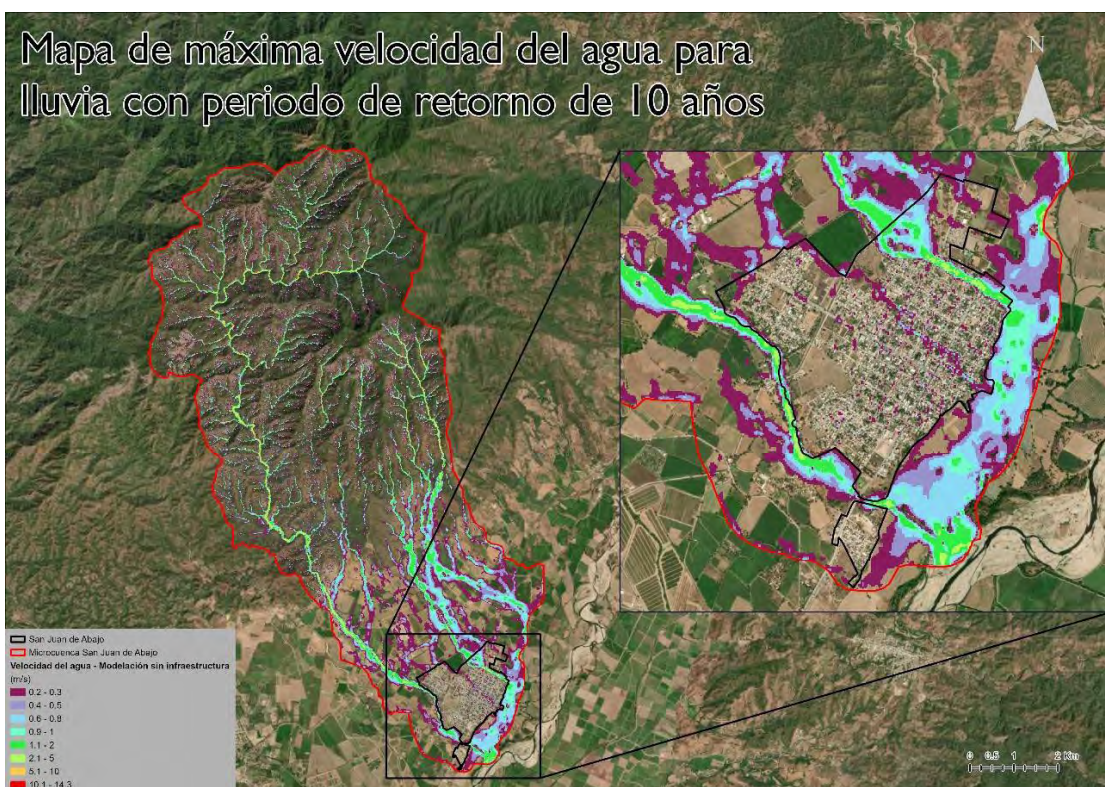


Figura 13. Máxima velocidad del agua - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años.

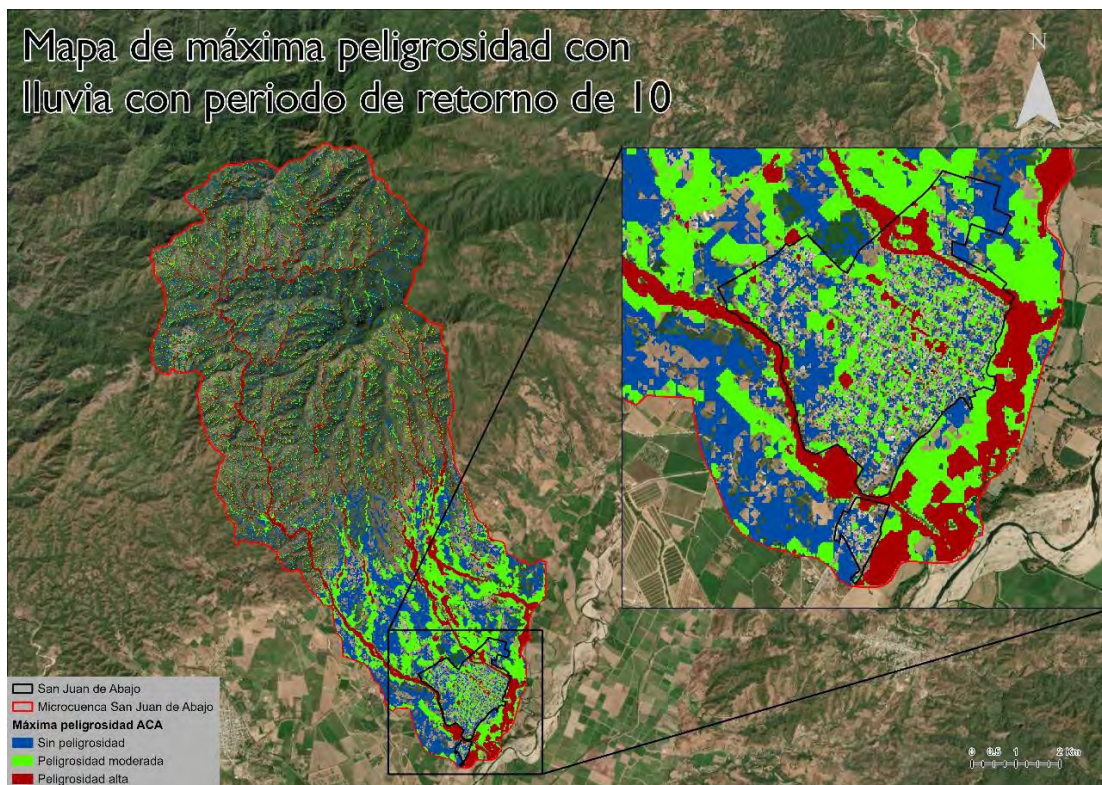


Figura 14. Máxima peligrosidad ACA - Simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años.

A partir de los resultados presentados en la Figura 12 es posible observar como el calado máximo para la lluvia con periodo de retorno de 10 años, sigue un comportamiento similar al presentado en la Figura 7 correspondiente al calado máximo para la lluvia con periodo de retorno de 100 años, donde es posible observar algunas zonas de inundación, en la parte baja de la cuenca, a los costados de el Río Huichichila, El Canal y el Río Ameca. Estas zonas pueden alcanzar calados de hasta 3 metros de altura. Al analizar el calado máximo dentro del poblado de San Juan de Abajo, es posible observar que, de las 2 franjas identificadas en la simulación de la lluvia con periodo de retorno de 100 años, únicamente la ubicada al norte del poblado también se presenta en la simulación presentada en la Figura 12; por lo que la atención a esta zona deberá ser prioritaria con respecto a las inundaciones de la franja sur.

Del mapa de máxima velocidad del agua presentado en la Figura 13, es posible observar un comportamiento similar los resultados de máximo calado para la presente simulación. Donde las mayores velocidades del agua son ubicadas en los cauces principales de la cuenca. Además, dentro del poblado de San Juan de Abajo, también se sigue la misma tendencia antes mencionada, en la que se identifica la franja de inundación norte como área prioritaria para la implementación de medidas de mitigación. Así mismo, dado que el mapa de máxima peligrosidad ACA presentado en la Figura 14, surge de la relación entre el calado y velocidad del agua, este sigue la misma tendencia que los dos mapas previos (Figura 12 y Figura 13).

5.2.7.4 Comparativa entre resultados obtenidos para lluvias con periodos de retorno de 100, 50, 20, 10, 5 y 2 años.

Dado que el escenario de simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años es el utilizado como referencia en la LAN para la definición de la zona federal, este escenario también fue utilizado como punto de referencia para las demás simulaciones realizadas. Para llevar a cabo el análisis comparativo entre las simulaciones realizadas se obtuvo la descarga en la parte baja de la cuenca, tanto para el Río Huichichila como para el canal obteniendo los resultados presentados en la Figura 15.

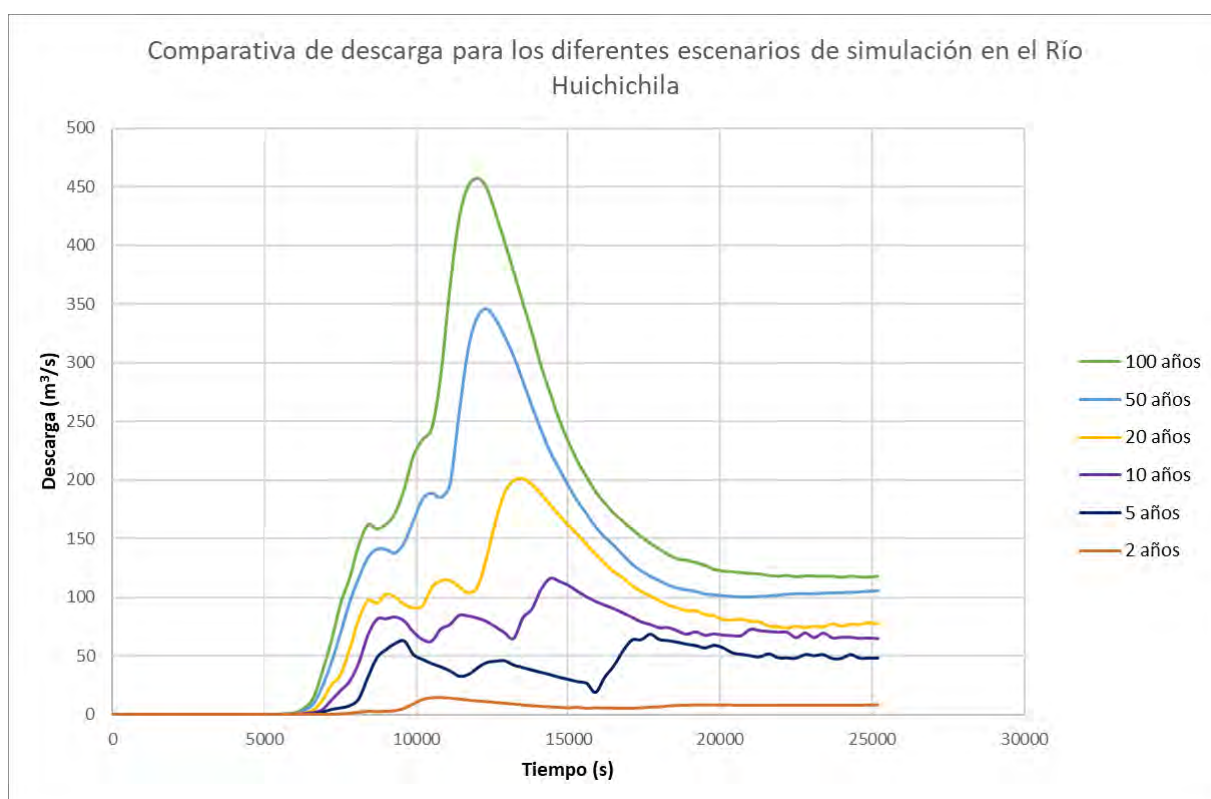


Figura 15. Gráfico de comparativa de descarga para los diferentes escenarios de simulación del Río Huichichila.

De los resultados presentados en la Figura 15 es posible observar como a mayor periodo de retorno el caudal de descarga aumenta, donde para 20, 50 y 100 años el comportamiento de la curva es similar entre sí, y para 5 y 10 años el comportamiento es similar entre sí. Por otro lado, la curva presentada para el periodo de retorno de 2 años no sigue un comportamiento similar a las anteriores.

1.1 Escenario de simulación para lluvia con periodo de retorno de 10 años, con infraestructura propuesta.

5.2.8 Validación y sensibilidad

Una de las formas de validar los resultados es la comparación de éstos con lluvias que han sucedido en el pasado. Si se remite a los resultados presentados en la sección 8 del presente documento, se puede notar que las lluvias tienen un calado máximo en la zona inferior de la cuenca, que es donde el área de estudio coincide con el Río Ameca. En el 2015 se tiene registro de una tormenta de intensidad tal que generó el desalojamiento de más de doscientas personas, debido al desbordamiento de dicho río (Hernández, 2015). Es el último desbordamiento del que se tiene datos, pero este afirma que la inundación de la cuenca se lleva a cabo en la zona inferior cercana a los cuerpos de agua superficiales.

A su vez, el modelo toma en cuenta los escenarios de precipitación extrema que puede generar consecuencias semejantes en los otros ríos y cuerpos de agua superficiales que se encuentran en el área de estudio.

Otra de las actividades realizadas para llevar a cabo la validación del modelo fue la validación en campo, en la que se presentaron los resultados a los habitantes del poblado de San Juan de Abajo buscando obtener una retroalimentación de su parte. A partir de la charla con los pobladores se pudo identificar que las zonas de inundación corresponden a las observadas de manera empírica.

No obstante, para llevar a cabo una validación con mayor rigor técnico es necesario instalar estaciones meteorológicas y de monitoreo en la zona de estudio con las cuales se pueda llevar a cabo una calibración constante del modelo y se generen datos cada vez más cercanos al comportamiento hidrológico de la zona.

5.2.9 Discusión y recomendaciones

Para futuras simulaciones se recomienda tener en cuenta que los datos presentados en el presente documento fueron obtenidos en su mayoría en gabinete, por lo que llevar a cabo trabajo en campo con la finalidad de obtener información que ayude a calibrar el modelo es de suma importancia. Por otro lado, también es necesario fundamentar de una mejor manera las propuestas estructurales planteadas como áreas de intervención, esto con la finalidad de evaluar su viabilidad e impacto en las inundaciones de la zona.

En futuras simulaciones también se sugiere el planteamiento de un mayor número de escenario, de tal manera que se consideren factores como el impacto de el aumento en el nivel del Río Ameca en el comportamiento de los escurrimientos hidrológicos en la zona, el planteamiento de el crecimiento del poblado de San Juan de Abajo, el planteamiento de una posible

deforestación en la parte alta de la cuenca, entre otros. Todos estos escenarios de simulación ayudaran a tener mayor información para la toma de decisiones.

5.2.10 Anexos

Los anexos 1 y 2 se adjuntan como entregables en formato PDF con la finalidad de evitar pérdidas en la calidad de la información presentada en éstos.

5.3 Propuestas constructivas San Juan de Abajo

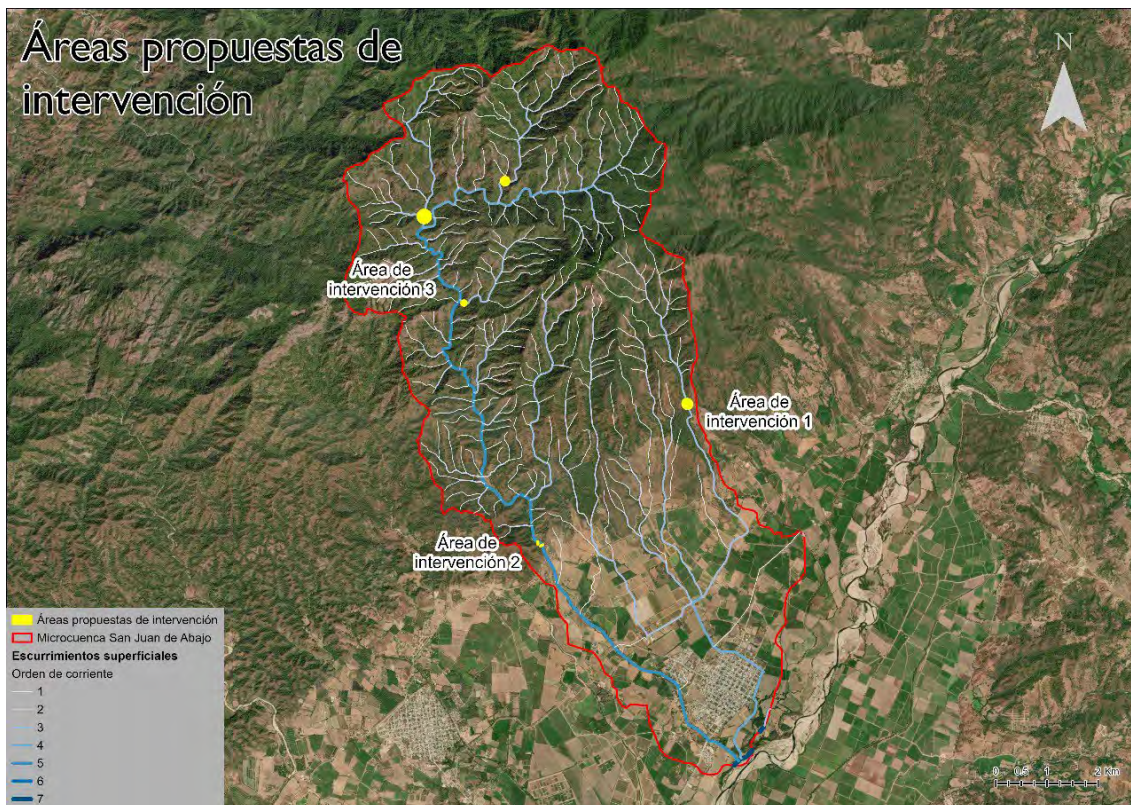


Figura 1. Áreas propuestas de intervención.

La figura 1 aglomera los espacios en los que se pretenden instalar las intervenciones propuestas en el presente documento.

Para el área de intervención 1 se plantea la instalación de un estanque de acuicultura. Se espera que el mismo caudal que baja por los ríos tributarios llene el volumen del estanque y salga por un vertedor para mantener un flujo constante. Es un espacio que

se planea para el uso de las personas de San Juan de Abajo, donde podrán criar peces y venderlos o consumirlos.

En el área de intervención 2 se presenta la construcción de una serie de pequeñas presas en el río Huichichila en el pueblo San Juan de Abajo, Nayarit. Consiste en elementos contruidos de concreto ciclópeo, utilizando la misma piedra del río y mano de obra del lugar. El objetivo de construir estas presas radica en contener el flujo que baja por el río desde la cima de la sierra de Vallejo y generar espacios de recreación y conexión humana entorno al agua. Las presas, más allá de contener el agua, también tienen la capacidad de contener a las personas. Se pueden generar albercas en las cuales se pueda pasar el día y tener tiempo de calidad con seres queridos. La importancia de esta propuesta se encuentra en los beneficios hidrológicos y sociales que se le puede brindar a la población de San Juan de Abajo.

Finalmente, el área de intervención 3, trata de barreras hechas de geocostales (costales que se pretenden rellenar con la misma tierra del sitio de intervención) que permitirán el paso del agua con una velocidad menor, y evitarán el arrastre de sedimentos.

5.3.1. Descripción del Problema

La cuenca de San Juan de Abajo ha tenido diversas inundaciones a través del tiempo. Existen registros de inundaciones en publicaciones periódicas

Después de hacer una simulación hidrológica y conocer el contexto de San Juan de Abajo a través de los mismos habitantes y visitas de sitio, se dio a conocer que el río Huichichila durante épocas de lluvia puede tener fuertes crecidas. El agua baja rápidamente de la sierra. El punto más alto se encuentra alrededor de 1400 metros sobre el nivel del mar. Claramente el agua puede llegar a tomar velocidades considerables. Una vez en su desembocadura, el río Huichichila se une al río Ameca. Esto también es problemático ya que el agua del Ameca suele ser mucha durante las crecidas ocasionando que el agua del Huichichila, al momento de desembocar, no pueda integrarse y se regrese por su mismo cauce. Esto provoca inundaciones en el pueblo y márgenes elevados de peligrosidad para los habitantes. Puede ser que esto suceda pocas veces por año, pero hay prioridad en cuidar de las personas del pueblo. La infraestructura urbana, la agricultura y la vida de los habitantes puede verse en riesgo con las crecidas del río.

5.3.2. Objetivos de la Intervención

Hay varios objetivos involucrados en estas intervenciones. El primer objetivo tiene que ver con el aspecto social. En visitas de sitio se pudo observar que el río, aunque no sea temporada de lluvias y no lleve mucha agua, sigue siendo un lugar de interacción y reunión. Es un lugar con el que los habitantes se sienten identificados. El Huichichila es un personaje que ha estado presente en sus vidas e incluso se vuelve especial para las personas que tienen la oportunidad de conocerlo por primera vez. Cuando el calado del río es mayor durante la época de lluvias, el río sigue siendo un lugar de esparcimiento. Pareciera que los mismos habitantes del pueblo intervienen el terreno del río para crear albercas a lo largo del río. Se pueden observar varias piedras acomodadas con el fin de detener el paso del agua y hacer que se retenga en varios puntos. Es justo en estos puntos donde las personas se meten al río ya que tiene mayor calado y es posible relajarse dentro del agua. Por esto se plantea la construcción de varias presas, esto haría que el nivel de agua que se retenga sea mayor y las personas tengan más espacio para disfrutar del agua.

El segundo objetivo tiene que ver con cuestiones ambientales e hidrológicas. Con una serie de presas y los geocostales en la cima del cauce, durante la temporada de lluvias se busca que el agua al toparse con ellas disminuya su velocidad, reduzca el grado de peligrosidad a lo largo del cauce y en su desembocadura. Se busca retener más agua en el río ocasionando que éste pueda llevar agua durante más tiempo en el año. Considerando también que las presas funcionarían como vertederos, es decir que solamente el agua continuará su flujo cuando desborde sobre la altura máxima del elemento construido (o cuando se abra una compuerta), se busca que cuando el agua no tenga capacidad de continuar su flujo, pueda infiltrarse en el suelo del río y se recarguen los mantos acuíferos. Esto puede beneficiar considerablemente la red de pozos de San Juan. El agua que no baje por el cauce bajaría a los mantos acuíferos, los recargaría y la población podría darse fácil abasto de agua potable. Es importante mencionar que el punto en el cual se plantea la construcción de las presas, el agua es sumamente limpia. Así se puede asegurar que el acuífero no se contaminaría. Es hasta aguas abajo donde se ven algunas descargas de aguas negras provenientes de viviendas.

El tercer objetivo está relacionado con una actividad económica que puede beneficiar a los habitantes de San Juan de Abajo, al tratarse de la cría de peces, que se convierten en comida y en producto. Se busca que la comunidad sea la encargada del lugar y que se genere cultura de apreciación por el recurso hídrico que tienen disponible.

5.3.3. Evaluación Preliminar

Para comprender la situación actual en San Juan de Abajo, se hicieron una serie de análisis. Se trabajó con el Modelo Digital de Elevación presentado por el INEGI a escala 1:10,000 a través de la plataforma Espacio y datos de México. Gracias a este se pudo obtener información relevante como la altura y dimensión de la cuenca que se eligió para trabajar. En el Anexo 1 se puede ver el contorno completo de la cuenca analizada y en un rango de colores la altura en metros con respecto al nivel del mar. A partir de los datos geológicos presentados por el INEGI a escala 1:250, 000, se obtuvo la litología para la microcuenca de San Juan de Abajo. Se observa en el Anexo 2 cómo al sur (parte baja de la microcuenca) se encuentra material aluvial y al norte litologías como conglomerado poligénico, granito-granodiorita y toba riolítica. Para el entendimiento hidrológico se puede apreciar el Anexo 3. En él se observan todos los flujos que hay en la cuenca de San Juan de Abajo. El flujo marcado con el azul más oscuro representa al río Ameca y el flujo del color más claro que sigue a este representa al Huichichila. Al analizar los tipos de clima presentados por el INEGI es posible observar que dentro del área de estudio se registran dos tipos de clima principalmente; al norte se tienen climas semicálidos subhúmedos, mientras que al sur se registran climas cálidos subhúmedos (Geografía INEGI, 2005).

De igual manera se visitó un par de veces el sitio donde se busca hacer las presas. El hecho de estar en el lugar, conocerlo y sentirlo es muy valioso ya que ayuda a tener presente factores que no se pueden conseguir en internet, a través de una institución o con un análisis de información geográfica. En las visitas se interactuó con los habitantes de San Juan y el valor del río Huichichila fue avalado por sus comentarios y aprecio que ellos le tienen.

5.3.4. Diseño de la Intervención

5.3.4.1 Barreras de geocostal

La propuesta de barreras de geocostales va de la mano con la colocación de presas más abajo del río. Prácticamente se busca reducir la velocidad que el agua del río trae. Se piensan colocar en los cauces tributarios del Huichichila, en una de las partes altas de la sierra de Vallejo. El agua corre por los cauces tributarios y desemboca en el cauce principal. Al bajar, el agua toma velocidad y esta se podría reducir si al momento de unificarse hay algún elemento sólido y estable que tape su flujo. En la Figura 2 es posible apreciar un ejemplo de cómo se vería la barrera de costales. Lo interesante de estos elementos es que se pueden hacer con material del mismo sitio. Se necesita solamente del costal en el cual se depositará el material. El relleno provendría del cauce del río.



Figura 2. Geocostales.

5.3.4.2 Albercas naturales/Presas.

Las presas se buscan colocar aguas arriba pasando las compuertas existentes. Se construirán tres presas aproximadamente a cada 50 metros de separación. Con un espacio de ese tamaño entre elementos se puede retener mucha agua y una mayor cantidad de personas puede nadar en el río. El largo de cada presa se adaptará al punto en el que se proponga su construcción. Puede ir de 5m de largo hasta 30 m de largo.

El ancho de cada presa es de 2.40 metros, así pueden caminar varias personas al mismo tiempo sobre ella y cruzar al otro lado del río sin necesidad de mojarse o resbalarse entre las rocas. La altura propuesta para las presas es de 1.30 metros desde punto más bajo dónde se coloquen. Con esta altura fácilmente se puede contener una cantidad considerable de agua y el nado puede ser muy agradable.

Cada presa requiere de una compuerta que permita su vaciado. Esto es de suma importancia ya que no siempre deben de estar hasta el tope. Se requiere de un flujo constante al igual que un calado lo suficientemente alto para que siempre haya agua en todas las partes del río. Por esto la altura de la compuerta está a 40 cm del nivel más bajo permitiendo que el agua llegue de un lado hacia el otro. El espacio por donde corre el agua tiene una pendiente del 2%. De esta manera no se quedará agua estancada dentro del vano de la compuerta. Las compuertas solo deberán permanecer cerradas en las épocas de mayor calor (mayo-agosto) cuando probablemente haya más visitantes en esta parte del río.

Las presas se construirán con concreto ciclópeo. Esto es una mezcla de concreto y piedras que forman elementos sólidos los cuales pueden ser muy resistentes a las condiciones del río. Según la Dirección General de Obras y Conservación de la UNAM, el concreto ciclópeo requiere de un 60% de concreto y un 40% de piedra. En este caso la piedra será extraída del mismo río. Se pueden encontrar piedras muy grandes que pueden funcionar para la construcción.

En las imágenes que se presentan a continuación es posible ver el diseño tipo de las presas. Como ya se mencionó anteriormente, las medidas de longitud se pueden adaptar a cada caso específico.

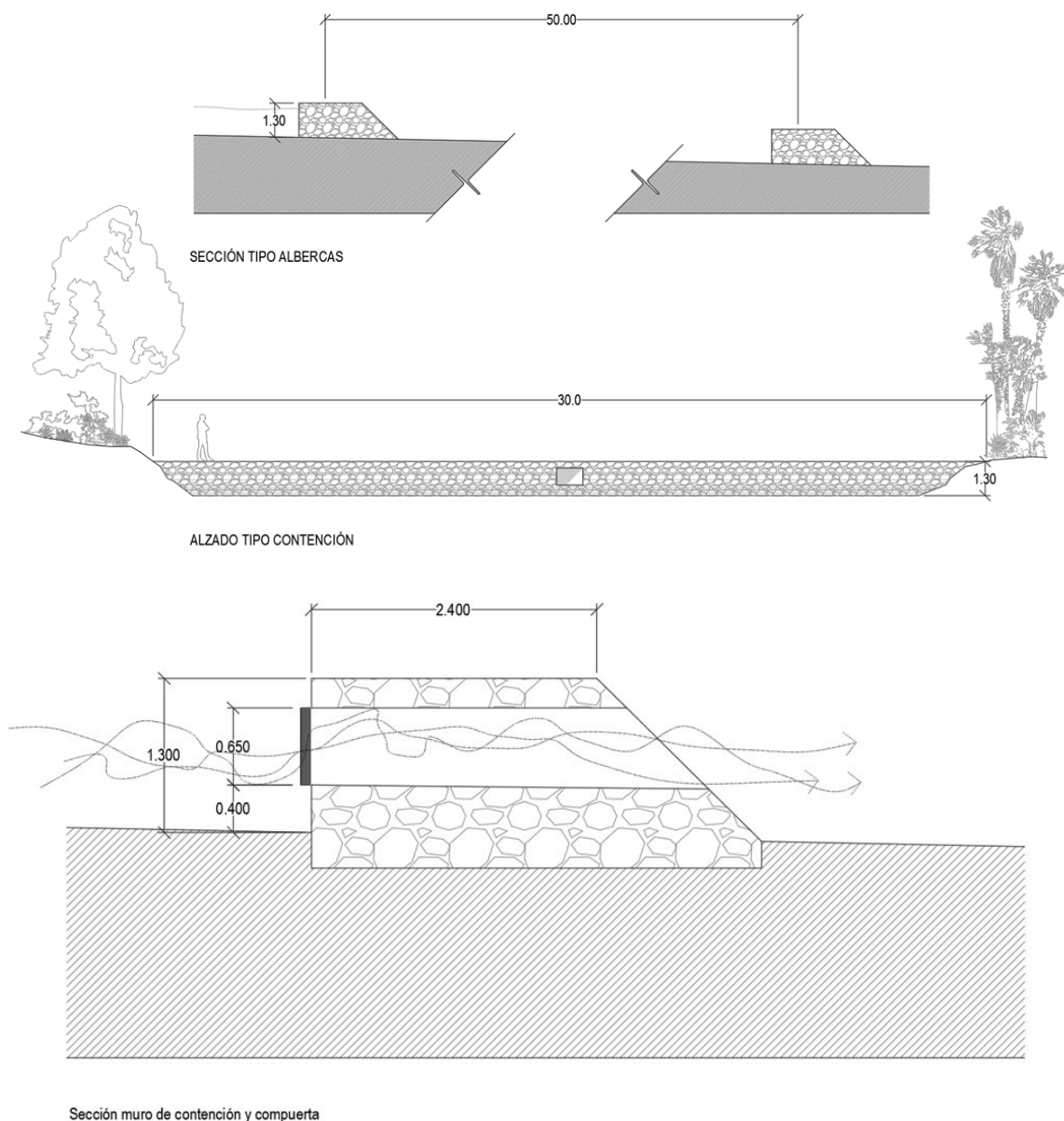


Figura 3. Albercas naturales.

5.3 Acuicultura.

Para la granja de acuicultura, la implementación de una presa se revela como un elemento crucial para asegurar el suministro constante de agua a los estanques que contienen los peces. Se contempla la ubicación estratégica de la granja en las proximidades de un cauce, permitiendo así la canalización continua del agua hacia los estanques. Para la construcción de la presa, se considera la utilización de concreto ciclópeo que puede garantizar la estabilidad necesaria para soportar el flujo constante de agua. En cuanto a los estanques destinados a la acuicultura, se plantea una

variedad de opciones que van desde la construcción con una mezcla de piedra del sitio y cemento hasta simples excavaciones realizadas en el lugar. En la Figura 4. se puede ver un ejemplo claro de cómo se está concibiendo la granja de acuicultura.

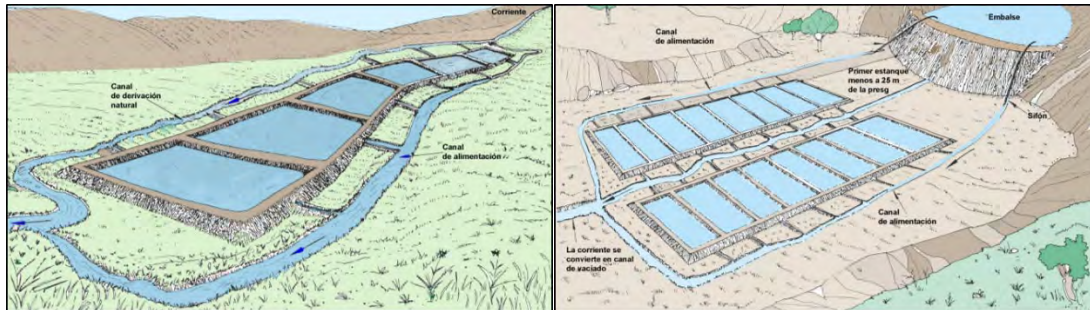


Figura 4. Estanque de acuicultura.

5.3.5. Beneficios e Impactos

5.3.5.1 Barreras de geocostal o Gaviones.

Los gaviones son utilizados en estructuras de contención por gravedad, revestimientos de canales/para proyectos geotécnicos, hidráulicos y de control de la erosión. Los gaviones contribuyen a la reducción del impacto ambiental al ser utilizados en proyectos de control de la erosión y en la construcción de presas, teniendo impactos positivos en la salud y el bienestar.

5.3.5.2 Albercas naturales/Presas.

Las presas pueden ayudar a disminuir riesgos durante las épocas de lluvia. El río trae consigo mucha fuerza y su contención es importante. El agua que se mantenga dentro de las presas puede infiltrarse a los mantos acuíferos y recargarlos. Las personas podrían aprovechar de los recursos naturales de su pueblo para tener un espacio de recreación más estructurado sin impactar fuertemente la imagen natural del cauce ya que todo se haría con piedra del lugar. Un impacto para considerar tiene que ver con la fauna del río. Se tiene que evaluar hasta qué punto la intervención impactaría factores biológicos y naturales del lugar. Es importante considerar que en el sitio hay dinámicas naturales que no deben de ser interrumpidas. Se tiene que evitar un desbalance del ecosistema.

5.3.5.4 Acuicultura

La acuicultura tiene tanto impactos ambientales como beneficios significativos. Algunos de los impactos ambientales incluyen la influencia en las poblaciones silvestres, el hábitat, la calidad del agua y las enfermedades. Estos impactos pueden ser abordados y mitigados mediante la selección de especies, el tipo de arte, el uso de tecnología, regulaciones que apoyen el manejo sostenible, evaluación del impacto ambiental, selección de sitios y enfoques de planificación espacial adecuados.

En cuanto a los beneficios, la acuicultura simbiótica se basa en la utilización de microorganismos que ejercen una acción beneficiosa directa o indirecta sobre la salud del animal y sobre la calidad del agua de cultivo. Además, la acuicultura sostenible puede convertirse en una alternativa responsable para aquellos que buscan consumir proteína animal de manera responsable con el medio ambiente.

5.3.6. Consideraciones Ambientales

Para las intervenciones propuestas: barreras de geocostal o gaviones, albercas naturales y acuicultura, se tiene diversos efectos ambientales cuya consideración es importante.

Las propuestas que suponen una interrupción en el flujo -como lo son la acuicultura y los gaviones- cuentan con beneficios como: disminución de la velocidad del transcurso de agua superficial, favoreciendo así la infiltración y minimizando el riesgo de inundación cuenca abajo; retención del agua en temporada seca; cuidado de los suelos, mantener el agua en su sitio impide la erosión y conserva los nutrientes y minerales del suelo en el mismo lugar. No obstante, interrumpir el flujo del agua de manera artificial tiene sus consecuencias en cuanto a inundaciones en la zona (es decir, el nivel de calado aumenta a la misma altura que del gavión o de la pared del estanque de acuicultura), posibilidad de eutrofización (cualquier materia orgánica que se descomponga dentro del agua, puede ocasionar el desarrollo de vida microbiana que consuma el oxígeno dentro del agua, ocasionando condiciones anaerobias donde la vida no puede progresar), y necesidad de mantenimiento (cada temporada, los sedimentos se acumularán en la zona pegada a la pared que interrumpe la corriente, es preciso retirar dichos sedimentos para conservar la eficiencia de las propuestas).

La acuicultura es una propuesta que requiere de la selección adecuada del tipo de pez que se va a reproducir. Dado que se espera implementar esto en la zona este a la mitad de la falda de la Sierra de Vallejo, dentro de la cuenca de San Juan de Abajo, no se trata de una zona con especies endémicas. Es posible criar especies como: Tilapia, Carpa, Bagre, etc. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2022). Es importante una realización correcta de las paredes y el vertedor para evitar el paso de estas especies por el río/canal y que puedan llegar a desembocar en el Río Ameca. Fuera de eso, no habría mayor afectación. También, es puntual preservar un flujo constante del agua (aunque se trata de una velocidad mínima) para permitir la oxigenación del agua y evitar el estancamiento de materia orgánica (hojas, ramas, desechos de los peces). Dependiendo de las dimensiones del estanque de acuicultura, se espera una reducción del volumen de agua que llega al canal dentro del pueblo.

Los espacios destinados a la interacción de la población con la propuesta -la acuicultura y las albercas naturales- requieren de un reglamento o una cultura de manejo adecuado por parte de las personas. Esto es, evitar la contaminación del agua por uso de bloqueadores con oxibenzona y/u octilmetoxincinato, ya que éstos funcionan como filtros resistentes a la radiación que afecta el ciclo reproductivo de la vida acuática (Crespo, 2022). Instalar botes para el desecho de basura, y así evitar que ésta termine el agua del río o dentro del estanque de acuicultura. Se busca que las personas interioricen los cuerpos superficiales de agua de San Juan de Abajo como parte del espacio en el que se desarrollan y comprendan la necesidad del cuidado de los mismo. Es un recurso trabajado y cuidado por ellos, cuyos beneficios son para ellos.

5.3.7. Evaluación de Riesgos y Gestión.

5.3.7.1 Riesgos.

Modificación del sistema hidrodinámico. Cambiar el caudal del agua, tiene una repercusión directa en la velocidad que la que fluye, y el volumen se llega a otros ríos y/o al pueblo. Uno de los riesgos principales es la afectación que puede tener al sistema ambiental, es decir, puede que los minerales que se arrastran desde la cima de la sierra no

lleguen a los suelos de los cultivos en la zona baja de la cuenca. O, que se inunden unos cuantos centímetros las zonas aledañas a las intervenciones.

Desprendimiento de una barrera de retención. Existe la probabilidad de que una lluvia muy fuerte precipite y haga que se desprenda un costal de los gaviones. Esto generaría una liberación repentina de un gran volumen de agua, incluyendo el arrastre de sedimentos. Dependiendo del tamaño y la cantidad de los sedimentos acumulados, estos pueden generar daños en el curso del río a la fauna o a la vegetación, incluso a personas si es ellas se encuentran cerca. También el material con el que se mejoren las paredes de las albercas naturales pueden sufrir un desprendimiento y llegar a golpear a alguien que se encuentre nadando dentro.

Impacto en la vegetación, cambio en el escurrimiento. Debido a la altura planeada de las intervenciones, se espera que el calado no llegue a alturas grandes. Aún así, se espera un ensanchamiento del río en la zona alta de la cuenca, y que haya una disminución de agua que alimenta el resto del flujo.

5.3.7.2 Gestión.

Las propuestas de intervención 1 y 3 no suponen un alto impacto en la zona del pueblo. En otras palabras, es difícil que un geocostal llegue a pegarle a una persona que se encuentra dentro del pueblo, por la distancia que debería recorrer y por la pérdida de sedimentos y del mismo costal en el trayecto. Lo mismo se podría decir de la acuicultura. La zona donde se tiene mayor riesgo es en el balneario natural, y este consiste principalmente en la construcción correcta de las albercas, el resto de los riesgos ocasionados por la fauna o la vegetación no le competen al desarrollo constructor de la propuesta.

Para mitigar esto, el diseño de construcción debe ser calculado para aguantar los diferentes caudales y velocidades con los que el agua puede llegar a la zona de la propuesta, con materiales de calidad que permitan el mantenimiento constante de las intervenciones y la remoción de los sedimentos que se acumulen en las barreras.

5.3.8. Cronograma y Presupuesto

Barreras de geocostal o Gaviones

El diseño de barreras de geocostales se basa en crear una barrera en tres puntos céntricos de la colina de San Juan de Abajo, en donde se busca poder reducir la

velocidad del agua que baja por ella. Para el tema de constructivo, se necesita preparar una ligera excavación que funcionara como la cimentación de la barrera, en ella, se instalara una hilada de geocostales. Las siguientes hiladas consisten en ser puestas en medio de la junta de los geocostales de la primera hilada, esto para que puedan crear una mayor adherencia similar a la de un muro de mampostería, es importante que en el proceso de supervisión se cuide este paso para que la barrera pueda funcionar adecuadamente. Para cubrir 1m³ de barrera, usando la medida estándar de costales de 50x75 cm, se necesitan 20 geocostales. El presupuesto estimado de los materiales se presenta en la *figura 2*:

Costos promedio para la construcción de las presas geocostales				
CONCEPTO	UNIDAD DE MEDIDA	COSTO UNITARIO \$	NÚMERO DE JORNALES	COSTO DE LA ACTIVIDAD \$
Medición de pendientes y ubicación de cárcavas	Jornal	45	0.10	5
Limpieza trazo, nivelación y retiro de material	Jornal	45	0.25	11
Excavación para cimentación y empotramiento	Jornal	45	0.50	23
Excavación para llenado de geocostales	Jornal	45	0.75	34
Llenado y acomodo de los geocostales	Jornal	45	2.00	90
Geocostales	Pieza	13.3	20.00	266
				TOTAL \$ 429

Figura 5. Costo de los geocostales.

Albercas naturales/Ecoestanques

El diseño de las albercas está pensado en usar remodelar los mismos cauces que tienen, en donde a través de unas compuertas se pueda frenar el flujo del agua y usar como albercas naturales. En ellos, la gente podrá estar junta y disfrutar de un espacio al abierto. Para la construcción de ello, se necesita frenar la corriente o redirigirla temporalmente, se excavaría para poder fijar la cimentación, formar un armado de varilla para posteriormente colarlo y dejar que fragüe. En la supervisión es importante

ver que los armados estén bien y haya un anclaje correcto, el tiempo de fraguado y sus condiciones serán también importantes. El costo de materiales es aproximadamente de 2850\$/m² para la excavación, armado de varilla, cimbra y colado.

Acuicultura

Para el diseño de la acuicultura, se planea redirigir el agua de los cauces que vienen de aguas arriba hacia aguas abajo hacia un estanque que tenga un movimiento de agua constante, en este se planean tener peces que sobrevivan con el movimiento del agua, la meta es que el municipio tenga pescados que puedan vender y consumir. Es importante que en el tema de la supervisión se cuide el armado de la estructura junto con su respectivo colado de concreto. Aquí, es importante cuidar que se pongan rejillas para que los pescados no se vayan por los cauces hacia el río. El costo de materiales es aproximadamente de 3250\$/m² para la excavación, redirección, armado de varilla, cimbra y colado.

5.3.9. Plan de Comunicación y Participación*

Se describe cómo se planea involucrar a la comunidad local y otras partes interesadas en el proceso de intervención, promoviendo la transparencia y la participación ciudadana.

5.3.10. Evaluación Económica y Financiera

La viabilidad económica y financiera de la intervención realmente depende del IMPLAN y los ciudadanos, existe una limitación con el presupuesto por parte de las instituciones gubernamentales, pero con la ayuda de los ejidatarios, se pueden realizar los proyectos que serían muy buenos para el pueblo si se habla del costo-beneficio. Ya que, cada que hay inundaciones hay pérdidas considerables para San Juan de Abajo (desde carros inundados hasta las plantas bajas de las casas) el tener que estar arreglando las humedades o tener pérdidas totales en los carros son considerables; Por ende, el poder ejecutar las propuestas antes mencionadas ayudaría de gran manera a evitar las pérdidas por desastres naturales, en este caso por inundaciones.

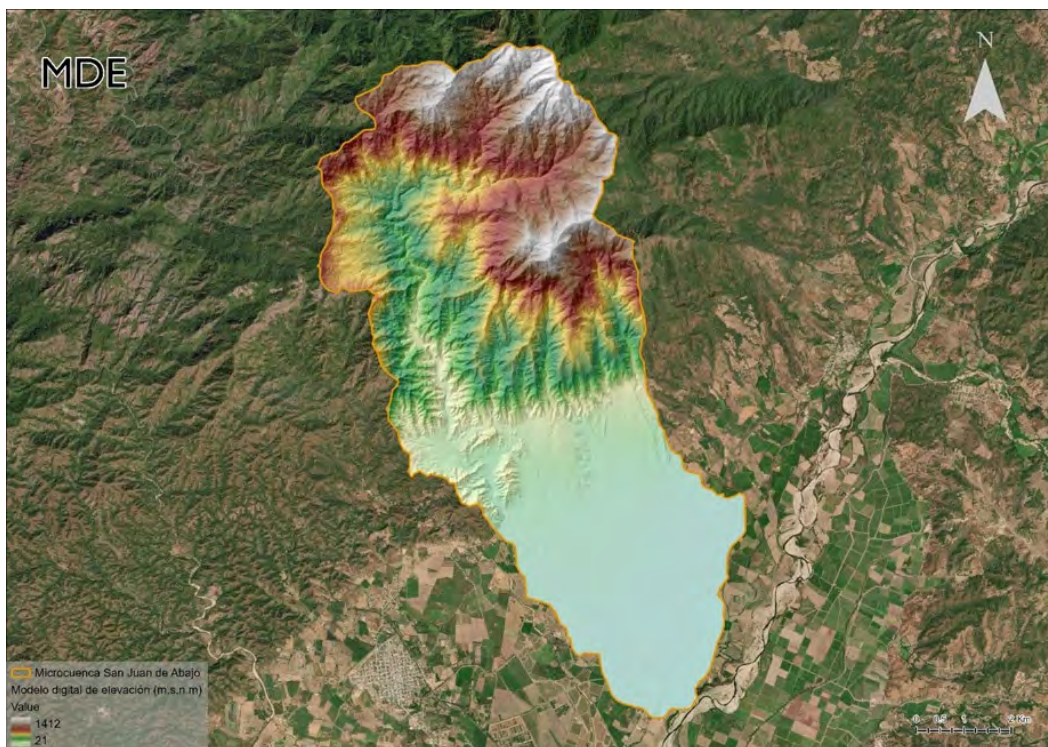
5.3.11. Conclusiones y Recomendaciones

Se pretende instalar tres intervenciones, geocostales, balnearios naturales, y acuicultura. Todas influyen en la disminución del escurrimiento y el favorecimiento de la infiltración. Dependiendo de la zona y la propuesta, se puede minimizar la erosión, favorecer la conservación de lugares naturales de recreación, conservar el agua más tiempo durante las diferentes temporadas del año, generar una actividad económica, requerir de mantenimiento frecuente, incluir riesgos de desprendimiento o inundaciones pequeñas *in situ*.

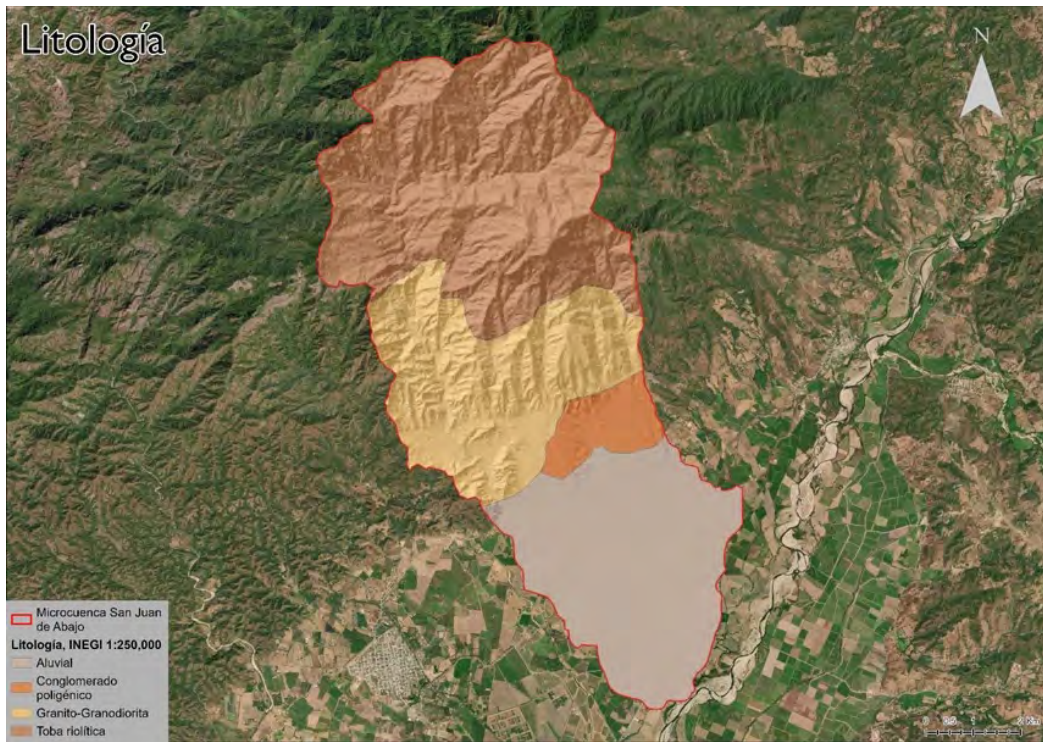
Las propuestas tienen el objetivo de disminuir la velocidad y/o el volumen que se dirige al pueblo de San Juan de Abajo, disminuyendo así las probabilidades de inundación del espacio. A su vez, se espera que las propuestas generen una conexión entre las personas y los espacios con los que cuenta la cuenca para su aprovechamiento.

5.3.12. Anexos

Anexo 1.



Anexo 2.



Anexo 3.

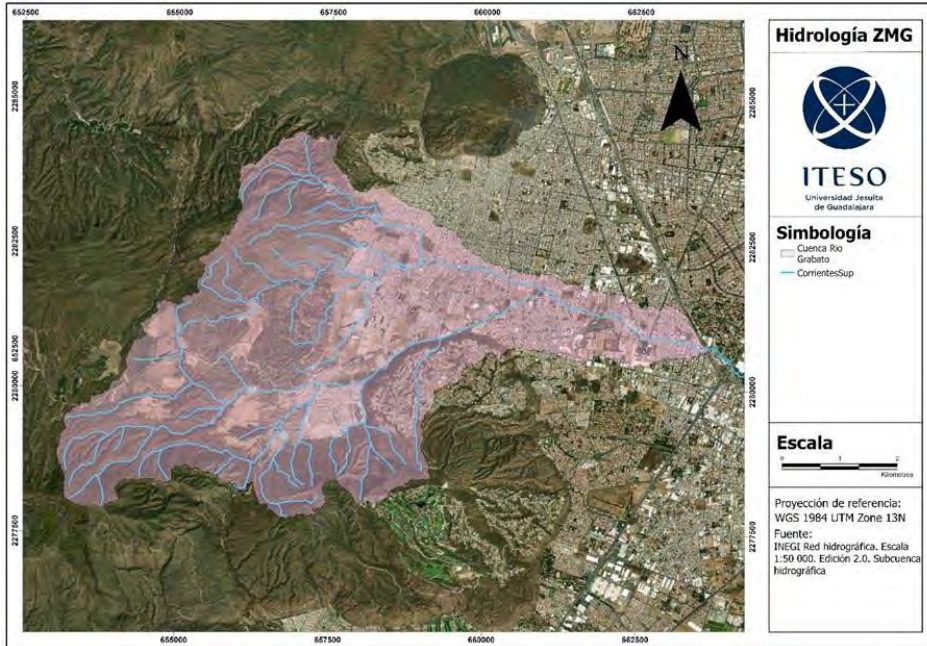


5.3 Arroyo Seco

La investigación se centra en la delimitación y caracterización del área de estudio, focalizándose en la cuenca y cauces del Río Garabato, ubicado en el estado de Jalisco, México. A pesar de la urbanización predominante en la región, la presencia de áreas boscosas aún persiste, aunque se ve amenazada por el continuo proceso de urbanización. Este río y su cuenca, abarcando 3164.44 hectáreas, presentan desafíos significativos relacionados con la gestión del agua y la influencia del cambio climático, particularmente evidenciado por la falta de lluvias en el último año y la continua urbanización. El clima templado y las características geográficas juegan un papel crucial en la hidrología de la región. Este estudio no solo recopila datos mediante investigaciones geográficas, visitas de campo y herramientas como IBER para modelar hidrológicamente la cuenca, sino que también aborda la evaluación de la hidrología superficial y subterránea, análisis de eventos extremos y propuestas de intervención para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la gestión del agua en esta área. La validación y calibración del modelo hidrológico, así como la evaluación de impactos y la anticipación de escenarios futuros, completan un enfoque integral para comprender y abordar los complejos problemas hidrológicos en la cuenca del Río Garabato.

5.3.1. Definición del Área de Estudio

A continuación, se mostrará un mapa de la delimitación del área geográfica de la cuenca y causes del Río Garabato.



Mapa de la cuenca y cauces del río garabato.

El río Garabato está localizado en el estado de Jalisco, México, se encuentra en las faldas del cerro del Bosque de la Primavera. La zona de estudio está en su mayoría urbanizada, aunque todavía hay área de bosque, muchos de los cauces han desaparecido gracias a la urbanización, sigue en proceso de seguirse urbanizando.

El clima es templado (semiseco-semihúmedo con lluvias en verano), mostrando una temperatura media de 19.2°C, la temperatura máxima es de 29 °C y la mínima de 21.1°C. Los meses julio y agosto, son los meses de intensas lluvias, el último año casi no tuvo lluvias, el cambio climático va a seguir cambiando gracias a que se sigue urbanizando hacia las áreas naturales.

La cuenca delimitada para este río abarca un extenso territorio de 3164.44 hectáreas, caracterizado por un río principal, el Garabato, acompañado por unos 20 afluentes tributarios intermitentes.

No hay mucha información acerca de este río.

5.3.2 Recopilación y Preparación de Datos

La recopilación de datos del Arroyo Seco se obtuvo en la realización de una profunda investigación de datos geográficos, para posteriormente hacer mapas con curvas de nivel en ArcGIS e Iber para comprender el comportamiento de la hidrología de las cuencas del cauce del Arroyo Seco. La información cuantitativa geográfica se obtuvo de INEGI, IIEG, etc. para entender los flujos de agua del río que bajan desde el cerro del Bosque de la Primavera hasta el Río Santiago, pero el área de estudio solamente abarca el Arroyo seco.

También, se realizaron visitas de campo en una parte del arroyo para analizar un poco del contexto de lo que es el canal actualmente para comprender mejor la realidad del canal, se visitaron algunos puntos, principalmente en los puentes. Se observó que hay deformaciones en el canal, como, por ejemplo, la urbanización creciente que no respeta el cauce, lo que genera que el canal se recorra dañando casas vecinas ya existentes generando inundaciones, hay demasiada contaminación de basura en los canales de agua generando malos olores y gases, ha habido colapsos de viviendas, ya que no respetan el sitio donde pasa el agua generando erosiones, etc. No hay tal información cuantitativa exacta de la hidrológica de este arroyo, pero cada año hay desbordamientos y destroces por la cantidad de agua que corre,

sobre todo en temporadas de lluvia, generando que el agua no se capte ni gestione de la manera correcta, el resto del año el canal suele estar seco. Esta información fue obtenida en páginas web de periódicos como el Informador, es decir las noticias.

5.3.3 Selección del Modelo Hidrológico

La elección del modelo hidrológico se basó en la consideración de diversos hietogramas, los cuales presentaban diferentes periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación, como se detalla en el capítulo 7 del documento. Estas tormentas fueron meticulosamente generadas por el Mtro. Diego Rojas en el marco de su tesis de maestría (Rojas & González, 2015). Se seleccionaron específicamente los hietogramas con periodos de retorno de 2, 10 y 25 años debido a que reflejan las distintas condiciones pluviales en la zona de interés. Estas tormentas fueron integradas en el modelo con el propósito de llevar a cabo las simulaciones correspondientes, siendo un componente esencial para la evaluación hidrológica.

5.3.4 Parametrización del Modelo

Se plantearon diversas ideas e intervenciones para mejorar nuestra cuenca, con el objetivo de restaurar y reducir las áreas de riesgo y inundación tanto dentro del arroyo como en las zonas circundantes, incluyendo vialidades propensas a inundaciones. En el marco de estas propuestas, se llevó a cabo la creación de una red hidrográfica para la subcuenca. Este sistema modela el drenaje de la cuenca hidrográfica, identificando las corrientes de agua, canales principales y la dirección del flujo de agua (INEGI, 2010).

Posteriormente, se emplearon herramientas de procesamiento geoespacial como "ArcGIS Pro" para organizar los cauces de la zona de estudio, como parte de la propuesta de intervención, se sugirió la construcción de represas en la parte superior del arroyo y distintas intervenciones a lo largo de la cuenca como arroyos infiltrantes, camellones infiltrantes, pozos de absorción, estaciones de autobús con pozos, parques lineales, entre otras. Estas represas cumplirían la función de reducir las velocidades del caudal dentro del arroyo y controlar el tirante de agua, permitiendo una dosificación más efectiva del cauce. La importación de datos de estas intervenciones al modelo en IBER facilitó el análisis de su

influencia en el modelo hidrodinámico superficial. Se compararon los hidrogramas de la corriente con y sin intervenciones, evaluando la velocidad máxima del agua, la máxima peligrosidad ACA y el calado del caudal retenido a lo largo de toda la cuenca. Finalmente, tras completar la propuesta de selección de intervenciones, se le asignaron distintos puntos donde se realizarían estas intervenciones considerando todas las propuestas que teníamos y combinando las mismas para obtener un mejor desempeño de nuestro modelo. Este espacio ofrece la oportunidad de realizar una captación de agua a mayor escala, con el objetivo de mitigar las afectaciones actuales en la zona.

Mediante estas propuestas, se busca optimizar el uso de un extenso terreno para convertirlo en una considerable área de infiltración. Este reservorio, fue diseñado para gestionar eventos pluviales con un periodo de retorno de 2, 10 y 25 años, teniendo como objetivo almacenar, dosificar e infiltrar volúmenes significativos de agua. La finalidad es prevenir que las áreas urbanas sigan sufriendo las consecuencias de lluvias intensas y desbordamientos del canal, originados por la incapacidad para gestionar elevados niveles de caudal. Estas intervenciones facilitarían la retención y reducción de la velocidad del agua, disminuyendo el caudal de escurrimiento, reteniendo sedimentos y reduciendo las áreas de riesgo, tal como se describe en el modelo de represas.

Durante el análisis de estas propuestas, se consideraron varios modelos en el programa Iber, un modelo matemático bidimensional con un módulo hidrodinámico para simular flujos en ríos, canales y cauces naturales. Se evaluaron 3 intervenciones diferentes con distintas intervenciones, centradas en la implementación de las varias propuestas en conjunto para mejorar la infiltración, pero algunas propuestas incluyeron intervenciones adicionales para mejorar su rendimiento. Estas mejoras comprendieron la incorporación de un pozo de infiltración, una compuerta y unos parques lineales y arroyo infiltrante que incluían áreas más profundas. En algunos casos, se exploró la combinación de todas estas intervenciones en un mismo modelo para lograr un funcionamiento y aprovechamiento óptimos.

5.3.5 Escenarios de Simulación

Los escenarios de simulación fueron definidos con base en distintos eventos de lluvia caracterizados por diferentes periodos de retorno, conforme a los hietogramas presentados en la tesis de maestría del Mtro. Diego Rojas (Rojas & González, 2015). En específico, se consideraron periodos de retorno de 2, 10 y 25 años, con el propósito de generar resultados que abarcaran una gama diversa de situaciones. Las intervenciones llevadas a cabo durante estos escenarios incluyeron la simulación de la cuenca sin ninguna intervención de recarga artificial en puntos estratégicos. Posteriormente, se realizó una segunda simulación con intervenciones, incorporando una infiltración total de 43 m³/s en toda la cuenca. Finalmente, se efectuó una tercera simulación con intervenciones, caracterizada por una infiltración de 100 m³/s en toda la cuenca. Lo cual podemos obtener 9 simulaciones con los diferentes escenarios.

5.3.6 Desarrollo de la Simulación

Para la realización del modelado hidrológico y el comportamiento de los cuerpos de agua superficiales de la cuenca delimitada y mencionada anteriormente que abarca algunos de los causes más importantes del área de Zapopan, como lo son el arroyo Teinstique y el arroyo grande entre otros, los cuales fueron los cauces que se utilizaron para para añadir la información al software de IBER. Con el cual, se revisaron y analizaron las zonas de riesgo para de esta manera observar en que sitios de la ciudad se nos presentan los mayores problemas tanto de inundaciones como de posibles zonas de peligrosidad por acumulación de agua, a su vez se obtuvieron tirantes y velocidades de escorrentías las cuales nos ayudan a definir cuanta es la cantidad de agua que pasa a través de estos cauces y que tan rápido se desaloja hacia las zonas más bajas de la ciudad.

IBER es una herramienta de modelación matemática bidimensional para la simulación del flujo del agua en lamina 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 esta manera nos ayuda a poder predecir los valores de las variables hidráulicas 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. Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos de microcuencas urbanas se siguieron una serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER, la cual se basó en:

- Manejo de datos en SIG
- Preproceso
- Realización de intervenciones en el modelo

Es importante recalcar que previo al proceso de simulación, intervenciones y modelo numérico que se realizó por computadora, se realizaron distintas actividades para el manejo de datos en el sistema de información geográfica. Dentro de estas actividades se ingresaron distintos datos a nuestro modelo de IBER como lo son:

- Rugosidad del Suelo: Depende de las variaciones de uso de suelo asignado a esa área de la ciudad, si es área urbanizada, no urbanizada, protegida, vegetación, pavimento, arbustos, etc.
- Numero de Curva: Este 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 número de curva.
- Modelo Digital de Elevaciones: Este modelo representa una representación gráfica y matemática de la variación de altura del territorio respecto al nivel del mar y presenta visualmente las formas del relieve y los elementos presentes en el mismo como las áreas urbanizadas, casas, edificios, calles, etc.

Antes de iniciar el proceso de modelación fue necesario realizar una recolección de información en ArcGIS, donde 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 número de curva y el tercero con el modelo digital de elevación del límite de la cuenca. El número de curva es la metodología de pérdidas que se seleccionó para trabajar con las simulaciones, donde la información recolectada salió de la Universidad Americana de Beirut quien publicó un mapeo de celdas de 250 m con números de curva para tres diferentes condiciones del suelo, seco, mojado y promedio, y con base a este mapeo buscamos celdas que se aproximaran al uso de suelo de nuestras cuencas para después establecer el número de curva para cada uso de suelo que se tenía en cada cuenca.

Para poder realizar los archivos ASCII se obtuvo información vectorial 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 2017 con escala 1:10,000 y curvas a cada 5 m.

Para los modelos de las tres zonas de estudio se tomaron los valores de rugosidades y número de curva obtenidos mediante la clasificación del suelo que se realizó a lo largo del proyecto. Según los criterios del software de IBER, se determinaron las rugosidades de los distintos tipos de suelo. El número de curva y la rugosidad del uso del suelo están estrechamente ligados, es necesario mantener un orden de asignar estos valores para que ambos datos correspondan al área seleccionada según su tipo de suelo.

En las siguientes tablas se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning y número de curva obtenidos según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), para determinar correctamente los parámetros necesarios para estimar el 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.

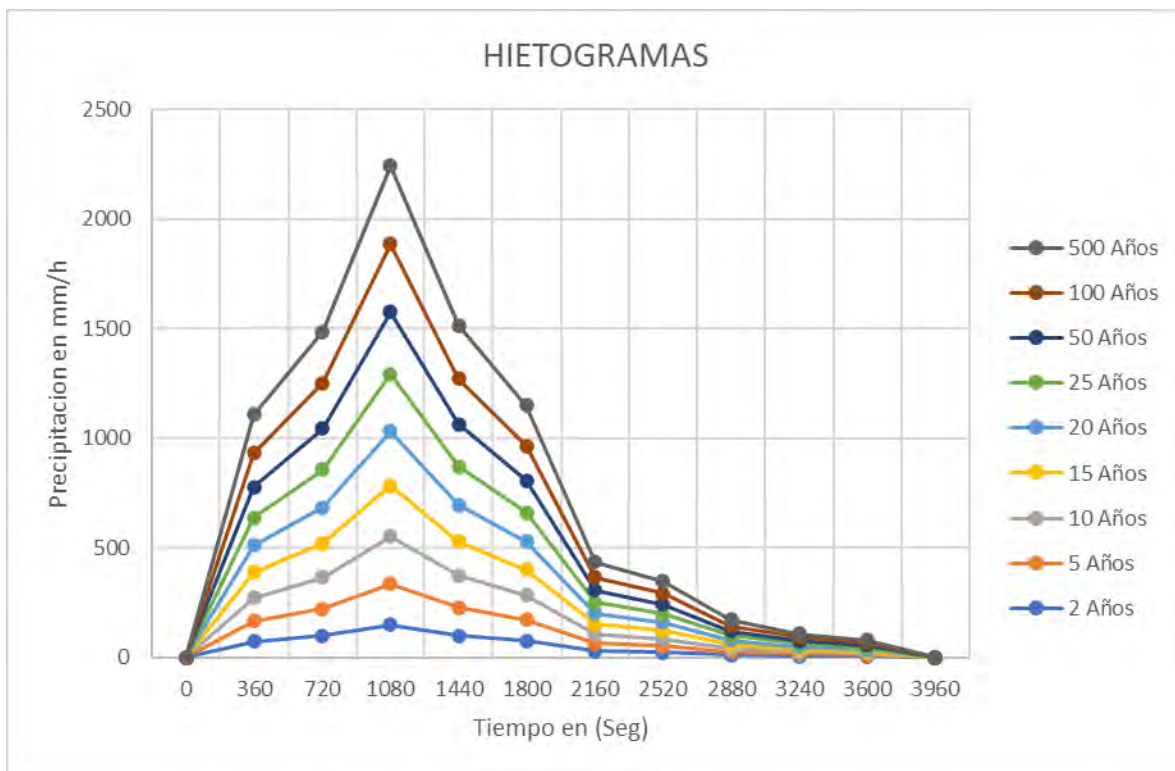
Uso de suelo Coeficiente de Manning	
Bosque	0.12
Arbustos	0.05
Arboles	0.12
Vegetación Urbana	0.032
Hormigón	0.018
Residencial	0.15

Uso de suelo Numero de curva	
Bosque	88
Arbustos	91
Arboles	91
Vegetación Urbana	90
Hormigón	97
Residencial	95

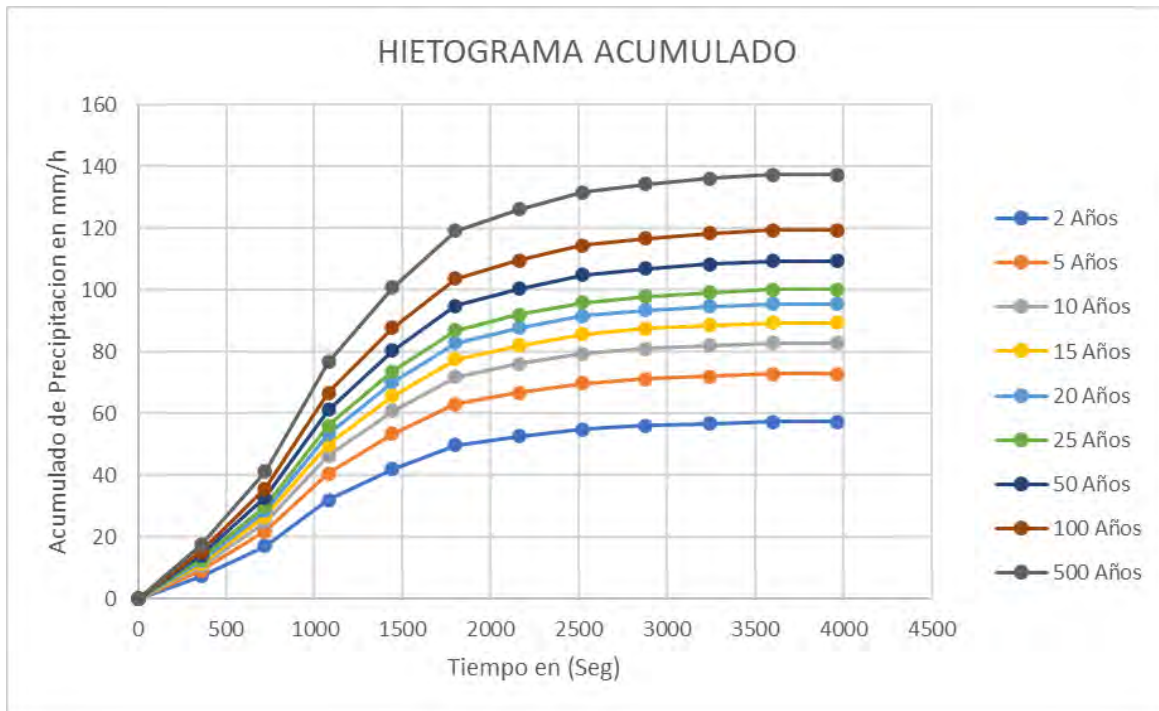
Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación los archivos shapefile de las manzanas, calles y la delimitación de la cuenca que se está estudiando, para posteriormente crear una malla la cual hará referencia a pequeñas porciones del terreno a las cuales se les asignaran las elevaciones formando puntos mediante triángulos, por lo cual en IBER se creó un nuevo archivo donde se importaron las elevaciones de la cuenca mediante el relieve; se utilizó una tolerancia de 20 metros para el área del bosque de la primavera en donde no es necesario tener una malla tan

refinada ya que los datos tendrán menos variación porque es el mismo tipo de terreno y la elevación no varía a grandes escalas, por otro lado dentro del área urbana se asignó una malla de 5 metros la cual tendría más definición para poder ver de manera más real la elevación de las áreas pavimentadas, calles, casas, fraccionamientos, plazas, etc. 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. 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 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación; los cuales se presentan en la siguiente figura. Dichas tormentas fueron generadas por el Mtro. Diego Rojas en su tesis de maestría (Rojas & González, 2015).



Hietogramas de diseño en segundos para 1 Hora por precipitación en mm/h



Hietogramas acumulados de diseño en segundos para 1 Hora por precipitación en mm/h

Posteriormente, se asignó un valor de rugosidad y número de curva a toda el área mediante los archivos que se habían generado anteriormente donde ya se habían obtenido estos datos para de esta manera finalmente pasar al proceso de simulación en donde se inició el tiempo de simulación en (0 segundos) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 300 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.

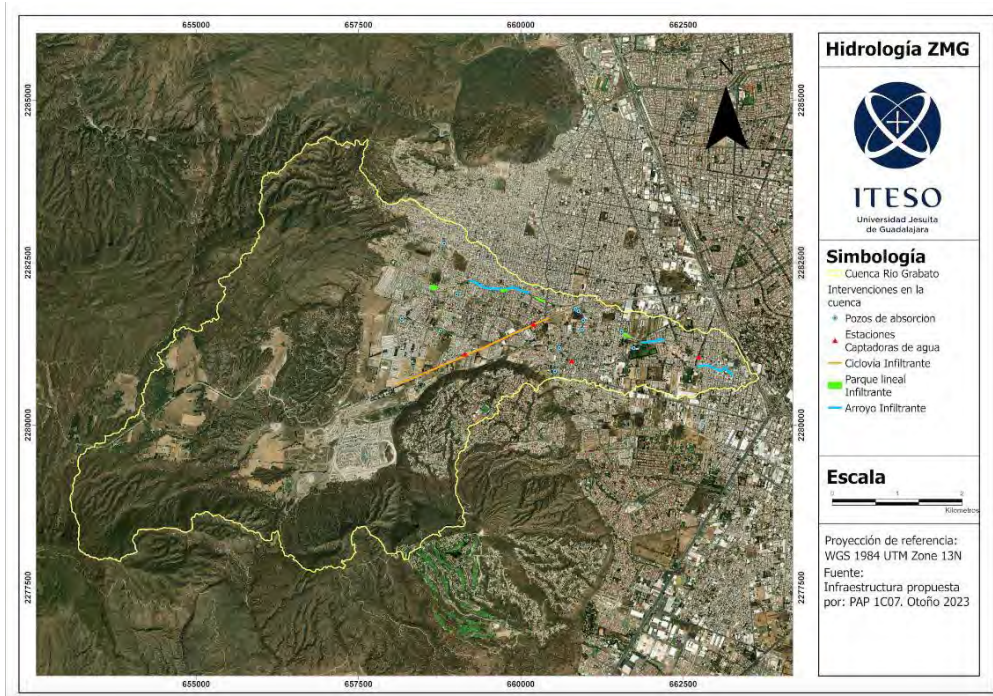
Además, los tiempos de concentración fueron calculados con ayuda de la página web SIATL del INEGI, que es un simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas en México. El tiempo de concentración es el de equilibrio para que el cuerpo de agua se estabilice tras una precipitación, es decir, el tiempo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

Área de Captación	Tiempo de Concentración
-------------------	-------------------------

	(Min)
Arroyo Chicalote	240
Arroyo Seco	156
Arroyo Teinstique	57

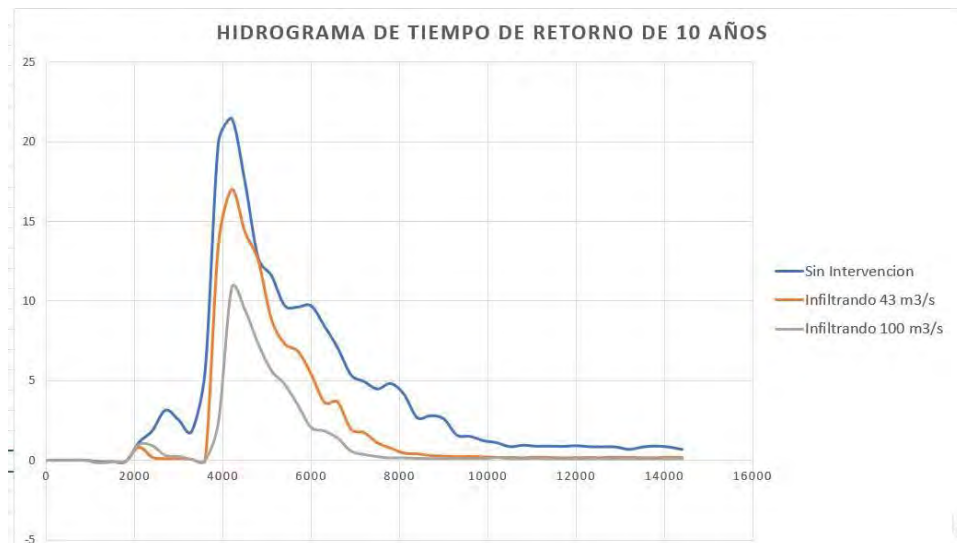
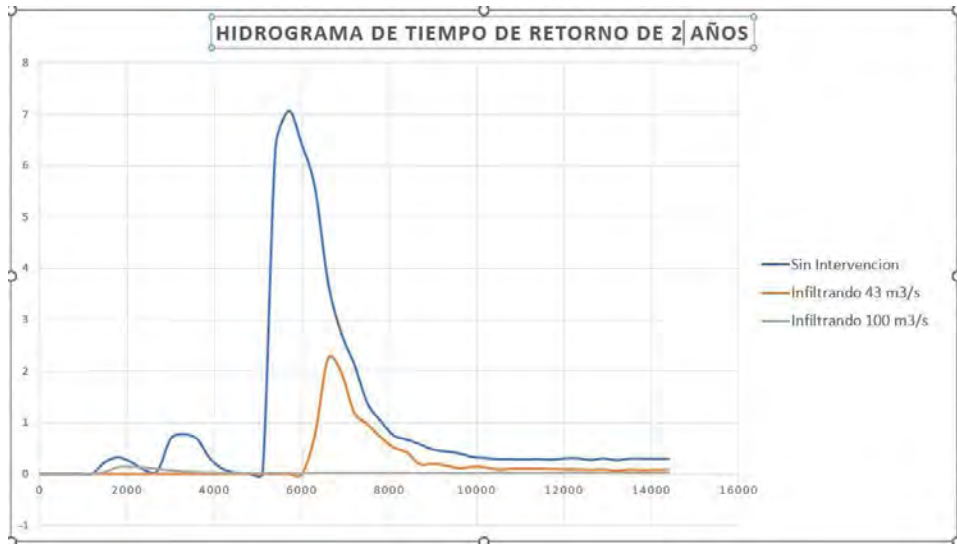
En la simulación, se exploraron tres escenarios distintos, cada uno con sus propias características. En el primer escenario, se modeló la cuenca utilizando tres eventos de lluvia con periodos de retorno de 2, 10 y 25 años, sin realizar ninguna modificación al modelo para mantener la condición hidrológica actual de la cuenca. En el segundo escenario, se replicaron las mismas lluvias, pero se introdujo una infiltración de 43 m³/s en puntos críticos de la cuenca. En el tercer escenario, se repitió la operación del segundo, pero con una infiltración de 100 m³/s, también distribuida en las zonas críticas de la cuenca. Este planteamiento permitió contar con un modelo que reflejara la condición actual, otro con una infiltración moderada y, finalmente, uno con una infiltración óptima para la cuenca.

Las intervenciones de infiltración implementadas en la cuenca se encuentran representadas de manera visual en el siguiente mapa;



5.3.7 Resultados y Análisis

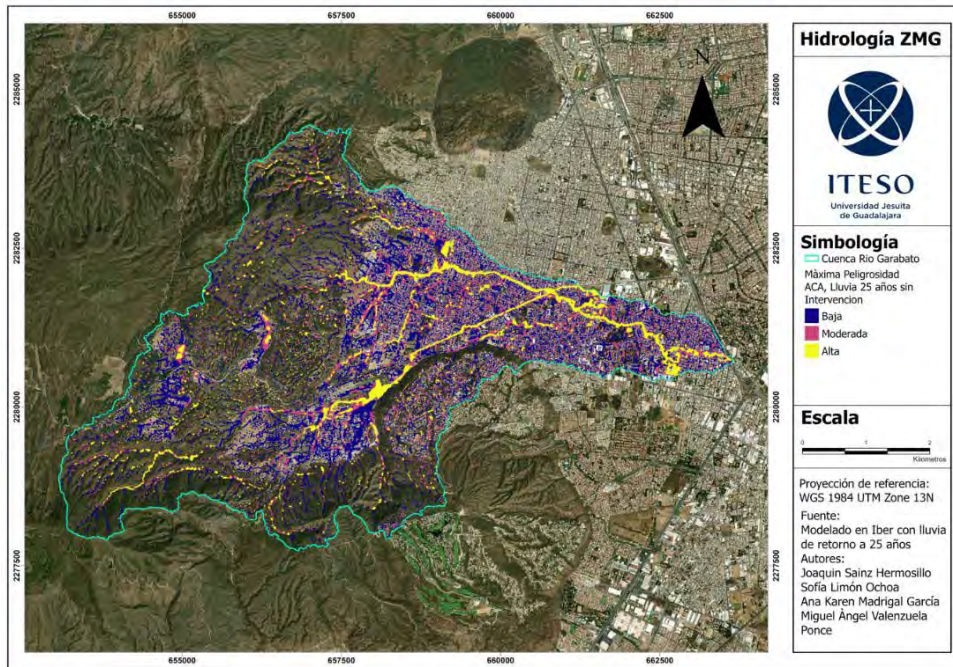
Para analizar los diversos escenarios en la cuenca, se generaron gráficos correspondientes a tres eventos de lluvia simulada. En estas representaciones, se llevó a cabo una comparación del comportamiento del caudal a lo largo del tiempo en tres condiciones distintas: el estado actual, la infiltración con infraestructura moderada (43 m³/s) y la infiltración con infraestructura óptima (100 m³/s). Estas comparativas se presentan de manera visual en los gráficos siguientes.



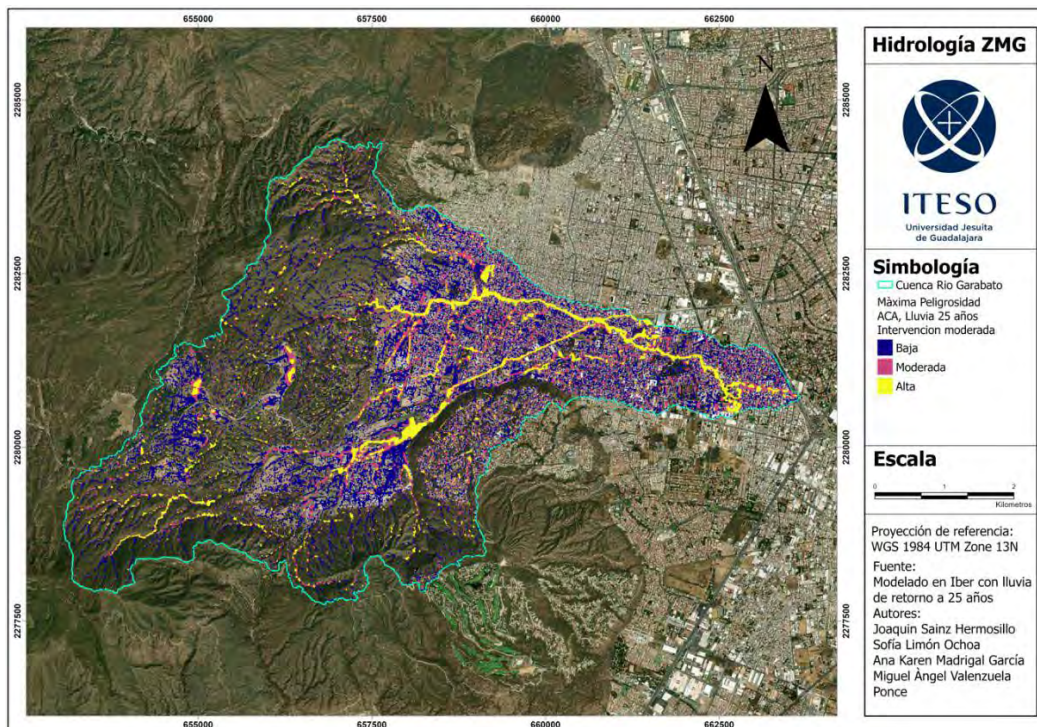
A través de la observación detallada de las gráficas proporcionadas, se ofrece la oportunidad de analizar los tres escenarios simulados. Estos escenarios proporcionan una visión integral de cómo la introducción de la infraestructura propuesta resulta en una notable disminución del caudal. En particular, en las dos simulaciones con infraestructura, se evidencia que la reducción en el flujo hídrico se atribuye a la capacidad de la mencionada infraestructura para infiltrar el agua distribuida en toda la cuenca en el subsuelo. Este fenómeno específico contribuye de manera significativa a la modificación del régimen del caudal, generando impactos apreciables en el comportamiento hidrológico del sistema.

Una perspectiva adicional para evaluar los resultados se materializa a través de la interpretación de los mapas generados como consecuencia de las simulaciones. En este contexto, procederemos a exponer de qué manera se manifestó la peligrosidad y el caudal en los diversos escenarios, específicamente enfocándonos en la precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Estos mapas proporcionan una representación gráfica detallada de la variabilidad y comportamiento de los riesgos asociados, así como de las fluctuaciones en los niveles de caudal, arrojando luz sobre las implicaciones de cada escenario en el contexto de eventos climáticos extremos.

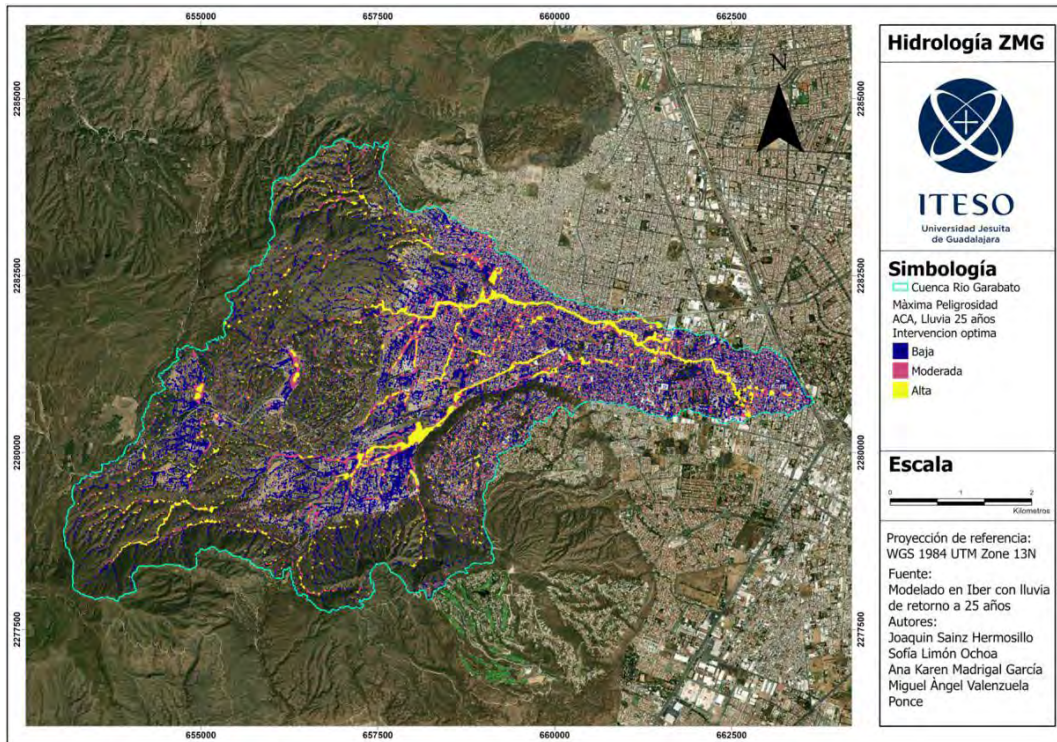
Peligrosidad sin intervenciones



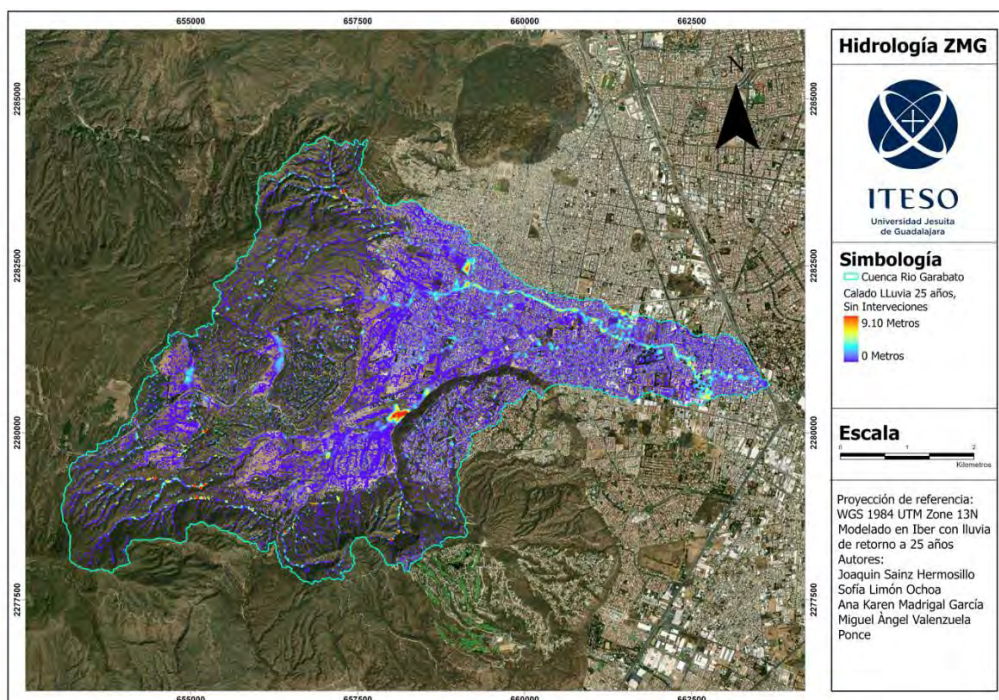
Peligrosidad con intervención moderada



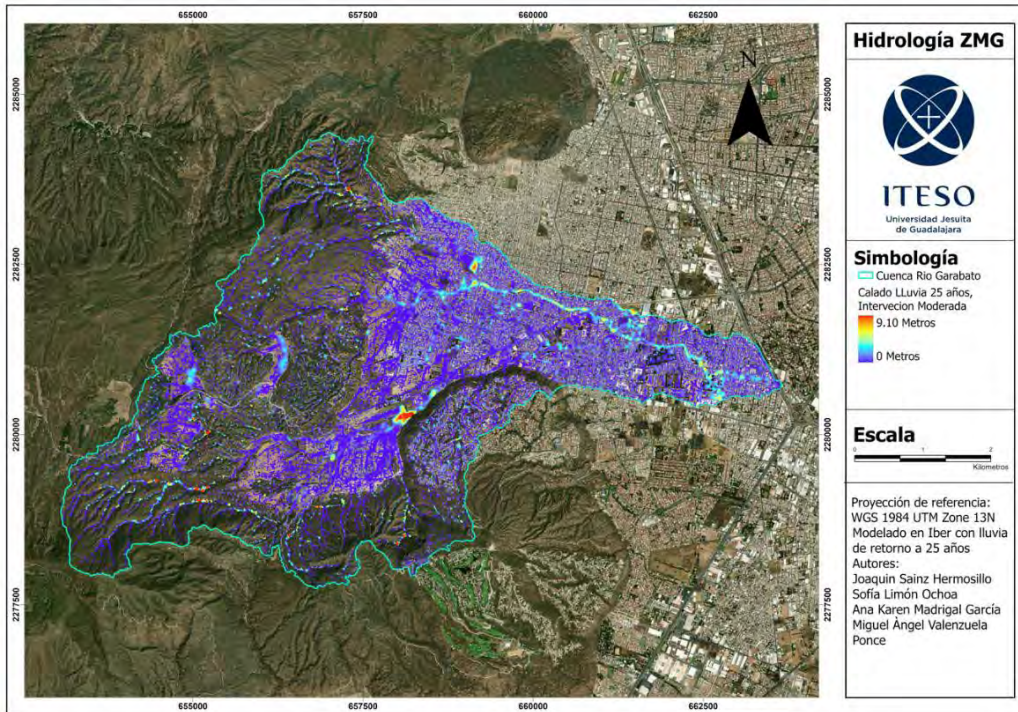
Peligrosidad con intervención óptima



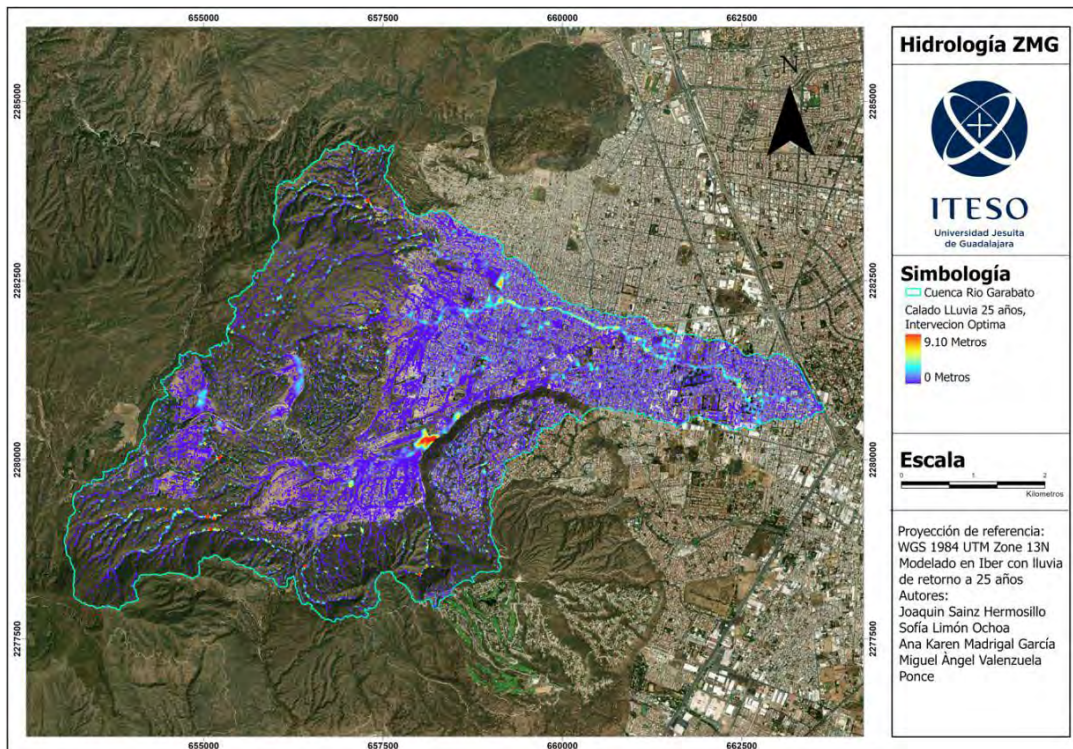
Calado sin intervenciones



Calado con intervención moderada



Calado con intervención optima



Los mapas de calado ofrecen una visualización del nivel máximo alcanzado en toda la cuenca, partiendo de una referencia de 9.10 metros. En las simulaciones que incorporan la infraestructura de infiltración, se observa una disminución significativa en este calado, evidenciándose principalmente en las corrientes principales y los puntos críticos de la cuenca. En relación con la peligrosidad, este índice establece una conexión entre el nivel de calado del agua y la velocidad con la que se desplaza. Cuantitativamente, dicho índice proporciona información sobre si las corrientes presentan un riesgo alto, moderado o bajo. Esta evaluación cuantitativa permite la identificación precisa de puntos críticos que podrían representar riesgos significativos para la comunidad, brindando así una herramienta valiosa para la gestión de riesgos y la toma de decisiones en materia de seguridad hídrica.

5.3.10 Validación y Sensibilidad

La validez del modelo hidrológico, se mostraron con la realizaron modelos de simulaciones en Iber, lo que se añadió al programa fueron los puntos críticos, que se consideraron en la visita a campo al canal del río Garabato y del hidrograma, esto para poder hacer proposiciones que ayuden a la gestación y captación del agua. Las propuestas son arroyos de infiltración, parques permeables de infiltración, pozos de absorción en ciclovías y en los camellones y parada de autobuses. Lo que se muestra en la simulación de Iber como punto crítico coincide con los puntos y puentes que se observaron de la misma manera como críticos en la visita de campo, ya que se observaron alteraciones y deformación en los mismos puentes, generando que el agua que corre por el río sea desbordada o que la capacidad del mismo canal no sea suficiente. Gracias a las intervenciones propuestas mencionadas previamente, se mostraron cambios en las simulaciones de Iber. Se mostró disminución de agua que corre por los cauces en los años futuros, eso es una buena señal ya que el agua se está infiltrando y gestionando de manera correcta, disminuyendo los puntos de peligrosidad.

5.3.11 Evaluación de Impactos y Conclusiones

Dentro de los impactos de nuestro proyecto es importante recalcar que los impactos positivos son la reducción de riesgos de inundación en donde las distintas construcciones e intervenciones como las represas y áreas de infiltración tienen el potencial de reducir

significativamente los riesgos de inundación al controlar el flujo del agua y proporcionar áreas de almacenamiento, a su vez existe una mejora en la gestión de aguas pluviales y protección de áreas urbanas ayudando a gestionar de manera más efectiva las aguas pluviales, evitando su acumulación y reduciendo la presión sobre los sistemas de drenaje donde mientras reduzcamos la velocidad del agua y mejorar la capacidad de infiltración en donde las propuestas buscan proteger las áreas urbanas contra inundaciones , minimizando los daños a infraestructura y propiedades.

Estas propuestas para la mitigación de inundaciones e infiltración de agua pluvial presentan una serie de impactos positivos, desde la reducción de riesgos hasta beneficios ambientales y sociales. La combinación de enfoques preventivos y participación comunitaria sugiere un enfoque integral y sostenible para abordar los desafíos relacionados con el agua en la cuenca. Finalmente, entendemos los impactos positivos del proyecto de mitigación de inundaciones e infiltración de agua pluvial. Destacando distintos puntos clave sobre cómo funcionan estas infiltraciones considerando estos ambientes sociales y la protección de infraestructura y propiedades de las comunidades cercanas a estas áreas de impacto y peligrosidad.

5.3.12 Discusión y Recomendaciones

Durante el exhaustivo análisis territorial y las simulaciones llevadas a cabo en el transcurso del semestre, se ha destacado un descubrimiento significativo relacionado con la implementación de la infraestructura de infiltración en la cuenca asignada al río Garabato. Este hallazgo encuentra respaldo tanto en la literatura especializada como en las prácticas de gestión del agua implementadas a nivel global. La propuesta de infraestructuras que hemos desarrollado constituye una combinación de ideas adaptadas a las condiciones específicas de la zona metropolitana de Guadalajara, configurándose como un proyecto con viabilidad tangible para la ciudad.

Este proyecto, en su eventual ejecución, promete generar beneficios trascendentales en términos ambientales, sociales y económicos para la ciudad de Guadalajara. Se reconoce que mantener el agua dentro de las cuencas aporta al ciclo hidrológico natural, confirmando una resiliencia crucial frente a los desafíos del cambio climático. Desde una perspectiva socioeconómica, los impactos positivos incluyen la reducción del riesgo de inundaciones, la mejora de la infraestructura urbana, el bienestar general en la comunidad y una gestión eficiente del recurso hídrico, lo que se traduce en beneficios económicos sostenibles.

En aras de perfeccionar y fortalecer este proyecto, es imperativo realizar una investigación más profunda sobre los tipos de suelos presentes en Guadalajara para modelar y evaluar de manera más precisa la capacidad de infiltración. Además, la obtención de un modelo de elevación más preciso contribuirá a una mayor exactitud en las simulaciones, identificando de manera más acertada los puntos de riesgo. Una recomendación crucial es la inclusión activa de la comunidad en todas las fases del proyecto, asegurando que comprendan plenamente el alcance y la importancia de una gestión efectiva del agua. Este compromiso comunitario no solo fomentará el cuidado y la preservación de la infraestructura propuesta, sino que también la integrará como parte esencial de la vida cotidiana de la comunidad.

5.4 Propuestas constructivas

La gestión efectiva del agua en entornos urbanos es crucial para abordar los desafíos de inundaciones y asegurar la sostenibilidad hídrica. En este informe, presentamos un conjunto de propuestas de intervención cuidadosamente seleccionadas para optimizar la gestión del agua en áreas vulnerables. Desde la creación de un Parque Lineal hasta la implementación de Pozos de Infiltración, Arroyos Infiltrantes, y una Ciclovía y Camellón Infiltrante, nuestro enfoque busca integrar soluciones que mejoren la calidad de vida, reduzcan el riesgo de inundaciones y contribuyan a la sostenibilidad hídrica en entornos urbanos y suburbanos.

5.4.1 Descripción del Problema

El Arroyo Seco enfrenta un problema de inundaciones periódicas debido a eventos climáticos extremos, sobre todo en las temporadas de lluvias. Estas inundaciones tienen impactos significativos en el entorno urbano a lo largo de la cuenca, ya que, dañan la infraestructura local, afectan la seguridad de las personas, amenazan la sostenibilidad ambiental de la zona, etc.

Esta problemática de inundaciones ha estado a lo largo de los años generando daños a la Infraestructura urbana, como a las calles, casas habitacionales, etc. de la zona. Cabe recalcar que en el crecimiento de la ciudad hacia la cuenca, es decir, al momento de urbanizar, le están dando prioridad a construir sin respetar el cauce natural del arroyo, ocasionando inundaciones, adelgazan los canales, para seguir construyendo, causando que las casas colapsen, etc. También, las inundaciones han generado pérdidas de viviendas de la zona, por lo que en las zonas de alta peligrosidad no están cien por ciento seguras, no se sabe cuándo el agua pueda inundar vivienda dañando las cosas personales o la misma vivienda (edificio) en general, pero,

sobre todo, no están exentos de que alguna inundación pueda terminar con la vida de alguien. También, estamos hablando de los comercios de la zona, una catástrofe puede dañar el negocio de alguna persona, por lo mismo, afecta de la economía de la comunidad.

Gracias a la cantidad que estas inundaciones se están generando mucha contaminación, también, las personas no son conscientes de no tirar basura a los canales, por lo que los mismo están llenos de basura. La cantidad de basura genera, malos olores, gases, bacterias, etc. esto puede generar enfermedades transmitidas por el medio ambiente contaminado o por el agua sucia.

Lo que se espera con las intervenciones es poder gestionar de mejor manera el agua, poder retener el agua y crear elementos de infiltración del agua para disminuir el tema de inundaciones y sea un lugar seguro para las personas que viven alrededor de la cuenta. También, concientizar a personas para la captación y gestión del agua pluvial.

5.4.2 Objetivos de la Intervención

Los métodos de recarga hídrica ofrecen una serie de beneficios significativos, entre los que se incluyen el aumento de la disponibilidad de agua, la estabilización y aumento de los niveles piezométricos, el incremento del flujo de base en ríos (con impacto ecológico positivo), el control de la intrusión salina, la reducción de la subsidencia del terreno, el establecimiento de una fuente sostenible de agua subterránea, la sostenibilidad de áreas irrigadas, la estabilización de la erosión del suelo, un análisis positivo de la relación costo- beneficio, el mejoramiento del nivel de vida, la mitigación de inundaciones, el control de la contaminación y el ahorro de espacio superficial para el almacenamiento del agua.

5.4.3. Evaluación Preliminar

La evaluación preliminar del área de estudio constituye un paso fundamental en la concepción de propuestas destinadas a la infiltración hídrica. Este proceso implica un análisis exhaustivo de las condiciones existentes en la zona, permitiendo la identificación de sitios específicos que requieren intervenciones focalizadas. Al considerar factores como la topografía, la hidrología, la composición del suelo y el uso del suelo, se puede desarrollar un enfoque estratégico para la implementación de medidas de infiltración. Este enfoque detallado no solo optimiza la efectividad de las intervenciones, sino que también garantiza una adaptación precisa a las características particulares del entorno, brindando así soluciones más sostenibles y resilientes

a largo plazo. La selección cuidadosa de sitios específicos para la infiltración hídrica se traduce en un mejor rendimiento del sistema y una gestión más eficiente de los recursos hídricos, lo que contribuye a la mitigación de problemas como la escasez de agua y la prevención de inundaciones.

5.4.4. Diseño de la Intervención

Para las distintas propuestas de intervención dentro de nuestro proyecto se buscó realizar un modelo en conjunto donde implementamos distintas propuestas y de esta manera obtener un modelo hidrológico de intervención lo más eficiente posible y lograr tener una mejora significativa para nuestro proyecto y las zonas de peligrosidad en la ciudad y áreas aledañas al arroyo.

Estas intervenciones fueron:

- **Parque Lineal:** Esta propuesta consiste en la creación de un área verde continua y lineal a lo largo de un corredor, como una vía fluvial, una carretera, una vía férrea o cualquier otro espacio lineal. El objetivo principal de un parque lineal es proporcionar un espacio público accesible que combine áreas verdes, senderos para caminar o andar en bicicleta, zonas de recreación y elementos paisajísticos a lo largo de una ruta específica. Lo que buscamos con esta propuesta es mejorar la calidad de vida de los residentes locales y también crear un entorno agradable que fomente la actividad física, el contacto con la naturaleza y la cohesión comunitaria a lo largo de un trayecto lineal en el entorno urbano.
- **Pozo de infiltración:** Esta propuesta está destinada a gestionar y aprovechar el agua pluvial mediante la creación de estructuras que permitan su infiltración en el suelo de manera controlada. Estos pozos son diseñados para recoger, retener y permitir la absorción gradual del agua de lluvia en el subsuelo, contribuyendo así a la recarga de acuíferos y reduciendo el escurrimiento superficial. A su vez lo que se busca es reducir el impacto del escurrimiento superficial y la acumulación de agua pluvial, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico y minimizando los riesgos de inundaciones en áreas urbanas. Estos proyectos son especialmente útiles en entornos urbanos donde el sellado del suelo y la impermeabilización de superficies impiden la infiltración natural del agua de lluvia.

- **Arroyo Infiltrante:** Este es un diseño que ayuda a gestionar las aguas pluviales de manera sostenible al crear un canal o arroyo con características que fomentan la infiltración del agua en el suelo. Este enfoque busca reducir el escurrimiento superficial y aprovechar la capacidad natural del suelo para absorber y retener el agua de lluvia. Esta gestión busca integrar una propuesta tecnológica junto con la planificación urbana, promoviendo la infiltración del agua de lluvia en lugar de su simple canalización. Esto puede resultar beneficioso tanto para la prevención de inundaciones como para la recarga de acuíferos locales, contribuyendo así a la sostenibilidad hídrica en entornos urbanos y suburbanos.
- **Ciclovía y Camellón infiltrante:** Este proyecto específicamente se puede realizar de manera dividida sin ningún inconveniente, pero en nuestro caso para este proyecto decidimos pensarlo de una manera combinada la cual genera una creación de un espacio seguro para el tránsito de ciclistas con características destinadas a gestionar y aprovechar el agua de lluvia de manera sostenible. Este enfoque busca promover la movilidad activa y, al mismo tiempo, contribuir a la gestión eficiente de las aguas pluviales. Lo que buscamos con esta intervención era integrar la infraestructura vial con prácticas sostenibles, aprovechando el espacio de la ciclovía y el camellón central para gestionar las aguas pluviales de manera eficiente y contribuir a un entorno urbano más sostenible.

5.4.5. Beneficios e Impactos

Los beneficios e impactos de todas estas propuestas son muy grandes y muy amplios ya que se consideran demasiadas cosas en conjunto, pero dentro de estos beneficios e impactos destacan la importancia de considerar enfoques integrales y sostenibles en la gestión del agua y el diseño del entorno urbano. Cada propuesta aborda aspectos específicos, pero juntas pueden contribuir significativamente a la resiliencia, la sostenibilidad y la calidad de vida en las comunidades locales.

También en el área de beneficios podemos destacar distintos puntos muy importantes como lo son:

- Reducción de Riesgos de Inundación

Esto gracias a la creación de espacios verdes y áreas de infiltración, las cuales contribuyen a reducir el riesgo de inundaciones al gestionar el agua de lluvia de manera más efectiva.

El almacenamiento del agua pluvial el cual permite su infiltración controlada, reduciendo la presión sobre los drenajes pluviales y evitando la saturación de los mismos.

También la facilitación de la infiltración gradual del agua de lluvia, minimizando los escurrimientos superficiales y los riesgos asociados.

- Gestión Sostenible del Agua

Promover la sostenibilidad al incorporar prácticas de diseño que favorecen la retención y absorción natural del agua.

Contribuir a la gestión sostenible del agua al recargar acuíferos y prevenir el desperdicio de recursos hídricos.

Aprovechamiento del entorno natural para infiltrar agua de lluvia de manera eficiente y sostenible.

- Mejora de la Calidad del Agua

La vegetación y áreas verdes ayudaran a filtrar y mejorar la calidad del agua. Filtrar el agua de lluvia a medida que se infiltra en el suelo, reduciendo la carga de contaminantes.

Contribuir a la filtración natural del agua, mejorando su calidad antes de ingresarla a cuerpos de agua cercanos.

- Promoción de la Biodiversidad

El diseño paisajístico y la vegetación promueven hábitats naturales y la biodiversidad local.

Puede favorecer el desarrollo de ecosistemas locales al recargar los niveles freáticos y mantener humedad en el suelo.

La vegetación ripiaría y el diseño ecológico fomentan la biodiversidad en las cercanías del arroyo

- Fomentar la Movilidad Activa y Recreación

Promociona un espacio seguro y atractivo para actividades recreativas y movilidad activa para la población.

Su diseño puede integrarse con áreas recreativas, contribuyendo al uso multifuncional del espacio.

Se pueden incluir senderos y áreas verdes de recreación junto al arroyo, fomentando el disfrute del entorno natural.

- Impacto Social y Comunitario

Mejora la calidad de vida al proporcionar espacios verde accesibles y promover la interacción comunitaria.

Sensibiliza a la comunidad sobre la gestión sostenible del agua y su importancia para el entorno y la sociedad.

Contribuye a la construcción de comunidades más sostenibles y conectadas a través del uso consciente del entorno natural.

- Estímulo Económico

Puede aumentar el atractivo de la zona, beneficiando a negocios locales y propiedades circundantes como a la ciudad en general.

Poco a poco esta gestión eficiente del agua puede reducir costos asociados a inundaciones y daños a la infraestructura de las comunidades.

Contribuye al atractivo de la comunidad, potencialmente impulsando el valor de propiedades cercanas,

5.4.6. Consideraciones Ambientales

Las propuestas de infraestructura para la cuenca se fundamentan en gran medida en la infiltración del agua en el subsuelo, una práctica que ofrece numerosos beneficios, como la reducción del riesgo de inundaciones, una gestión más eficaz del agua y el respaldo al ciclo hidrológico. Aunque estos aspectos son altamente positivos, la infiltración de agua conlleva consideraciones ambientales que no deben pasar desapercibidas.

La implementación principal que se busca llevar a cabo en esta propuesta es el uso de pozos de infiltración. Sin embargo, este mecanismo no está exento de consideraciones ambientales importantes. El agua que se pretende infiltrar a menudo proviene de escorrentías urbanas y puede contener contaminantes tales como hidrocarburos, grasas, materia orgánica y residuos sólidos. La infiltración de este tipo de agua tiene el potencial de alterar física y químicamente la calidad del agua ya presente en los acuíferos, un aspecto crucial dado que la zona metropolitana de Guadalajara depende en gran medida del agua subterránea como fuente hídrica.

Otro aspecto relevante al considerar la construcción de pozos de infiltración es el riesgo de erosión que estos pueden generar con el tiempo, ya que el proceso natural de circulación del agua tiende a erosionar el suelo. Es esencial abordar estas consideraciones ambientales de manera integral durante la planificación e implementación de la infraestructura, garantizando así que los beneficios de la infiltración no comprometan el equilibrio ambiental y la calidad del agua subterránea en la región.

Una estrategia efectiva para abordar estas consideraciones ambientales consiste en garantizar que los sitios seleccionados para la infiltración se respalden con un exhaustivo estudio de suelos. De esta manera, se puede planificar la construcción de los pozos teniendo en cuenta factores como la profundidad adecuada, el ancho apropiado y los materiales idóneos, con el objetivo de minimizar el riesgo de erosión.

En el proceso de diseño de los pozos de infiltración, es crucial considerar la calidad del agua que se pretende infiltrar. Esto implica una evaluación detallada de la red hidráulica y de alcantarillado de la zona, asegurándose de que los pozos solo reciban agua pluvial y no estén siendo alimentados por aguas residuales domésticas. La delimitación clara de las fuentes de agua destinadas a los pozos es esencial para preservar la integridad del recurso hídrico infiltrado.

Además, durante la fase constructiva, se puede implementar una infraestructura que filtre y elimine contaminantes antes de que el agua ingrese al pozo. Este proceso podría incluir la instalación de trampas de grasas y filtros, contribuyendo así a garantizar que solo se infiltre agua de la más alta calidad. La adopción de estas medidas no solo fortalece la efectividad de la infraestructura de infiltración, sino que también minimiza el impacto ambiental negativo asociado con la práctica.

5.4.7. Evaluación de Riesgos y Gestión

Para llevar a cabo una gestión efectiva de las intervenciones en la cuenca, es crucial enfocarse en dos aspectos clave: el mantenimiento y la vigilancia. El monitoreo constante de las infraestructuras propuestas es esencial para verificar su correcto funcionamiento y prevenir posibles problemas a lo largo del tiempo.

En cuanto al mantenimiento, se destaca la importancia de desazolvar regularmente los pozos de infiltración. Este proceso implica la remoción de materiales acumulados en el pozo, como sedimentos, residuos sólidos y materia orgánica, entre otros. Además, es esencial llevar a cabo revisiones estructurales para garantizar que el pozo no represente riesgos para la comunidad ni para el medio ambiente.

El objetivo principal de estas prácticas de mantenimiento es asegurar la efectividad de las intervenciones y prevenir posibles riesgos, como desbordamientos, malos olores e infiltración de agua de baja calidad en el subsuelo. Proponemos realizar este mantenimiento al menos una vez al año, preferiblemente antes del inicio del período de lluvias. Además, es importante la implementación de un plan de vigilancia integral a lo largo de todo el año, asegurando así una supervisión continua y la detección temprana de cualquier problema potencial.

Es esencial incorporar activamente a la comunidad local en este proceso, fomentando una participación activa para que asuman la responsabilidad del cuidado de estas intervenciones y comprendan los beneficios que estas pueden aportar tanto a la ciudad como al ciclo hidrológico del agua. Al hacerlo, se busca empoderar a la comunidad para que no solo reconozca el valor de estas iniciativas, sino que también se comprometa activamente en su preservación y buen funcionamiento.

Este enfoque integral no solo busca garantizar la eficacia a corto plazo de la infraestructura, sino que también contribuye a la sostenibilidad a largo plazo del proyecto. Al establecer un ciclo de mantenimiento y vigilancia, nos aseguramos de que la infraestructura tenga una vida útil prolongada, cumpliendo con los objetivos del proyecto y preservando la salud del ecosistema acuático y terrestre en la cuenca.

Se analizan los riesgos asociados a la intervención y se proponen estrategias de gestión y mitigación de riesgos, garantizando la seguridad y la sostenibilidad de la obra.

5.4.8. Evaluación Económica y Financiera

Con las propuestas ya mencionadas previamente en el punto número 5 no se realizó un presupuesto en específico ya que se necesitan más especificaciones de los materiales, medidas, cantidades, etc. pero se generaron precios aproximados de las intervenciones ya propuestas. Las ciclovías tienen un costo aproximado de 2 millones de pesos por kilómetro, estas ciclovías son de concreto permeable de 10 cm con filtro de arenas y gravas, tiene pozos de 20cm de ancho y 20cm de profundidad a cada 20 metros. Los camellones infiltrantes tienen una funcionalidad similar a las ciclovías ya que el agua en ambos casos es dirigida a pozos de infiltración, el precio es el mismo 2 millones de peso por kilómetro. Las paradas de autobús de captación de agua tienen como presupuesto aproximado de la estructura de infiltración de \$60,000 y de la estructura del parabus con \$50,000 con una sumatoria de \$110,000 aproximadamente cada uno. En arroyo infiltrante se está considerando el precio de los pozos de infiltración ya que hay un arroyo existente, el precio aproximado es de \$1'750,000 por pozo. Por último, están los parques lineales permeables que infiltran agua tiene un presupuesto aproximado de 20 millones de pesos.

5.4.9. Conclusiones y Recomendaciones

En conclusión, el informe destaca el problema de inundaciones periódicas que enfrenta el Arroyo Seco debido a eventos climáticos extremos, generando impactos significativos en la infraestructura urbana y la seguridad de la población. La falta de consideración en el desarrollo urbano ha exacerbado esta problemática. Las inundaciones también afectan la economía local y generan contaminación debido a la acumulación de basura.

Las intervenciones propuestas, como el Parque Lineal, Pozos de Infiltración, Arroyo Infiltrante y Ciclovías con Camellones Infiltrantes, buscan gestionar de manera efectiva el agua pluvial, reducir el riesgo de inundaciones y crear espacios seguros y sostenibles. Estas intervenciones ofrecen beneficios significativos, como la reducción de riesgos de inundación, gestión sostenible del agua, mejora de la calidad del agua, promoción de la biodiversidad, fomento de la movilidad activa y recreación, impacto social y comunitario, estímulo económico, y consideraciones ambientales.

El informe destaca la importancia de una evaluación preliminar del área de estudio, un diseño integral de intervenciones, consideraciones ambientales durante la implementación, y la necesidad de evaluación de riesgos y gestión continua. Se propone un enfoque de

mantenimiento regular y vigilancia, involucrando activamente a la comunidad para garantizar la efectividad y sostenibilidad a largo plazo de las intervenciones.

En cuanto a la evaluación económica y financiera, se proporcionan costos aproximados para las intervenciones propuestas, aunque se reconoce la necesidad de detalles específicos para una evaluación más precisa. Se destaca la importancia de la participación comunitaria y la conciencia de la gestión sostenible del agua para el éxito a largo plazo del proyecto.

6. Conclusiones

6.1 San Juan de Abajo

6.1.1 Conclusiones

El trabajo realizado para la cuenca de San Juan de Abajo llevó una obtención, procesamiento y presentación de datos utilizando herramientas de SIG y simulación. Este escenario tiene un contexto hidrológico interesantísimo. Es un lugar que se encuentra cercano al agua en varios sentidos. En un lado se encuentra el Río Huichichila, al otro está el imponente Río Ameca, y en la lejanía se encuentra el Océano Pacífico.

El análisis hidrológico que se realizó y las visitas de sitio fueron de gran ayuda para entender cómo abordar nuestras ideas. Pudimos comprender la importancia que tiene conocer las áreas de estudio y las zonas de riesgo para facilitar la presentación de información (mediante mapas) a las personas, y qué tomen decisiones con base en lo que se les comentó. Gracias a las visitas del sitio validamos que los habitantes del pueblo tienen un compromiso considerable en hacer que sucedan cosas que beneficien al pueblo. Tenemos la impresión de que los habitantes ya están abiertos a colaborar con nosotros. Nos han dado su confianza y es algo que se tiene que cuidar. San Juan de Abajo es un lugar muy especial. Lo más importante fue entender cómo dirigirse a las personas y aprender a entender sus necesidades y estar abiertos a escuchar sus comentarios ya que todo el proyecto es para ellos y nadie más.

En San Juan de Abajo hay que aprender a pensar en plural. No hay espacio para el beneficio privado sino para el público y colectivo. Aquí hay comunidad. Este PAP puede ayudar a tejer lazos fuertes entre los habitantes del pueblo. Nos gusta creer que esto que nosotros hicimos probablemente tendrá un impacto muy positivo para los habitantes de San Juan. Fue una etapa muy buena y pensar en la dimensión que este proyecto puede tener es impactante. Trabajar en este escenario tiene mucho valor. Nos quedamos muy satisfechos con el proyecto.

6.1.2 Recomendaciones

Enfatizamos la necesidad de pensar siempre en lo colectivo. A los habitantes del pueblo les interesa su comunidad y ese es el camino que hay que seguir para desarrollar proyectos buenos y acertados. No estamos solamente recargando los mantos acuíferos y previniendo inundaciones. Con nuestras propuestas buscamos darle algo más al pueblo. Por esto se debe tener en cuenta la búsqueda del sentido de comunidad dentro de San Juan. De igual manera es importante que los próximos integrantes de este proyecto tengan la sensibilidad necesaria para acercarse a las personas, de entender el valor natural que hay en San Juan y de pensar colectivamente.

Y como buena práctica, también se les recomienda comenzar las simulaciones en IBER lo más pronto posible, el tiempo durante el semestre transcurre rápido, por lo que es bueno esforzarse por presentar resultados bien trabajados a la comunidad.

6.1.3 Próximos retos del proyecto

Un reto para el proyecto será cuidar de la participación ciudadana y estar siempre en el mismo canal que los habitantes de San Juan. Otro reto es el terminar de “amarrar” las propuestas hechas este semestre para poder desarrollarlas a fondo y hacer que se construyan. Investigar sobre las zonas de intervención, validar que sí se puedan usar, escoger materiales, plantear un cronograma de construcción y de financiamiento, para que puedan llegar a la operación. ¡Ánimo equipo! ¡Ustedes pueden!

6.2 Arroyo Seco

6.1.1 Conclusiones

Las intervenciones propuestas pueden llegar a tener un impacto significativo en la mejora de la calidad de vida de una población de diversas maneras como lo son:

- Reducción de Riesgos y Daños

Estas intervenciones pueden ser proyectos de gestión de inundaciones muy eficientes y pueden reducir los riesgos asociados con las lluvias intensas. Esto disminuye la posibilidad de inundaciones, deslizamientos de tierra y otros desastres relacionados con el clima, lo que a su vez protege la vida y la propiedad de las comunidades.

- Mejora de la Seguridad

Al implementar medidas preventivas, se aumenta la seguridad de las comunidades frente a eventos climáticos extremos. Esto permite que las personas vivan con menos preocupación sobre posibles inundaciones, lo que se traduce en una sensación de seguridad y bienestar general.

- Infraestructura Sostenible

La construcción de infraestructuras pluviales resistentes y sostenibles contribuye a una mayor durabilidad de las instalaciones urbanas. Esto no solo protege a las personas durante eventos climáticos adversos, sino que también reduce la necesidad de reparaciones constantes y costosas, mejorando la estabilidad económica de la comunidad.

- Acceso a Servicios Básicos

La prevención de inundaciones y daños relacionados con las lluvias ayuda a garantizar el acceso continuo a servicios básicos como agua potable, saneamiento y electricidad. Estos servicios son esenciales para la calidad de vida y la salud de la población.

- Desarrollo Sostenible

Las intervenciones pluviales bien planificadas pueden integrarse en estrategias de desarrollo sostenible. Esto implica considerar aspectos como la conservación del agua, la gestión de recursos naturales y la promoción de prácticas ecológicas, lo que contribuye a un entorno más saludable y sostenible a largo plazo.

- Participación Comunitaria

Involucrar a la comunidad en la planificación e implementación de intervenciones pluviales no solo asegura que las soluciones sean culturalmente apropiadas, sino que también fortalece el sentido de comunidad. La participación activa fomenta la cooperación entre los residentes, promoviendo una red de apoyo que puede ser crucial durante situaciones de emergencia.

Todas estas intervenciones pluviales no solo protegen a las comunidades de eventos climáticos extremos, sino que también contribuyen de manera integral a la calidad de vida, la seguridad y desarrollo sostenible de la población.

Como principal idea del proyecto pudimos notar la necesidad urgente de una planificación urbana adecuada en la cuenca. Se evidencia que las acciones actuales se centran en reparar daños existentes o inminentes, subrayando la importancia de pensar en una

planificación preventiva desde el inicio. El enfoque propuesto implica anticipar soluciones y considerar las repercusiones a largo plazo, evitando la creación de respuestas únicamente reactivas. Además, se enfatiza la importancia de involucrar a las comunidades locales en proyectos de intervención social, reconociendo que estas poblaciones son las más afectadas por los riesgos asociados con inundaciones y lluvias. La propuesta sugiere que una intervención bien planificada y atractiva, que involucre a las comunidades, no solo reduciría los daños, sino que también promovería el apoyo y la participación para lograr un proyecto funcional e inclusivo tanto a nivel gubernamental como social.

6.1.2 Recomendaciones

Se sugiere realizar un análisis más profundo de las propuestas en colaboración con los organismos operadores, buscando reuniones directas con expertos en gestión hídrica y planificación urbana. Esta colaboración permitiría enriquecer las simulaciones con datos específicos y obtener resultados más precisos y aplicables. La retroalimentación de los organismos operadores contribuiría a evaluar la viabilidad técnica y financiera de las propuestas, alineándolas con las capacidades y objetivos gubernamentales. Este enfoque mejorado fortalecerá la base de datos para las simulaciones y presentará una propuesta más respaldada y efectiva ante las autoridades pertinentes.

6.1.3 Próximos retos del proyecto

El proyecto se enfrenta a un desafío significativo en la obtención de los presupuestos necesarios para llevar a cabo la implementación propuesta. Aunque se ha completado un análisis exhaustivo de la simulación hidrológica, se reconoce la carencia de datos detallados sobre los costos asociados con la ejecución del proyecto. La ausencia de información específica sobre los gastos involucrados limita la capacidad de presentar a las autoridades datos concretos que respalden la viabilidad financiera del proyecto.

Para abordar esta brecha en la información, se hace necesario realizar un estudio más detallado y específico que permita recopilar datos crudos precisos relacionados con los costos de implementación. Este análisis más profundo podría involucrar la consulta con expertos en ingeniería, la obtención de cotizaciones de proveedores de servicios y materiales, así como la consideración de factores como la topografía local, las condiciones del suelo y los requisitos de infraestructura. Además, se podría explorar la posibilidad de colaboración con entidades

gubernamentales y organizaciones especializadas para obtener asesoramiento adicional sobre los costos asociados con proyectos similares.

Al proporcionar datos más concretos sobre los costos, el proyecto aumentará su credibilidad y permitirá a las autoridades evaluar de manera más precisa la viabilidad financiera y la importancia estratégica de la implementación propuesta. Este enfoque, respaldado por una evaluación económica más detallada, fortalecerá la posición del proyecto al demostrar la planificación y consideración cuidadosas de los aspectos financieros necesarios para su éxito.

Reflexiones PAP

Rosa María Almaraz Reynoso

A lo largo del PAP aprendí sobre diversas herramientas como IBER, AutoCAD, y usé otras que ya conocía: ArcGIS Pro, SolidWorks, QGIS, y Excel. Durante el desarrollo del proyecto tuvimos que buscar información en diversas fuentes (varias de ellas no estaban disponibles gratuitamente, pero contamos con la buena fortuna de que el ITESO las tiene disponibles para las investigaciones académicas). Realizamos un tratamiento de datos completo, desde la obtención, la organización en tablas dinámicas de Excel, aplicamos estadística para la elaboración de un sinnúmero de histogramas, organizamos los datos del suelo y los asignamos a tablas de atributos en ArcGIS, creamos varias capas, las metimos a IBER, y finalmente llegamos a las simulaciones resultantes finales. Todo el trabajo y el tiempo invertido al final se resume en imágenes: mapas. Estoy muy agradecida con mis compañeros y los profesores que nos acompañaron durante el PAP; porque son ellos quienes vieron el esfuerzo que se dedicó a cada paso y reconocen las futuras aplicaciones que tienen los resultados.

Es importante mencionar la salida de campo a San Juan de Abajo. Como estudiante, una no se imagina la importancia que tienen los pequeños detalles (como que los metros sean lo más acertados posibles cuando pones un punto en el mapa, o cuando planteas la diferencia de rugosidad entre un cultivo de maíz y sandía, etc.) hasta que ves a las personas para las que estuviste desvelándote e investigando a los ojos. Entonces, te das cuenta de que esa pequeña diferenciación que hiciste es importante, porque es el cultivo de esta persona, porque es el lugar donde esta persona vive y donde espera que sus futuras generaciones crezcan sin temerle a las inundaciones del futuro. Porque se trata de la vida cotidiana de una población de

aproximadamente 11,000 personas, cuyo futuro (en un tiempo de retorno) puede verse afectado por no haber tomado las decisiones correctas con anticipación (como desarrollar la urbanización fuera de la zona de máximo riesgo, o evitar que se inunde tal calle del pueblo construyendo unos gaviones cuenca arriba).

San Juan de Abajo es un lugar hermoso, cuya vegetación cambia dentro de la misma cuenca, y su agua está abastecida (a veces, en exceso por las inundaciones). El cambio en las condiciones climáticas es percibido por los mismos habitantes, y están dispuestos a escuchar a los estudiantes para tomar decisiones sobre qué se va a hacer en su pueblo. Creo que no hay dicha más grande que recibir el reconocimiento de las personas por quién tanto nos estuvimos esforzando y que se interesen en el proyecto. Espero que el próximo PAP pueda tomar decisiones y lleve al desarrollo las propuestas constructivas. Les deseo lo mejor.

Yoshiro Susumo Azano Carrillo

- Me fue muy interesante todo lo aprendido en el PAP, ya que pude aprender como usar el software de IBER, que nos deja manejar gastos de entrada a gran detalle en términos de rugosidad y perdidas de infiltración, por lo que nos deja tener una salida del agua con resultados confiables que nos ayudan a poder hacer un diseño para resolución de problemas de inundación. El otro software que aprendimos fue el Arcgis, en el que nos deja implementar lo antes visto en IBER a Arcgis. Con ello se pueden dar soluciones más realistas para problemas de ciudades, ya que te deja implementar mapas en donde se agregan niveles de curva, rugosidades e infiltraciones. Con esto completado se puede empezar a hacer simulaciones para ver cómo se comportan las lluvias desde un hidrograma con un tiempo de retorno de 10 años. En ello podemos ver los lugares con mayor peligrosidad y poder proponer soluciones para disminuir la peligrosidad. Estos programas me van a ayudar para mi carrera profesional, ya que va de la mano con la obra civil, pudiendo hacer simulaciones para ver cómo se comporte cierta área, y con esto poder hacer una propuesta, así como se hizo en este PAP. El poder tener la herramienta para poder simular problemas de ciertas áreas me ayudara mucho a poder proponer soluciones más reales y detalladas.
- El poder ayudar a un municipio como San Juan de Abajo, con una simulación de una lluvia con un retorno de 10 años, y poder ofrecer soluciones reales hacia los cauces con

mayor peligrosidad, creo que es un trabajo que, si bien los ciudadanos y encargados deciden escucharnos, podremos hacer un gran cambio. Los ciudadanos no habían sido muy receptivos con las propuestas de grupos pasados. Pero en la última ida a San Juan de Abajo, respetaron el trabajo y creo que eso abre las puertas a que los siguientes estudiantes del PAP puedan trabajar de la mano con los ciudadanos para el mejoramiento de su municipio.

- En términos de lo ambiental, si a las propuestas se les da su seguimiento, podrán tener un impacto de gran magnitud, ya que reduciría la peligrosidad que se presenta en varias partes del municipio, esto evitando el tener que dejar de circular en carro o resguardarse en sus casas cada vez que llueva fuerte. Al tener un mejor uso del agua los ciudadanos podrán aprovechar espacios para acuicultura y espacios como albercas naturales lo cual fomentarían el cuidado del agua.

Sofía Limón Ochoa

La ejecución del proyecto de aplicación profesional ha sido una experiencia enriquecedora, permitiéndome aplicar y desarrollar diversas habilidades adquiridas a lo largo de mi formación en ingeniería civil. La utilización de software especializado como IBER, ARCGIS y AUTOCAD ha ampliado mi comprensión sobre el manejo de datos y la implementación de propuestas. Desde la delimitación del área de estudio hasta la obtención de resultados, cada paso de la metodología ha contribuido significativamente a mi conocimiento.

Este proyecto ha sido especialmente valioso al abordar la problemática crucial de la gestión inteligente del agua, ofreciendo soluciones concretas para la ciudad de Guadalajara. La comprensión más profunda de cómo se puede gestionar el agua en entornos urbanos complejos y la capacidad de proponer intervenciones significativas son aspectos clave que he adquirido durante este proceso. La magnitud de la problemática y la necesidad de soluciones efectivas para evitar escenarios catastróficos, como la escasez de agua, se han vuelto aún más evidentes.

La satisfacción derivada de proponer soluciones a esta problemática es notable, ya que el estudio exhaustivo y la aplicación de metodologías específicas son fundamentales para obtener resultados favorables. Este proyecto no solo ha fortalecido mi comprensión técnica, sino que también ha

consolidado mi compromiso con la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para desafíos significativos en la gestión del agua en entornos urbanos.

Ana Karen Madrigal García

A lo largo del semestre he aprendido mucho del tema de la hidrología, yo como arquitecta, en mi carrera no se tocan estos temas a profundidad, solo ubicamos a los cauces en programas como QGis para ubicar brevemente un poco de la geografía de algún sitio. Se me hizo muy interesante el adentrarme cien por ciento a estudiar todo lo que conlleva la hidrología desde su origen como los cerros hasta donde desembocará el agua, también, me sensibilicé en el tema de la gestión del agua, al final de cuentas, es un recurso que todos necesitamos, pero ¿por qué no la estamos cuidando ni gestionando? Retomando, gracias a que me volví un poco más perceptible ahora puedo ubicar sitios proponer soluciones a los problemas de la hidrología que actualmente estamos viviendo, ya que, en la ciudad, como, por ejemplo, el arroyo Seco, hay mucha necesidad de propuestas para solucionar problemáticas

Gracias a este PAP, donde trabajé con, ingenieros ambientales e ingenieros civiles, pude aprender acerca de sus carreras, sobre todo los ambientales ya que conocen tema del agua desde una manera más pura, también, el conocer sus perspectivas acerca de este estudio, que se necesita para una buena investigación, pero un poco más técnico. También, aprendí a usar programas como Iber y ArcGis, como también, aprendí a obtener los diferentes tipos de datos que se necesitan para realizar simulaciones en Iber, con distintos hietogramas para conocer el comportamiento del agua ante cualquier situación de lluvia y sobre todo para ubicar las zonas de más peligro, para así, proponer soluciones.

También, se me hizo muy interesante trabajar y proponerles a los de IMEPLAN nuestros análisis que generamos a lo largo del semestre, ya que, gracias a todos los estudios, nos dimos cuenta de que, si existe una problemática muy grande, gracias a la mala gestión del agua. Para nosotros es muy importante el poder ayudar a proponer soluciones a esta problemática, sobre todo porque es una zona que está casi 75% y un poquito más urbanizada, donde cada temporada de lluvias, los habitantes que están en la zona donde corren los cauces del arroyo Seco, tienen un riesgo enorme principalmente por las inundaciones, donde hay veces que familias pierden sus hogares, entre otras cosas.

Joaquín Sainz Hermosillo

A lo largo de este Programa de Aprendizaje Práctico (PAP), he adquirido habilidades significativas que, tanto desde una perspectiva curricular como profesional, añaden un valor sustancial a mi perfil. La capacidad para analizar el territorio de manera espacial ha ampliado mi comprensión sobre la intrincada interconexión entre la geología y la naturaleza, revelando cómo estos elementos están intrínsecamente vinculados a la configuración del planeta.

Entre las habilidades fundamentales adquiridas durante este semestre, destaca mi competencia en la simulación mediante el programa Iber. Este enfoque me ha permitido explorar de manera más detallada fenómenos hidrológicos como la erosión, sedimentación, rugosidad e infiltración. Además, el desarrollo de mis habilidades en sistemas de información geográfica (SIG) ha sido esencial para la ejecución y optimización del proyecto.

Desde una perspectiva hidrológica, el entendimiento profundo del ciclo del agua en un sistema cerrado, como lo representa una cuenca, ha abierto nuevas perspectivas en mi enfoque hacia la planificación urbana y el desarrollo de la ciudad. Este conocimiento no solo me ha dotado de una visión más holística de la gestión del agua, sino que también ha provocado preguntas y reflexiones sobre la manera en que la urbanización y los proyectos de desarrollo urbano deben alinearse con los procesos naturales.

A través de mi participación en este proyecto, he llegado a comprender de manera más profunda la relevancia global de la gestión del recurso hídrico. Esta conciencia ha fortalecido mi perspectiva sobre la magnitud de la problemática del agua a nivel mundial, subrayando la importancia de que la población en general tome conciencia de este tema. A medida que el cambio climático intensifica los desafíos asociados con la crisis del agua, la necesidad de abordar estos problemas con urgencia y enfoques sostenibles se vuelve aún más crucial.

Diego Seidel Quirarte

En aspectos que tienen que ver con lo técnico y profesional puedo decir que este PAP me dio mucha apertura a ver una parte del mundo con ojos nuevos. Ahora cuando veo cerros a lo lejos no veo solamente un gran pedazo de tierra, veo un camino por el cual el agua fluirá. Veo una oportunidad de infiltrar y de utilizar el terreno a nuestro favor. Creo que este proyecto me dio la capacidad de complementar mi formación de arquitecto. Puedo pensar un poco más allá. Ahora

puedo entender por dónde va el agua y esto es algo muy relevante. Me hice consciente de la importancia que existe en nuestra ciudad de comenzar a tener acciones que puedan revertir o mejorar el déficit que hay en el acuífero del AMG. Es importante que personas en el ámbito de la construcción, la arquitectura y el urbanismo puedan tener acercamientos a proyectos como este ya que la conciencia solo se crea cuando se tiene una situación de frente. Durante la carrera de Arquitectura no tuve oportunidad de darme un clavado en temas como este y sinceramente me parece una pena que hasta el último semestre pude hacerlo.

Ambientalmente entiendo que estamos en una crisis y la presencia de proyectos como este me hace pensar que estamos caminando por el sendero correcto. El agua es la base para toda nuestra vida y si no la cuidamos o si no entendemos la necesidad que tenemos de recargar los acuíferos, nunca saldremos del pozo. Para salir del pozo, éste debe tener agua. Las propuestas que hicimos en el equipo de San Juan me parecen muy acertadas. Creo que ambientalmente tuve la comprensión necesaria para guiar las ideas por dónde deberían de ir.

El aspecto social del PAP me parece muy valioso. Esto se debe que al final del día los proyectos e intervenciones que hemos propuesto están siendo dirigidas para las personas de San Juan de Abajo. Conocer a aquellos involucrados en la búsqueda del bienestar para el pueblo fue algo muy especial. Durante las dos visitas que realizamos pude sentir una energía muy positiva que provenía de estas personas. Hay un sentido de comunidad muy fuerte en San Juan y gracias a esto los proyectos (siempre y cuando estén planteados para beneficiar a la comunidad y no a un solo individuo) van a caminar solitos. Las personas tienen ganas de involucrarse en lo que sucede dentro de su pueblo, no hay apatía, sino que se siente la emoción de las personas por cambiar y mejorar su entorno.

San Juan de Abajo tiene una energía muy especial. Su gente y el río Huichichila tienen algo que no podría describir con palabras. Hay mucho valor en este pequeño pueblo y hay que cuidar de su gente y de sus recursos naturales. Agradezco mucho haber participado en este proyecto. Creo que me dejó muchas herramientas, buenos recuerdos y un entendimiento más amplio de nuestra existencia.

Miguel Ángel Valenzuela Ponce

A lo largo de todo este trabajo de intervención en el área estudiada que fue la de la cuenca que incluye los ríos de arroyo seco, arroyo teinzti que y arroyo garabato, me pude percatar que existe una gran necesidad de una planeación urbana adecuada ya que las acciones que se realizan en todo momento son acciones para reparar daños existentes o que están a punto de suceder, en cambio sí se pensara desde un inicio en una planificación adecuadamente y la implementación de algunas unas soluciones preventivas antes de que sucedan los daños o incluso planificar un proyecto con visualizaciones futuras en donde se piense las repercusiones que podría llegar a tener con el tiempo, esto nos beneficiaría para dejar de crear soluciones únicamente para reparar daños existentes y en su lugar poder mantener una infraestructura que sea planeada para sostener este tipo de peligros desde el inicio en el que es construida e implementada.

Al ser un proyecto de intervención social es importante tomar en cuenta a las comunidades que se encuentran cerca de estas zonas, ya que estas personas son las que sufren de este tipo de riesgos y que presentándoles una propuesta de intervención llamativa en la cual puedan asegurar que se podrán reducir los daños causados por las inundaciones y las lluvias, estas mismas comunidades podrían aportar distintos apoyos para que este proyecto pueda llegar a ser tanto de agrado para todos los individuos como un proyecto funcional e inclusivo para que se aproveche de la mejor manera posible desde gubernamental como socialmente.

Luis Xavier Villaseñor Coss y León

La simulación hidrológica tiene una gran relevancia en cuanto a la ingeniería ambiental debido a que con ella es posible determinar el comportamiento de los flujos de agua superficiales de manera cercana a su comportamiento real. El conocimiento de los flujos hidrológicos superficiales cobra relevancia en la medida que este conocimiento es aplicado para la toma de decisiones para una mejor gestión, tanto urbana, como de los recursos hídricos.

En la presente investigación se seleccionaron proyectos de impacto social, tanto en entornos rurales como y urbanos con la finalidad de analizar el comportamiento de la hidrología superficial en la cuenca en la cual se encuentran ubicados, determinar las principales problemáticas asociadas a la gestión del agua y generar propuestas de solución las cuales ayuden a un manejo integral de los recursos hídricos. Para llevar a cabo estos procesos fue necesario recabar información de diversas fuentes y poner en práctica los conocimientos

profesionales adquiridos a lo largo de nuestra trayectoria universitaria, generar dialogo interdisciplinario y evaluar los resultados generados.

Como se mencionó anteriormente, la investigación generada tenía la finalidad de atender problemáticas sociales, por lo que también se realizó una presentación final con las personas interesadas, las cuales tuvieron dos objetivos fundamentales: primero evaluar la información y las propuestas generadas y segundo determinar la aceptación de dichas propuestas por parte de las personas interesadas.

Finalmente, las propuestas de intervención producto de la investigación fueron pensadas y desarrolladas sin perder de vista la relevancia ambiental de éstas. Por lo tanto, se busca generar el menor impacto en los ecosistemas, además de generar beneficios a las personas residentes de las áreas de estudio.

Referencias

Referencias Marco Teórico

- 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. (2006). *Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva*. Buenos Aires, Argentina: Edición del Autor. Obtenido de

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15908/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Auge, M. (2007). *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., Graillot, 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.
- D'Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en Cuerpos Hidrológicos Superficiales*. México: ITESO.
- D'Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en cuerpos Hidrológicos Superficiales*. México: ITESO.
- 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.
- GisGeography. (2022). *Sentinel 2 Bands and Combinations*. Obtenido de Sentinel 2 Bands and Combinations - GIS Geography
- 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 Partnertship. (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 Ugalde, S. G., Mora-Flores, J. S., García Salazar, J. A., & Valdivia, A. R. (2012). Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Scielo*, 337-342.
- 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.
- González, P. (2017). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Obtenido de Newsletter (camara.cl)
- 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., Mahlknecht, 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>
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). *GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design*. (S. Data, Ed.) Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0155-x>
- 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 Yeguaire, 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~eF9uknr40YEUnbMuNOAACimxnGflS5TNcuqhZGtC5IkGmV2bbEMIdM TbTIRglxriPwX~NAFdiLCAHmwPp-Fv~IFBsC4P6mGMY

- María Paula, C. C., & Jorge, M. X. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Obtenido de https://aquabook.irrigacion.gov.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf
- Maryland Department of the Environment. (2009). Chapter 5 Environmental Site Design. Maryland: Maryland Department of the Environment.
- Melendez, I. d. (06 de 09 de 2021). *Vecinos resienten los embates del Arroyo Seco... por tercera ocasión*. Obtenido de udegtv.com/noticias: <https://udgtv.com/noticias/vecinos-resienten-embates-del-arroyo-seco-tercera-ocasion/>
- 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., Mahlkecht, 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 <http://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.
- Ogazon, V. C. (25 de 07 de 2021). *Se desborda arroyo en Zapopan y causa daños en siete colonias*. Obtenido de udgtv.com/noticias: <https://udgtv.com/noticias/se-desborda-en-arroyo-zapopan-causa-danos-siete-colonias/#:~:text=Una%20fuerte%20tormenta%20en%20los,Zapopan%20de%20Respu%20esta%20a%20Emergencias%E2%80%9D>
- 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-agua#:~:text=De%20acuerdo%20con%20datos%20de,y%20aguas%20de%20la%20superficie>.
- Palansooriya, K. N., Yang, Y., Tsang, Y. F., Sarkar, B., Hou, D., Cao, X., . . . Ok, Y. S. (2019). Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-63. doi:<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629803>
- Palma, A., Mendoza, A., Cruickshank, C., Villarreal, F., Salas, M., & Val , R. (2014). *Inventario de la Recarga Artificial en México*. Puerto Vallarta: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Paus, K., & Braskerud, B. (2014). Suggestions for Designing and Constructing Bioretention Cells for a Nordic Climate. *Water Management and Research*, 139-150.
- Peña, C., & Lara, J. (20 de Noviembre de 2012). Obtenido de Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte: <https://www.redalyc.org/pdf/911/91126903003.pdf>
- Perevochtchikova, M. (2009). La Situación Actual del Sistema de Monitoreo Ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, págs. 513-547.
- Piguave-Reyes, J. M., Castellano-González, M. J., Macías-Avia, A. M., Vite-Solórzano, F. A., Ponce-Pibaque, M. D., & Ávila-Ávila, J. A. (2019). Calidad microbiológica del agua subterránea como riesgo epidemiológico en la producción de enfermedad diarreica infantil. Revisión Sistemática. *Kasmera*, 47(2), 153-173. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3556409>
- Porse, E. C. (2013). Stormwater Governance and Future Cities. *Water*, 5(1), 29-52. doi:10.3390/w5010029
- Press, F., & Siever, R. (2001). UNDERSTANDING EARTH. FREEMAN AND COMPANY.
- Rascón, L., & Jiménez, A. (2001). *Investigaciones geográficas*, (45), 24-38. Obtenido de Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la

transferencia de agua a la Ciudad de México. :
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.
- Rus Copernicus. (2017). *Burned Area Mapping with Sentinel-2 using snap*. Obtenido de HAZA02_BurnedArea_Portugal_Tutorial.pdf (rus-copernicus.eu)
- 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-c-mo-funciona-un-pozo-de-absorci-n>
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2000). *Ciencias de la Tierra* (Sexta ed.). Madrid: Prentice Hall.
- Tarbuck, 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 Nations. (2022). *Normalized Burn Ratio (NBR)*. Obtenido de Normalized Burn Ratio (NBR) | UN-SPIDER Knowledge Portal
- 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.
- Vega, I. P. (08 de 05 de 2021). *Construye Zapopan sistema de vasos reguladores en la zonas de Puerta de Hierro y en Perisur, para evitar inundaciones*. Obtenido de [udgtv.com/noticias:](https://udgtv.com/noticias/) <https://udgtv.com/noticias/construye-zapopan-sistema-vasos-reguladores-zonas-puerta-hierro-perisur-evitar-inundaciones/>
- 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>

- Villegas, H. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes)*. Obtenido de Microsoft Word - memoria-curso-jul-2008Editado (sgc.gov.co)
- 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>
- Xingyu, Y., Fei, Y., & Wenxi, F. (2022). *Estimating the critical shear stress for incipient particle motion of a cohesive soil slope*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-022-13307-w>
- 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>

Referencias Marco Contextual

- Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: Application to

- pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 16, 911-925. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0274-5>
- Cerdà, A. (1997). Influencia de la litología en los procesos de erosión en badlands. Los casos de Anna (Valencia) y Petrer (Alicante). *Pirineos*, 149-150(0), 3-20. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1997.v149-150.124>
 - FIRCO. (s. f.). *Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gob.mx*. Recuperado 28 de septiembre de 2023, de <https://www.gob.mx/firco>
 - Geografía INEGI. (2005). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
 - Geografía INEGI. (2014). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
 - Geografía INEGI. (2016). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
 - Geografía INEGI. (2021). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
 - INEGI. (2013, diciembre). *SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
 - Planet. (2023). *Planet Monitoring—Satellite Imagery and Monitoring*. Planet. <https://www.planet.com/products/monitoring/>
 - Pourrut, P. (Ed.). (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
 - SIGEA. (2023). *Mapa de ordenamiento*. <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.
 - https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
 - https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023-Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjA_uMA
 - https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
 - [Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf](#)

- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

Referencias Metodología

- CONAGUA. (2023). *Estaciones meteorológicas* [KML]. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>
- Davis Instruments. (2023). *WeatherLink Air Quality & Temperature Map*. <https://www.weatherlink.com/map>
- Geografía INEGI. (2005). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Geografía INEGI. (2014). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Gracia, A., Godé, L., Crego, E., Arrabal, M., Guirado, V., García, G., Lobera, C., González, S., & Martínez, E. (2010). *Riesgos y cuantificación de daños por inundación*.
- PNT (2023). *Plataforma Nacional de Transparencia*. Recuperado el 14 de noviembre del 2023, de <https://consultapublicamx.plataformadetransparencia.org.mx/vut-web/faces/view/consultaPublica.xhtml#inicio>.
- Hernández, R. (2015). *Desalojan a más de 200 personas por desbordamiento del río Ameca*. Recuperado el 14 de noviembre de 2023, de <https://www.cronicajalisco.com/notas/2015/39518.html>.
- SIGIEA. (2023). *Sistema de Información Geográfica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. Recuperado el 06 de noviembre de 2023, de <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.
- 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

- 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
- 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>
- Suárez, C. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- SIAPA (Servicios de Agua Potable y Alcantarillado). (2014). RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5_infiltracion_pluvial.pdf
- 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.htm
- Science for Environment Policy. (2012). Soil Sealing. European Commission, Directorate-General Environment. Bristol: University of the West of England.

Referencias Resultados

- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2013). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- von Sperling, M. (2016). Stabilization Ponds: Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). Wastewater Treatment and Reuse. McGraw-Hill Education.
- Middlebrooks, E. J., & Crites, R. W. (2000). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- Crites, R. W., Tchobanoglous, G., & Ovidio, J. A. (1998). Natural Wastewater Treatment Systems. CRC Press.
- <https://patents.google.com/patent/CN211571235U/en?q=CN+211571235+U>

- [https://patents.google.com/patent/CN110627313A/en?q=\(Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city\)&oq=Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city](https://patents.google.com/patent/CN110627313A/en?q=(Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city)&oq=Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city)
- [https://patents.google.com/patent/KR102018462B1/en?q=\(rain+water+trench\)&oq=rain+water+trench](https://patents.google.com/patent/KR102018462B1/en?q=(rain+water+trench)&oq=rain+water+trench)
- [https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well)
- [https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well)
- [https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well&page=1](https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well&page=1)
- <https://patents.google.com/patent/KR20090090987A/en?q=KR2009-0090987A>
- <https://chat.openai.com/c/2711ba0f-264c-460b-961e-c31adb302990>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/pozo-de-absorci%C3%B3n>
- <https://umamexico.com/red-de-parques-sobre-el-rio-tizates/>
- <https://www.mandua.com.py/un-parque-lineal-para-dar-una-cara-distinta-al-entorno-del-arroyo-lambare-in469>
- *Nido de lluvia, una nueva forma de abastecimiento de agua en Jalisco | Gobierno del Estado de Jalisco.* (s. f.). <https://www.jalisco.gob.mx/es/gobierno/comunicados/nido-de-lluvia-una-nueva-forma-de-abastecimiento-de-agua-en-jalisco>
- Lapointe, M., Rochman, C. M., & Tufenkji, N. (2022). Sustainable strategies to treat urban runoff needed. *Nature sustainability*, 5(5), 366-369. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00853-4>
- Jones, J. E., Bisbee, G. D., & Stewart, H. T. (2002.). Innovative Stormwater Treatment Technologies: Best Management Practices Manual. *University of New Hampshire.* <https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1314&context=prep>

[https://patents.google.com/patent/US11096386B2/en?q=\(infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden\)&oq=infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden](https://patents.google.com/patent/US11096386B2/en?q=(infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden)&oq=infiltration+trench%2c+wels%2c+rain+garden)

- <https://patents.google.com/patent/CN111877461A/en?q=CN111877461A>
- Meléndez, V. (2023, 31 agosto). Baja presa Calderón nivel pese a lluvias. *Mural*. Recuperado 2 de octubre de 2021, de <https://www.mural.com.mx/baja-presa-calderon-nivel-pese-a-lluvias/ar2666957>
- SIAPA. (2021). *¿Qué está pasando con el agua en el AMG?* Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://www.siapa.gob.mx/suministro>
- IIEG. (2021). *Zapopan, Diagnóstico Municipal*. Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2021/10/Zapopan-1.pdf>
- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Atemajac (1401), Estado de Jalisco. Recuperado 6 de octubre de 2023, de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1401.pdf
- 34474270 Rain Water Harvesting and Conservation. (s. f.). Scribd. <https://es.scribd.com/doc/128890095/34474270-Rain-Water-Harvesting-and-Conservation>
- Perrozzi, A. (2022). Parques inundables: el rol del espacio público en la gestión del agua. *Transecto*. <https://transecto.com/2020/05/parques-inundables/>
- Pozos y zanjas de infiltración. (2016, 24 agosto). *SuD Sostenible*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/>
- CityAdapt. (2023, 21 agosto). Pozos de absorción - CityAdapt. https://cityadapt.com/sbn_cityadapt/pozos-de-absorcion/
- Sistemas de captación de agua pluvial y filtración a base de zeolitas – zeolitas. (s. f.). <https://zeolitas.mx/sistemas-captacion-pluvial/>
- Foley, J., Defries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin III, F. S., Coe, M., Daily, G., Gibbs, H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science (New York, N.Y.)*, 309, 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

- López, H. E. F., Orozco, C. de la M., Corral, J. A. R., & Durán, Á. A. C. (2013). Efecto De La Cobertura De Suelo De Tres Cultivos Sobre La Erosión Hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(1), 19-25.
- PERCOT. (s. f.). *Pozo de absorción*. Recuperado 8 de octubre de 2023, de <https://www.percot.com.mx/>
- 何畏洪祖勇王林棋. (2021, julio 20). *CN111733847B - A hydrophobic water guide device for foundation ditch construction—Google Patents*. [https://patents.google.com/patent/CN111733847B/en?q=\(infiltration+trenches+with+gravel+filters\)&oq=infiltration+trenches+with+gravel+filters](https://patents.google.com/patent/CN111733847B/en?q=(infiltration+trenches+with+gravel+filters)&oq=infiltration+trenches+with+gravel+filters)
- Pourrut, P. (Ed.). (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- SIGEA. (2023). *Mapa de ordenamiento*. <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.
- Camarillo, R., Valdés, F., Alonso, J. (2012). *Desarrollo de un sistema hidrodinámico para sistemas de análisis en flujo miniaturizados*. *Revista mexicana de ingeniería química*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200009.
- Celdrán, D. (2022). *Acuicultura Simbiótica como Nuevo Paradigma Productivo: Reduciendo Impactos y Aumentando Beneficios*. *Avances en Nutrición Acuícola*. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/353>.
- Crespo, C. (2022). *¿Qué impacto tienen las cremas solares en los ecosistemas?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/que-impacto-tienen-las-cremas-solares-en-los-ecosistemas>.
- Dirección General de Obras y Conservación. (s.f.). *Concretos ciclópeos*. Dirección de Planeación y Evaluación de Obras. https://www.obras.unam.mx/pagina/docs/normatividad/construc/espe_gral/estructu/ob_pre/obp_pc01.html#:~:text=El%20concreto%20cicl%C3%B3peo%20se%20elaborar%C3%A1,revolvedora%2C%20o%20suministrado%20de%20planta.
- Holcim. (2013). *Informe de Desarrollo Sostenible 2013*. <https://www.holcim.com.co/sites/colombia/files/images/IDS2013-11.pdf>.

- MACCAFERRI. (2023). *Gaviones*.
<https://www.maccaferri.com/mx/productos/gaviones-3/>.
- OAS. (s.f.). *Capítulo 8. Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones*. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/ch13.htm>.
- Reel Resilience Network. (2023). *Impactos ambientales y beneficios*. The Nature Conservancy. <https://reefresilience.org/es/management-strategies/aquaculture/environmental-impacts-and-benefits/>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *La acuicultura o acuicultura es el conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-en-mexico#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20ha%20alcanzado%20niveles,osti%C3%B3n%20camar%C3%B3n%20y%20langostino>.
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- *Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf*
- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n
- <https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>
- [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia l..pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia%20l..pdf)

- <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf>
https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023-Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n
<https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>
- [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia I..pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia%20I..pdf)
- <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf>
https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf