

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:

- Luis Alberto Álvarez Ibarra
- Antonio Ávalos Loaiza
- Juan Pablo Carballo Velasco
- Edgar Saul Chavez Casillas
- Héctor Iván Moreno Contreras
- Luis Arturo Peña Gálaviz
- Edgar Alfonso Ramos Gómez

Profesores PAP: Dr. José Manuel Ramírez León, Dr. David Vargas del Río, Gil Humberto Ochoa González. Tlaquepaque, Jalisco, 29 de julio 2024.

ÍNDICE

1. Introducción	12
1.1 Problemática	12
1.2 Justificación	13
1.3 Primeros avances	17
1.3.1 Primavera 2020	17
1.3.2 Otoño 2020.....	20
1.3.3 Primavera 2021	25
1.3.4 Verano 2021	31
1.3.5 Otoño 2021.....	35
1.3.6 Primavera 2022	40
1.4 Objetivos del proyecto.....	45
1.5 Descripción de los equipos de trabajo	45
2. Marco Teórico	46
2.1 Ciclo Hidrológico	46
2.2 Aguas Subterráneas	49
2.2.1. Acuíferos	51
2.2.2. Factores que determinan el movimiento hídrico subsuperficial	55
2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos	59
2.4 Calidad del agua	62
2.4.1 Calidad del agua superficial	65
2.4.2 Calidad del agua subterránea	67
2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS)	68
2.6 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos	81
2.6.1 Recarga superficial.....	83

2.6.2 Recarga profunda.....	85
2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano	88
2.7.1 Gestión informada del agua	88
2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional	94
2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro	97
3. Marco Contextual.....	98
3.1 San Juan de Abajo.....	98
3.1.3 Propuestas de intervención iniciales	101
3.2 Zona Poniente de Guadalajara	113
3.2.1 Introducción.....	113
3.2.2 Definición del área de estudio	114
3.2.3 Demografía.....	115
3.2.4 Desarrollo Urbano	115
3.2.5 Uso de suelo	116
4. Metodología	117
4.1 San Juan de Abajo.....	117
4.2 Zona Poniente de Guadalajara	138
5. Propuesta técnica	150
5.1 San Juan de Abajo.....	150
5.2 Zona Poniente de Guadalajara: Arroyo Garabato.....	151
5.3 Zona Poniente de Guadalajara: Arroyo Seco.....	154
6. Simulaciones Hidrológicas y Propuestas Constructivas.....	162
6.1 Simulación de Escenarios de Intervención para la Mitigación de Inundaciones en San Juan de Abajo.....	162
6.2 Análisis de factibilidad en el diseño y construcción de represas en el arroyo Huichichila	189
6.3 Simulación de Escenarios y Propuesta de Intervención para la Mitigación de Inundaciones en la Zona Poniente de Guadalajara.	214

6.3.1. Arroyo Tecolote	214
6.3.2. Arroyo Seco.....	229
Anexo 1. Caracterización del comportamiento geohidrológico de los suelos de la ZMG ante condiciones de recarga.....	244
Referencias.....	262

Índice de Figuras

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

Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.....	33
Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.	33
Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.....	34
Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.	34
Figura 31. Captura de pantalla del Model Space del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.	35
Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.	38
Figura 33. Prototipo funcional para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG.....	39
Figura 34. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.	41
Figura 35. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.	42
Figura 36. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).	43
Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.	43
Figura 38. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto “Campus Hidrológico”.....	44
Figura 39. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.).....	48
Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).....	51
Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).	52
Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).	53
Figura 43. Acuífero colgado (Sánchez San Román).....	53
Figura 44. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).....	54
Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).	56
Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).....	57
Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).	58
Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.). ...	60
Figura 49. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).....	60
Figura 50. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).	61
Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).	71
Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).	73

Figura 53. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).	73
Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).	74
Figura 55. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).	75
Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)	76
Figura 57. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al., 2013).	77
Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.	79
Figura 59. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).	80
Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971	84
Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971	87
Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).	93
Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).	95
Figura 64 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016)	97
Figura 65. Área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo).	118
Figura 66. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).	119
Figura 67. Modelo digital de elevación.(Geografía INEGI, 2014).	120
Figura 68. Clasificación supervisada de la vegetación.	122
Figura 69. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).	123
Figura 70. Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.	126
Figura 71. Mapa de máximo calado en el área de estudio.	127
Figura 72. Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio.	128
Figura 73. Mapa de máxima velocidad en el área de estudio.	129
Figura 74. Mapa de máxima peligrosidad ACA.	130
Figura 75. Determinación de peligrosidad ACA (Gracia et al., 2010).	131
Figura 1. Localización del proyecto. (Google Earth, 2024).	189
Figura 12. Dibujo esquemático de la propuesta de intervención en el cauce del arroyo Huichichila, (Autoría propia).	193
Figura 13. Proyección de la ubicación de las represas vista desde Civil 3D. (Autoría propia, 2024)	194
Figura 14. Lugar potencial para la ubicación de la represa. (Autoría propia).	194
Figura 15. Propuesta de dimensionamiento de las represas. (Autoría propia, 2024)	195
Figura 16. Tipos de falla en un muro de contención. (Autoría propia, 2024)	195
Figura 17. Dibujo esquemático del caso 1. (Autoría propia).	196
Figura 18. Dibujo esquemático del caso 2. (Autoría propia).	196

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición.	36
Tabla 2. Propuestas de intervención (descripción de escenarios).	40
Tabla 3. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).	49
Tabla 4. Propiedades de acuíferos.	57
Tabla 5. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).	75
Tabla 6. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).	79
Tabla 7. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).	89
Tabla I. Cuerpos de agua superficiales de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).	133
Tabla II. Características de los acuíferos pertenecientes a la microcuenca de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).	135
Tabla 1. Clasificación del riesgo potencial de falla en presas según el Programa Nacional de Inspección de presas de los EUA, (Arreguín & Alcocer, 2011).	212
Tabla 2. Comparación de la capacidad de los vertedores, de acuerdo al riesgo potencial y tamaño de la presa según varias agencias, (Arreguín & Alcocer, 2011).	212
Tabla 3. Resultados granulometría Tepetate.	252
Tabla 1. Resultados de conductividad saturada del Tepetate.	255
Tabla 2. Resultados de prueba de saturación Jal.	256
Tabla 3.1. Resultados granulometría Tepetate.	257
Tabla 4. Resultados reportados Jal.	258
Tabla 5. Resultados calculados Jal.	259
Tabla 6. Comparativa de resultados obtenidos experimentalmente y modelado digital.	260

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 del desarrollo del proyecto, sus incidencias en el entorno y las reflexiones y aprendizajes profesionales que el estudiante desarrolló durante 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 enfrenta 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 de los últimos años ha sido desfavorable porque hay fallas en el sistema hídrico y donde hay 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, es un factor de grandes desastres naturales en el mundo, pero la mala planeación de nuestras ciudades ha provocado esto. 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. 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 causas. Cientos de problemas causan las tormentas gracias a que hemos transformado de manera severa el sistema hidrográfico de la ciudad y se ha impermeabilizado gran parte de la superficie que los esfuerzos de las redes artificiales no son suficientes para atacarlo. 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 se dirigen a analizar y proponer soluciones para 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).



El SIAPA repara 10 hundimientos al día

Ante la profundidad de los socavones en vialidades, el organismo tarda en repararlos hasta dos semanas

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. Asimismo, promueve la recarga de aguas subterráneas y conservación de flujos superficiales. 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. Realizar estudios de hidrología de superficie y geohidrológicos sobre los que pueda simularse el flujo del agua por la ciudad y así poder evaluar la capacidad de las soluciones implementadas. 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 Primeros avances

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 (Proyectos de Aplicación Profesional). Se creó un equipo multidisciplinario de académicos, asesores externos y alumnos para abordar el problema desde diferentes enfoques, para 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.

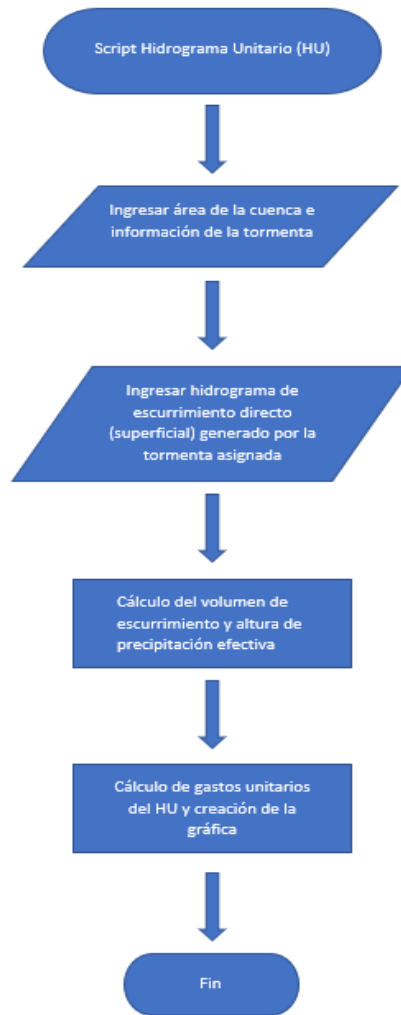


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.

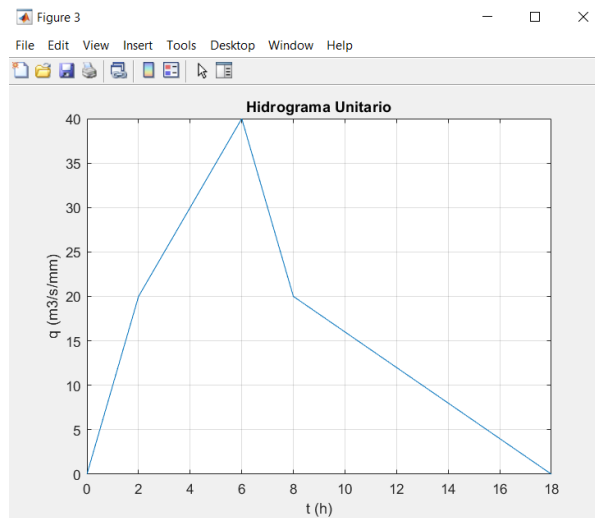


Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.

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 en internet, con un sistema electrónico instalado en una parte aislada del pluviómetro.

Más no totalmente acabaron los pluviómetros en su aspecto mecánico, por la falta de 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.

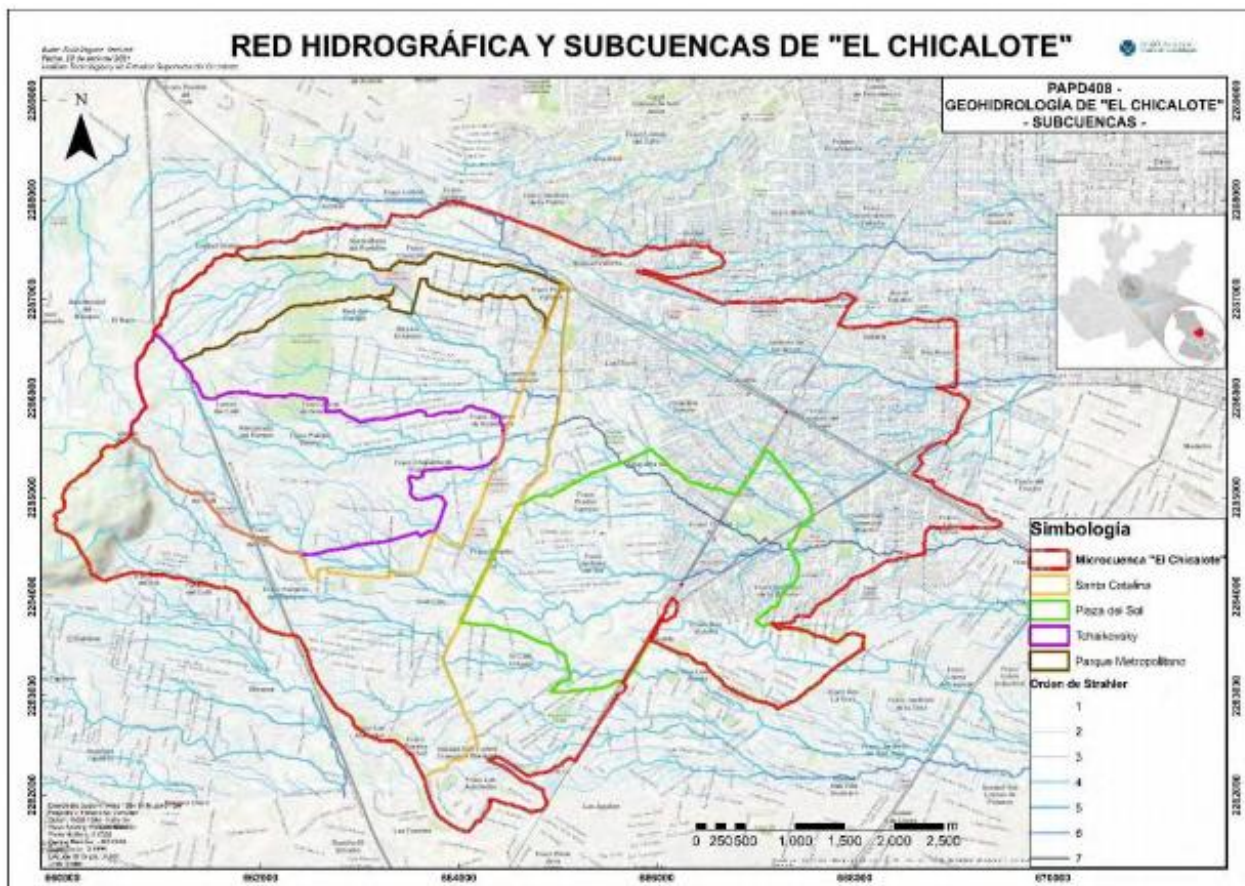


Figura 6. Mapa de áreas de captación de “El Chicalote”.

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.

Para la calidad del agua, se caracterizó la cuenca con base en una investigación sobre su localización, geología, topografía, hidrología, cobertura y uso de suelo, las actividades económicas de la zona, entre otras. Por medio de los softwares 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.

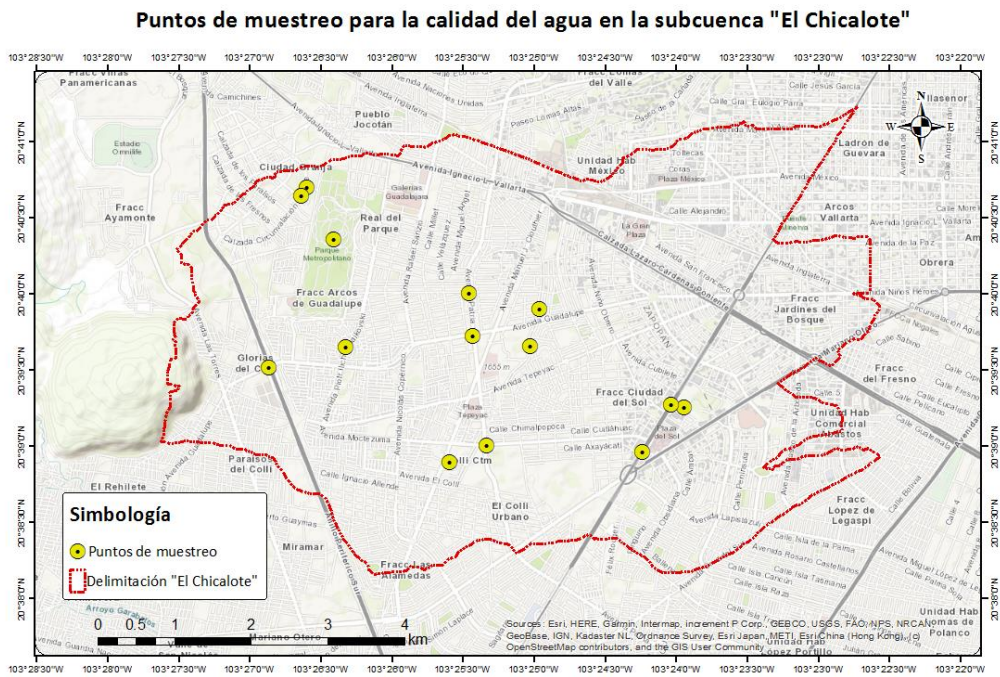


Figura 10. Mapa de puntos de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial en la microcuena “El Chicalote”.

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

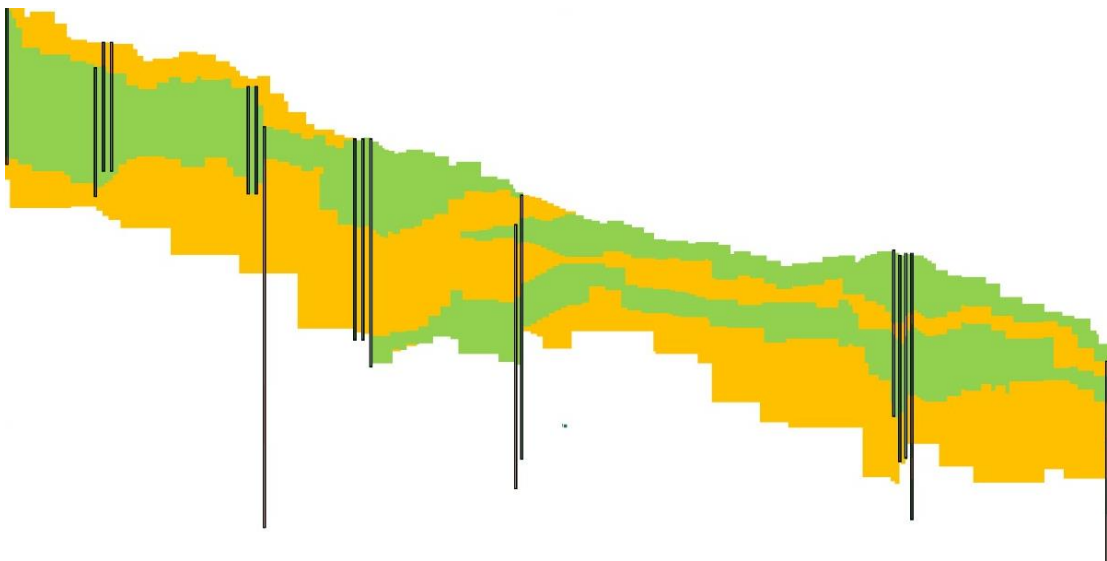


Figura 11. Perfil de suelos sur.

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).

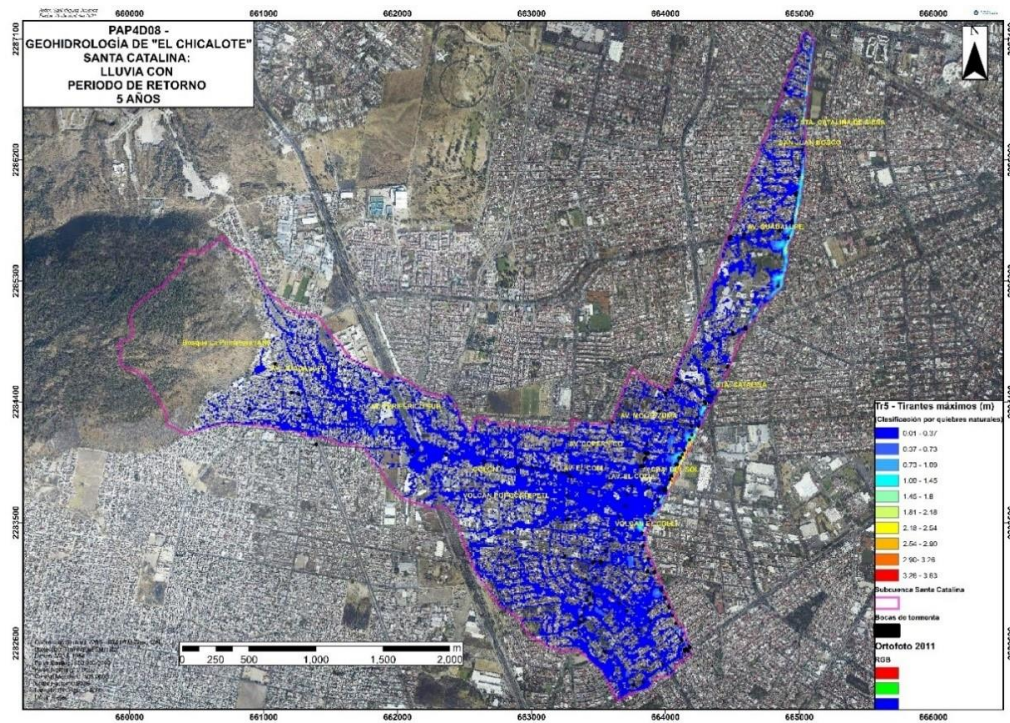


Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

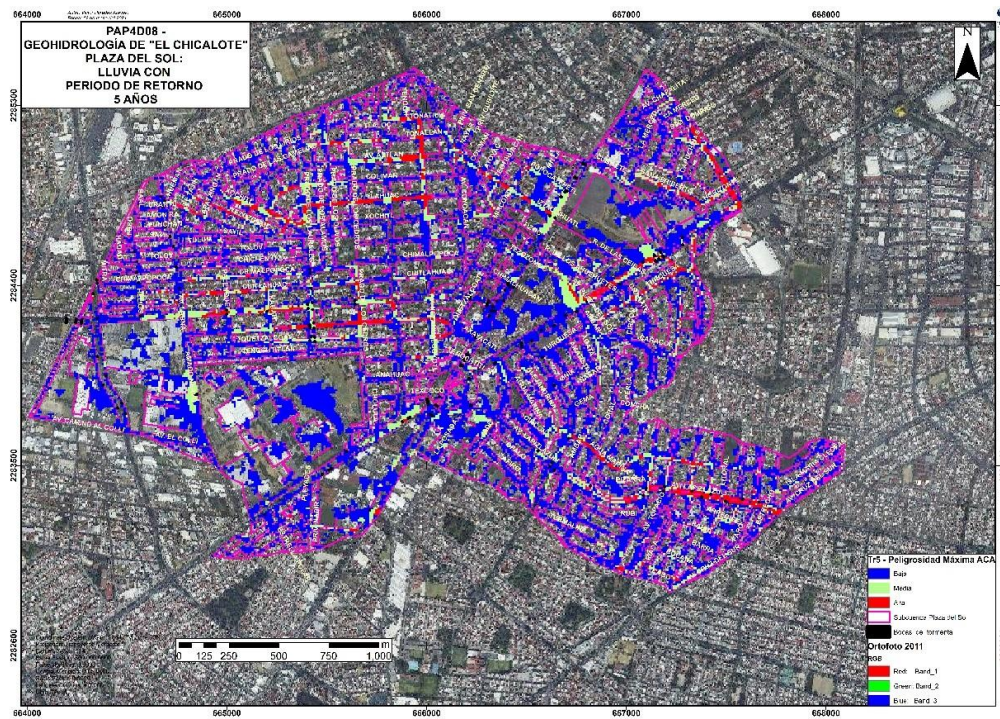


Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.

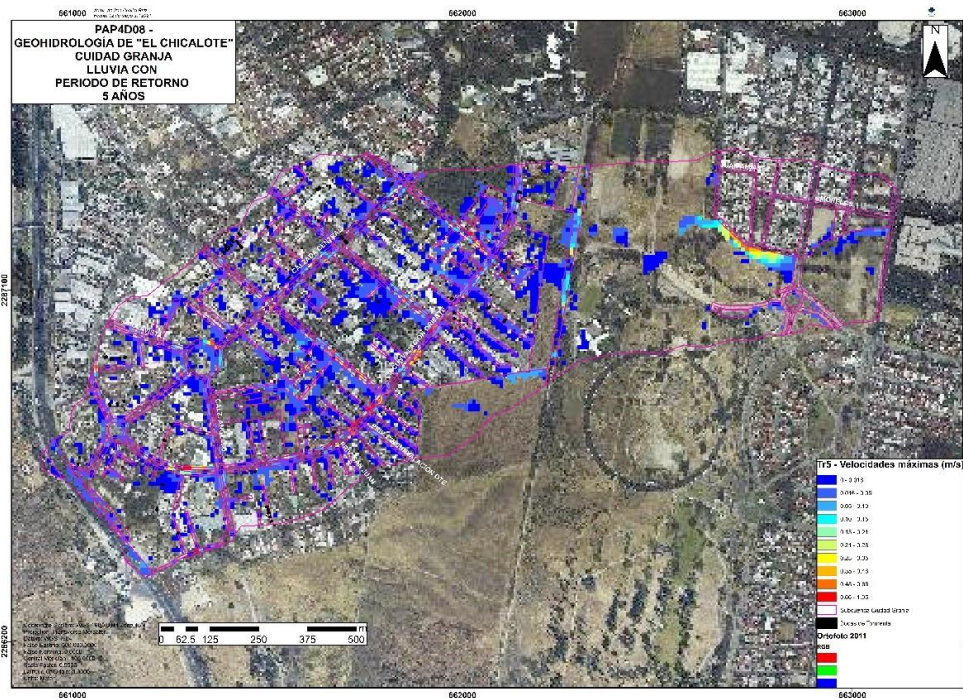


Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.

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. No se pudo completar el modelo, ya 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.

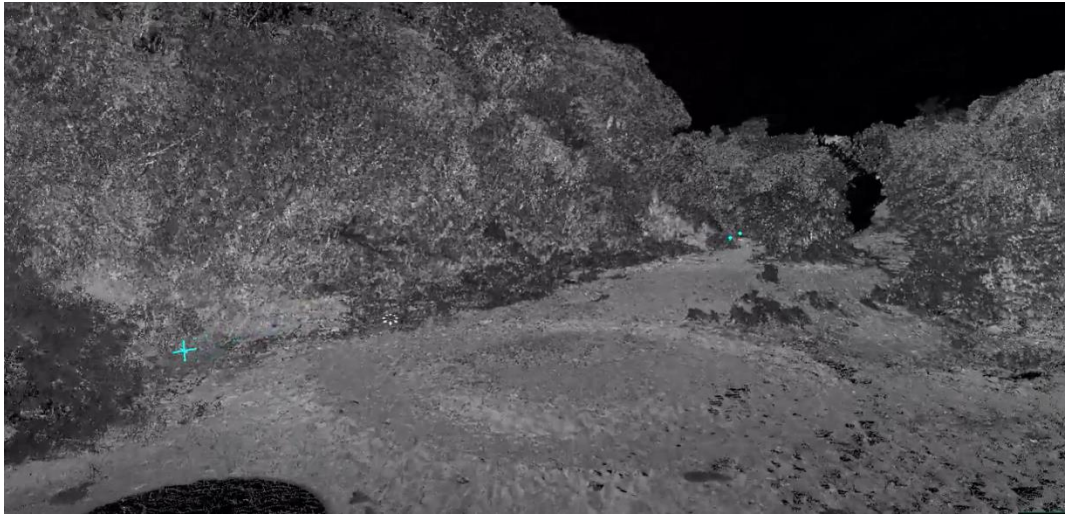


Figura 16. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.



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.

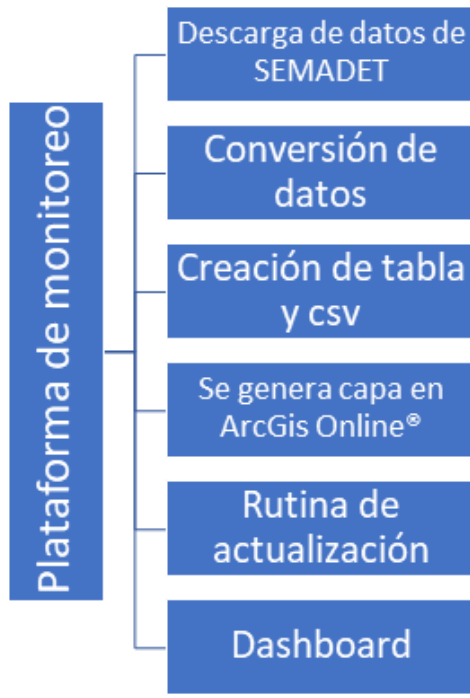


Figura 18. Proceso de la creación de la plataforma de monitoreo.

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 primer 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)
    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.

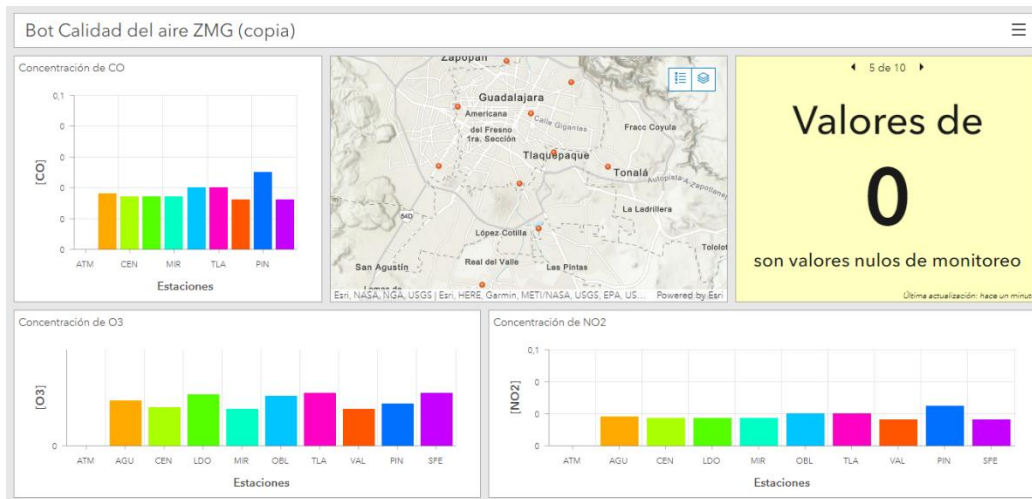


Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.

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 de los escurrimientos, según las actividades económicas de cada zona y la dirección de la escorrentía superficial. Esto para 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, para compararse 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

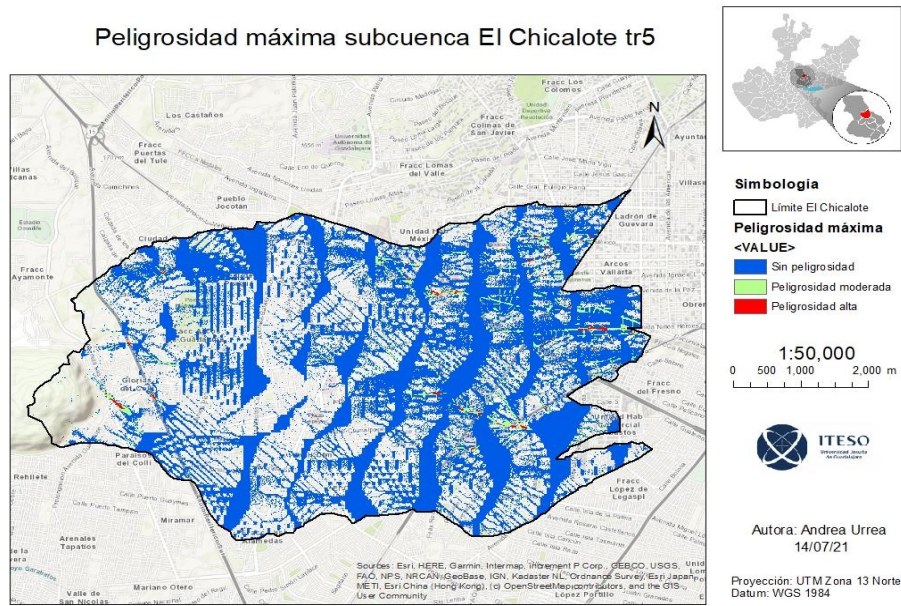


Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.

Máxima Peligrosidad subcuenca Sta. Catalina tr5

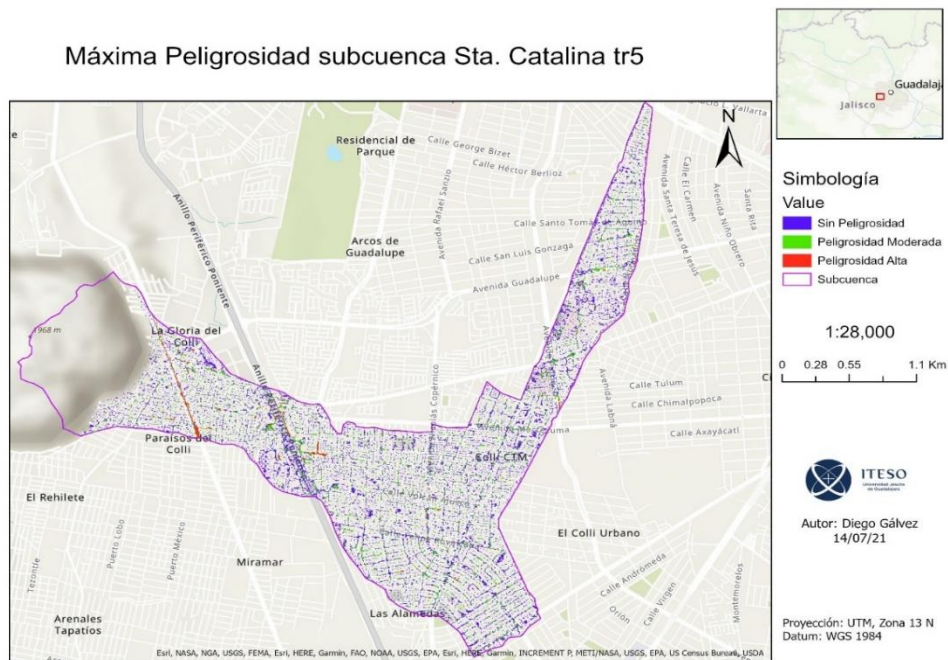


Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

Máxima Peligrosidad ACA área de captación Plaza del Sol tr5

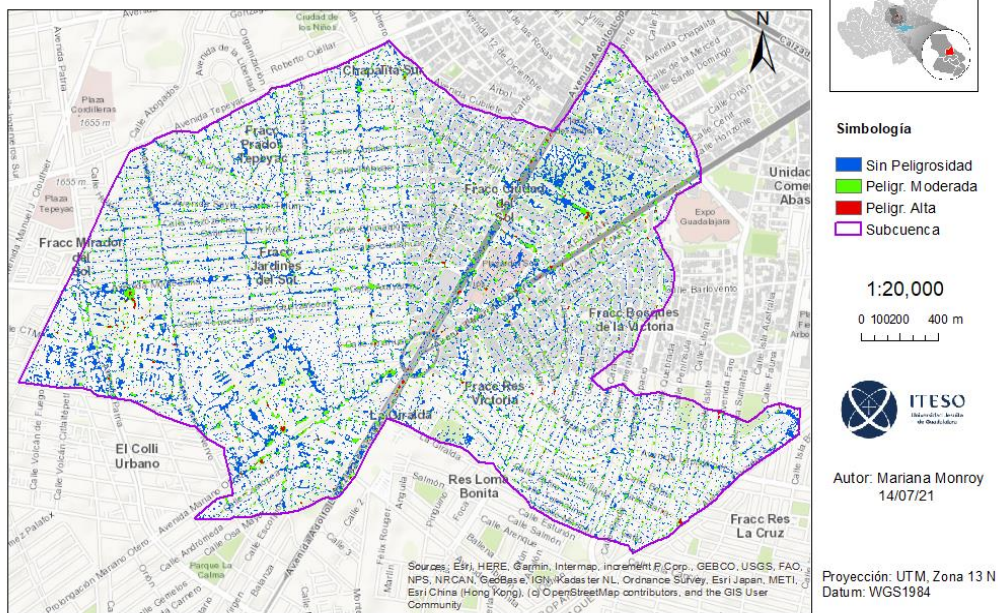


Figura 27. Máximas peligrosidades para tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Plaza del Sol.

Máxima Peligrosidad ACA Área de captación Tchaikovsky - Tr 5 años

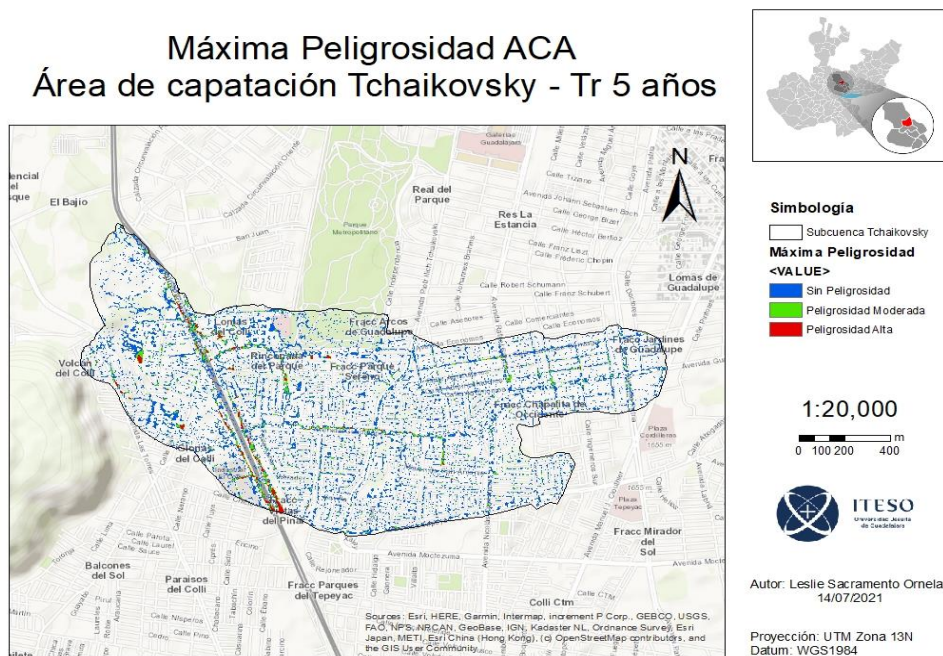


Figura 28. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Tchaikovsky.

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

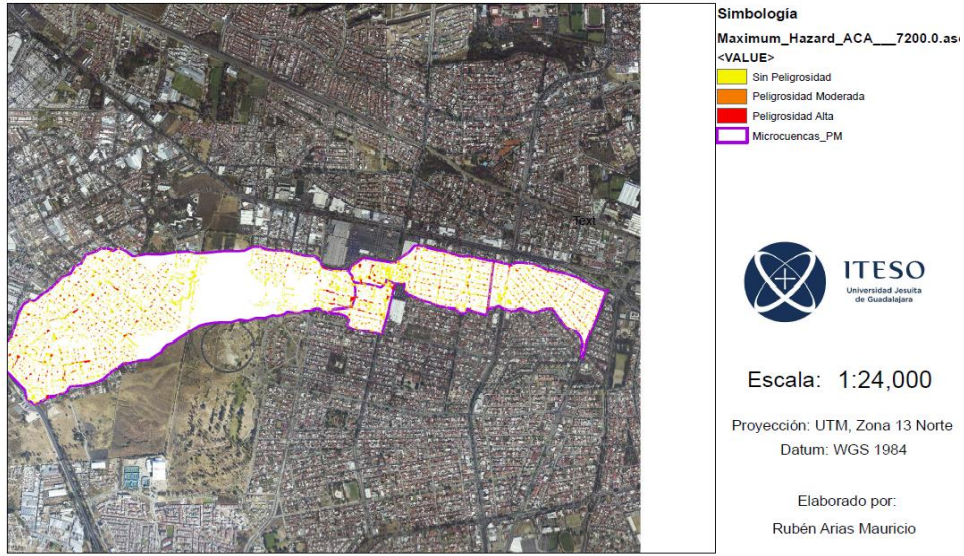


Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.

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

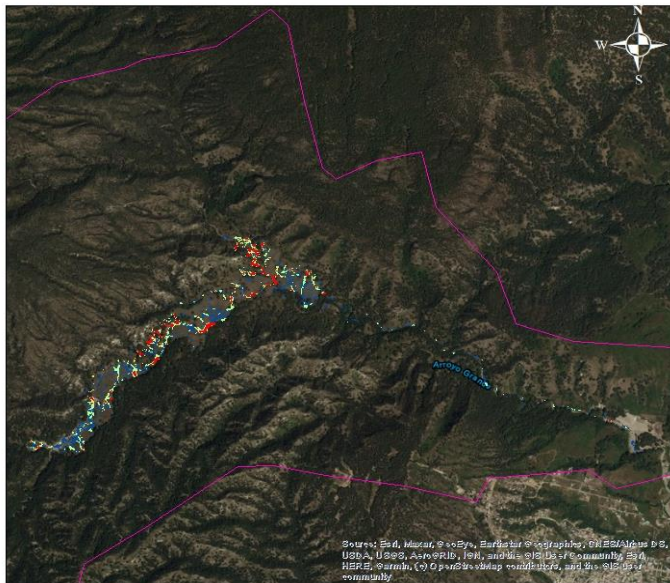


Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.

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.

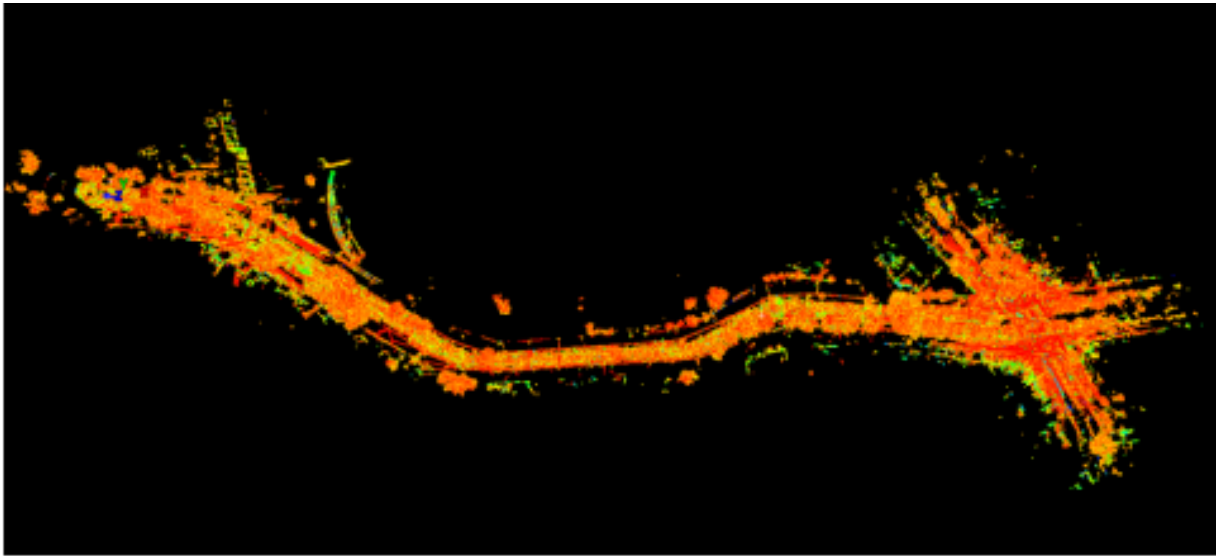


Figura 31. Captura de pantalla del Model Space del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.

1.3.5 Otoño 2021

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. Después, con la determinación de dichas cuencas, se señalaron los distintos usos de suelos y 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 1. 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-028-SCFI-2001	Se toma un mínimo de 1 L, en un frasco de vidrio o envase de polietileno y debe mantenerse a 4°C hasta su análisis en el laboratorio, con un tiempo de almacenamiento máximo de 24 horas antes de analizar.
	DQO [mg/l]	150	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-030-SCFI-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-034-SCFI-2015	Recolectar un mínimo de 600 mL de muestra en envase de plástico o vidrio. El tiempo máximo de almacenamiento previo al análisis es de 7 días a una temperatura de entre 2°C a 4°C.
	SDT [mg/l]	1000.00	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-034-SCFI-2015	
	Temperatura [°C]	15-25	NOM-127-SSA1-1996	Imprescindible	NMX-AA-007-Aguas.	Determinación de la temperatura mediante método visual con termómetro.
	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-SCFI-2000 Conductímetro	
	Nitrógeno Total [mg/l]	40	NOM-01-SEMARNAT-1996	Imprescindible	NMX-AA-026-SCFI-2010	Deben tomarse un mínimo de 2.0 litros para el muestreo macro-Kjeldahl y 500 mL para el muestreo micro Kjeldahl en muestras simples o compuestas en un envase de polietileno. Se almacena por un máximo de 30 días en condiciones de oscuridad y se preserva con ácido sulfúrico (1:1), un pH de 1.0 a 2.0 y temperatura de 4°C +/-2°C.
	Fósforo Total [mg/l]	0.1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	NMX-AA-029-SCFI-2001	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.
	Turbidez [NTU]	5	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-038-SCFI-2001	Medición con turbidímetro en el lugar o en laboratorio, en caso de ser en laboratorio coleccionar la muestra mínimo de 100 mL en recipiente plástico o de vidrio boca ancha y hermético. Conservar en refrigeración y analizar en un máximo de 24 h.
	Grasas y aceites [mg/l]	10	Ley Federal de Descargas	Imprescindible	NMX-AA-005-SCFI-2013	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.
Alcalinidad [mg CaCO3]	400	Ley Federal de Descargas	Desable	NMX-AA-036-SCFI-2001	Recolectar un mínimo de 500 mL en frascos de vidrio, polietileno o polipropileno. Llenar por completo y taponar herméticamente, almacenar a una T de 0-4°C. Realizar el análisis antes de 24 h.	

Variables inorgánicas	Cloruros como Cl ⁻	250	NOM-127-SSA1-1994	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-SSA1-1994	Imprescindible			
	Nitratos como NO ₃ ⁻	10	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Nitritos como NO ₂ ⁻	1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible			
	Sulfatos como SO ₄ ²⁻	400	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Sulfuros como S ²⁻	0.2	Ley Federal de Descargas	Imprescindible			
	Al [mg/l]	0.02	NOM-SSA1-1994	Imprescindible			
	As [mg/l]	0.05	Ley Federal de Descargas	Imprescindible			
	Ba [mg/l]	0.7	NOM-127-SSA1-1994	Deseable			
	Cd [mg/l]	0.005	NOM-127-SSA1-1994	Deseable			
	Cu [mg/l]	2	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	P [mg/l]	0.1	Ley Federal de Descargas	Imprescindible			
	Cr [mg/l]	0.05	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Fe [mg/l]	0.3	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Mn [mg/l]	0.15	NOM-127-SSA1-1994	Deseable			
	Ni [mg/l]	0.01	Ley Federal de Descargas	Deseable			
	Pb [mg/l]	0.01	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Zn [mg/l]	5	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Hg [mg/l]	0.001	NOM-127-SSA1-1994	Deseable			
	Na ⁺ [mg/l]	200	NOM-127-SSA1-1994	Deseable			
Br ⁻ [mg/l]	-	-	Deseable				
Mg ⁺² [mg/l]	-	-	Deseable				
Ca ⁺² [mg/l]	-	-	Deseable				
Variable biológica	E. coli ⁺ o coliformes fecales u organismos termotolerantes	no detectables	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	NMX-AA-042-SCFI-2015	Recolección de 100 ml de muestra en bolsas o frascos estériles con tiosulfato de sodio (10 mg/ envase de 100 ml). Preservar muestras a T de 4°C ± 2°C sin exceder en todo el proceso las 24 h.	
Plaguicidas	Hexaclorobenceno [mg/l]	1	NOM-127-SSA1-1994	Deseable	NMX-AA-71-1981	Se toma la muestra de la superficie en un frasco de vidrio, se cierra con tapón con contratapa de teflón, se conserva la muestra a 4°C y se analiza en laboratorio mediante cromatografía de gases.	
	DDT, ametrina, dimetoto, diazinón.	-	-				
Emergentes	Hidrocarburos	Benceno	10	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	Espectroscopio	Se identifican cada una de las variables mediante la técnica de espectroscopía infrarrojo. (Robledo <i>et al.</i> , 2017)
		Tolueno	700	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible		
		Naftaleno	0.02	Ley Federal de Descargas	Imprescindible		
		Etilbenceno	300	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible		
	Farmacéuticos	Ibuprofeno	-	-	Deseable	MEFS-CG-EM	Utilización de la técnica de microextracción en fase sólida, cromatografía de gases y espectrofotometría de masas. (Peña-Alvarez, A. y Castillo-Alanís, A. 2015)
		Paracetamol	-	-	Deseable		
		Clonazepam	-	-	Deseable		
		Antibióticos	-	-	Deseable		
		Inhibidores de bomba de protones. (omeprazol, pantoprazol, etc.)	-	-	Deseable		
		IECAS	-	-	Deseable		
	Cuidado personal	Carbamocipinas	-	-	Deseable	Cromatógrafo	Utilización de la técnica de cromatografía de gas. (Durán-Alvarez <i>et al.</i> 2012)
		Bisphenol A	-	-	Deseable		
Triclosan		-	-	Deseable			
	Drogas legales e ilegales	-	-	Deseable	Cromatografía de líquidos acoplada a MS/MS	Utilización de la técnica de cromatografía de líquidos acoplada a cromatografía de masas con HPLC. (Damià Barceló, L. y López de Alde, M. J. 2008)	

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

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

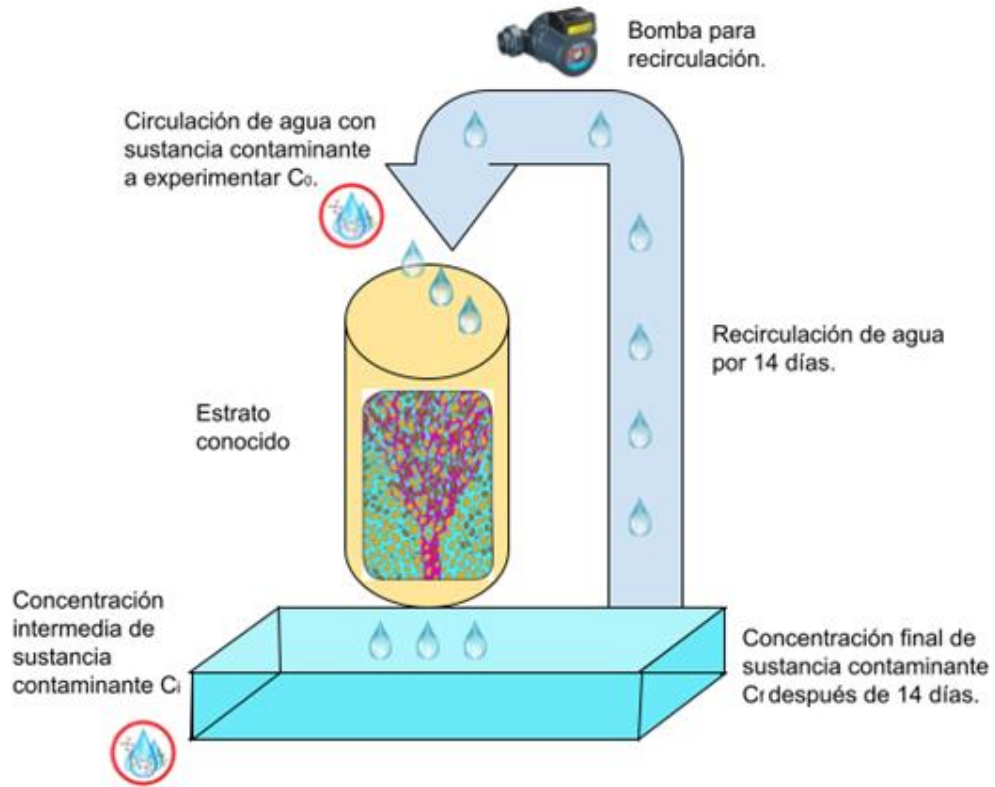


Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG. Elaboración propia.



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

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

- Topografía del área modelada con una cuadrícula de celdas de 100 x 100 metros
- Capa de grosor de la toba tala elaborada a con datos estratigráficos de pozos existentes

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

Se llevaron a cabo distintas simulaciones del funcionamiento del pozo de infiltración y se analizó el comportamiento del flujo del agua subterránea a causa de este. Se analizó la cantidad de agua que se podría infiltrar con dicho pozo en el Parque Metropolitano, llegando a unos 6 millones de metros cúbicos en 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. Tras el reconocimiento de la hidrología, se generaron escenarios con la selección de 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 antes, junto con lo que cada uno 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.

Después, en otra etapa del curso, se le asignó un hietograma de tormenta de 5 años y de 15 años, ya que se espera que la cuenca se restablezca 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.

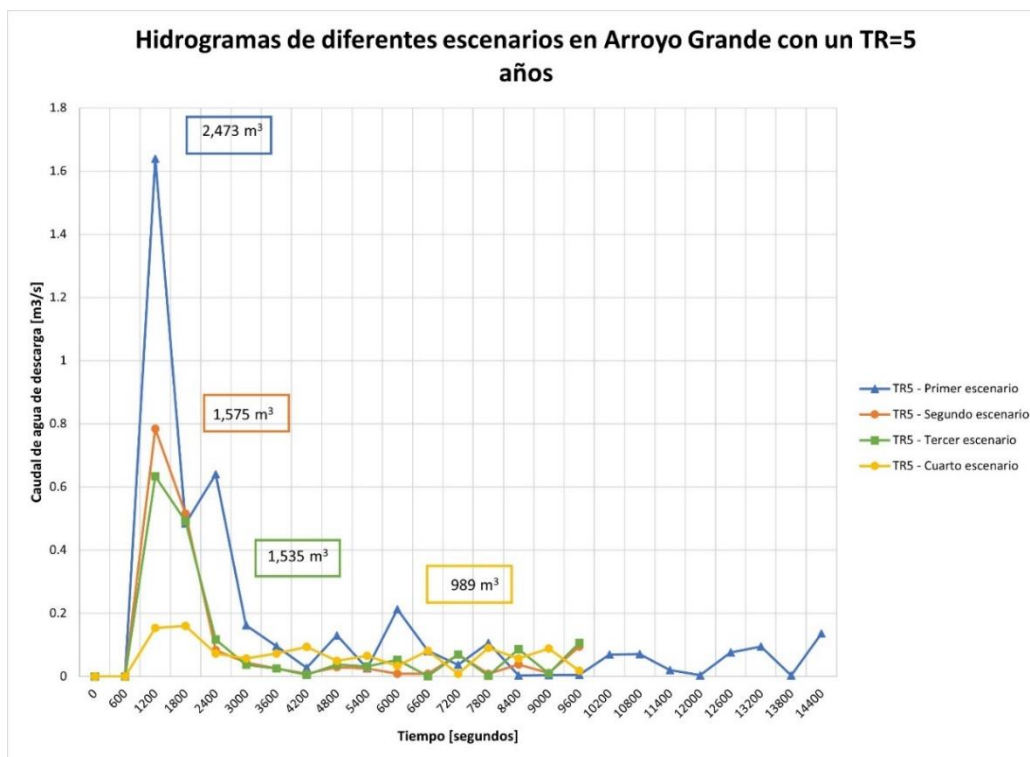


Figura 34. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.

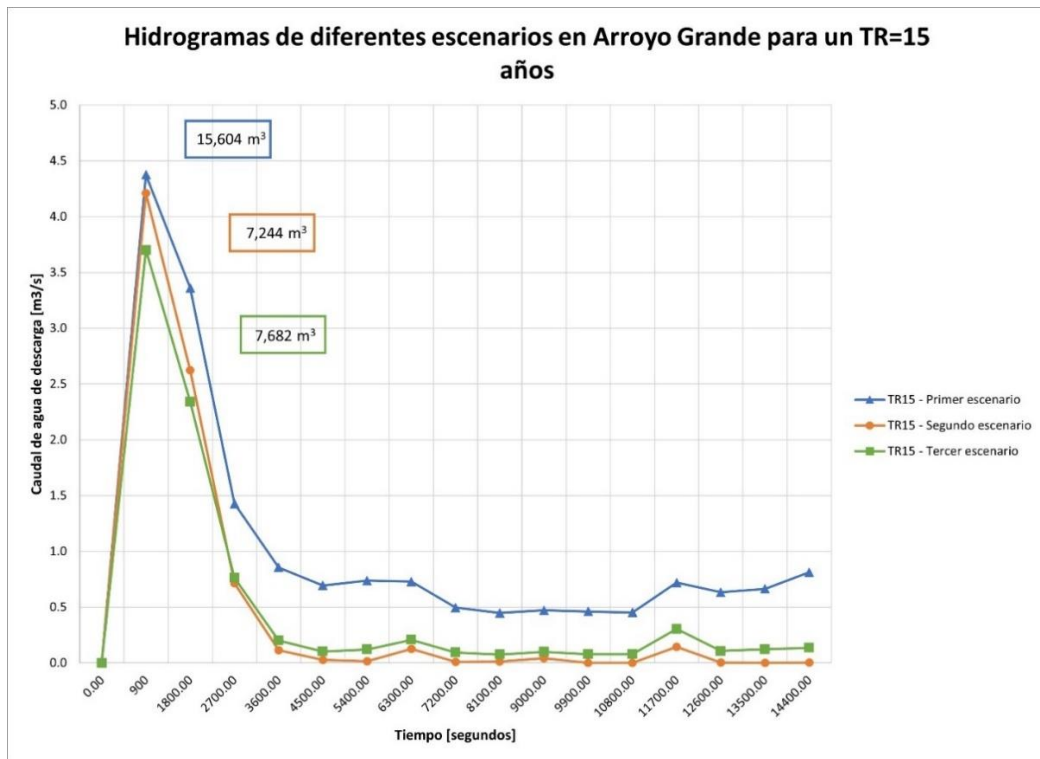


Figura 35. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.

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. 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 se retiene el volumen de agua, por lo que un porcentaje del agua se evaporará, otra se evapotranspirará 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.

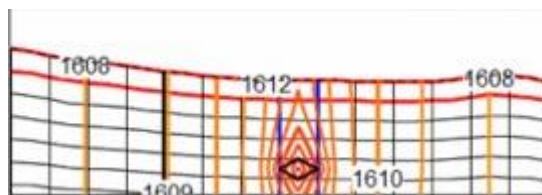
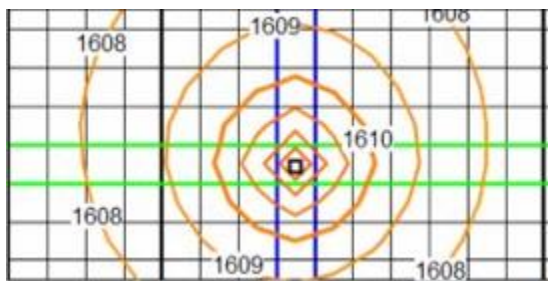


Figura 36. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).

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:

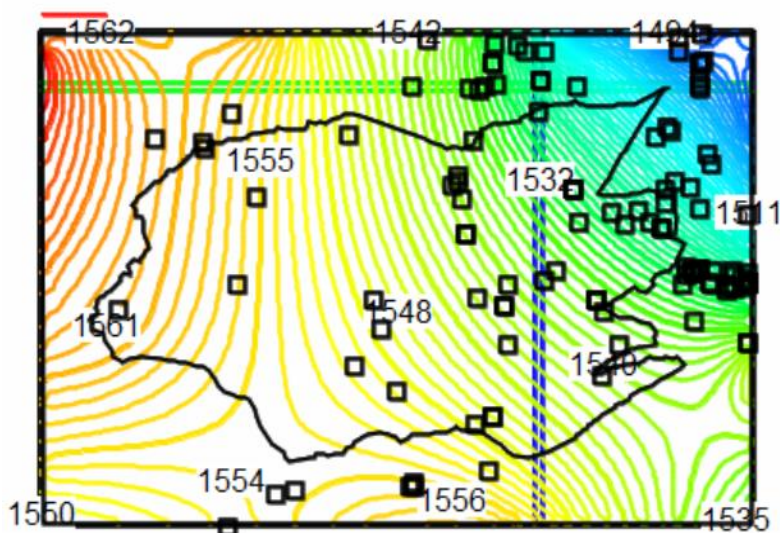


Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.

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 para conocer mejor las propiedades hidrológicas de la región sur poniente de la ciudad, y validar los modelos numéricos, para que los resultados aquí obtenidos se extrapolen y utilicen en todo 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"

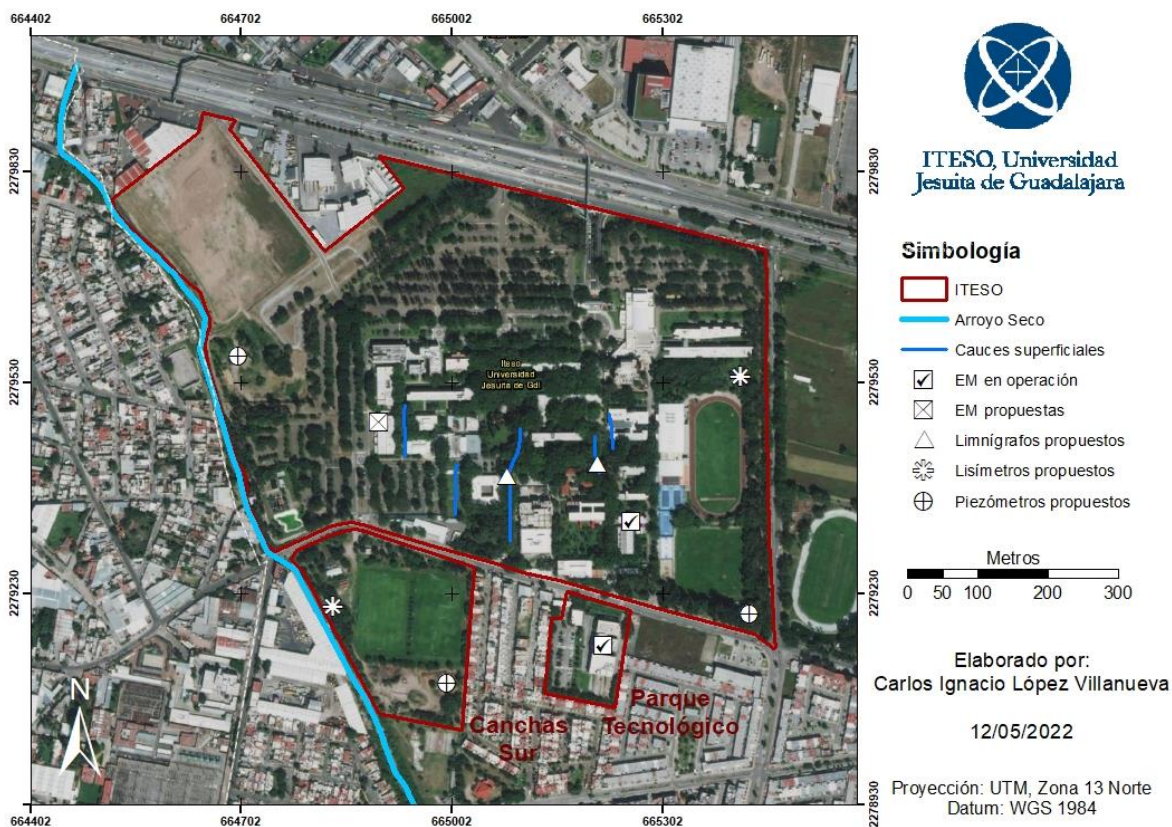


Figura 38. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto "Campus Hidrológico".

1.4 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

En el verano 2022, el equipo multidisciplinario, formado por académicos, asesores externos y alumnos, trabajó en distintas partidas de trabajo para avanzar en aspectos del proyecto mencionados 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).

Pertenecientes 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).

- Escorrentías: Agua que se escurre sobre superficies naturales o artificiales, que desembocan en pequeños arroyos o ríos para su posterior culminación en cuerpos lénticos (e.g. lagos, lagunas y océanos) (Auge M. , 2007).



Figura 39. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.)

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 humedad del suelo)	67 x 10 ³	0.005
	Aguas subterráneas hasta una profundidad de media milla	4.2 x 10 ⁶	0.31
	Aguas subterráneas profundas	4.2 x 10 ⁶	0.31
Otras localizaciones	Casquetes y otros glaciares	29 x 10 ⁶	2.15
	Atmósfera	1.3 x 10 ³	0.001
	Océano	1.320 x 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 que existe 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.

- Acuícludo: 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 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.

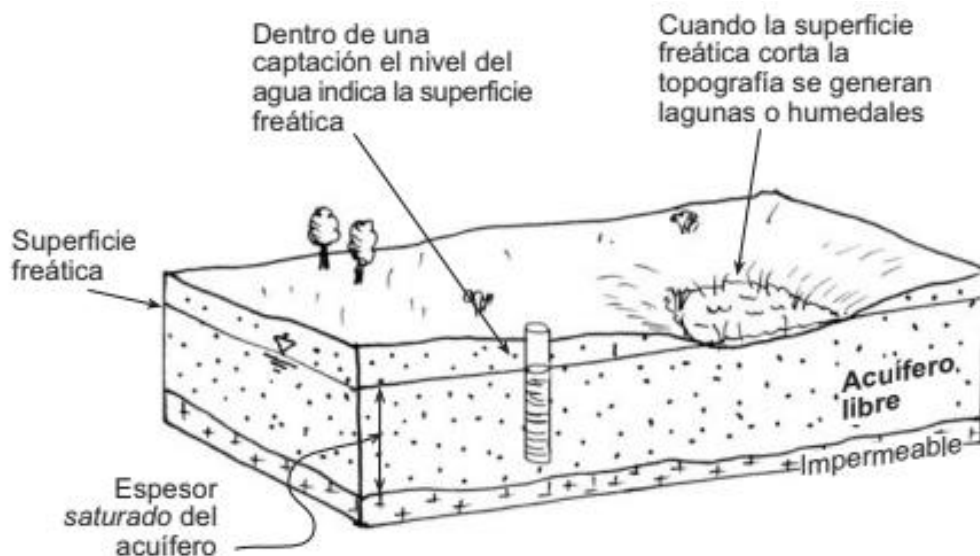


Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).

En cambio, los acuíferos confinados 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.

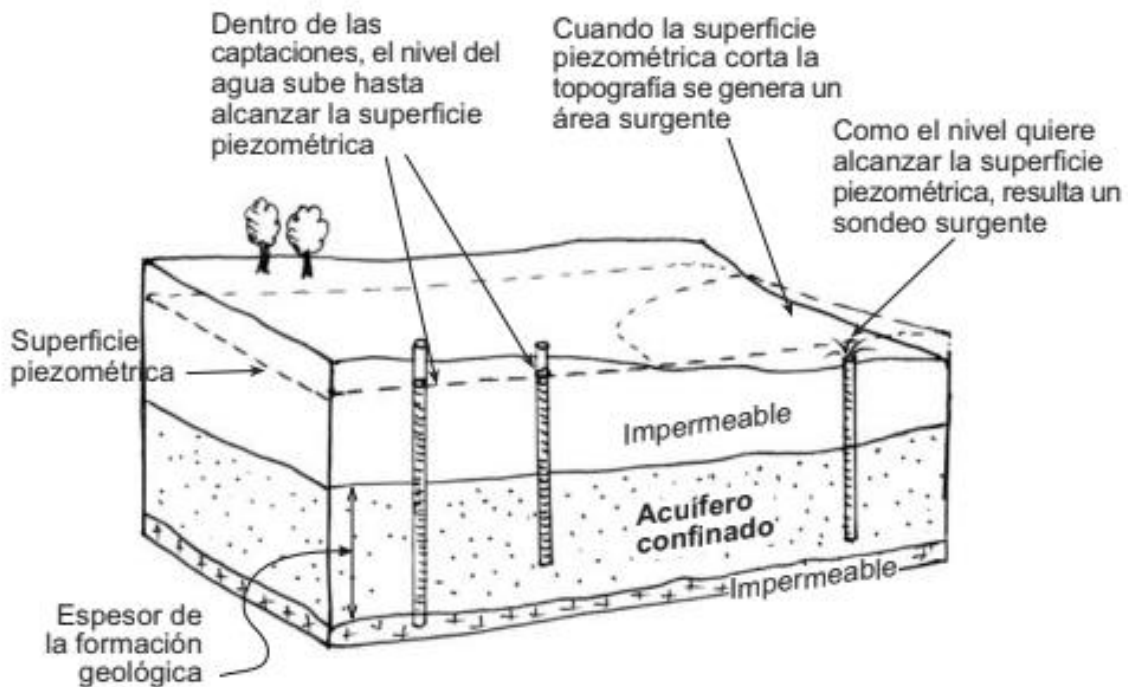


Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).

Los acuíferos semiconfinados son acuíferos a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables; permiten pequeñas filtraciones. Y los colgados 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).

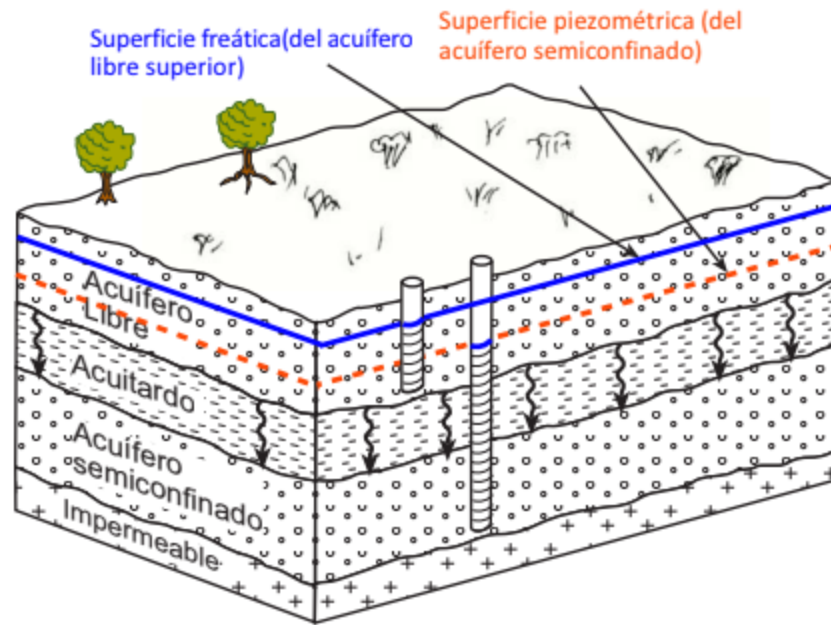


Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).

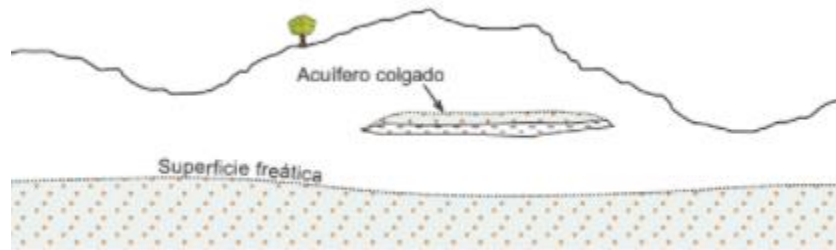


Figura 43. Acuífero colgado (Sánchez San Román).

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 se consideran recursos no renovables, ya que la velocidad de extracción supera la de infiltración, otra razón por la que se enfatiza en el cuidado del recurso.

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



Figura 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 pueden limpiar naturalmente el agua de contaminantes biodegradables gracias a las bacterias presentes, pero es difícil disolver o eliminar productos y/o contaminantes químicos, que llegan infiltrando 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 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.

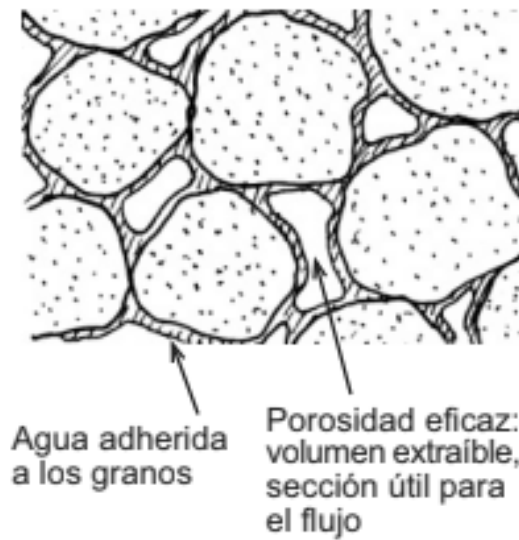


Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).

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 por su gran porosidad, pero sus espacios porosos son tan pequeños que no se mueven por ellos. Por tanto, la porosidad de la arcilla es grande, pero, debido a su baja permeabilidad, tiene una porosidad eficaz muy baja y se considera como un estrato impermeable.

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

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

Ecuación 3.

Donde:

Q = Caudal [=] L^3/T

A = Área transversal [=] L^2

K = Conductividad hidráulica [=] L/T

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

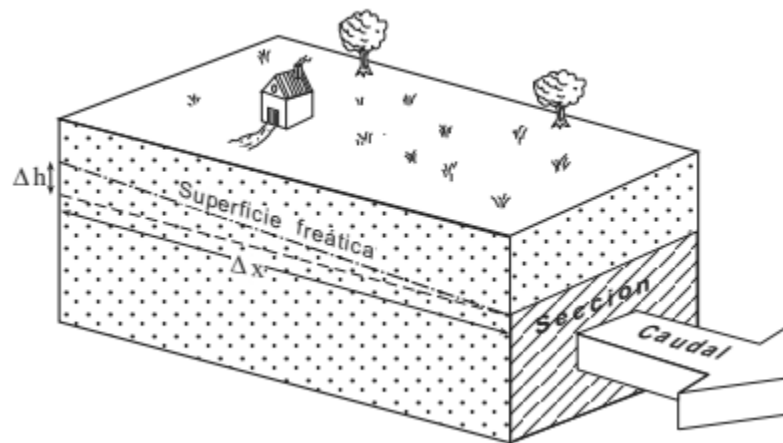


Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).

La Tabla 4 expone las características de porosidad y permeabilidad de cada concepto descrito.

Tabla 4. Propiedades de acuíferos.

	Porosidad total	Permeabilidad
Acuíferos	Alta o moderada	Alta
Acuitardos	Alta o moderada	Baja
Acuicludos	Alta	Nula
Acuíferos	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):

$$\text{Transmisividad} = K * \text{espesor}$$

Ecuación 4.

Donde:

Transmisividad [=] L^2/T

K [=] L/T

espesor [=] L

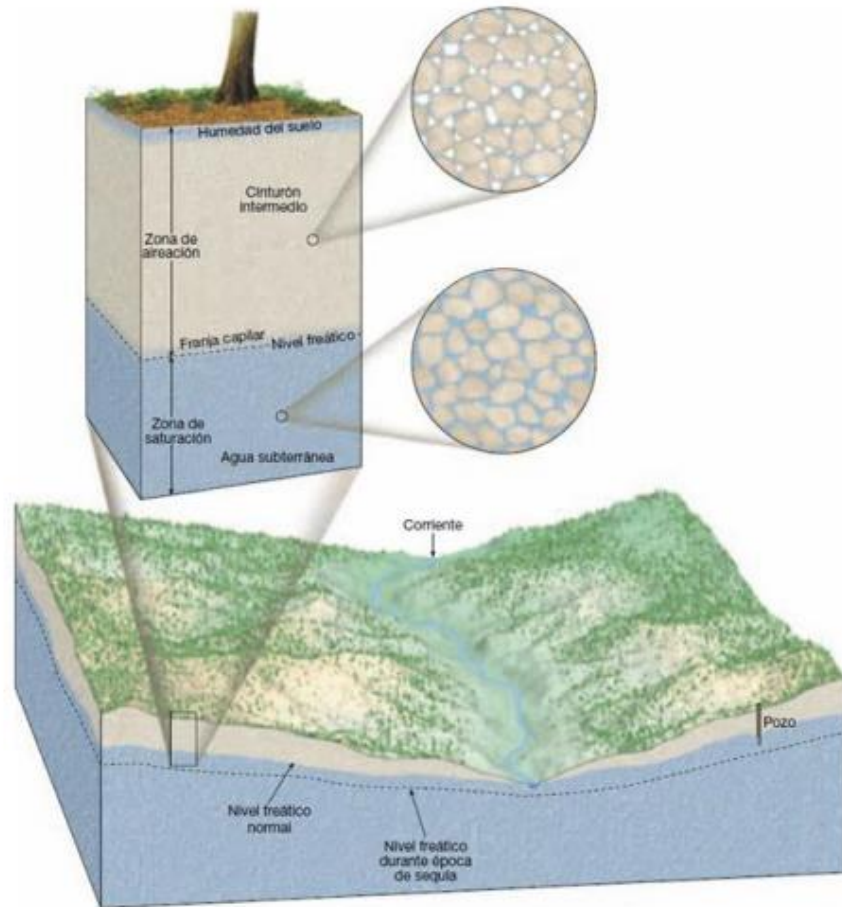


Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).

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 está la zona vadosa, que no está 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). Durante el temporal de lluvias, se observan escorrentías superficiales más elevadas y rápidas por el incremento de la cubierta impermeable. 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).

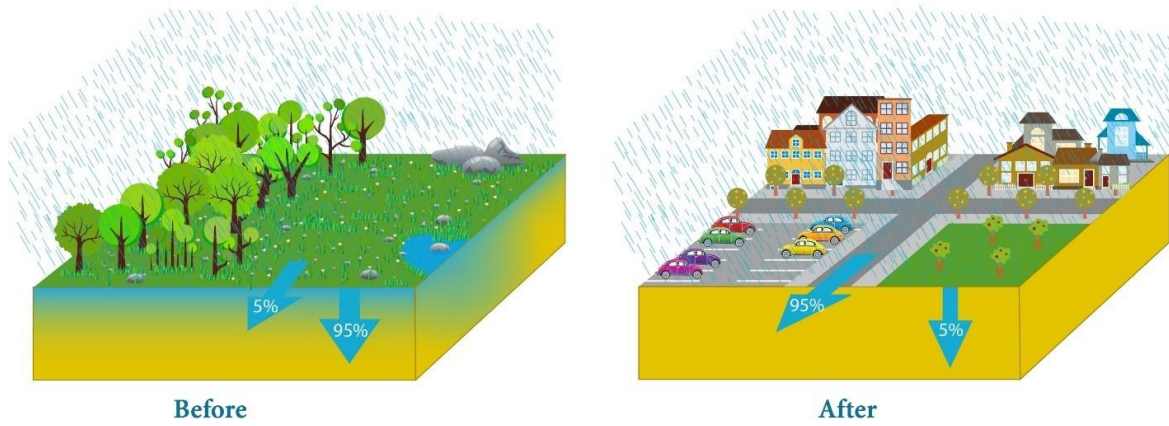


Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).

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. En su trayectoria por el ciclo hidrológico, el agua libera o acepta iones y minerales que alteran su constitución, lo que es muy importante que se entienda y se considere para determinar el uso que se le dará al agua en su lugar de captación. 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 estos. 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 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 (índices de calidad del agua)). 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 están los parámetros de temperatura, 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 suspendidos en el agua, como 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 lo controla 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., O_2) disuelto y los metales pesados. El oxígeno disuelto en el agua indica presencia de materia orgánica, siendo importante para evaluar y controlar el tratamiento de las aguas de desecho. Por otro lado, la medición de metales pesados es importante, ya que su extrema abundancia resulta peligrosa por su carácter no biodegradable y la toxicidad que ejercen, tanto en el uso del agua para riego agrícola, como para uso doméstico (Mancilla-Villa et al., 2012). Otros componentes inorgánicos son alcalinidad, Cl^- , F^- , P^- (Organización Meteorológica Mundial, 1994).

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 estas. 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 contaminantes físicos, químicos y biológicos, transportados por 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, 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 les 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. Las reacciones químicas las generan 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 implementar planes de desarrollo sostenible, en los que se involucran 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 (Momparlet, 2008).

Actualmente se ha reconocido a nivel mundial que se necesita un cambio para la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos (Momparlet, 2008). Este tipo de técnicas no han sido no han sido implementadas en México. Sin embargo, existen varios estudios de alternativas de SuDS en distintas partes del país, por ejemplo, en la ciudad de Córdoba, Veracruz (Gorostegui, 2021). Hablando sobre los sistemas de drenaje, éstos pueden contribuir al desarrollo sostenible, mejorar los espacios en los que vivimos, trabajamos y jugamos, equilibrando las diferentes oportunidades y desafíos que influyen en el diseño urbano y el desarrollo de las comunidades (Susdrain, s.f.).

El drenaje urbano consiste en la gestión del agua de lluvia precipitada. Actualmente, en países poco desarrollados, el drenaje urbano consiste solo en el movimiento del agua de lluvia precipitada de un lugar hacia otro. Lo cual acaba provocando problemas como contaminación difusa, inundaciones y pérdida de servicio de sistemas de saneamiento. En cambio, el drenaje sostenible pretende disminuir estos problemas para mejorar la gestión del agua de lluvia y evitar pérdidas de recursos. Para lograr este sistema se requiere de una adecuada metodología para asegurar el objetivo del proyecto y se tomen en cuenta las condiciones particulares de dicho país (Gorostegui, 2021).

Los SuDS son una mejor opción que los métodos tradicionales de drenaje (Susdrain, s.f.), 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 puede absorber contaminantes mediante sus estomas y reducir 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.

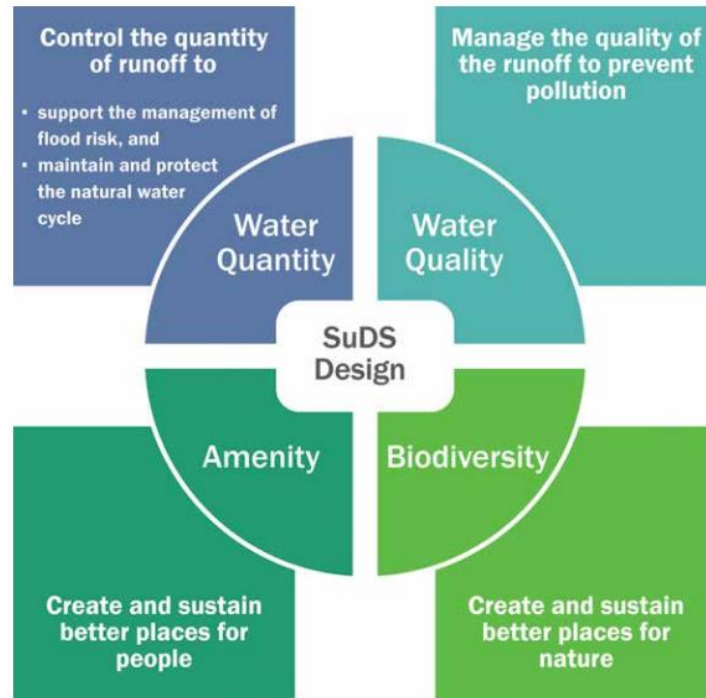


Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).

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. Los sistemas de gestión de aguas pluviales diseñados 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. Si el suelo no se drena adecuadamente, hay que 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.

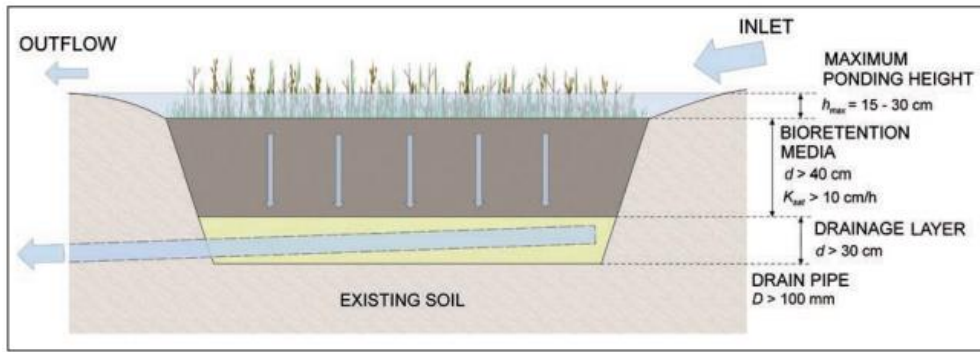


Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).



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.

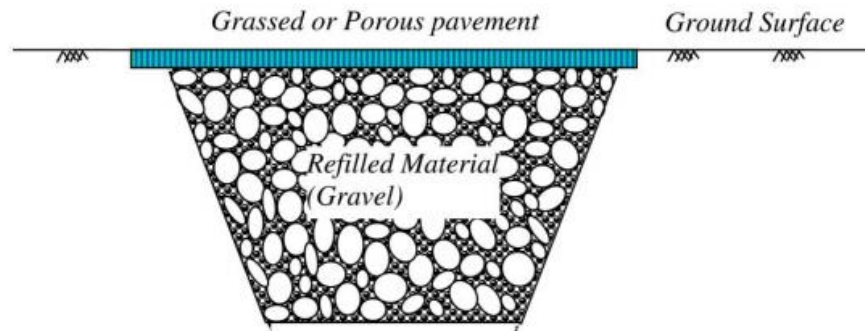


Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).

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. No se puede utilizar cualquier planta porque 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).

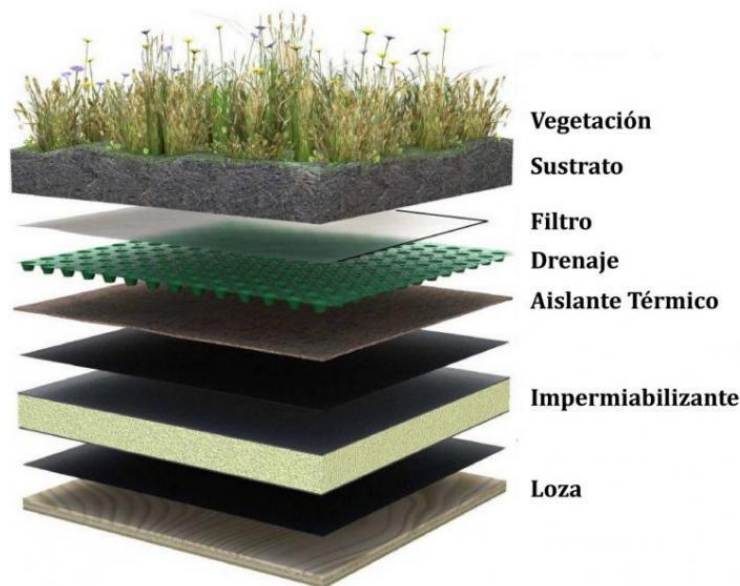


Figura 55. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).

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.

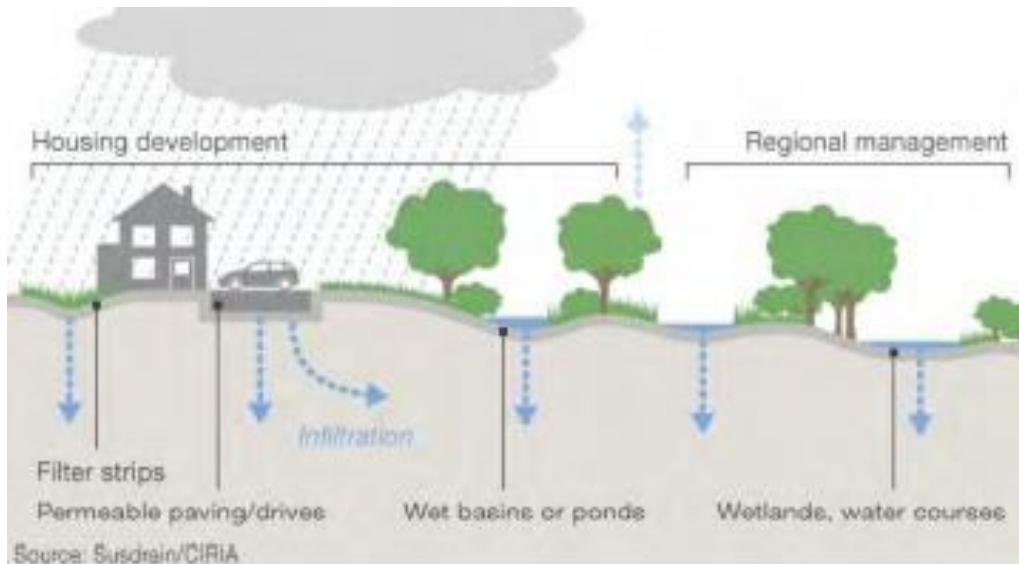


Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)

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 esta (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. Tipos de plantas más comunes para techos verdes. A esas comunidades se les influencia por el nivel de los nutrientes presentes en el agua, como el fósforo y el 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 son que requiere mucha participación de los habitantes/encargados de la casa/edificio puesto que se debe vaciar cada vez que se llena para 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, estos barriles deben conectarse a un sistema de drenaje para que, si se llenan durante una precipitación prolongada, estos desembocan los excesos al drenaje y evitar afectaciones al inmueble. Sifonamiento de los barriles de lluvia (Jennings et al., 2013).

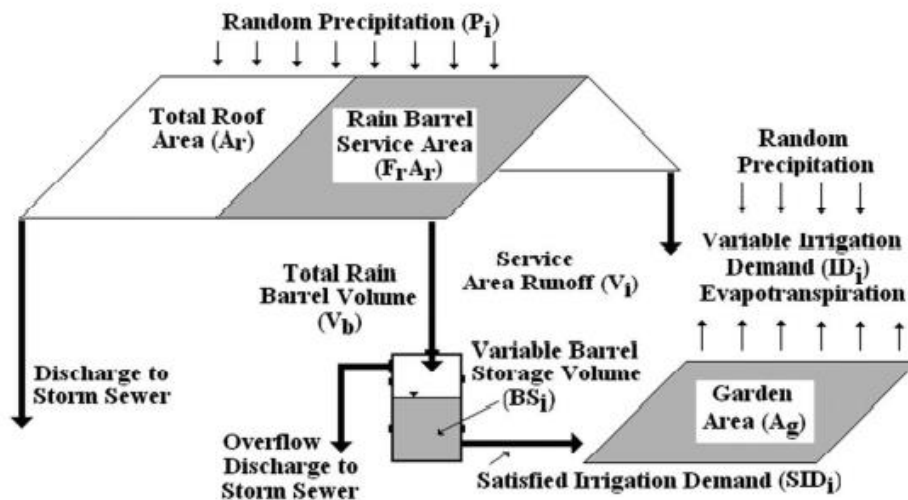


Fig. 1. Rain barrel for urban garden irrigation stormwater runoff management strategy

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. Son depresiones poco profundas en las que se plantan árboles y arbustos propios de la zona y se añade 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, lo más importante es maximizar la infiltración y tratamiento del agua y 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 eficiencia de estos jardines antes las lluvias y disminuir la escorrentía superficial; solo el 0,8 % terminó en escorrentía superficial, mientras que el resto se infiltraron. 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 la desnitrificación, el tiempo de retención pudo ser poco y por eso no ocurrió, 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 se esperaba. 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.

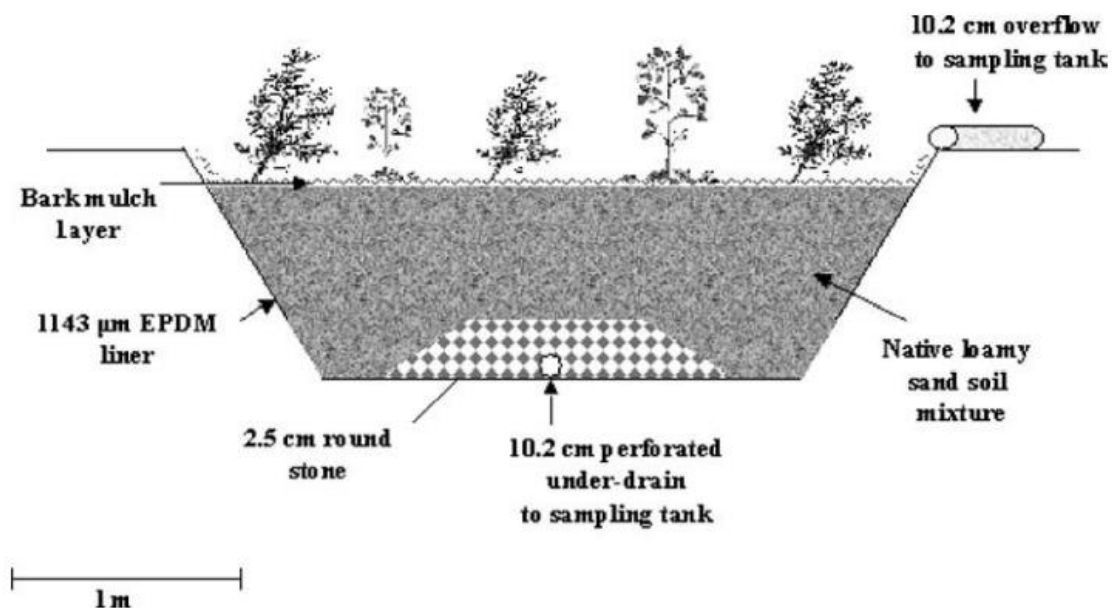


Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.

El estudio concluye que los jardines construidos resultaron ser buenos para infiltrar el agua de lluvia y evitar inundaciones, pero los resultados no fueron buenos en cuanto al mejoramiento de la calidad del agua, por lo que se recomienda que estos jardines estén conectados a un drenaje subterráneo para un 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. La calidad del agua no siempre es la mejor; se usan para recargar acuíferos mediante 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. Pero muchos organismos reguladores del agua no ven las técnicas como viables, ya que antes se consideraban emergentes y riesgosas; es el primer obstáculo para usar 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 fosas que se pueden utilizar son de las excavaciones para extraer 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):

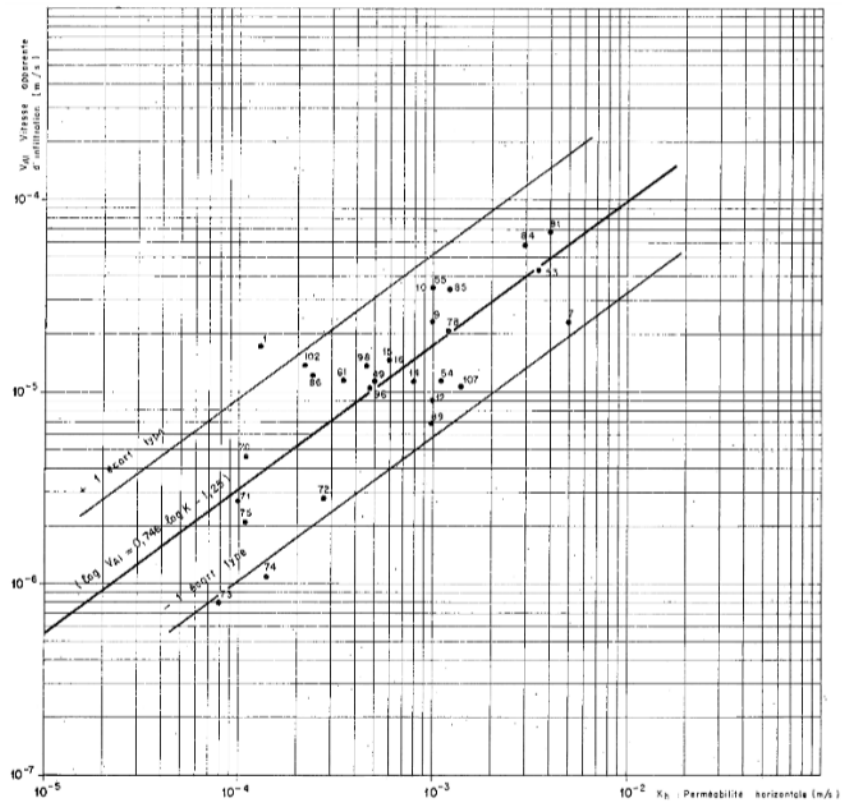


Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971

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

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):

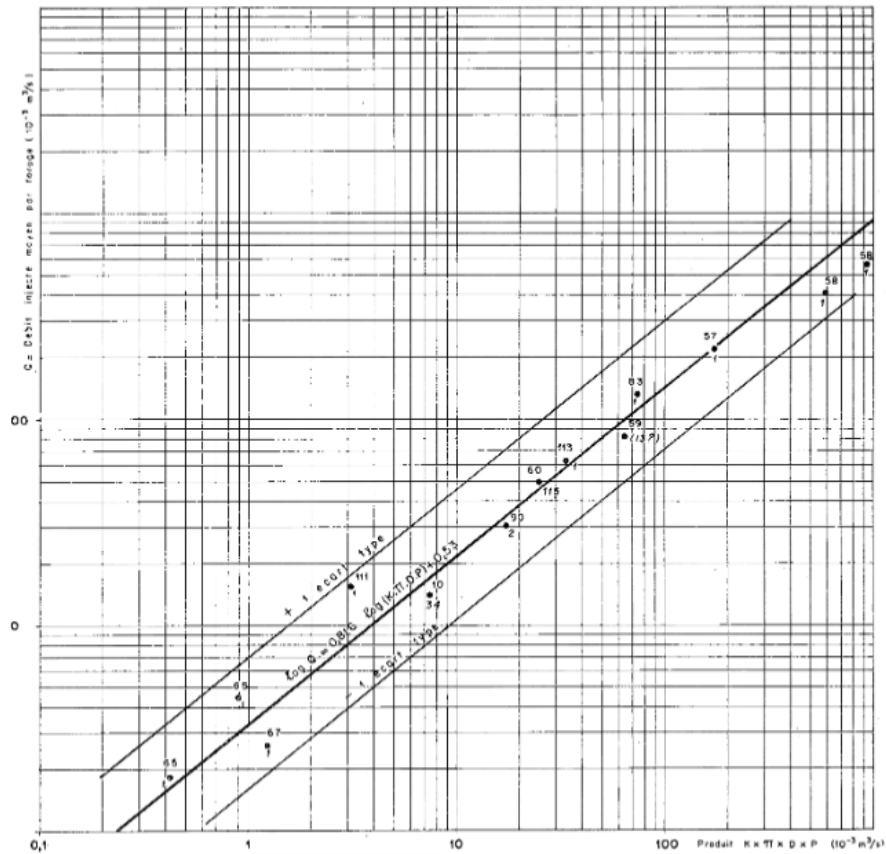


Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971

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

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

Actualmente, muchas ciudades del planeta comparten el problema de la escasez de agua potable; especialmente las 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 con la administración del agua para 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. En la siguiente tabla hay una breve descripción de los roles que juegan cada uno. 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 útil porque pretende 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 ello hay que contar con estaciones de monitoreo capaces 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:

¿Cuáles son los retos principales de la ciudad? (TPF).

¿Qué tan adecuado es el manejo del agua en la ciudad? (CBF).

¿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).

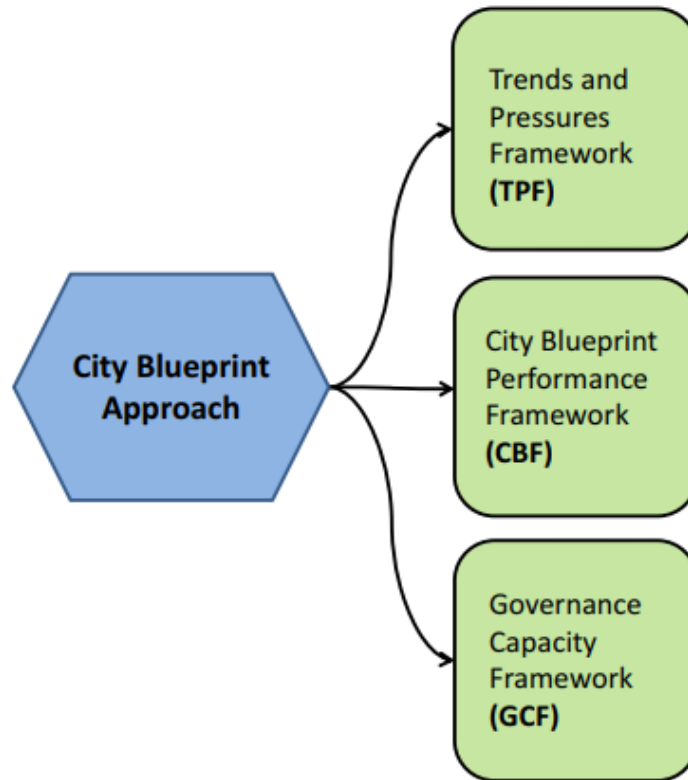


Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).

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 estos sistemas son innumerables, pareciera que una de las principales es tener una calificación y tomar acciones para mejorar o conservar las buenas prácticas, según 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 están desarrollando proyectos que integran la gobernanza y monitoreo para 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.

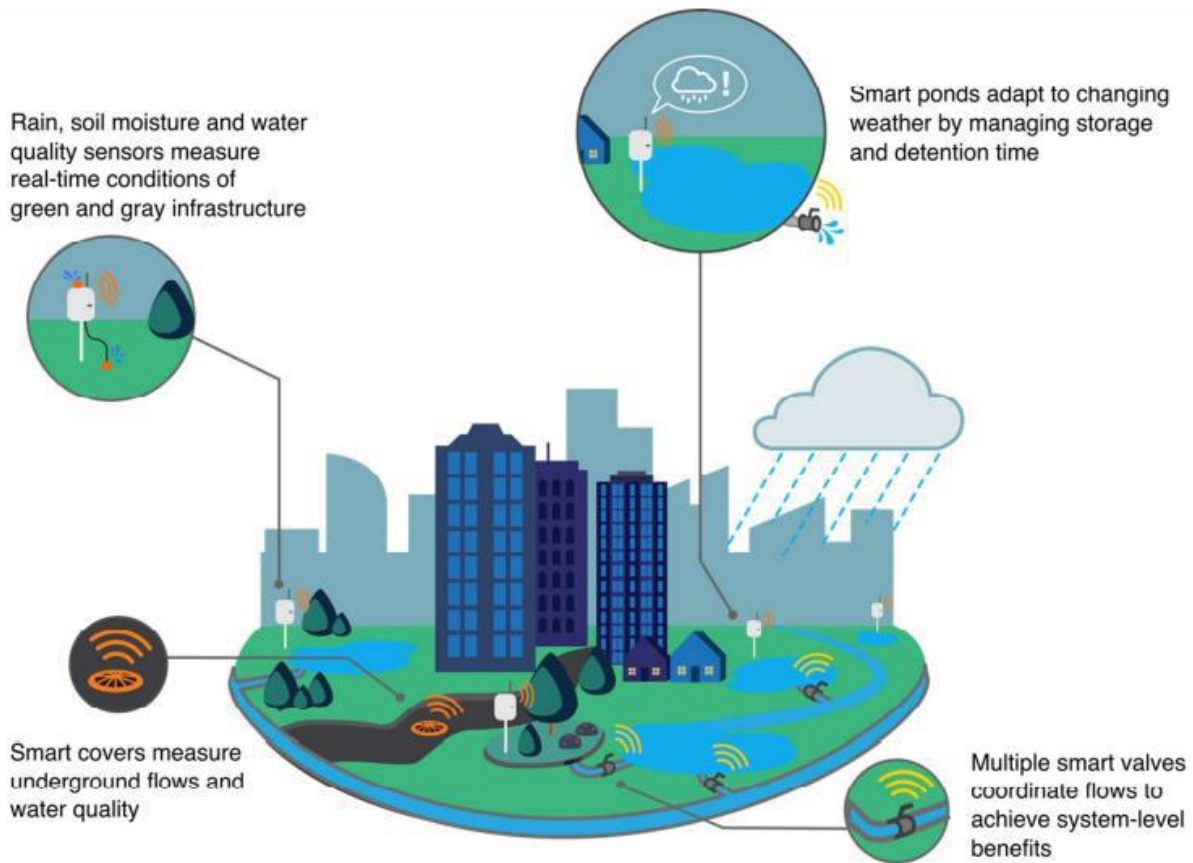


Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).

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.

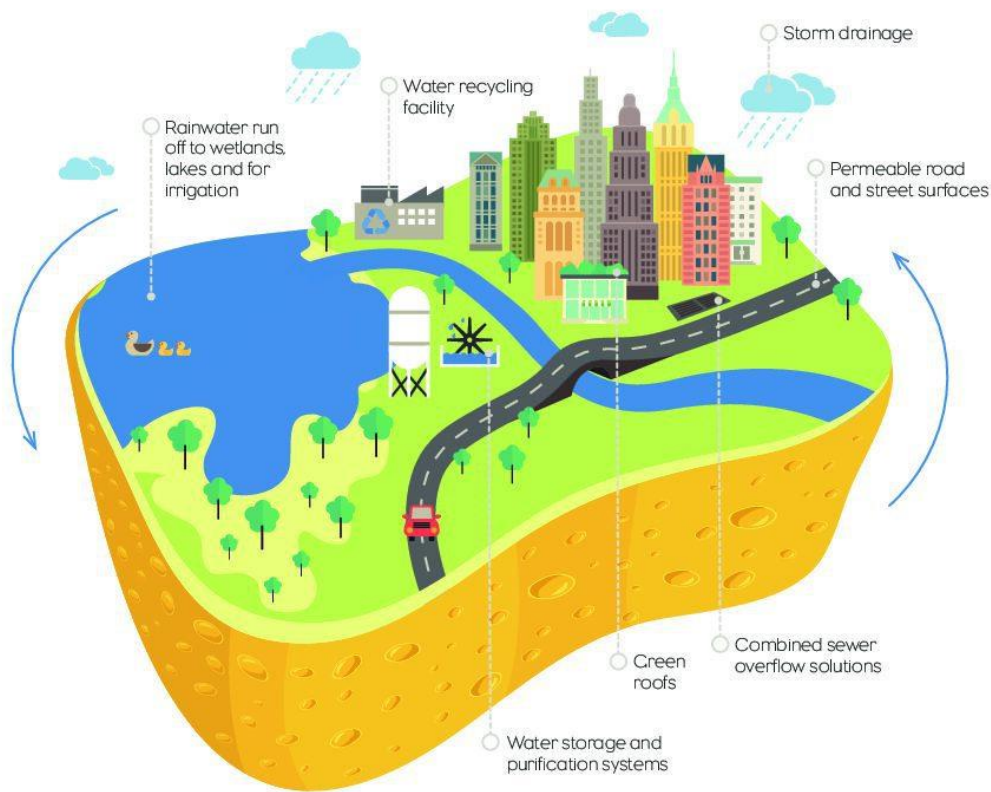


Figura 64 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016)

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 esponjan 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 espectroradiómetro 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). Se

diseño y se utiliza para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente, pero 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. Para solucionar el problema es necesario 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

Introducción

San Juan de Abajo cuenta con una población de más de 11,000 personas y una economía agrícola. 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.

Uno 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 para identificar los principales usos de suelo de y tipos de vegetación de la zona (Geografía INEGI, 2021).

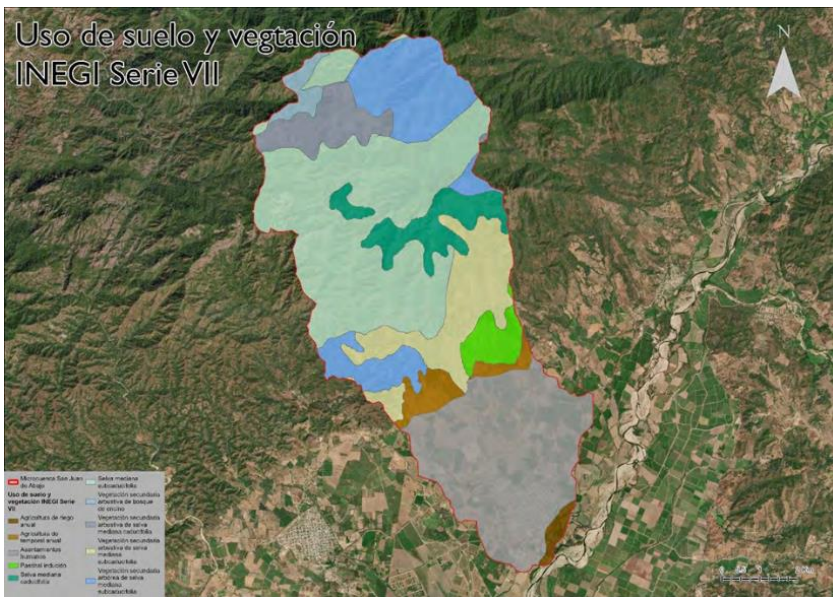


Figura 1. Uso de suelo y vegetación INEGI Serie VII (INEGI, 2021).

De la Figura 1., 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 se obtuvo para el 29 de abril de 2023, previa a la temporada de lluvias, para observarse con mayor detalle las diferencias entre cada tipo de vegetación de la zona.

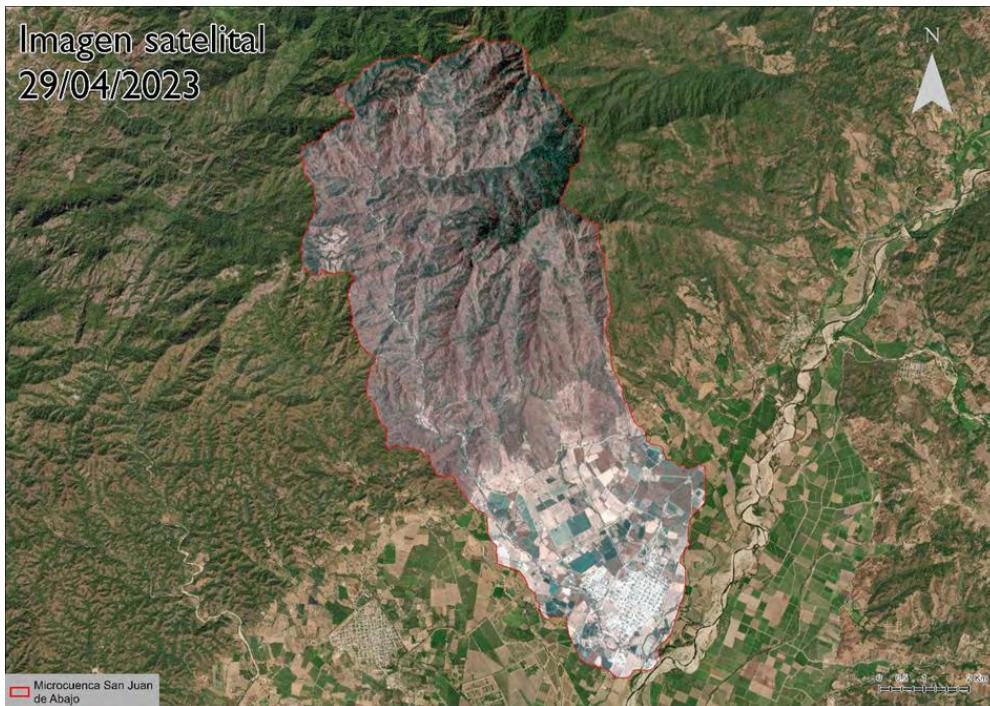


Figura 2. Imágen satelital del 29 de abril de 2023 (Planet, 2023).

Para clasificar la imagen satelital se realizó una clasificación supervisada, usando el 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 3(Geografía INEGI, 2016).

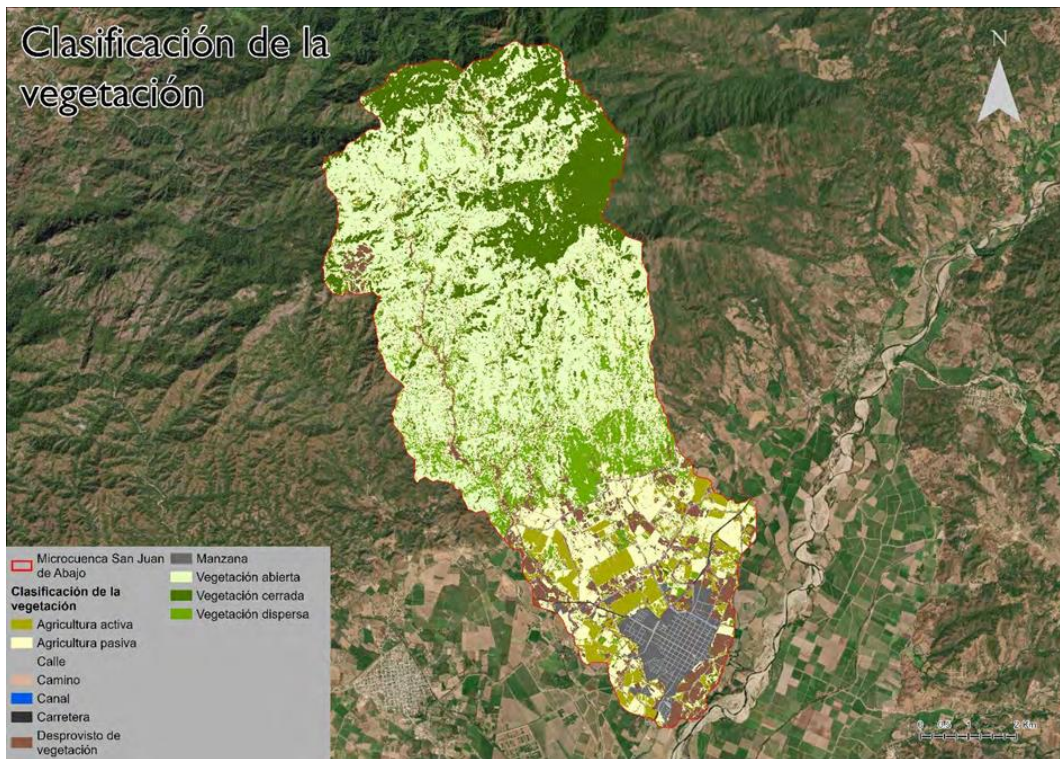


Figura 3. Clasificación de la vegetación (Elaboración propia de alumnos del semestre pasado).

De la Figura anterior 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.

3.1.3 Propuestas de intervención iniciales

Según el estudio inicial, se establecieron tres zonas de estudio. Dos de ellas en el Río Huichichila y otra en una zona de cultivos de temporada y ganadería en donde pasa el afluente de una escorrentía.

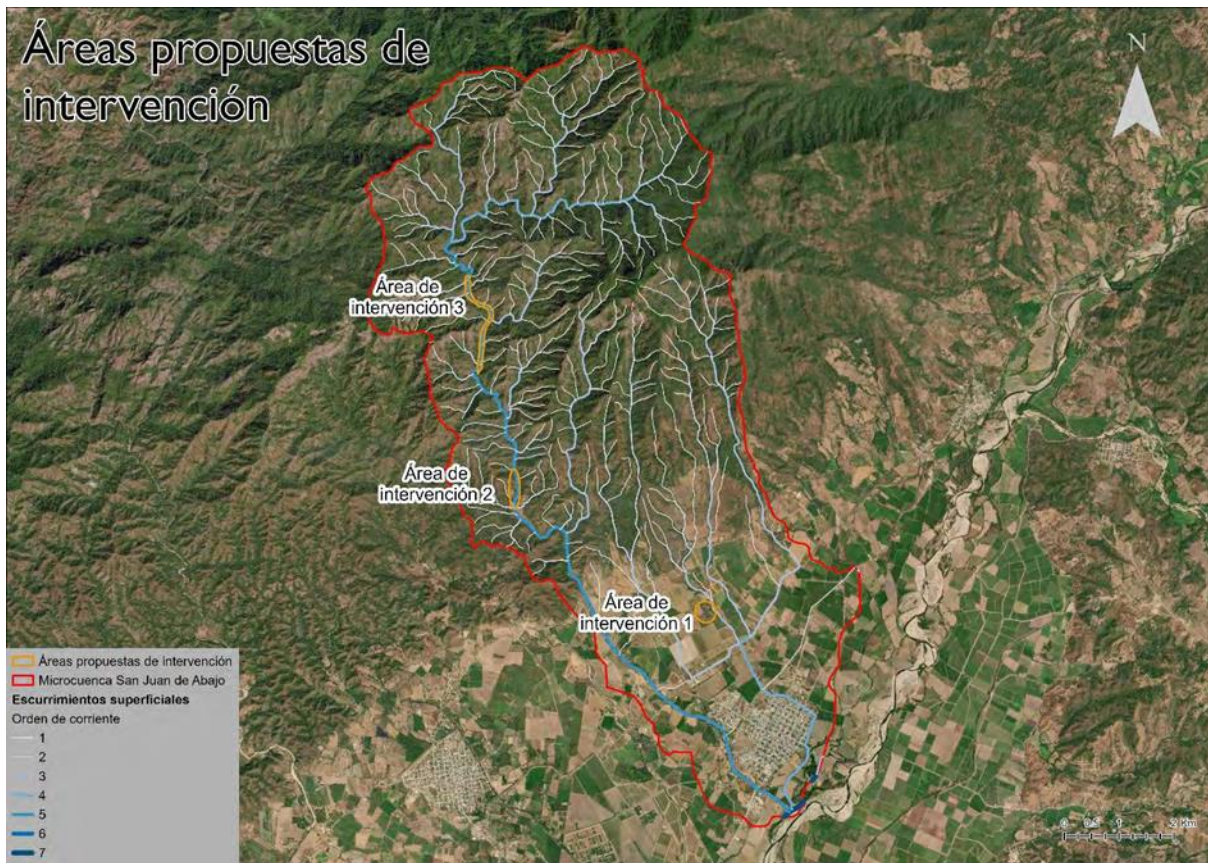


Figura 4. Áreas propuestas de intervención.

Área 1: Represa y área inundable

- Objetivo: Generar una actividad económica alternativa a la siembra de sandías y recargar el acuífero.
- Características:
 - Represa con área inundable para producción acuícola.
 - Dominio público para beneficiar a la comunidad.
 - Conexión con el suelo para la recarga del acuífero.

Área 2: Área recreativa estilo balneario

- Objetivo: Fomentar la recreación segura y la conservación del río.
- Características:
 - Acondicionamiento de un área recreativa pública con acceso seguro al río.
 - Mantenimiento continuo para evitar accidentes y contaminación.

- Infografías para concientizar sobre la importancia del río.

Área 3: Gaviones para retención de agua

- Objetivo: Retener y ralentizar el flujo de agua para proteger el área 2 y prevenir la erosión.
- Características:
 - Construcción de gaviones en la parte alta de la cuenca.
 - Reducción de la velocidad del flujo de agua en áreas erosionables.
 - Protección del área 2 de crecidas en el río.

Beneficios esperados:

- Diversificación de la economía local.
- Mejora de la calidad del agua.
- Disminución del riesgo de inundaciones.
- Promoción de la recreación y el turismo.
- Conservación del ecosistema del río.

Se recomienda:

- Implementar las tres áreas de intervención de manera conjunta para lograr un impacto integral en la gestión del agua.
- Involucrar a la comunidad en el proceso de diseño, implementación y mantenimiento de las intervenciones.
- Realizar un seguimiento y monitoreo continuo de las intervenciones para evaluar su efectividad y realizar ajustes necesarios.

Información Meteorológica.

Generación de una tormenta de diseño para el área de estudio

- No existía información de referencia de tormentas de diseño para la zona.
- Se consultó información de las estaciones meteorológicas de CONAGUA: San José del Valle, La Desembocada y Las Gaviotas.

- Se determinó la precipitación máxima registrada por estación.
- Se interpoló la precipitación máxima para el área de estudio usando el método IWD.
- Se definió la duración promedio de una tormenta con la mayor intensidad: 3 horas.

Proceso de generación:

1. Obtención de datos de precipitación:

- Se utilizaron datos de las estaciones meteorológicas de CONAGUA para el período 1981-2010.
- Se seleccionaron las estaciones más cercanas al área de estudio y con mayor cantidad de datos históricos.

2. Interpolación de la precipitación máxima:

- Se utilizó el método IWD para estimar la precipitación máxima en el área de estudio.

3. Definición de la duración de la tormenta:

- Se analizaron datos de las estaciones meteorológicas Acuarela, Las Palmas y Vidanta.
- Se identificaron las tormentas con mayor intensidad y ocurrencia dentro de intervalos de una hora.
- Se determinó que la duración del evento de lluvia con mayor intensidad es de 3 horas.

Resultado:

- Se generó una tormenta de diseño para el área de estudio con una precipitación máxima promedio y una duración de 3 horas.

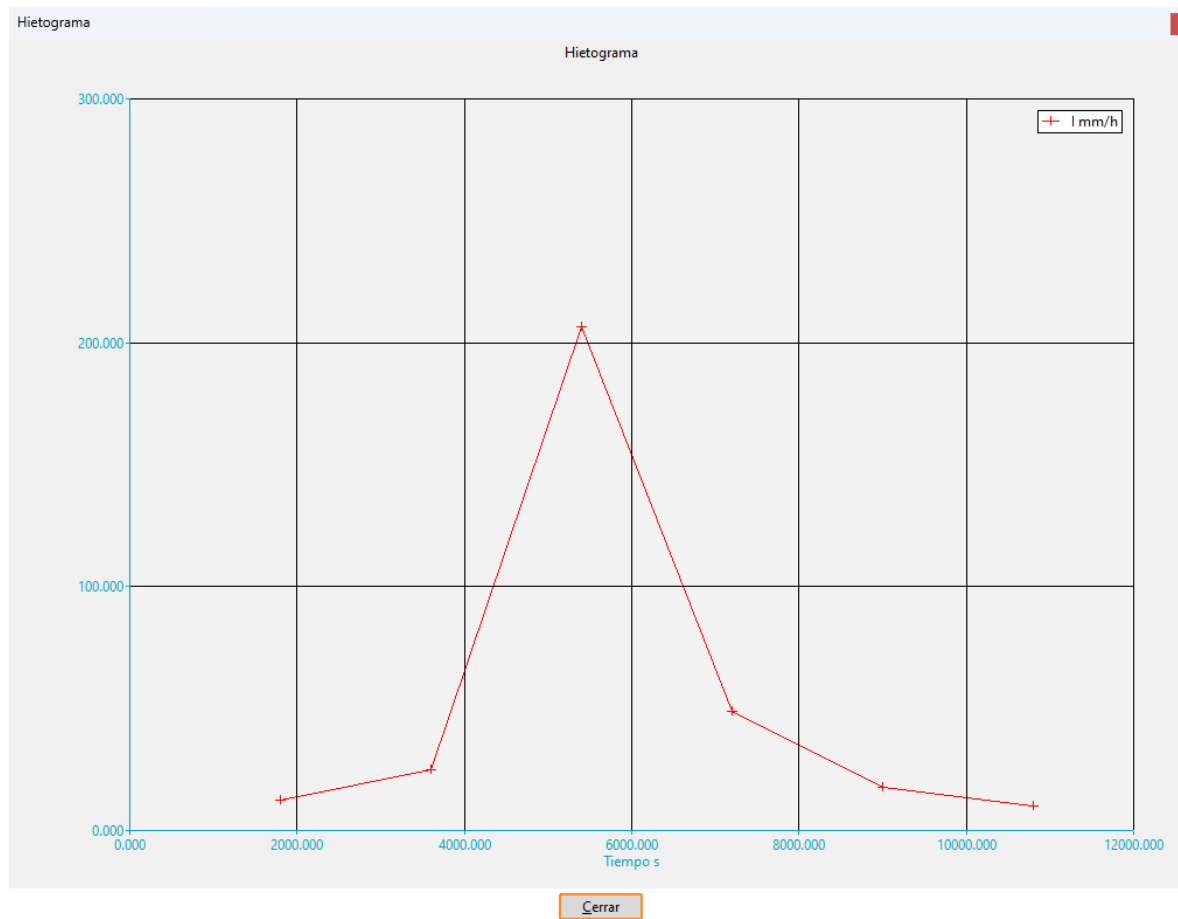
Beneficios:

- Permite realizar simulaciones hidrológicas más precisas en el área de estudio.
- Aporta información valiosa para el diseño de infraestructura hidráulica.
- Reduce el riesgo de inundaciones y otros desastres relacionados con el agua.

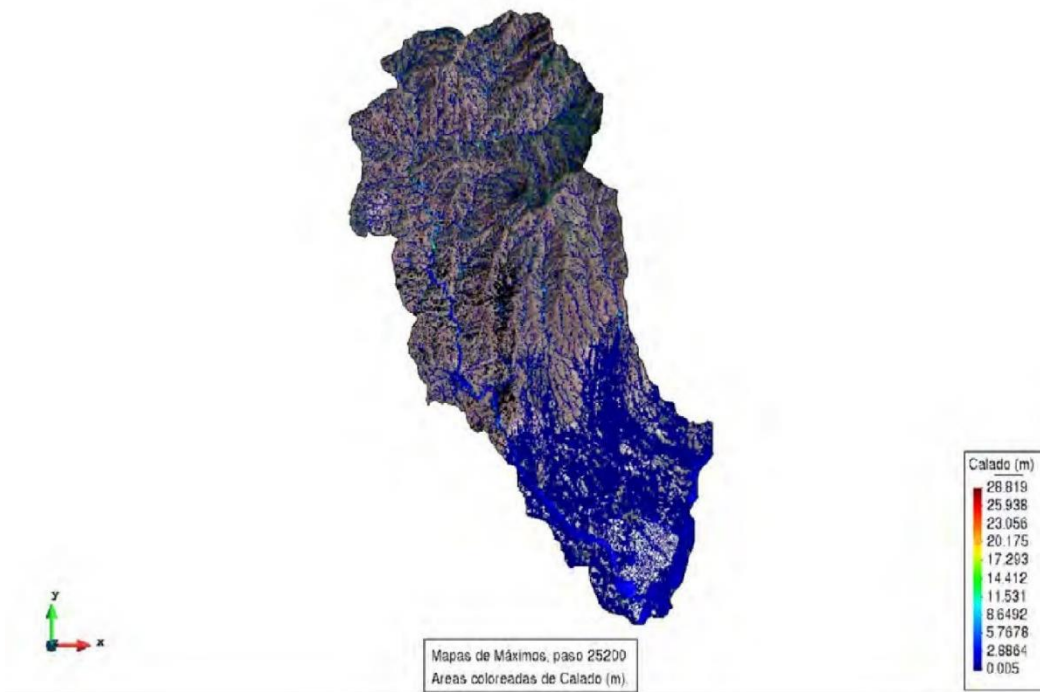
Modelación y resultados de IBER.

Para realizar el modelo los compañeros realizaron un preprocesamiento de la información recabada mediante el uso del software de SIG ArcGIS pro. Primero se transformó la información correspondiente al modelo digital

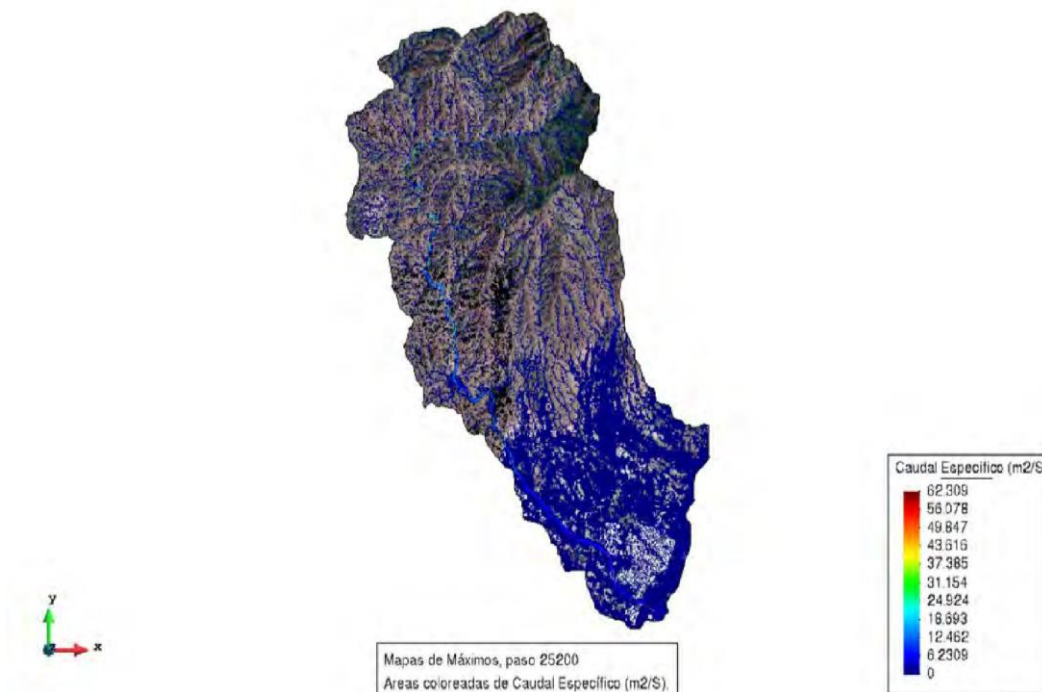
de elevación tipo superficie de formato ráster a formato ASCII, ya que es el formato soportado por IBER. Finalmente, el modelo digital de elevación en tipo ASCII fue utilizado para generar un RTIN en la plataforma de IBER con un tamaño de malla máximo de 100 metros, un tamaño de malla mínimo de 1 m y una tolerancia de 0.6 m.



Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.



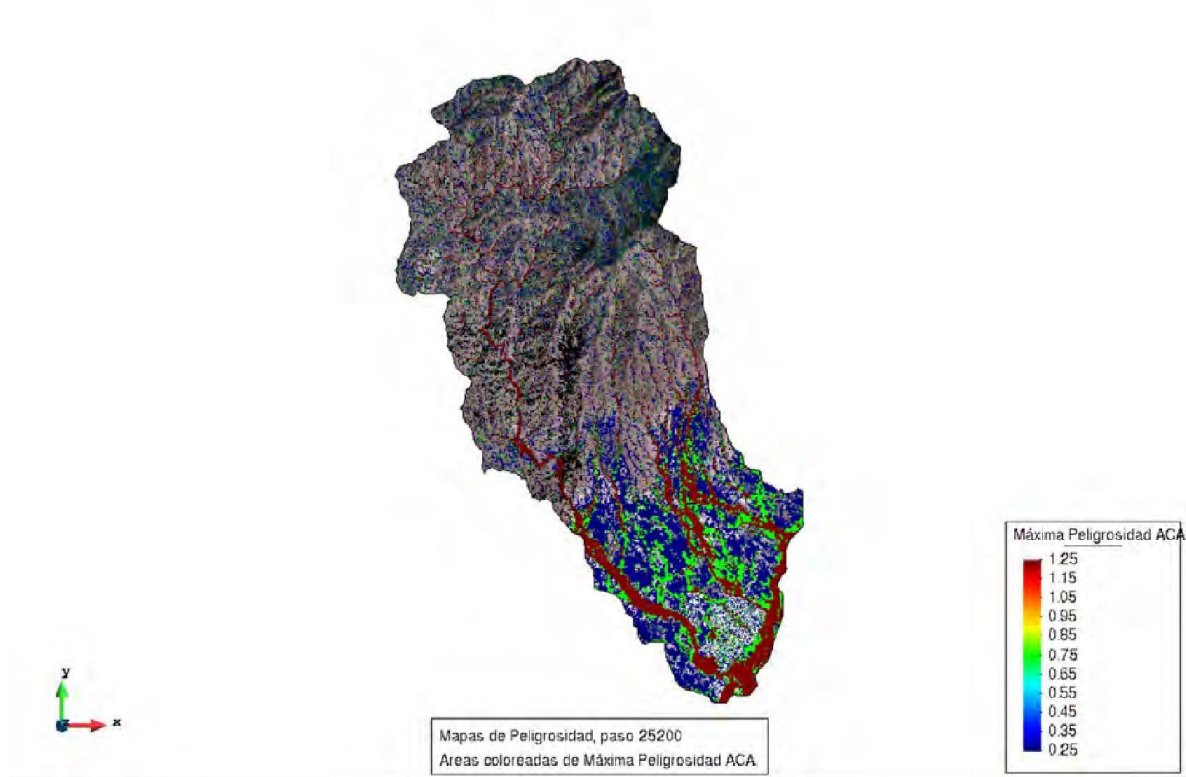
Mapa de máximo calado en el área de estudio.



Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio

A partir de los resultados presentados en las figuras anteriores es posible identificar las zonas con mayor calado y caudal específico, al presentarse un evento de lluvia. 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 de esta primera iteración es la identificación de las zonas más propensas a inundaciones en el poblado de San Juan de abajo, en una franja de Noroeste a Sureste.



Mapa de máxima peligrosidad ACA.

Finalmente, en la anterior imagen, es posible observar la máxima peligrosidad basada en la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA). La metodología propuesta por la agencia tiene como propósito caracterizar la gravedad del flujo del agua y como este puede impactar en la seguridad de las personas y los bienes materiales. Esta caracterización está enfocada en el calado y el flujo del agua lo cual la ACA muestra la siguiente tabla en la figura 10.

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).

Caracterización territorial

Topografía

Zona baja (Pueblo San Juan de Abajo y áreas agrícolas):

- Terreno prácticamente plano.
- Cercanía al Río Ameca.
- Riesgo de inundaciones por aumento del caudal de los ríos en temporadas de lluvia.

Importancia de la vegetación:

- La ausencia de vegetación aumentaría significativamente el riesgo de inundaciones en el pueblo San Juan de Abajo.

Consideraciones adicionales:

- El Modelo Digital de Elevación muestra claramente la diferencia topográfica
- La zona baja carece de obstáculos naturales que puedan detener el flujo del agua.

Beneficios:

- La comprensión de la topografía de la cuenca permite identificar áreas de riesgo y tomar medidas de prevención.
- La información sobre la vegetación es crucial para diseñar estrategias de manejo del agua y conservación del suelo.
- El análisis de la cuenca contribuye a la toma de decisiones informadas para la gestión del agua y la reducción del riesgo de desastres.
- La tabla abajo integra los cuerpos de agua superficiales, principalmente ríos, de la zona de estudio.

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

Tipo	Nombre del río	Clasificación	Longitud del río (m)
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 perenes dobles	de de	Río Ameca	Corriente perenne	11,841.25
Ríos y límites de corrientes perenes dobles	de de	Río Ameca	Corriente perenne	9,260.17
Arroyos y de corrientes intermitentes	de de	A. Guastitán	Corriente intermitente	8,782.22
Arroyos y de corrientes intermitentes	de de		Corriente intermitente	

Calado:

El río Huichichila presenta variaciones en su profundidad, con zonas de 2 a 5 metros y otras que superan los 5 metros cerca del río Ameca.

En la parte alta de la cuenca, la profundidad alcanza hasta 10 metros.

En general, el calado se mantiene dentro de estos rangos.

Peligrosidad:

La mayor peligrosidad se concentra en la zona baja de la cuenca, en la confluencia de los ríos Ameca y Huichichila, donde el índice de peligrosidad alcanza 1.25.

A lo largo del río Huichichila, el índice de peligrosidad también es de 1.25.

Algunas áreas dentro del pueblo de San Juan presentan un índice elevado, lo que sugiere riesgo de inundación y escurrimientos peligrosos.

Calidad del agua:

En la parte alta de la cuenca, el agua del río Huichichila es clara y no muestra signos de contaminación.

El agua fluye por un cauce natural sin intervención humana ni urbanización.

A medida que se acerca a la desembocadura con el río Ameca y al pueblo San Juan de Abajo, el agua pierde claridad y se contamina.

Se observaron descargas de aguas negras provenientes de viviendas cercanas al río.

La contaminación es relativamente baja y podría solucionarse desviando las descargas a la red municipal. Con un tratamiento adecuado del entorno, el agua del río podría mantenerse limpia.

Observaciones adicionales:

El análisis realizado con IBER permitió identificar zonas con diferentes características hidrológicas.

La calidad del agua se ve afectada por las actividades humanas, principalmente por las descargas de aguas negras.

Es necesario implementar medidas para prevenir la contaminación del río y mejorar su calidad.

Beneficios:

La comprensión de la dinámica hidrológica de la cuenca permite tomar decisiones informadas para la gestión del agua.

El conocimiento de la calidad del agua es fundamental para la protección de la salud pública y el medio ambiente.

La identificación de áreas de riesgo de inundación facilita la implementación de medidas de prevención y mitigación.

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 siguiente tabla:

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 geometría (m2)	Superficie de incidencia (m2)
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		2'351,616.84
1807	Valle de Banderas	Con disponibilidad			No	118,058.122		65'666,517.3

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, en la tabla, 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 m3
Nayarit	Bahía de	Río Ameca-	Valle de	7	78,351
					206,186

	Banderas	Ixtapa	Banderas		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 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.

3.2 Zona Poniente de Guadalajara

3.2.1 Introducción

La Zona Poniente de Guadalajara, emerge como un área de oportunidad para la investigación, innovación y el desarrollo de infraestructura de recarga artificial. Esta región, incluye a los municipios de Zapopan, Tlajomulco de Zúñiga y zonas de Tlaquepaque. Al aprovechar la ubicación estratégica y la infraestructura existente de la Zona Poniente, se pueden diseñar soluciones de recarga artificial que satisfagan las necesidades tanto de residentes como de visitantes. Además, la integración de estas tecnologías avanzadas promovería la eficiencia energética y la reducción de la huella de carbono, contribuyendo así a la construcción de una ciudad más resiliente y sostenible.

Desde el punto de vista climático, la Zona Poniente de Guadalajara disfruta de un clima subtropical seco, con temperaturas cálidas la mayor parte del año y una temporada de lluvias durante los meses de verano. Esta ubicación geográfica y su clima favorable han contribuido al desarrollo urbano y económico de la región.

3.2.2 Definición del área de estudio

La Zona Poniente de Guadalajara se encuentra ubicada en el estado de Jalisco, en el occidente de México. Limita al norte con el municipio de Zapopan, al este con el Río Santiago que la separa de la Zona Centro de Guadalajara, al sur con el municipio de Tlajomulco de Zúñiga y al oeste con el municipio de Zapopan y el municipio de Tlajomulco de Zúñiga. Esta ubicación geográfica la convierte en un punto neurálgico dentro del área metropolitana de Guadalajara, la segunda área metropolitana más grande de México.

La Zona Poniente se caracteriza por su topografía variada, que va desde áreas planas hasta zonas montañosas, lo que le otorga un paisaje diverso y atractivo. Además, está atravesada por importantes vías de comunicación, como la Carretera Federal 15 que conecta Guadalajara con otros puntos del país, así como por modernas autopistas y avenidas que facilitan el transporte dentro y fuera de la región.

Más específicamente nuestra área de estudio corresponde a la microcuenca El Tecolote es una región geográfica específica ubicada en la zona poniente de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco, México. Esta área abarca una extensión relativamente pequeña de terreno, pero juega un papel crucial en el equilibrio hidrológico y ecológico de la región circundante.

El entorno natural de la microcuenca está caracterizado por una combinación de elementos urbanos y naturales. Aunque se encuentra dentro del área urbana de Guadalajara, aún conserva ciertos elementos de vegetación y cursos de agua naturales que son vitales para la regulación del agua y la biodiversidad local.

Sin embargo, como ocurre en muchas áreas urbanas en crecimiento, la microcuenca El Tecolote enfrenta diversos desafíos ambientales y de gestión del agua. Entre estos desafíos se encuentran la contaminación del agua, la pérdida de áreas verdes debido al desarrollo urbano y la alteración de los cursos de agua naturales debido a la urbanización y la infraestructura construida.

El estudio y la simulación de esta microcuenca son de suma importancia para comprender mejor cómo los cambios en el uso del suelo y la infraestructura pueden afectar el flujo del agua, la calidad del agua y la capacidad de la microcuenca para proporcionar servicios ecosistémicos vitales para la comunidad local y el medio ambiente en general.

3.2.3 Demografía

La Zona Poniente de Guadalajara alberga una población diversa y dinámica que refleja la riqueza cultural y social de la región. Con una población en constante crecimiento, esta área se ha convertido en uno de los polos demográficos más importantes de la ciudad.

Según datos recientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la población total de la Zona Poniente se estima en 1 millón 469 mil 966 para el año 2023, y con una densidad poblacional promedio de 1274.7 habitantes por kilómetro cuadrado. Esta densidad varía significativamente dentro de la zona, siendo las áreas residenciales y comerciales las más densamente pobladas.

En cuanto a la estructura demográfica, la Zona Poniente presenta una distribución equilibrada por edades, con una proporción significativa de jóvenes y adultos en edad laboral. Sin embargo, también se observa un aumento en la población de adultos mayores, reflejando las tendencias demográficas a nivel nacional.

La diversidad étnica y cultural es otro aspecto destacado de la demografía de la Zona Poniente. La presencia de comunidades indígenas, migrantes internacionales y personas de diversas regiones de México ha enriquecido el tejido social de la región, contribuyendo a su dinamismo y pluralidad.

En términos de distribución geográfica, la población se concentra principalmente en áreas urbanas y suburbanas, con núcleos residenciales y comerciales bien definidos. Sin embargo, también existen comunidades rurales y semiurbanas en las zonas periféricas, donde la densidad poblacional es menor pero igualmente significativa en términos de identidad y desarrollo comunitario.

3.2.4 Desarrollo Urbano

El desarrollo urbano en la Zona Poniente de Guadalajara ha experimentado un notable crecimiento y transformación en las últimas décadas, impulsado por una combinación de factores económicos, sociales y geográficos. Esta área, que anteriormente estaba compuesta principalmente por zonas rurales y semirurales, ha experimentado una rápida urbanización debido al aumento de la población, la expansión de la actividad económica y la creciente demanda de vivienda y servicios.

Uno de los principales impulsores del desarrollo urbano en la Zona Poniente ha sido el crecimiento económico y la atracción de inversiones. La proximidad a centros de actividad económica, como el área financiera de Puerta de Hierro y el corredor industrial de Periférico, ha fomentado la construcción de desarrollos comerciales y residenciales de alta gama, así como la expansión de infraestructuras y servicios.

La planificación urbana en la Zona Poniente ha sido fundamental para guiar el crecimiento de manera ordenada y sostenible. La creación de planes maestros y regulaciones urbanas ha permitido la identificación de áreas para

el desarrollo residencial, comercial e industrial, así como la preservación de espacios naturales y zonas de conservación ecológica.

El desarrollo de infraestructura también ha sido un aspecto clave del desarrollo urbano en la Zona Poniente. La construcción de nuevas carreteras, avenidas y vías de acceso ha mejorado la conectividad dentro de la región y con otras partes de la ciudad, facilitando el flujo de personas y mercancías. Del mismo modo, la expansión de servicios básicos como agua, electricidad, gas y telecomunicaciones ha sido fundamental para satisfacer las necesidades de una población en crecimiento.

Sin embargo, el desarrollo urbano en la Zona Poniente también ha enfrentado desafíos y críticas. La expansión descontrolada de la mancha urbana ha generado preocupaciones sobre la pérdida de áreas verdes, la fragmentación del hábitat natural y la congestión vehicular. Además, la desigualdad en el acceso a vivienda, servicios y oportunidades económicas ha sido un tema de preocupación para algunos sectores de la población.

3.2.5 Uso de suelo

Dentro de la Zona Poniente, se pueden identificar diferentes categorías de uso de suelo, cada una con sus propias características y restricciones. Algunas de las categorías más comunes incluyen:

Residencial: Esta categoría comprende áreas destinadas principalmente a la construcción de viviendas unifamiliares, multifamiliares o mixtas. Se pueden encontrar diferentes tipos de densidades residenciales, desde zonas de baja densidad con viviendas unifamiliares hasta áreas de alta densidad con edificios de departamentos.

Comercial: Las zonas comerciales están destinadas a la instalación de negocios, tiendas, restaurantes, oficinas y otros establecimientos comerciales. Estas áreas suelen estar ubicadas en torno a corredores viales principales y centros de actividad económica, como Puerta de Hierro y Ciudadela.

Industrial: Las áreas industriales están reservadas para la ubicación de actividades productivas, fábricas, bodegas y centros de distribución. Estas zonas suelen estar alejadas de las áreas residenciales para minimizar posibles conflictos de uso de suelo y mitigar impactos ambientales.

Mixto: En algunas partes de la Zona Poniente, se permite el desarrollo de proyectos mixtos que combinan usos residenciales, comerciales e incluso industriales en un mismo espacio. Estos desarrollos buscan fomentar la integración y diversidad funcional en el tejido urbano.

Además de estas categorías principales, también existen áreas destinadas a usos institucionales, educativos, recreativos, de conservación ecológica y de infraestructura pública, como parques, áreas verdes, escuelas, hospitales y vialidades.

4. Metodología

4.1 San Juan de Abajo

Introducción

El área de estudio, San Juan de Abajo, está en la intersección de factores que hacen que el análisis de su hidrología sea muy importante. 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.

- 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.

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 65). La microcuenca de estudio tiene una extensión de 6,804.24 ha, en las que se puede encontrar una localidad urbana, San Juan de Abajo.



Figura 65. Área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo).

En la Figura 65, 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.

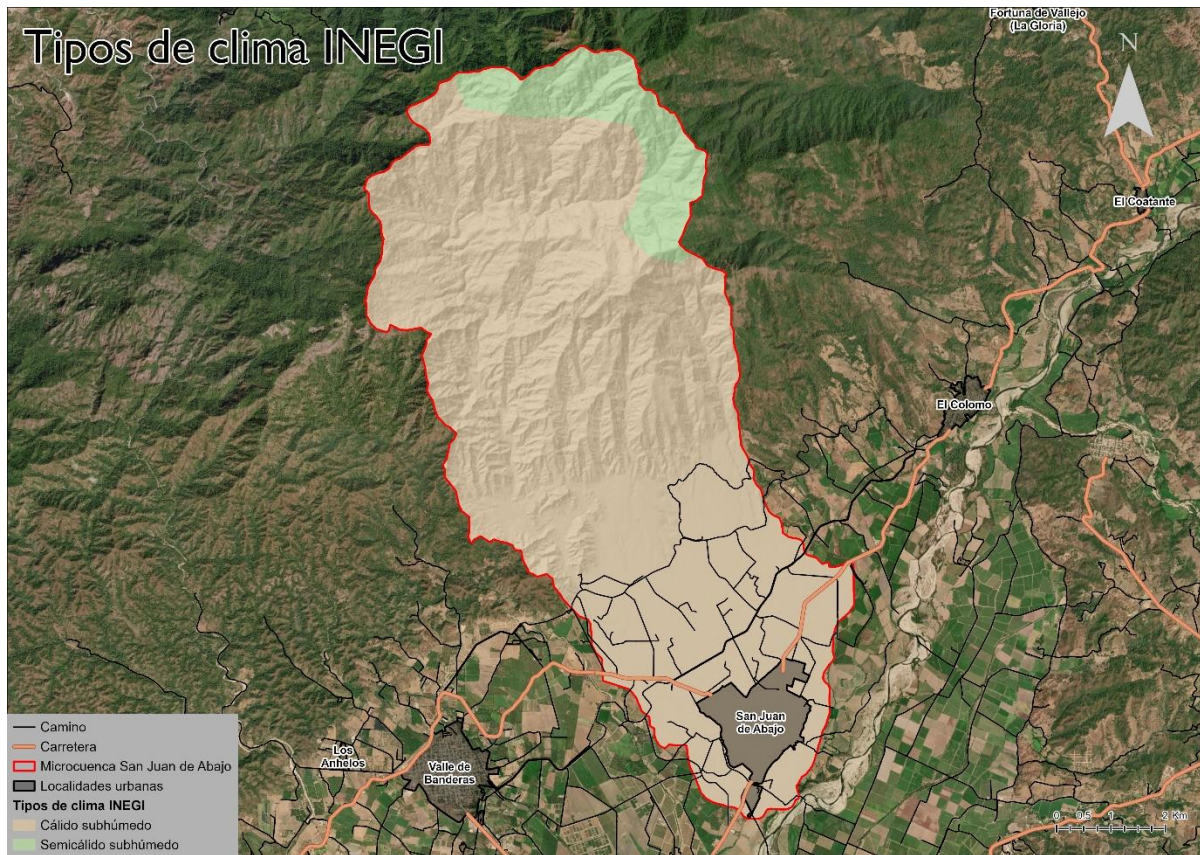


Figura 66. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).

Al analizar los tipos de clima presentados por el INEGI a escala de 1:250.000, se puede observar que en el área de estudio se registran dos tipos de clima principalmente; al norte se tienen climas semicálidos subhúmedos y al sur se registran climas cálidos subhúmedos (Geografía INEGI, 2005).

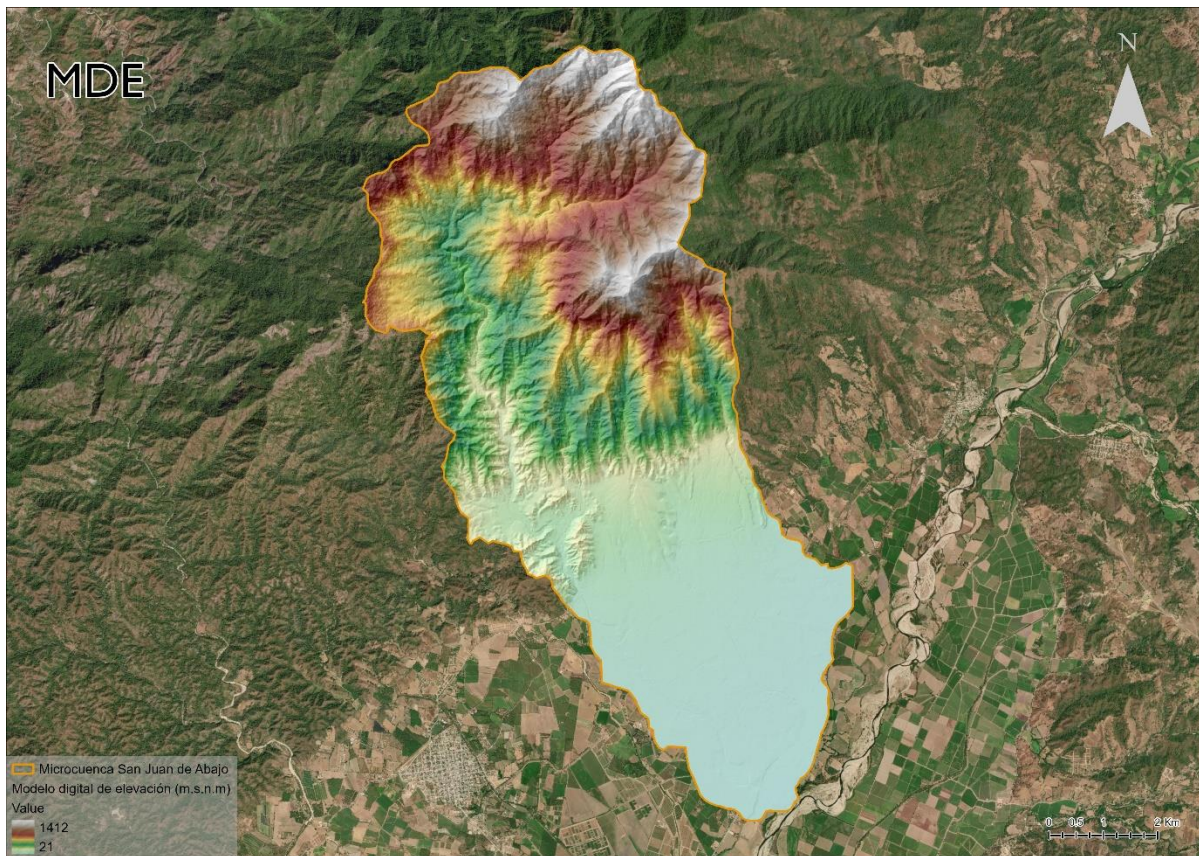


Figura 67. Modelo digital de elevación. (Geografía INEGI, 2014).

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 65), 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).

Recopilación de datos

Para el análisis hidrológico de la microcuenca de estudio hubo que recabar y generar información como: topología, usos del suelo, edafología, número de curva del SCS, rugosidad del suelo, lluvia de diseño para la zona de estudio y puentes y presas presentes.

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 la plataforma se pudo obtener tanto el modelo digital de elevación tipo terreno como el 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.

Obtenida la información de las cartas topográficas, esta se procesaba con la herramienta de sistemas de información geográfica ArcGIS pro, donde se realizó un mosaico de la información ráster presentada en las cartas topográficas para unificar la información de cada capa 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 65).

Para determinar el uso de suelo en la zona se hizo 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 de 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.

Tras los análisis descritos, se unió la información generada en cada uno para 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 68).

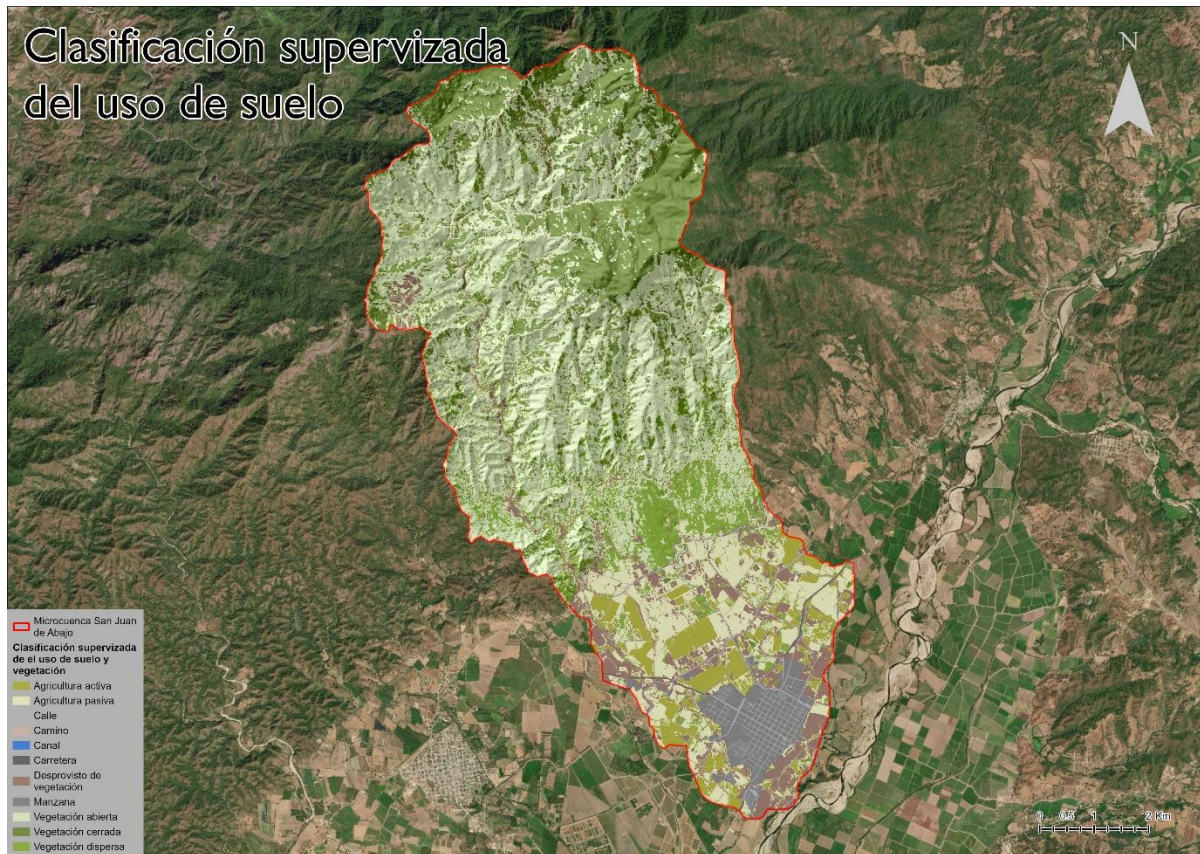


Figura 68. Clasificación supervisada de la vegetación.

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

Además de la información presentada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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).

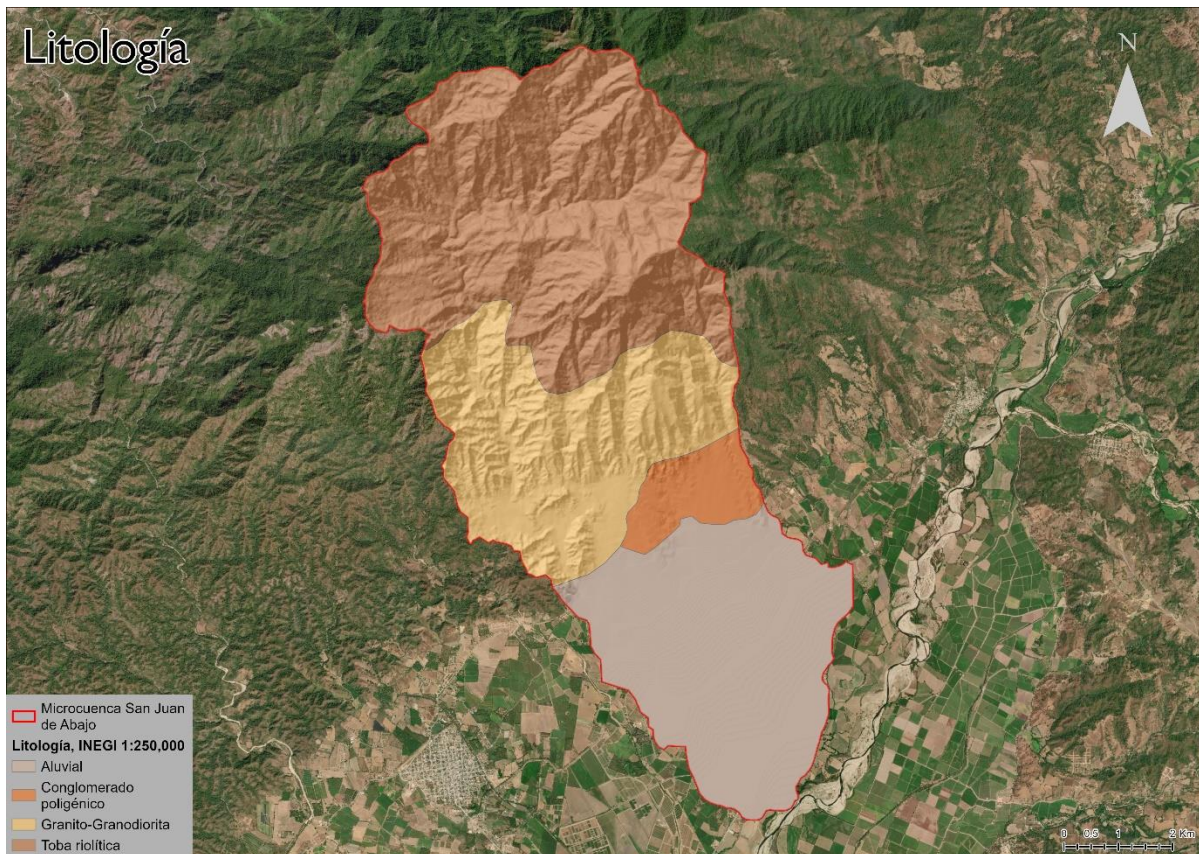


Figura 69. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

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 están en San Juan de Abajo, mientras que aguas arriba está uno muy largo y que 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.

Información meteorológica

Para la simulación en IBER, se necesitó 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. Después, se realizó una interpolación mediante el método IWD, con la que se pudo determinar el comportamiento esperado para la precipitación en el área de estudio y determinar una precipitación máxima promedio para esta.

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 las bases de datos para cada estación meteorológica, se clasificó 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. Después, se clasificaron las tormentas encontradas para cada estación con intervalos a cada hora e identificando la precipitación máxima registrada para cada intervalo. 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.

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.

Metodología de proceso para primera iteración de simulación.

Para la simulación en IBER se necesitó un preprocesamiento de la información recabada con el software de SIG ArcGIS pro. Primero se transformó la información correspondiente al modelo digital de elevación tipo superficie de formato ráster a formato ASCII, ya 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.

Después se asignaron las rugosidades y el número de curvas de la SCS a cada tipo de suelo identificado por la clasificación espectral de la vegetación generada por 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 se transformó a ráster y luego a ASCII. Finalmente, los numero de curva fueron asignados a cada uno de los elementos de la malla en IBER.

Para asignar las rugosidades fue necesario generar un nuevo campo en la capa de la clasificación espectral de la vegetación, enumerando cada uso 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 transformación de la capa a ráster y posteriormente a ASCII. Para asignar las rugosidades a cada elemento de la malla, se crearon nuevos campos de rugosidad en IBER asignando a cada campo las rugosidades encontradas. Después, se creó un archivo CSV para corregir cada rugosidad creada con la numeración asignada a cada suelo colocando dicho archivo en la misma carpeta del ordenador que el archivo ASCII generado. Se asignaron las rugosidades a cada elemento 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 asignar las condiciones del contorno del sistema, no se establecieron entradas de agua por el contorno del sistema, así la única entrada de agua será la lluvia; mientras que para asignar las salidas se analizó el modelo

digital de elevación, los flujos de agua superficiales, la imagen satelital y se realizó trabajo en campo, para que esa salida correspondiera a la 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 que consiste en dos pasos. 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 70. 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.

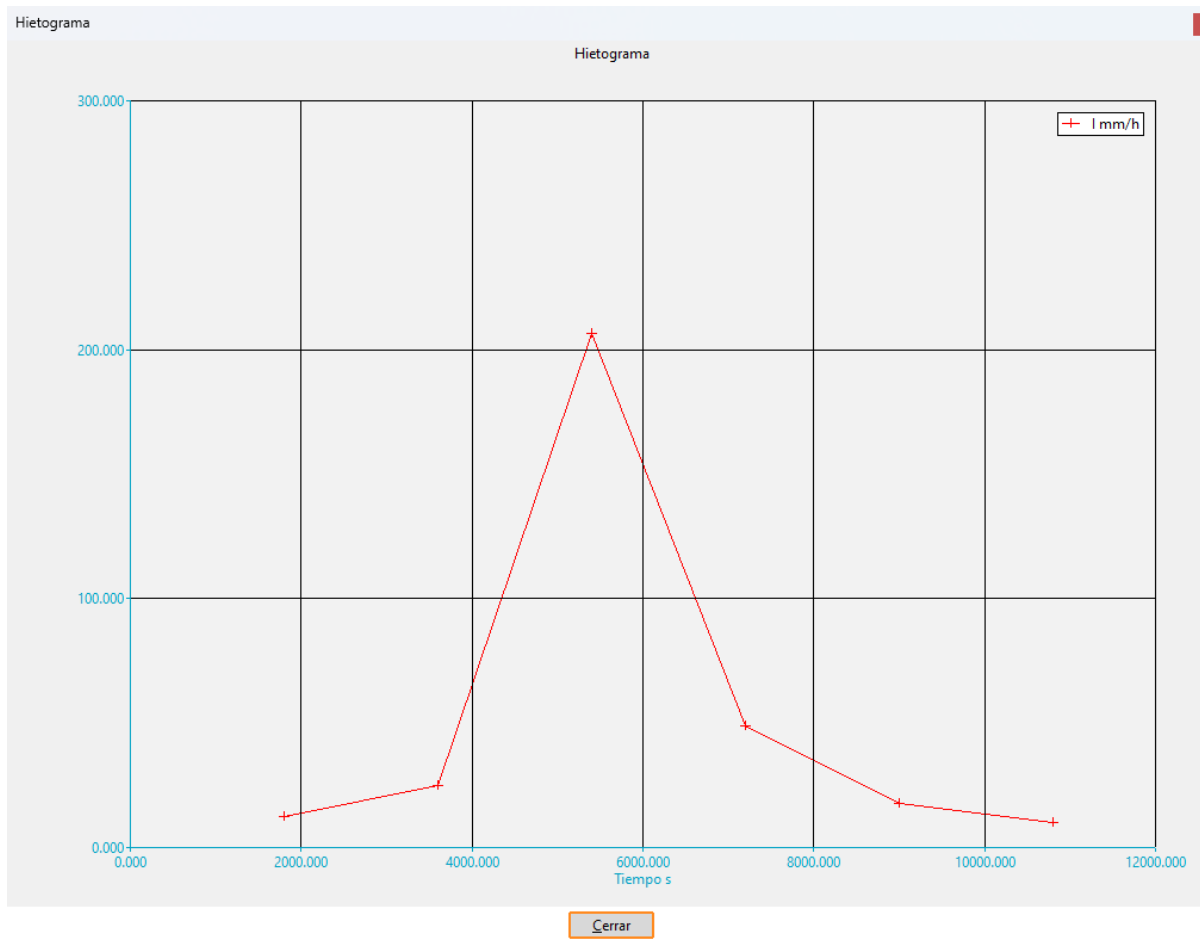


Figura 70. Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.

Finalmente, fue necesario definir los datos del problema. Para ello se tomó como instante inicial de simulación 0 segundos, mientras que el tiempo final se estableció 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.

Resultados primera iteración

Desde la primera iteración del software IBER se obtuvieron los resultados presentados de la Figura 6 a la Figura 10.

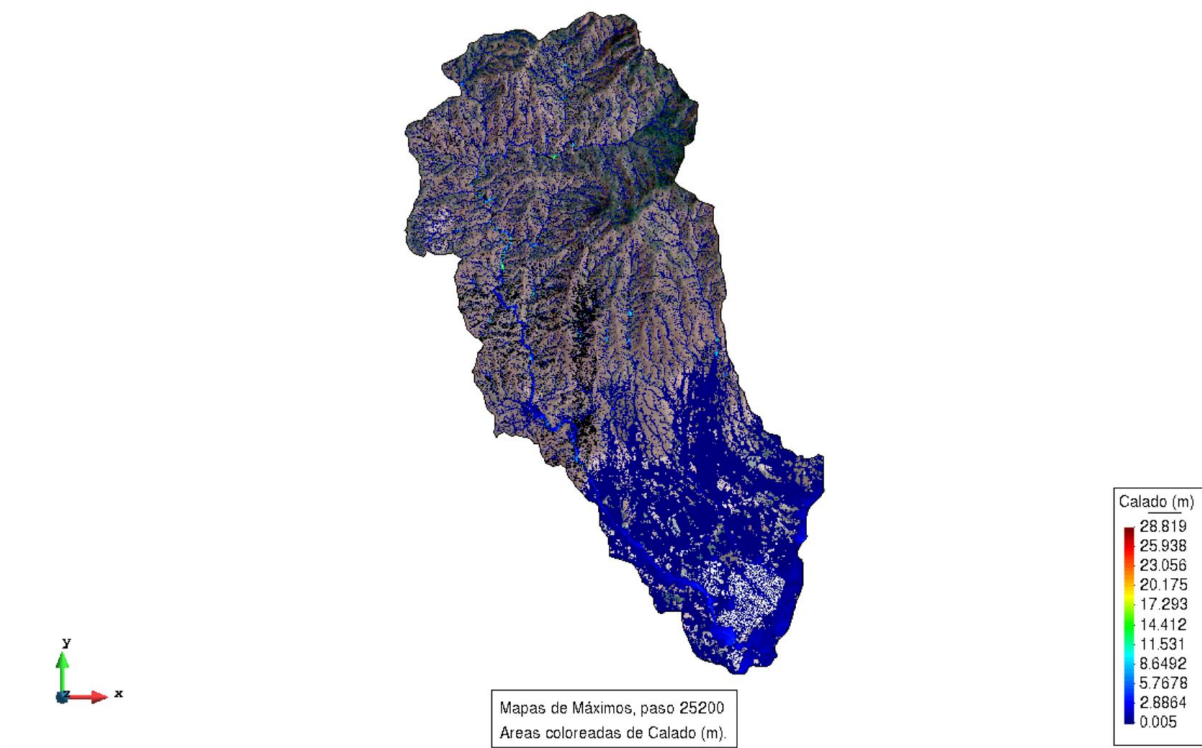


Figura 71. Mapa de máximo calado en el área de estudio.

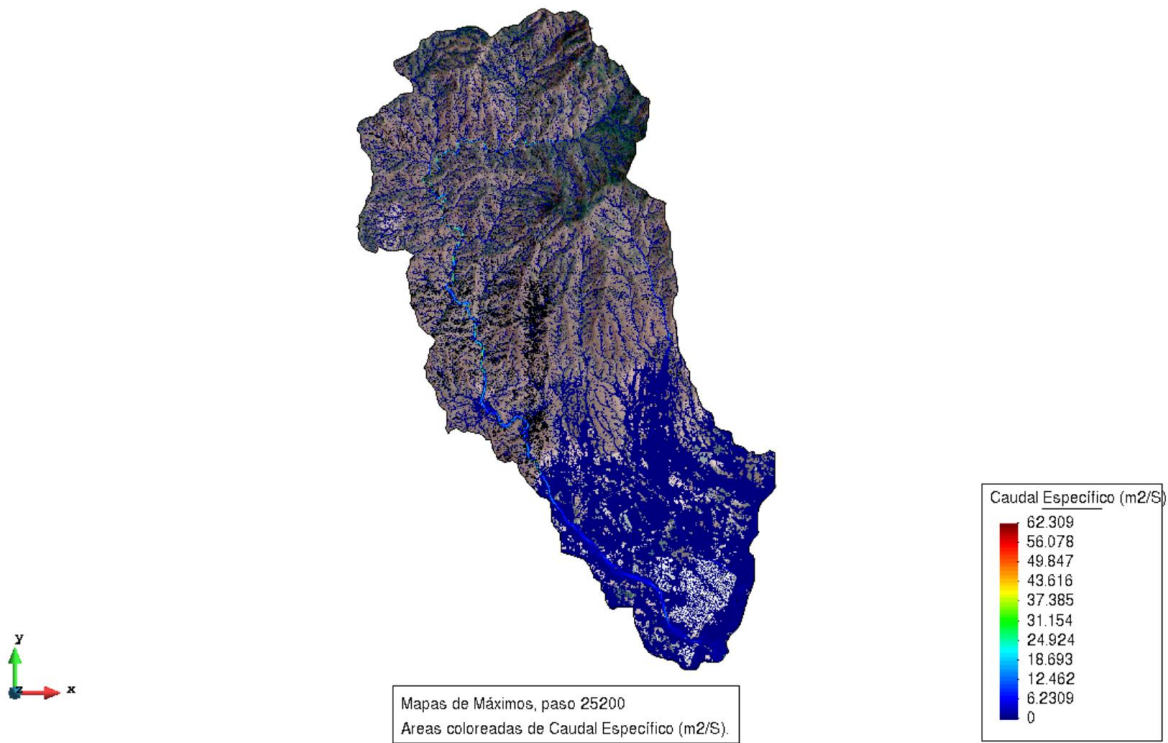


Figura 72. Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio.

A partir de los resultados presentados en la Figura 71 y Figura 72, es posible identificar las zonas con mayor calado y caudal específico, al presentarse un evento de lluvia como el definido en la Figura 70. 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 de esta primera iteración es la identificación de las zonas más propensas a inundaciones en el poblado de San Juan de abajo, en una franja de Noroeste a Sureste.

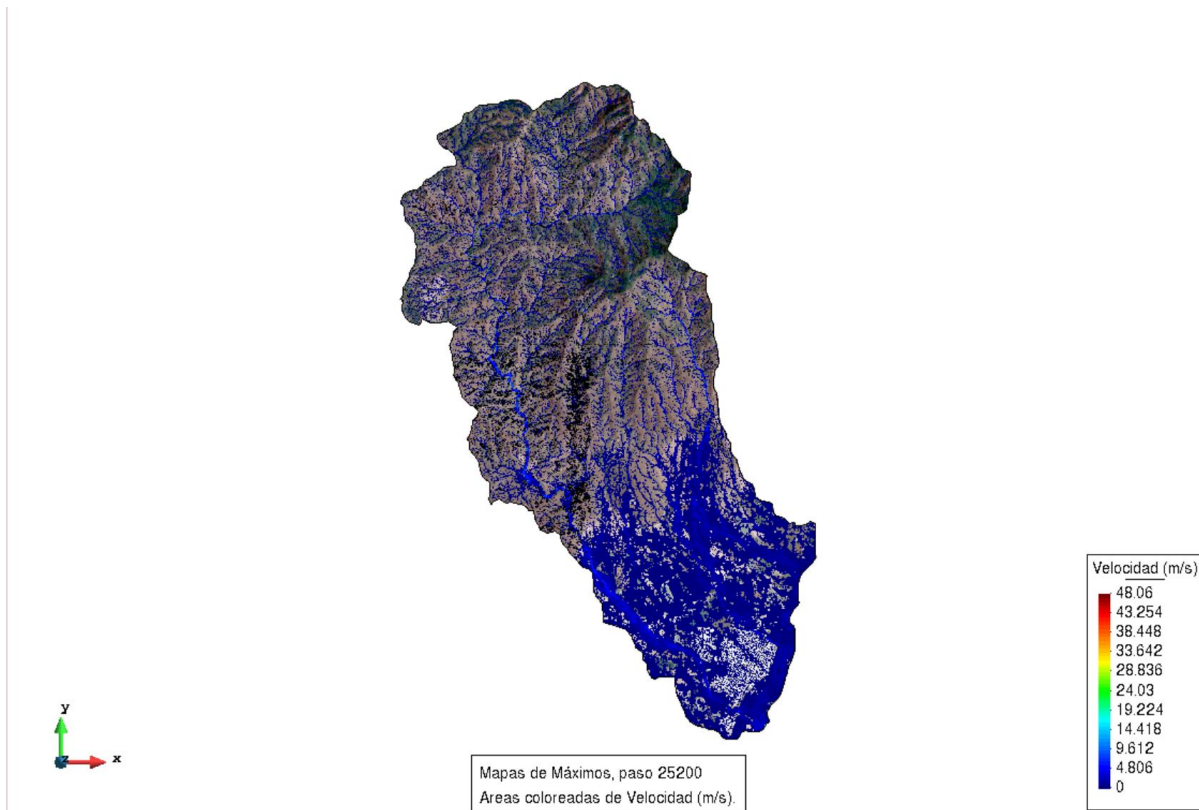


Figura 73. Mapa de máxima velocidad en el área de estudio.

A partir de los resultados de la Figura 8, se puede observar la velocidad de los flujos de agua en el área de estudio. Analizando la figura mencionada, se puede observar cómo los perfiles de velocidad siguen los mismos patrones que las figuras del máximo calado y el máximo caudal específico.

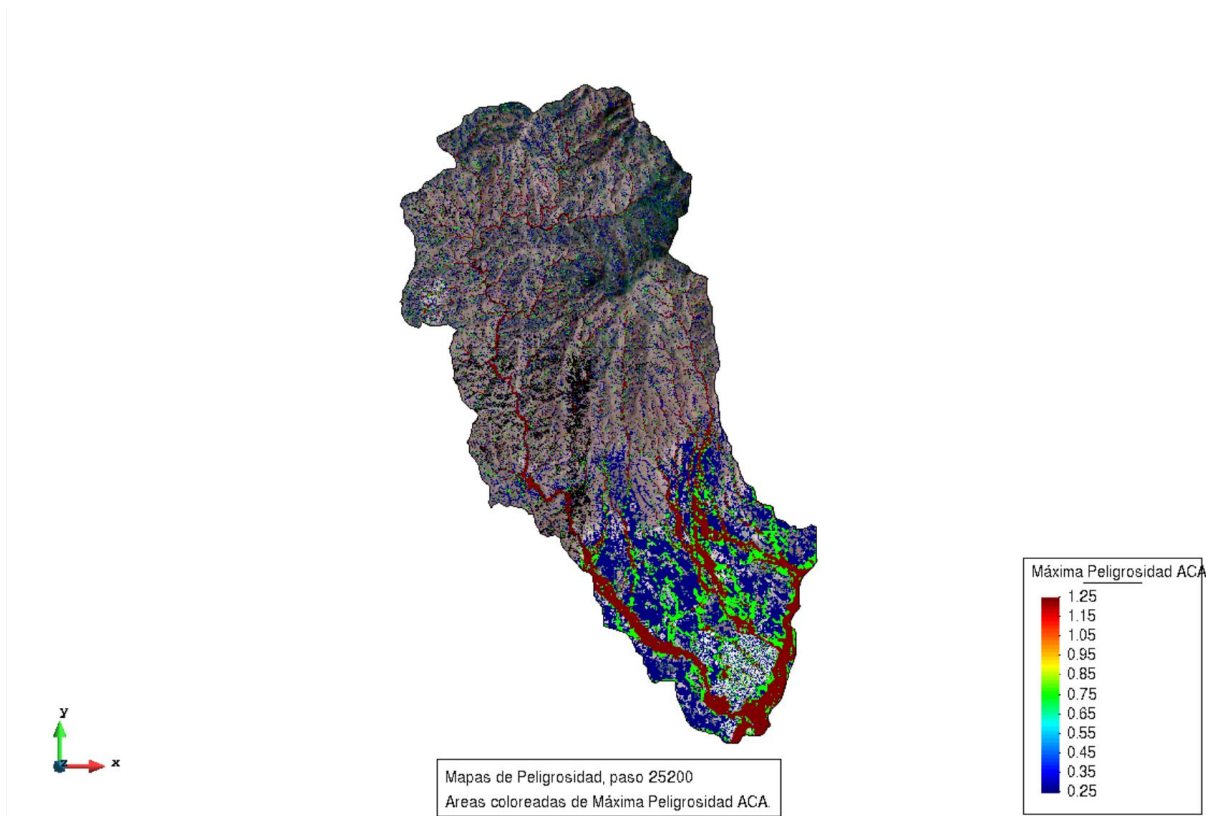


Figura 74. Mapa de máxima peligrosidad ACA.

Finalmente, en la Figura 74, 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. La ACA relaciona la velocidad del flujo y su calado para caracterizar la gravedad, como se muestra en la Figura 10. Al analizar los resultados presentados en la Figura 74 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 75. Determinación de peligrosidad ACA (Gracia et al., 2010).

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.

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 lo confirmaron los 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 gran cantidad de tierra y piedras esa área deslavada para 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.

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 la cuenca tiende a 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.

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 uso 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.

El uso de suelo en la cuenca es importante, pero podría parecer que el de la zona más baja (San Juan de Abajo y su territorio adyacente) da mucho de qué hablar. Al tener prácticas agrícolas activas y pasivas, el suelo puede carecer de vegetación y con un escenario drástico (un huracán o una lluvia fuerte), el suelo permitiría que el agua escurriera fácilmente 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.

Evaluación de la hidrología superficial

La tabla abajo integra los cuerpos de agua superficiales, principalmente ríos, de la zona de estudio.

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

Tipo	Nombre del río	Clasificación	Longitud del río (m)
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. 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. Se pudo ubicar en el sitio algunas descargas de aguas negras provenientes de casas 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.

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 IX. 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 (m2)	Superficie de incidencia (m2)
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

Según la tabla 3, se tiene un total de 2.400 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.

Para estudiar 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 de este 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. Después, a partir de la tormenta de diseño, se plantearon escenarios de lluvia para diferentes periodos de retorno, para analizar 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. Ya que la cobertura está asociada a la rugosidad del suelo y número de curva de la SCS (coeficiente de pérdidas). Por lo que, al hacer un cambio de uso de suelo, de manera que se tenga menor rugosidad y mayor número de curva, los escurrimientos ocurrirán a una mayor velocidad y ocasionaran eventos desfavorables, como inundaciones o sequías.

En el análisis de eventos extremos hay que considerar la ocurrencia de eventos de precipitación consecutivos, por lo que, al tener mayor contenido de humedad, el suelo tiene 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 consideran los factores de análisis de eventos extremos, por lo que se debe generar nuevos modelos con los factores mencionados.

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 refiere a la figura 8, las lluvias tienen un calado máximo en la zona inferior de la cuenca, donde el área de estudio coincide con el Río Ameca. En el 2015 hubo 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.

El modelo considera escenarios de precipitación extrema que puede generar consecuencias similares en los otros ríos y cuerpos de agua superficiales del área de estudio.

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.

4.2 Zona Poniente de Guadalajara

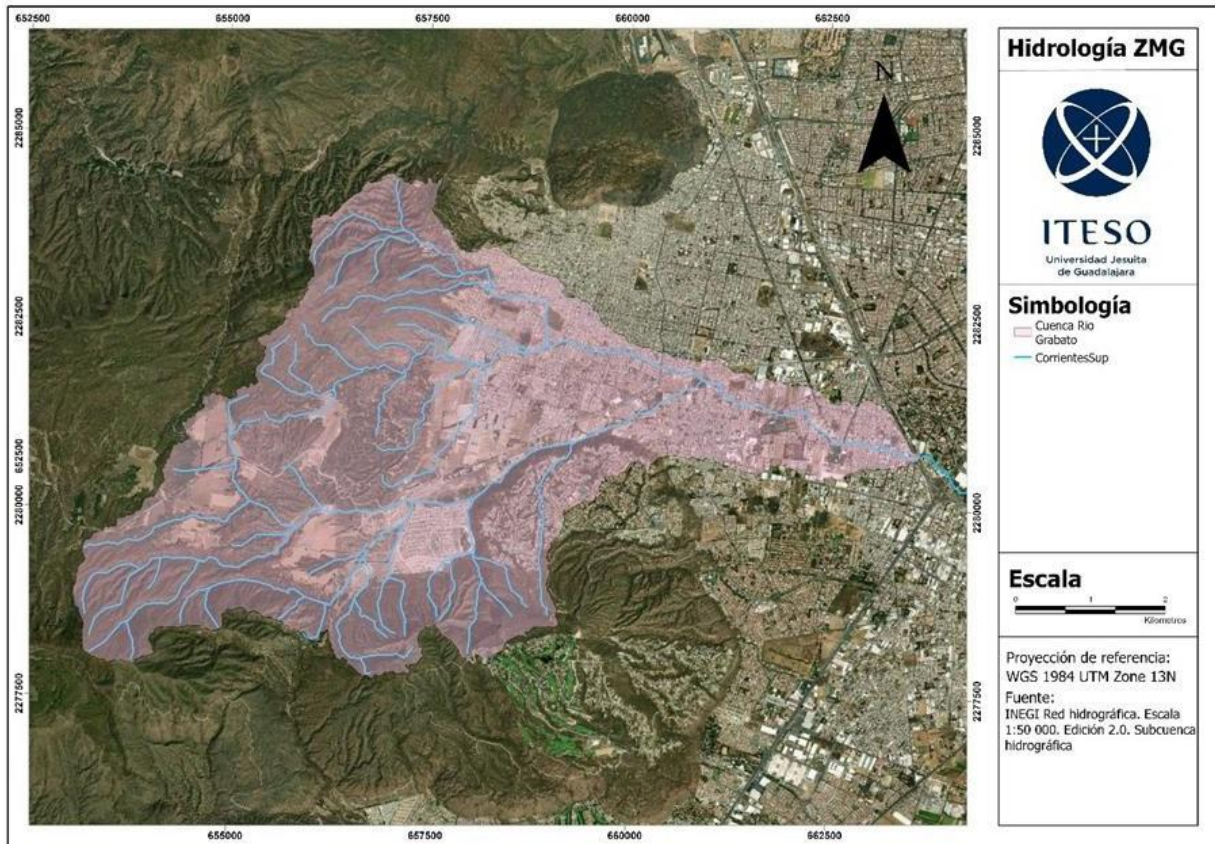
El planteamiento metodológico para un análisis hidrológico es esencial para guiar la investigación y el estudio de los procesos relacionados con el ciclo del agua en una determinada área geográfica. A continuación, se presenta una estructura base que describe los contenidos que deben formar parte de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

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.

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.

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.

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.

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 numero 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.

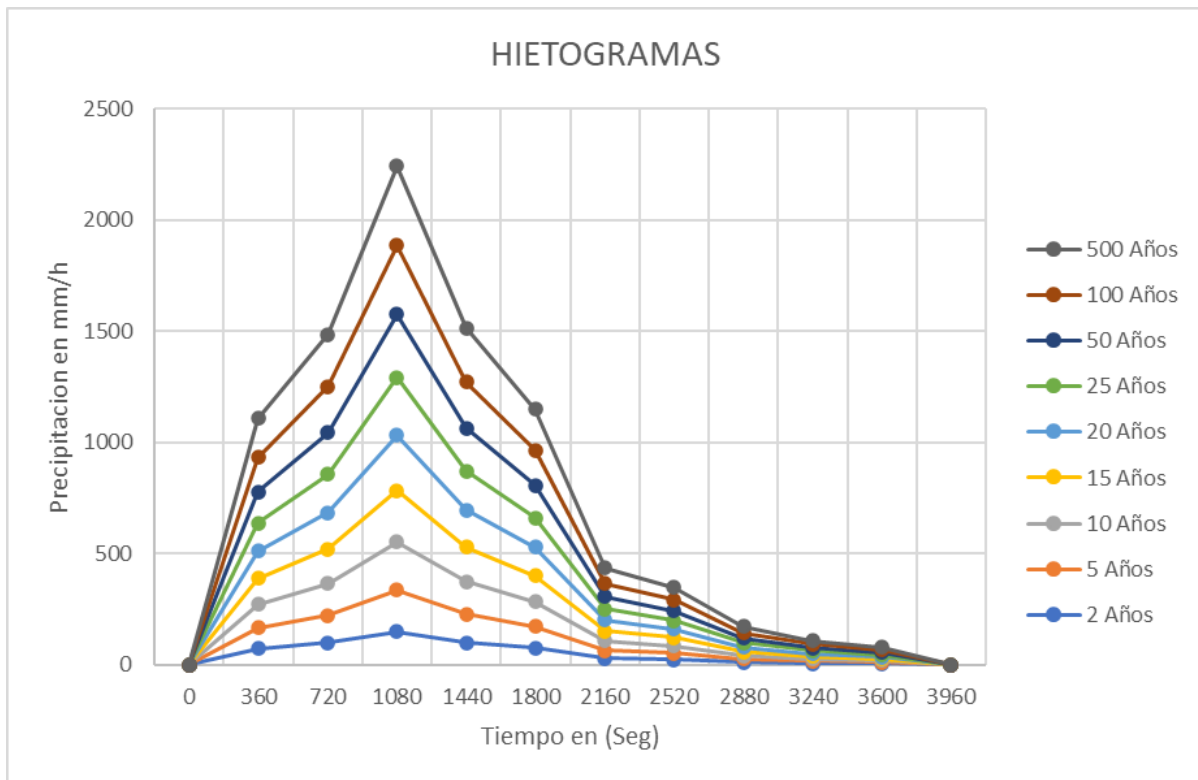
En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), para determinar correctamente los parámetros necesarios para estimar el número de curva. De igual manera se analizaron las cartas edafológicas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

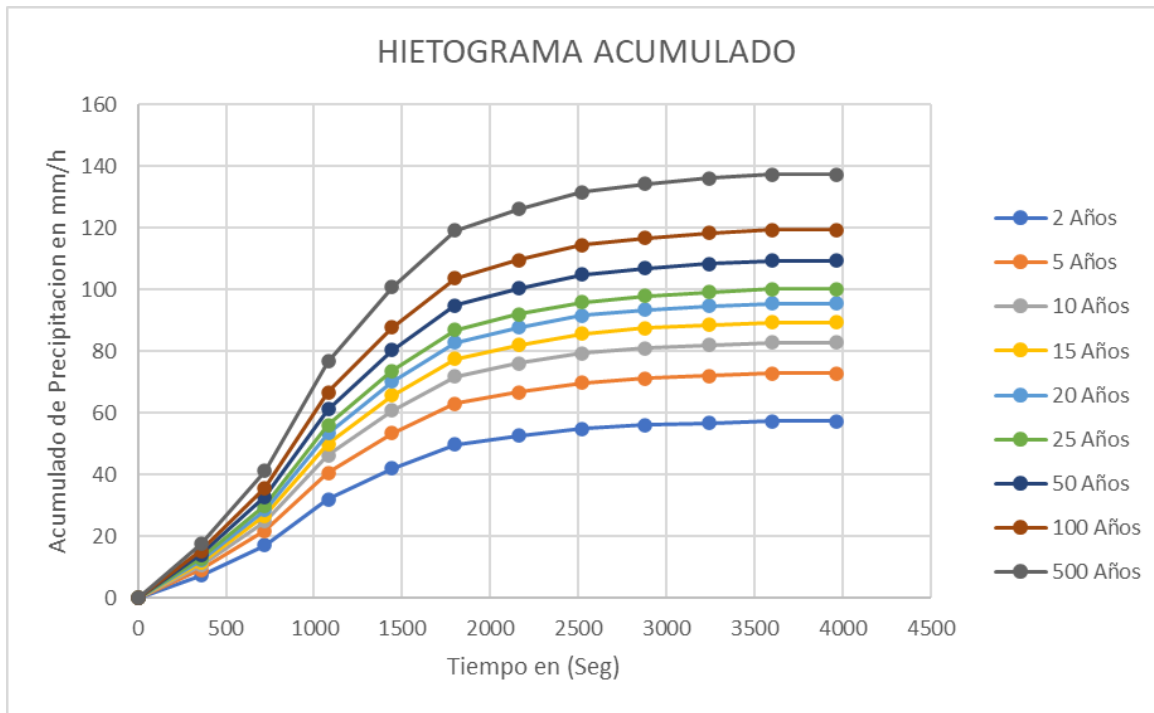
Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación los archivos shapefile de las manzanas, calles y la delimitación de la cuenca que se está estudiando, para posteriormente crear una malla la cual hará referencia a pequeñas porciones del terreno a las cuales se les asignaran las elevaciones 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 establezca 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

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 hizo utilizando los recursos disponibles en el portal del INEGI e 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, verificamos visualmente los cauces superficiales de agua en el área de estudio, ya que los datos proporcionados por el INEGI no estaban actualizados por las modificaciones causadas por el desarrollo urbano en Guadalajara.

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.

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.

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 vasos 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.

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. Propuesta técnica

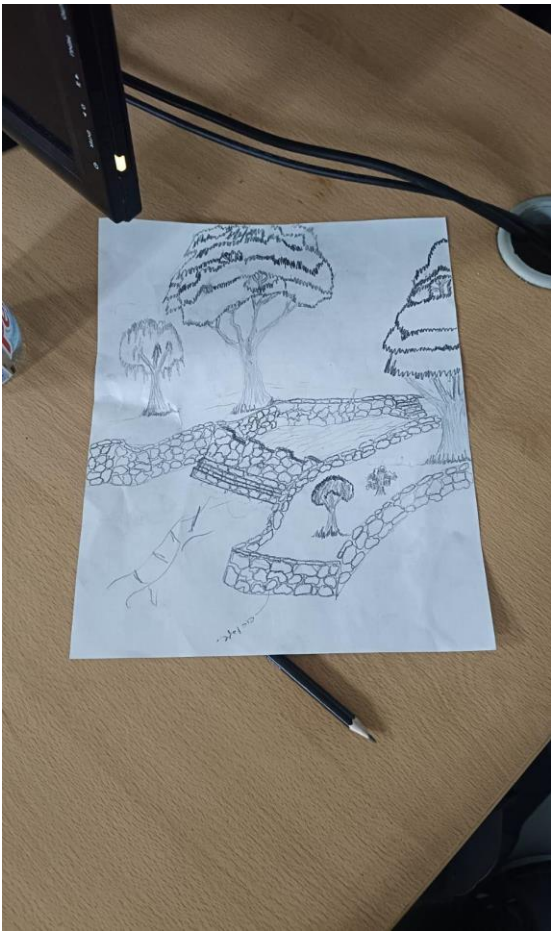
5.1 San Juan de Abajo

El pueblo de San Juan de Abajo presenta problemas de inundación durante la temporada de lluvias debido a que el cruce de los afluentes de Huichichila y el Ameca genera un aumento en el nivel del agua, lo cual provoca que el agua se adentre en el pueblo. Otra problemática es que el Huichichila presenta problemas de erosión, lo que provoca que algunos árboles ubicados en las márgenes se caigan y dañen las compuertas existentes en el río.

Las soluciones propuestas son:

1. Implementar un sistema de represas que ayude a reducir la velocidad del cauce del río aguas abajo y también disminuya su nivel. Estas represas se planean colocar aguas arriba, antes de las represas ya existentes, y se construirán de mampostería y concreto ciclópeo.
2. Construir muros de contención en las márgenes, hechos de mampostería y concreto ciclópeo, con el objetivo de evitar la erosión de las márgenes del arroyo Huichichila y así prevenir la caída de árboles que puedan dañar el sistema de represas y las compuertas existentes.

Boceto de la solución:

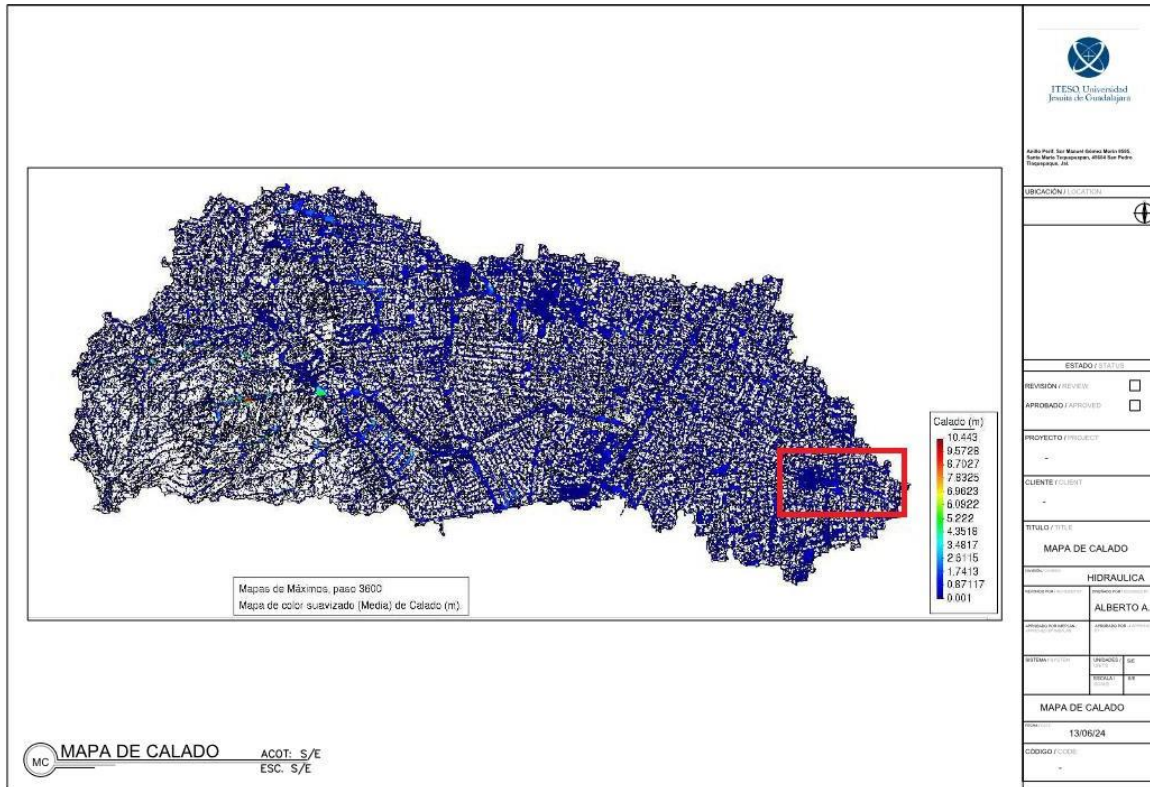


5.2 Zona Poniente de Guadalajara: Arroyo Garabato

Descripción del problema y Contexto:

La Colonia La Florida, situada en los municipios de Tlaquepaque y Zapopan, sufre inundaciones recurrentes con una altura de aproximadamente 1 metro. Esta área se encuentra en la microcuenca del arroyo El Tecolote, cuyo cauce desciende desde el Bosque de la Primavera. Este entorno geográfico y ambiental influye en la dinámica de las inundaciones, ya que la topografía y el uso del suelo pueden exacerbar la acumulación de agua durante eventos de lluvia intensa. Los vecinos reportan el inconveniente que representa este problema.

Calado máximo en la cuenca del Arroyo El tecolote con tiempo de referencia de 25 años, se resalta la zona de impacto del proyecto



Justificación:

Las inundaciones representan un grave problema para la Colonia La Florida, afectando la calidad de vida de sus habitantes y causando daños materiales significativos. A continuación, se presentan las razones por las cuales es crucial abordar este problema:

- **Riesgo para la Salud y Seguridad:** Las inundaciones pueden provocar lesiones, enfermedades transmitidas por el agua y, en casos extremos, la pérdida de vidas humanas. La exposición a aguas contaminadas puede causar infecciones, enfermedades gastrointestinales y otras condiciones de salud adversas.
- **Impacto Económico:** Los daños a propiedades, infraestructuras y vehículos resultan en costos considerables para los residentes y las autoridades locales. La pérdida de bienes y la interrupción de actividades comerciales pueden tener repercusiones económicas a largo plazo para la comunidad.
- **Deterioro de Infraestructura:** Las inundaciones recurrentes deterioran las infraestructuras locales, como calles, puentes y sistemas de drenaje, incrementando los costos de mantenimiento y reparación para los municipios de Tlaquepaque y Zapopan.

Abordar el problema de las inundaciones en la Colonia La Florida es esencial para mejorar la seguridad y bienestar de sus habitantes, reducir costos económicos asociados a daños materiales, y promover un desarrollo

urbano sostenible y resiliente. La implementación de medidas efectivas de gestión de aguas pluviales, infraestructura adecuada y políticas de adaptación al cambio climático son fundamentales para mitigar este problema y garantizar un entorno seguro y saludable para la comunidad.

Propuesta técnica de resolución del problema:

En un terreno ubicado por la calle Bahía de Huatulco, se propone construir un vaso regulador. Este debe ser capaz de almacenar el volumen del caudal que excede la capacidad de carga del canal por el que el arroyo atraviesa la zona, con una tormenta de tiempo de retorno de 25 años como referencia. El mecanismo debe retener el agua suficiente tiempo como para evitar las inundaciones que suceden aguas abajo y después permitir que siga su cauce. El predio considerado presenta una posición y unas características ambientales y urbanas favorables para esta obra. Así mismo, se plantea que el plan permita la construcción de un espacio público en el área.

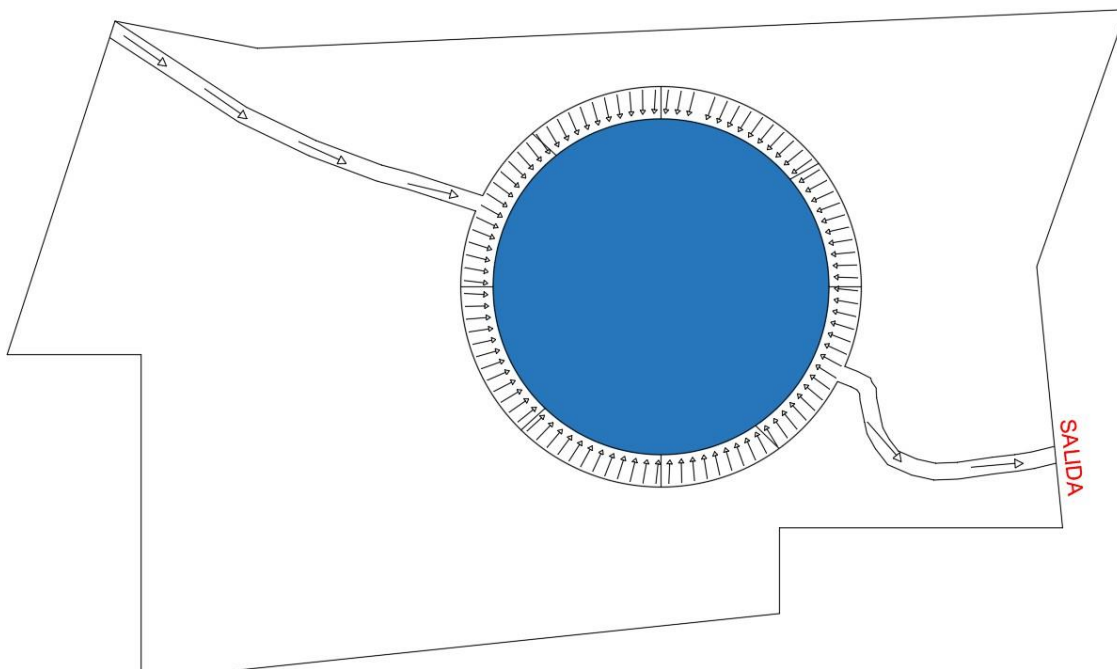
Adicionalmente, se propone instalar en las inmediaciones un sistema de recarga del acuífero que se encuentra en el sitio. Como parte de esto, se implementarían paredes de infiltración en el vaso. El agua es capturada por pozos alrededor que facilitan el flujo subterráneo. En la actualidad se encuentra un pozo en La Florida, con nivel piezométrico de 64 m. Se espera poder aprovecharlo para la recarga, de modo que provoque un cono de abatimiento que cause un gradiente por el que el agua infiltrada del vaso viaje hasta el acuífero. La localización de este pozo es cercana, lo que hace factible la captación. Al mismo tiempo, está a una distancia y profundidad suficiente como para que el agua se filtre en el recorrido.

Representación gráfica de la propuesta técnica:

Terreno tentativo para implementar un vaso regulador:



Representación gráfica del vaso regulador en el terreno descrito anteriormente:



5.3 Zona Poniente de Guadalajara: Arroyo Seco

Problemática:

Inundaciones en la zona baja del arroyo y sobreexplotación del acuífero.

Contexto:

- Inundaciones que han ocurrido a lo largo del tiempo.





- Zonas que tienen alto riesgo de inundaciones.



Justificación:

Investigación de campo de las diferentes zonas, en relación con el desalojo de viviendas.



2021

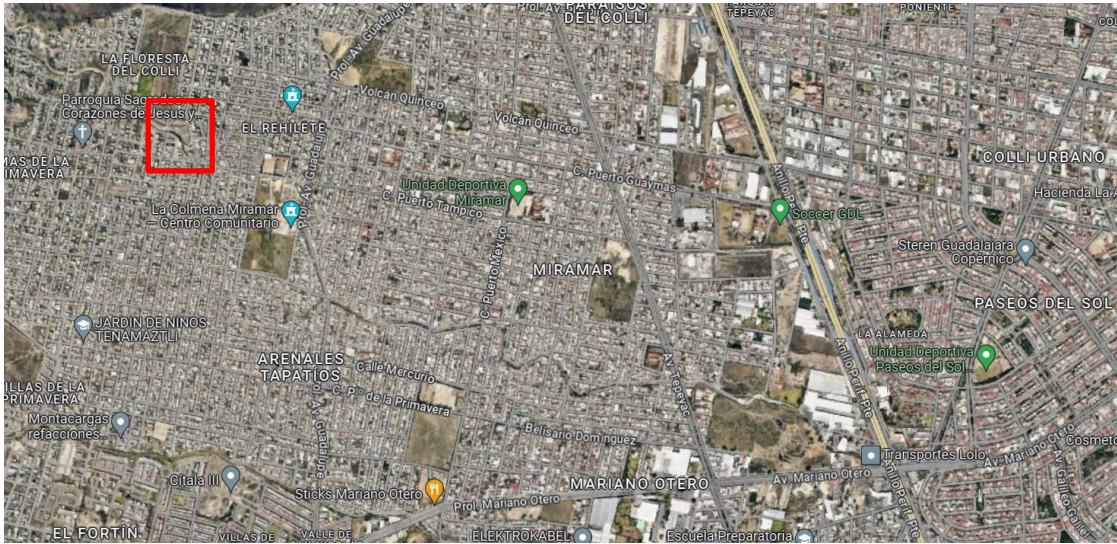


2023

2.1. Descripción de la solución

Optimizar el funcionamiento del vaso regulador existente mediante recarga en profundidad para reducir la sobrecarga de agua y recargar el manto acuífero de la zona en la cuál será implementada la propuesta.

El punto de intervención está en Colorines 25, La Floresta del Colli, Colinas de la Primavera, 45068 Zapopan, Jal. Se eligió esta zona, principalmente por la calidad del agua que presenta el arroyo y por la fácil intervención que tiene al no estar rodeado de zonas urbanas.







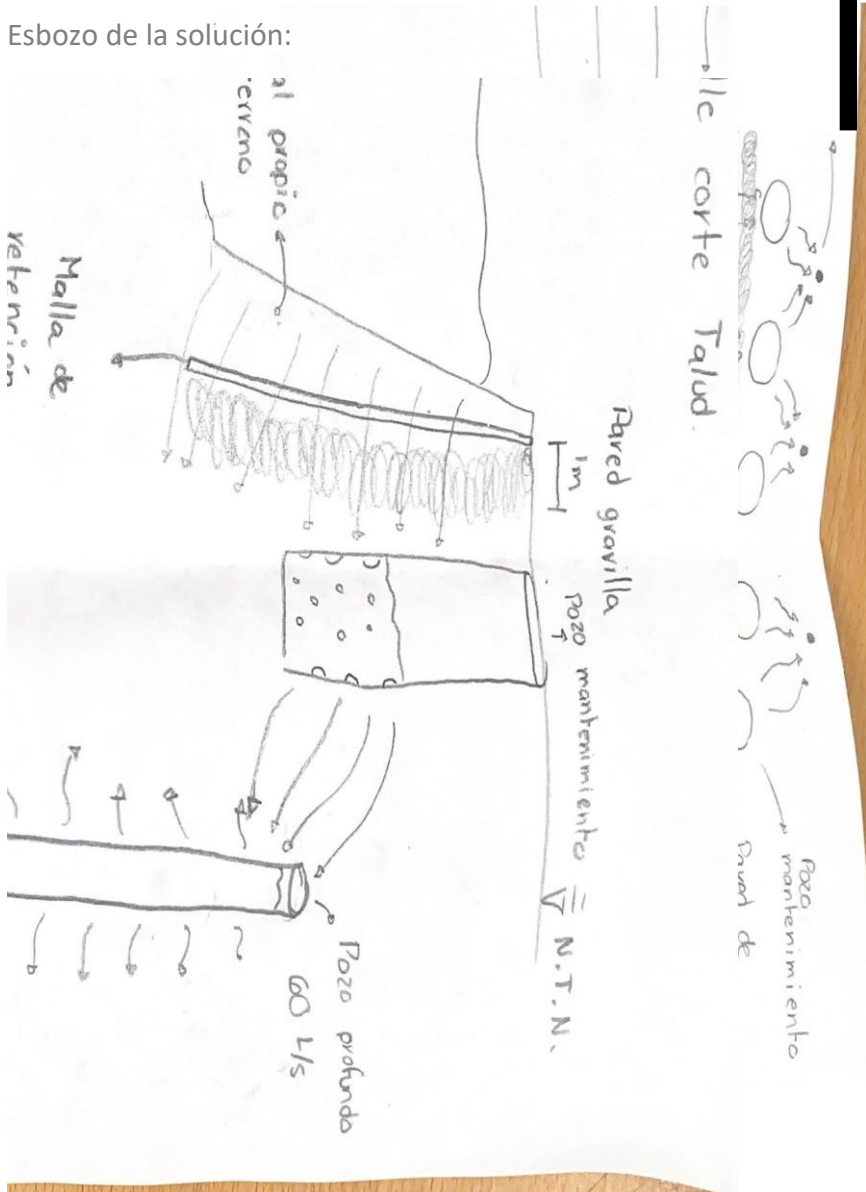
2.2. Explicación del método a utilizar. Recarga en profundidad

- Inyectar el agua en el acuífero mediante pozos verticales o galería de infiltración. La propuesta del proyecto es infiltrar 60 l/s y evitar problemas con la norma que está implementada para la calidad que debe tener el agua a inyectar.

Contaminante	Unidad de medida	Límite	Método de prueba*	Método de muestreo
Grasas y Aceites	Mg/L	15	NMX-AA-005-SCFI-2000	NMX-AA-003-1980
Materia Flotante	Unidad	0	NMX-AA-006-SCFI-2000	
Sólidos Sedimentables	Mg/L	2	NMX-AA-004-SCFI-2000	
Sólidos Suspendidos Totales	Mg/L	150	NMX-AA-034-SCFI-2001	
Nitrógeno Total	Mg/L	40	NMX-AA-026-SCFI-2001	
Fósforo Total	Mg/L	20	NMX-AA-029-SCFI-2001	
Coliformes Fecales	NMP/100 ml	No detectable	NMX-AA-042-1987	

Utilizaremos el método de Bourguet (1971). También se harán simulaciones de la zona a trabajar, donde lograremos destacar la importancia de intervenir en la zona seleccionada y el comportamiento que tendrá, siendo así IBER la plataforma seleccionada y Rockscience para los temas de infiltración.

Esbozo de la solución:



5. Simulaciones Hidrológicas y Propuestas Constructivas

6.1 Simulación de Escenarios de Intervención para la Mitigación de Inundaciones en San Juan de Abajo.

Se hizo un análisis de flujo de agua en el programa Iber donde se desarrollaron modelos que nos sirvieron para analizar el comportamiento del cauce del río Huichichila en donde podremos determinar que beneficios aportan las intervenciones que se propusieron en el semestre pasado a los pobladores del pueblo de San Juan de Abajo.

Objetivo:

Estudiar la viabilidad técnica y la adaptación al entorno hidrológico de la propuesta de represas en San Juan de Abajo, así como los retos que se enfrentarán a futuro.

Visita al sitio.

Se realizó una visita al río Huichichila con el objetivo de identificar la localización de las represas que son nuestra propuesta de intervención y que en semestres pasados se les mostro a los locales como propuestas de solución y fueron bien recibidas ya que estas represas tendrán la función de generar albercas para uso recreativo para las personas, así como determinar que otras soluciones se le pueden añadir al proyecto con el fin de que sean lo más beneficiosas para habitantes de San Juan de Abajo.

Durante nuestra visita determinamos que será necesario tener cuatro represas distribuidas en un tramo de la zona estudiada en semestres anteriores, este tramo comprende a partir de las compuertas en dirección de aguas arriba hasta donde se tiene el modelo digital de elevación obtenido a partir de escaneos realizados con anterioridad.



Figura 5. Localización de las represas (Vargas. D, 2024).



Figura 6. Localización de las represas (Vargas. D, 2024).



Figura 7. Localización de las represas (Vargas. D, 2024).

Durante la visita se determinó el diseño de cuatro represas además de poner muros de contención para evitar la erosión derivado de la velocidad del flujo de agua protegiendo las márgenes del río Huichichila ya que durante la visita se identificó zonas donde se presentaba esta erosión.



Figura 8. Erosión en el Huichichila (Vargas. D, 2024).

Al final de la visita se realizó un escalado en el vado que cruza el Huichichila para determinar hasta donde llega el nivel del agua para poder calibrar nuestros modelos a futuro. Platicando con los habitantes del lugar cuentan con historias de que el afluente tiene un cauce imponente donde el flujo del agua llega desbordarse hasta 15 m de altura lo que puede corroborarse mediante el desarrollo de los modelos y el análisis de resultados si estas

historias son ciertas y también podría corroborarse realizando una visita al sitio en temporada de precipitaciones.



Figura 9. Escala para nivel de agua (Chávez. E, 2024).



Figura 10. Muros de contención (Chávez. E, 2024).



Figura 11. Presas propuestas en el cauce y compuertas existentes (Moreno. H, 2024).

Calado.

Diseñamos un modelo en el programa Iber donde establecimos dos escenarios en el análisis de flujo en el cauce del río Huichichila en donde establecemos una solo con las condiciones iniciales que son la entrada de agua, las compuertas y la salida de agua ubicada en el vado que se encuentra en el río Huichichila que denominamos área de estudio sin intervenciones propuestas y tenemos un segundo escenario que es en donde consideramos las represas diseñadas colocadas en el cauce denominando el modelo con intervenciones.

Periodo de retorno 5 años.

Se desarrolló un análisis considerando las márgenes del río Huichichila para tener datos más reales del comportamiento del río Huichichila y que nuestro modelo este más cercano a la realidad, el hidrograma que se usó fue uno elaborado con una lluvia con periodo de retorno de 5 años elaborado por estudiantes de semestres pasados, estos datos del hidrograma fueron utilizados como nuestras condiciones iniciales de entrada donde se desarrollaron los siguientes modelos.

Sin intervención.

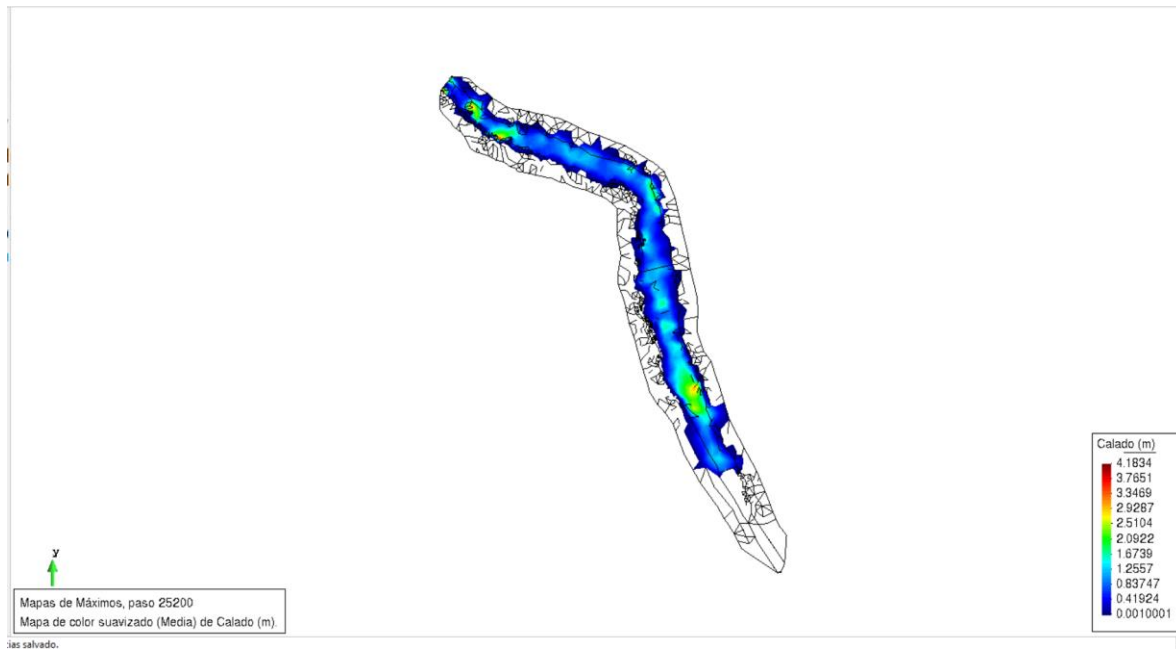


Figura 12. Simulación Iber de periodo de retorno 5 años (Moreno. H, 2024).

Con intervención.

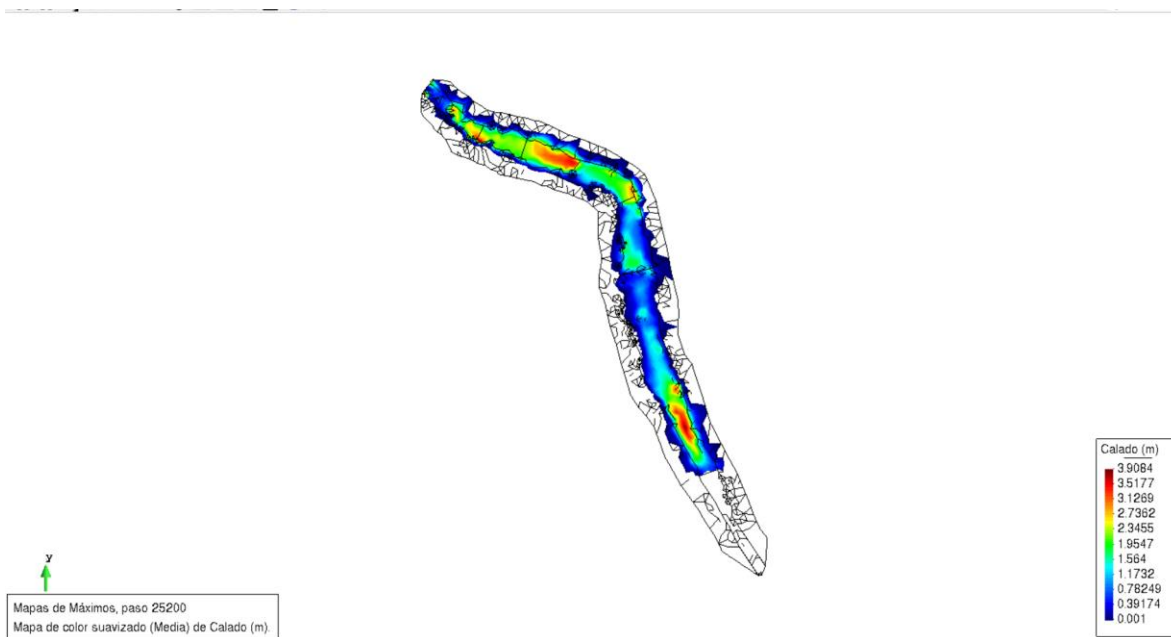


Figura 13. Simulación Iber de periodo de retorno 5 años (Moreno. H, 2024).

En las imágenes anteriores muestran el análisis de calado máximo en nuestros modelos con intervenciones y sin intervenciones. Los resultados que arrojó el análisis sin intervenciones fue un calado o nivel de agua de

4.18 m de altura en aguas arriba y aguas abajo después de las compuertas en donde hablando con los locales mencionaron que el cauce del río se llega a desbordar provocando inundaciones en los predios que se encuentran cerca de las márgenes del afluente.

Por otro lado, cuando se consideran las represas operando en el río se detectó que este calado máximo bajó a 3.91 m de altura aguas arriba en donde ubicamos las intervenciones, lo que indica que las intervenciones ayudan a disminuir el nivel del agua durante una crecida del río derivado de las precipitaciones.

En ambos casos se presentan desbordes del afluente en donde el agua llega a invadir las márgenes, aunque es más notorio en el modelo con las intervenciones ubicándose estas inundaciones aguas arriba antes de las compuertas ya existentes donde se tiene pensado construir las represas.

Periodo de retorno 10 años.

Se desarrolló un análisis considerando las márgenes del río Huichichila para tener datos más reales del comportamiento del río Huichichila y que nuestro modelo este más cercano a la realidad, el hidrograma que se usó fue uno elaborado con una lluvia con periodo de retorno de 10 años elaborado por estudiantes de semestres pasados, estos datos del hidrograma fueron utilizados como nuestras condiciones iniciales de entrada donde se desarrollaron los siguientes modelos.

Sin intervenciones.

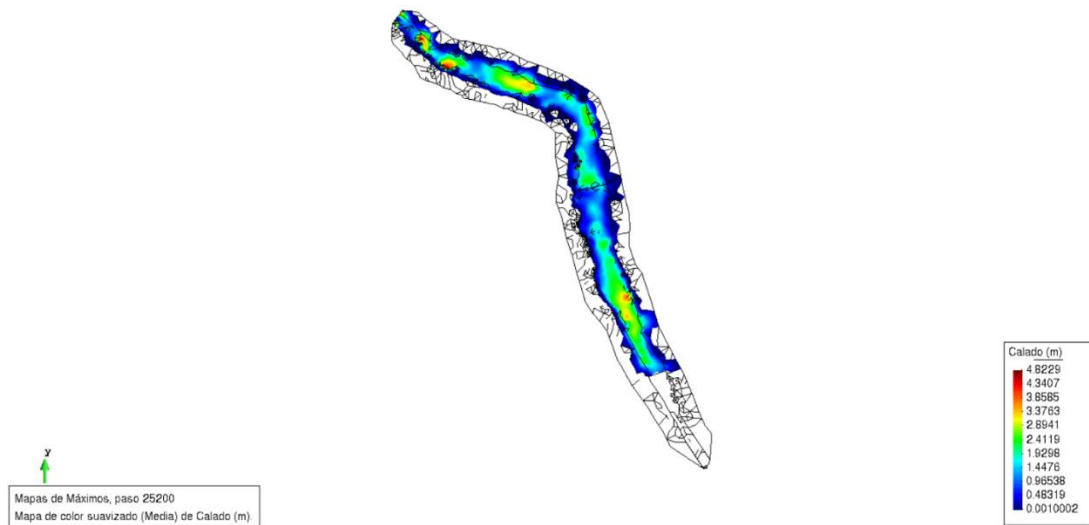


Figura 14. Simulación Iber de periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Con intervenciones.

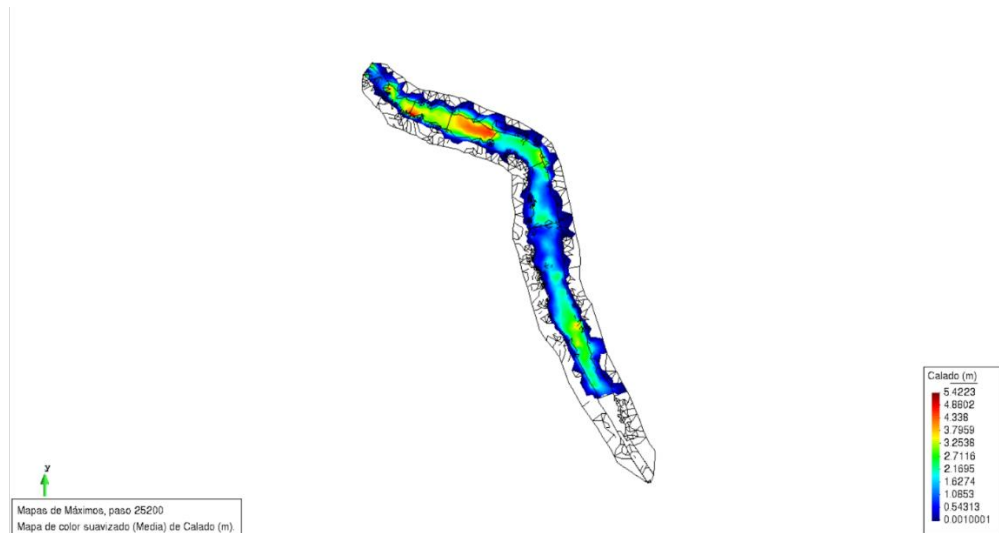


Figura 15. Simulación Iber de periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

En las imágenes anteriores muestran el análisis de calado máximo en nuestros modelos con intervenciones y sin intervenciones. Los resultados que arrojó el análisis sin intervenciones fue un calado o nivel de agua de 4.82 m de altura en aguas arriba y aguas abajo después de las compuertas en donde hablando con los locales mencionaron que el cauce del río se llega a desbordar provocando inundaciones en los predios que se encuentran cerca de las márgenes del afluente.

Por otro lado, cuando se consideran las represas operando en el río se detectó que este calado máximo aumentó a 5.42 m de altura aguas arriba en donde ubicamos las intervenciones. Mientras tanto, aguas abajo presento un nivel de 3.25 m de altura, lo que indica que las intervenciones ayudan a disminuir el nivel del agua durante una crecida del río derivado de las precipitaciones aguas abajo después de las compuertas en donde ya se encuentran predios habitados y que en temporada de lluvias sufren por las inundaciones.

En ambos casos se presentan desbordes del afluente en donde el agua llega a invadir las márgenes, aunque es más notorio en el modelo con las intervenciones ubicándose estas inundaciones aguas arriba antes de las compuertas ya existentes donde se tiene pensado construir las represas.

Periodo de retorno 20 años.

Se desarrolló un análisis considerando las márgenes del río Huichichila para tener datos más reales del comportamiento del río Huichichila y que nuestro modelo este más cercano a la realidad, el hidrograma que se usó fue uno elaborado con una lluvia con periodo de retorno de 20 años elaborado por estudiantes de semestres pasados, estos datos del hidrograma fueron utilizados como nuestras condiciones iniciales de entrada donde se desarrollaron los siguientes modelos

Sin intervenciones.

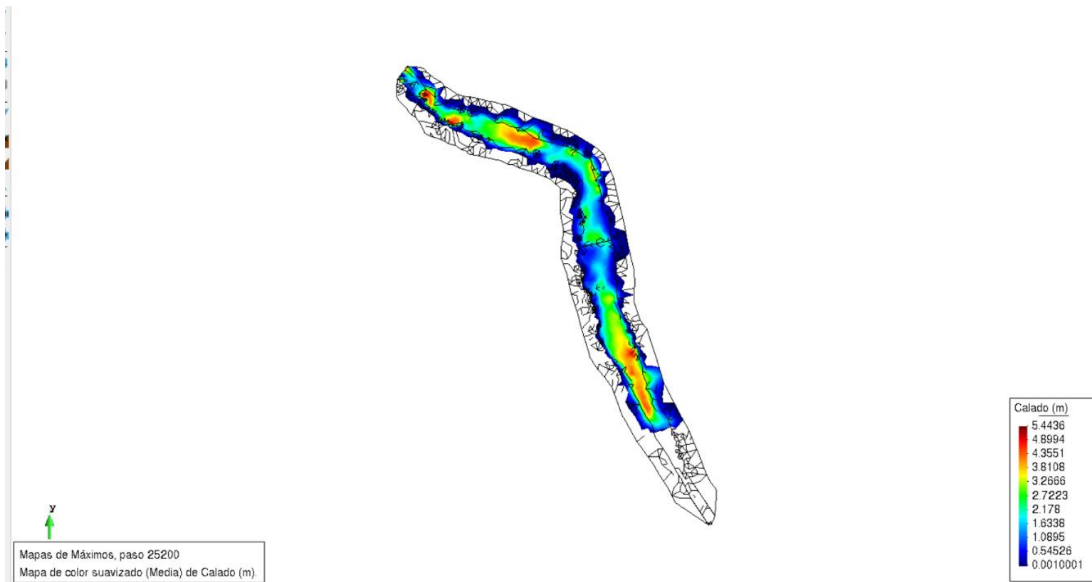


Figura 16. Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Con intervenciones.

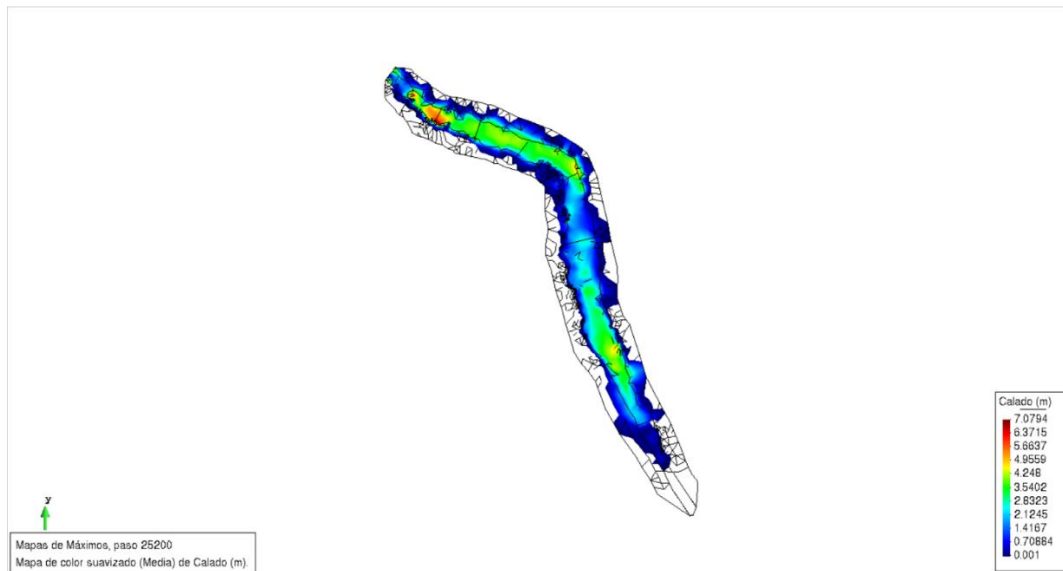


Figura 17. Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

En las imágenes anteriores muestran el análisis de calado máximo en nuestros modelos con intervenciones y sin intervenciones. Los resultados que arrojó el análisis sin intervenciones fue un calado o nivel de agua de 5.44m de altura en aguas arriba y aguas abajo después de las compuertas en donde hablando con los locales mencionaron que el cauce del río se llega a desbordar provocando inundaciones en los predios que se encuentran cerca de las márgenes del afluente.

Por otro lado, cuando se consideran las represas operando en el río se detectó que este calado máximo aumentó a 7.08 m de altura aguas arriba en donde ubicamos las intervenciones. Mientras tanto, aguas abajo presento un nivel de entre 3.25 m a 2.83 m de altura, lo que indica que las intervenciones ayudan a disminuir el nivel del agua durante una crecida del río derivado de las precipitaciones aguas abajo después de las compuertas en donde ya se encuentran predios habitados y que en temporada de lluvias sufren por las inundaciones.

En ambos casos se presentan desbordes del afluente en donde el gua llega a invadir las márgenes, aunque es más notorio en el modelo con las intervenciones ubicándose estas inundaciones aguas arriba antes de las compuertas ya existentes donde se tiene pensado construir las represas.

Periodo de retorno 20 años.

Se desarrolló un análisis considerando las márgenes del río Huichichila para tener datos más reales del comportamiento del río Huichichila y que nuestro modelo este más cercano a la realidad, el hidrograma que se usó fue uno elaborado con una lluvia con periodo de retorno de 50 años elaborado por estudiantes de semestres pasados, estos datos del hidrograma fueron utilizados como nuestras condiciones iniciales de entrada donde se desarrollaron los siguientes modelos

Sin intervenciones.

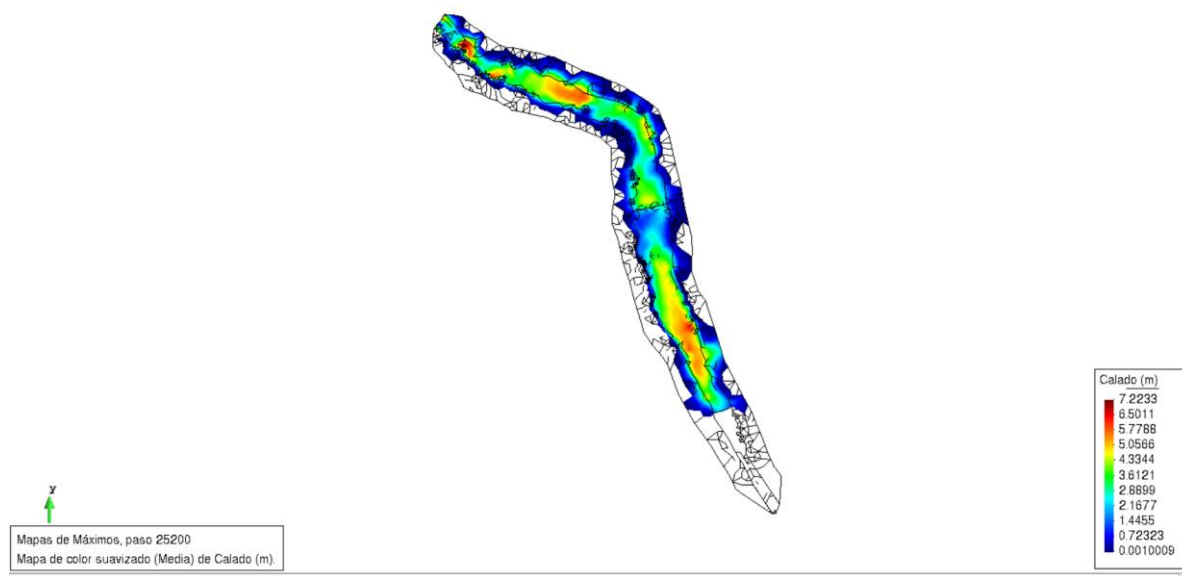


Figura 18.

Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Con intervenciones.

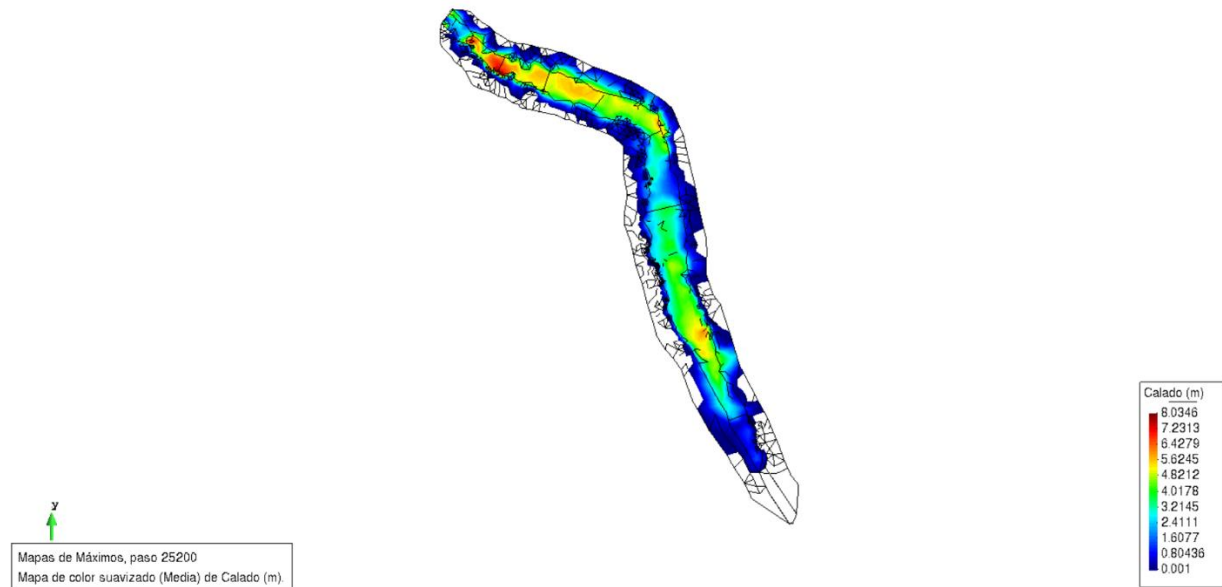


Figura 19. Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

En las imágenes anteriores muestran el análisis de calado máximo en nuestros modelos con intervenciones y sin intervenciones. Los resultados que arrojó el análisis sin intervenciones fue un calado o nivel de agua de 7.22m de altura en aguas arriba y aguas abajo después de las compuertas en donde hablando con los locales mencionaron que el cauce del río se llega a desbordar provocando inundaciones en los predios que se encuentran cerca de las márgenes del afluente.

Por otro lado, cuando se consideran las represas operando en el río se detectó que este calado máximo aumentó a 8.03 m de altura aguas arriba en donde ubicamos las intervenciones. Mientras tanto, aguas abajo presento un nivel de entre 3.21 m a 2.41 m de altura, lo que indica que las intervenciones ayudan a disminuir el nivel del agua durante una crecida del río derivado de las precipitaciones aguas abajo después de las compuertas en donde ya se encuentran predios habitados y que en temporada de lluvias sufren por las inundaciones.

En ambos casos se presentan desbordes del afluente en donde el agua llega a invadir las márgenes, aunque es más notorio en el modelo con las intervenciones ubicándose estas inundaciones aguas arriba antes de las compuertas ya existentes donde se tiene pensado construir las represas.

Velocidad.

Periodo de retorno de 5 años.

Continuando con el análisis de la zona de estudio evaluamos la velocidad con una lluvia de diseño de periodo de retorno de 5 años, donde se realizaron dos simulaciones una con las intervenciones y otra sin las intervenciones.

Sin intervenciones.

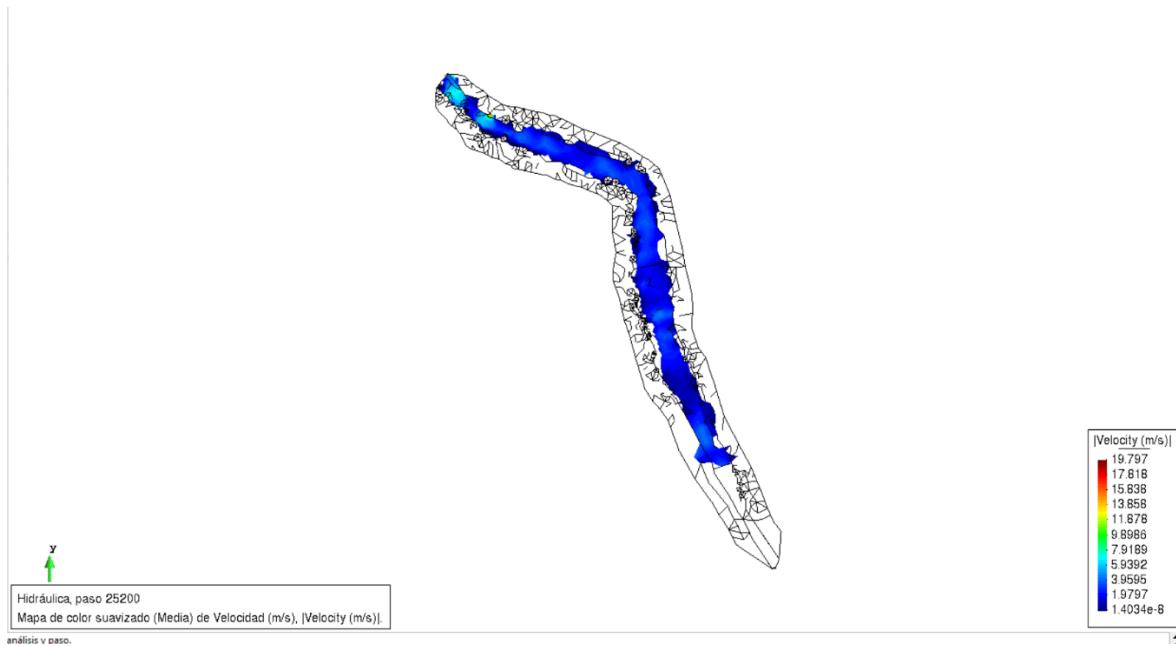


Figura 20. Simulación Iber de periodo de retorno 5 años (Moreno. H, 2024).

Con intervenciones.



Figura 21. Simulación Iber de periodo de retorno 5 años (Moreno. H, 2024).

En las figuras anteriores podemos observar que la velocidad más alta se presenta en la simulación sin intervenciones con 19.79 m/s localizada aguas arriba casi en e la entrada de flujo, en el cauce mientras que su velocidad mínima dentro del cauce se encuentra entre 1.29 m/s y 3.95 m/s aguas abajo después de las compuertas, lo que nos muestran estas velocidades es una erosión que se genera en las compuertas lo que hace que las cimentaciones de estas queden expuestas. Por otro lado, en la simulación con las represas se muestra una velocidad máxima en la zona donde se encuentra la entrada de agua con 10.62 m/s y baja conforme va pasando el flujo de agua en nuestras represas bajando a valores de entre 2.13 m/s y 3.19 m/s, pero después de las compuertas aumenta entre 4.25 m/s y 5.31 m/s, esto indica que se debe considerar una intervención para que estas velocidades no nos provoquen una erosión en el lecho del río, puede ser un tanque amortiguador.

Periodo de retorno de 10 años.

Continuando con el análisis de la zona de estudio evaluamos la velocidad con una lluvia de diseño de periodo de retorno de 10 años, donde se realizaron dos simulaciones una con las intervenciones y otra sin las intervenciones.

Sin intervenciones.

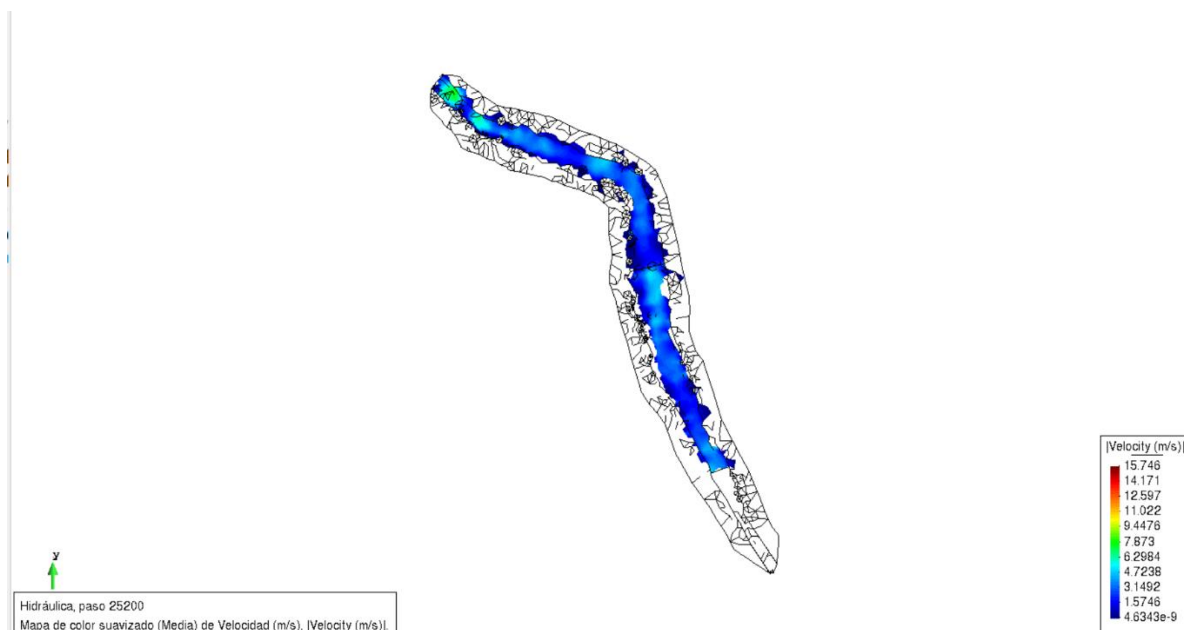


Figura 22. Simulación Iber de periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

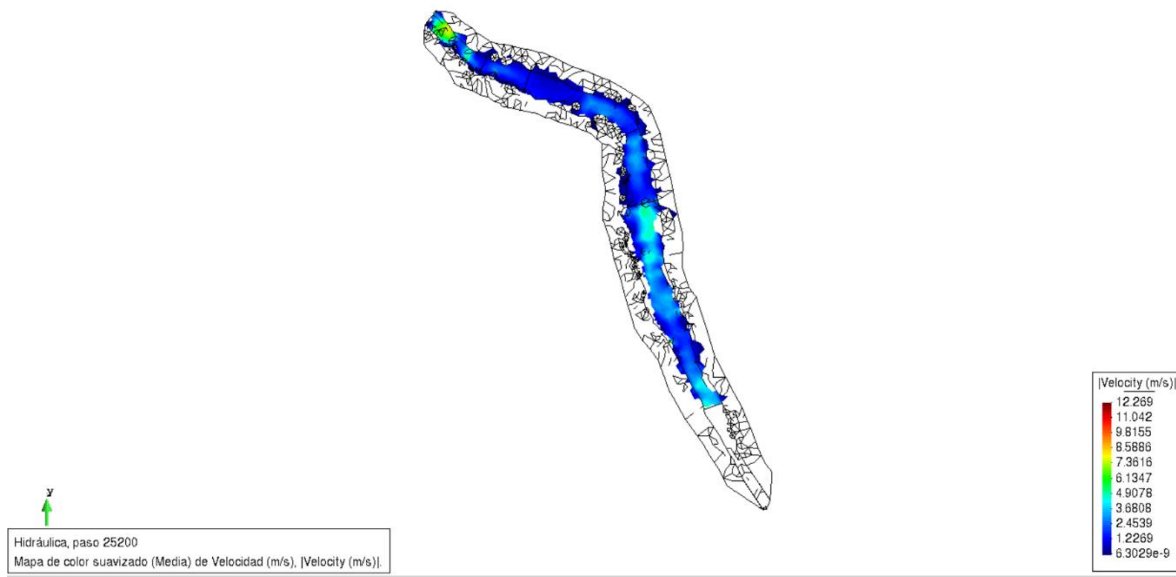


Figura 23. Simulación Iber de periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

En las figuras anteriores podemos observar que la velocidad más alta se presenta en la simulación sin intervenciones con 15.74 m/s localizada aguas arriba casi en la entrada de flujo, pero durante todo el tramo hasta llegar a las compuertas presenta velocidades que van desde 7.87 a 3.14 m/s estas velocidades también se presentan después de las compuertas, mostrándonos una erosión que se genera en las compuertas lo que hace que las cimentaciones de estas queden expuestas. Por otro lado, en la simulación con las represas muestra una velocidad máxima en la zona donde se encuentra la entrada de agua con 12.27 m/s y baja conforme va pasando el flujo de agua en nuestras represas bajando a valores de entre 7.36 m/s a 3.68 m/s, después de las compuertas presenta velocidades que van desde los 7.36 m/s llegando a los 3.68 m/s presentando el valor más alto justo después de las compuertas y en el vado, esto indica que se debe considerar una intervención para que estas velocidades no nos provoquen una erosión en el lecho del río, puede ser un tanque amortiguador en las compuertas y en el vado.

Periodo de retorno de 20 años.

Continuando con el análisis de la zona de estudio evaluamos la velocidad con una lluvia de diseño de periodo de retorno de 20 años, donde se realizaron dos simulaciones una con las intervenciones y otra sin las intervenciones.

Sin intervenciones.

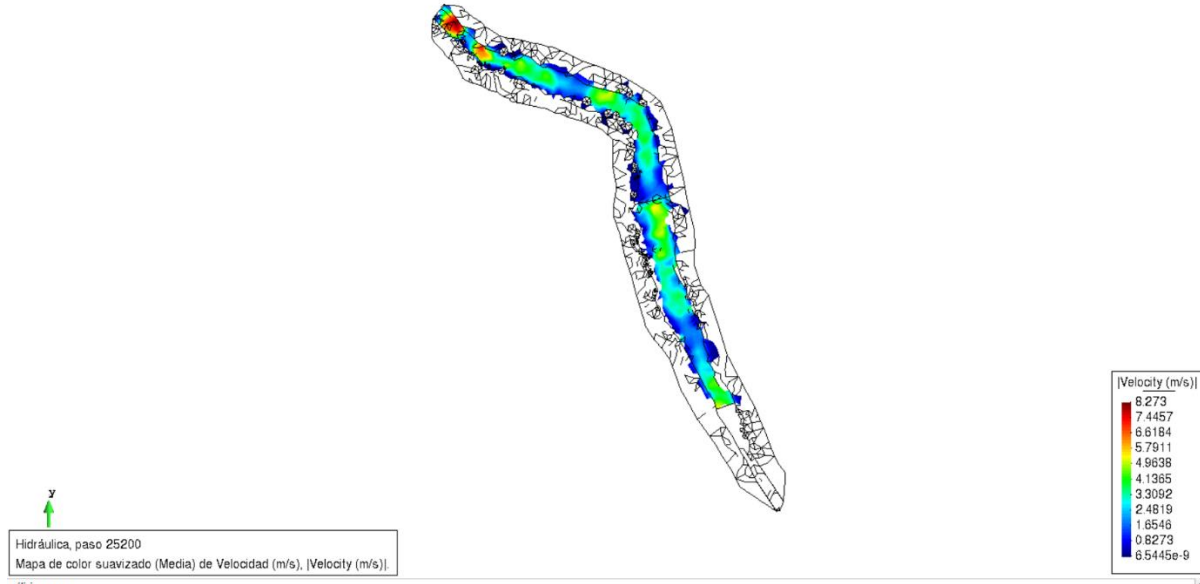


Figura 24. Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Con Intervenciones.

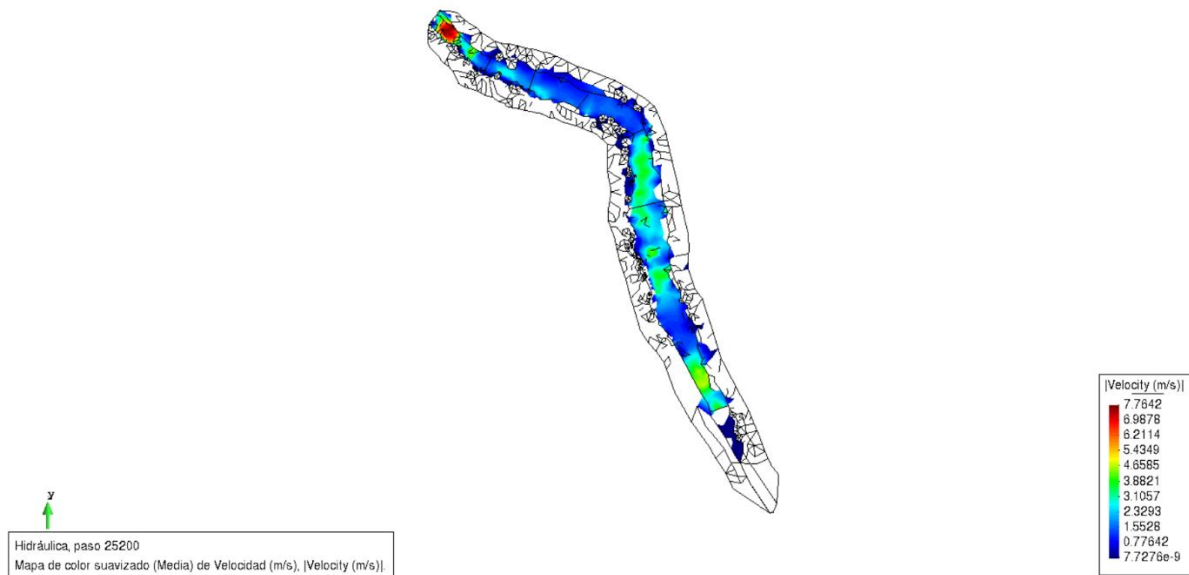


Figura 25. Simulación Iber de periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

En las figuras anteriores podemos observar que la velocidad más alta se presenta en la simulación sin intervenciones con 8.27 m/s localizada aguas arriba casi en la entrada de flujo, pero durante todo el tramo hasta llegar a las compuertas presenta velocidades que van desde 4.97 a 2.48 m/s estas velocidades también

se presentan después de las compuertas, mostrándonos una erosión que se genera en las compuertas lo que hace que las cimentaciones de estas queden expuestas. Por otro lado, en la simulación con las represas muestra una velocidad máxima en la zona donde se encuentra la entrada de agua con 7.75 m/s y baja conforme va pasando el flujo de agua en nuestras represas propuestas bajando a valores de entre 4.65 m/s a 3.11 m/s, después de las compuertas presenta velocidades que van desde los 4.65 m/s llegando a los 3.11 m/s presentando el valor más alto justo después de las compuertas y en el vado, esto indica que se debe considerar una intervención para que estas velocidades no nos provoquen una erosión en el lecho del río, puede ser un tanque amortiguador en las compuertas y en el vado.

Periodo de retorno de 50 años.

Continuando con el análisis de la zona de estudio evaluamos la velocidad con una lluvia de diseño de periodo de retorno de 50 años, donde se realizaron dos simulaciones una con las intervenciones y otra sin las intervenciones.

Sin intervenciones

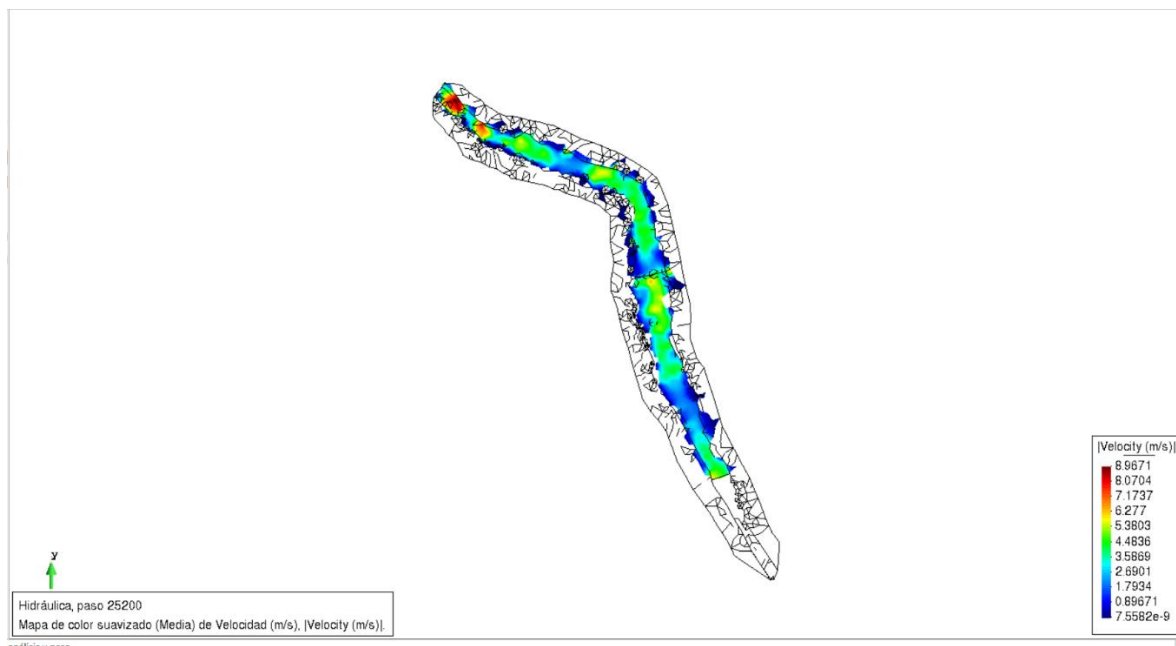


Figura 26. Simulación Iber de periodo de retorno 50 años (Moreno. H, 2024).

Con intervenciones.

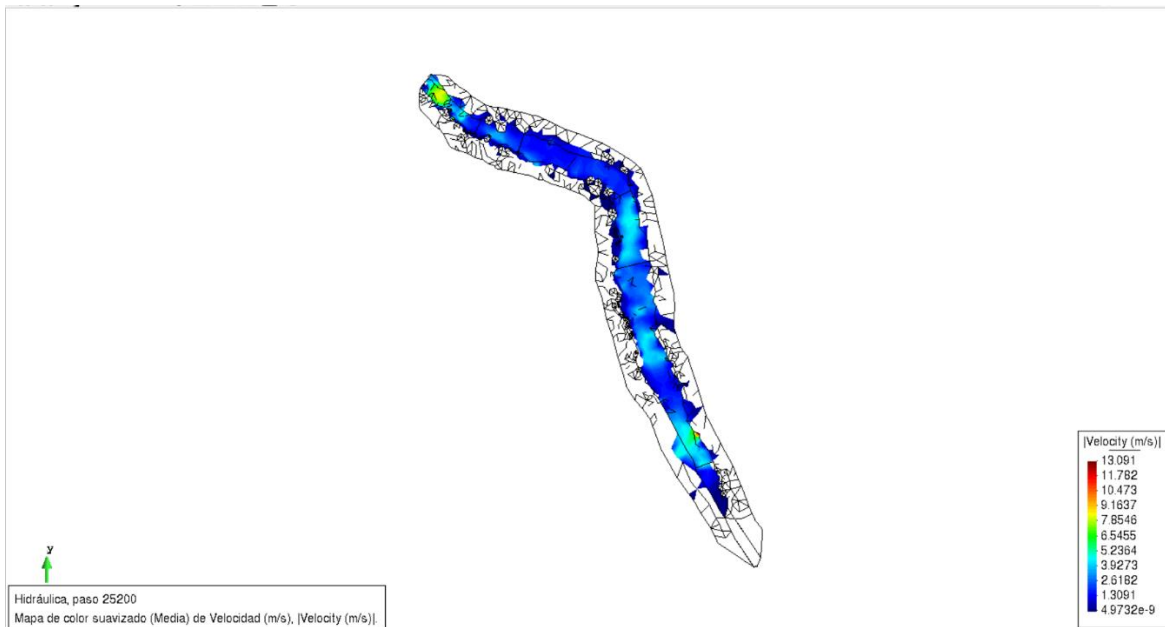


Figura 27. Simulación Iber de periodo de retorno 50 años (Moreno. H, 2024).

En las figuras anteriores podemos observar que la velocidad más alta se presenta en la simulación sin intervenciones con 8.96 m/s localizada aguas arriba casi en la entrada de flujo, pero durante todo el tramo hasta llegar a las compuertas presenta velocidades que van desde 5.38 a 2.69 m/s estas velocidades también se presentan después de las compuertas, mostrándonos una erosión que se genera en las compuertas lo que hace que las cimentaciones de estas queden expuestas. Por otro lado, en la simulación con las represas muestra una velocidad máxima en la zona donde se encuentra la entrada de agua con 13.09 m/s y baja conforme va pasando el flujo de agua en nuestras represas bajando a valores de entre 5.23 m/s a 2.61 m/s, después de las compuertas presenta velocidades que van desde los 5.23 m/s llegando a los 1.03 m/s presentando el valor más alto justo después de las compuertas y en el vado, esto indica que se debe considerar una intervención para que estas velocidades no nos provoquen una erosión en el lecho del río, puede ser un tanque amortiguador en las compuertas y en el vado.

Análisis de las secciones para determinar las condiciones de los caminos.

Para analizar los desbordes que se presentan en el Huichichila se requirió de secciones a lo largo del cauce mediante el uso de los programas Civil CAD y Easy Iber donde se importaban estas secciones en nuestros modelos con las intervenciones propuestas y determinar si los caminos que se piensan realizar para conectar las albercas y sean más accesibles para los usuarios. Para el análisis se realizó con los modelos de lluvias con periodos de retorno de 10 y 20 años, ya que son precipitaciones que suceden con mayor frecuencia.

Secciones lluvias con periodo de retorno de 10 años.

Las secciones que se analizaron son aquellas que se presentaron partiendo de las compuertas en dirección a la sierra de Vallejo.

El análisis arrojó que el río presenta desbordamientos con una altura de 0.5 m en el tramo existente entre las compuertas y la primera represa, después de la primera represa empiezan a presentarse desbordamientos de 1 m de altura lo que determina que durante la lluvia estos caminos quedarán inundados y considerando las velocidades de flujo en el río lo recomendable para los usuarios es que no se utilicen durante la lluvia.

Secciones entre compuertas y primera represa.

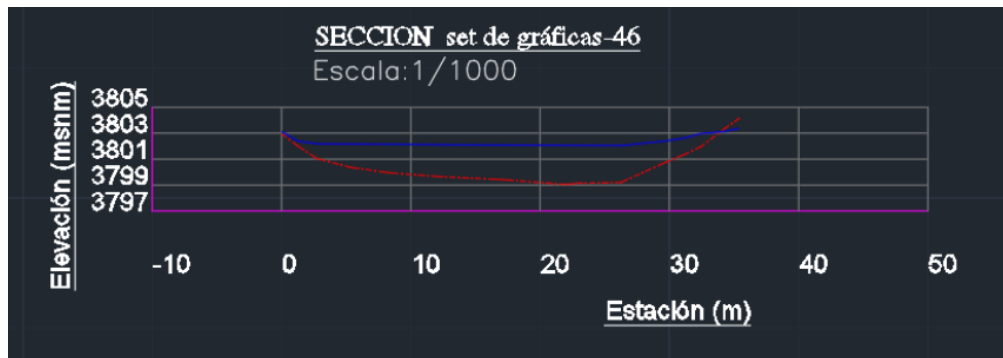


Figura 28. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 29. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la primera represa y la segunda represa.



Figura 30. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 31. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la segunda represa y la tercera represa.



Figura 32. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 33. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la tercera represa y la cuarta represa.



Figura 34. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 35. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Secciones después de la cuarta represa.



Figura 36. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 37. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

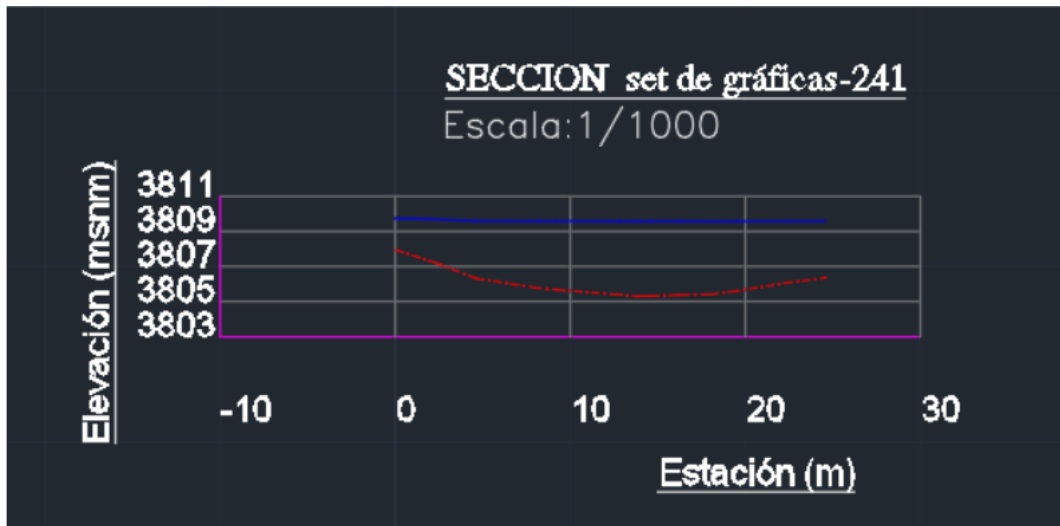


Figura 38. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).



Figura 39. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 10 años (Moreno. H, 2024).

Secciones lluvias con periodo de retorno de 20 años.

Las secciones que se analizaron son aquellas que se presentaron partiendo de las compuertas en dirección a la sierra de Vallejo.

El análisis arrojó que el río presenta desbordamientos con una altura de 1 m en el tramo existente entre las compuertas y la primera represa, después de la primera represa empiezan a presentarse desbordamientos de 1.5 m de altura lo que determina que durante la lluvia estos caminos quedaran inundados y considerando las velocidades de flujo en el río lo recomendable para los usuarios es que no se utilicen durante la lluvia.

Secciones entre compuertas y primera represa.



Figura 40. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

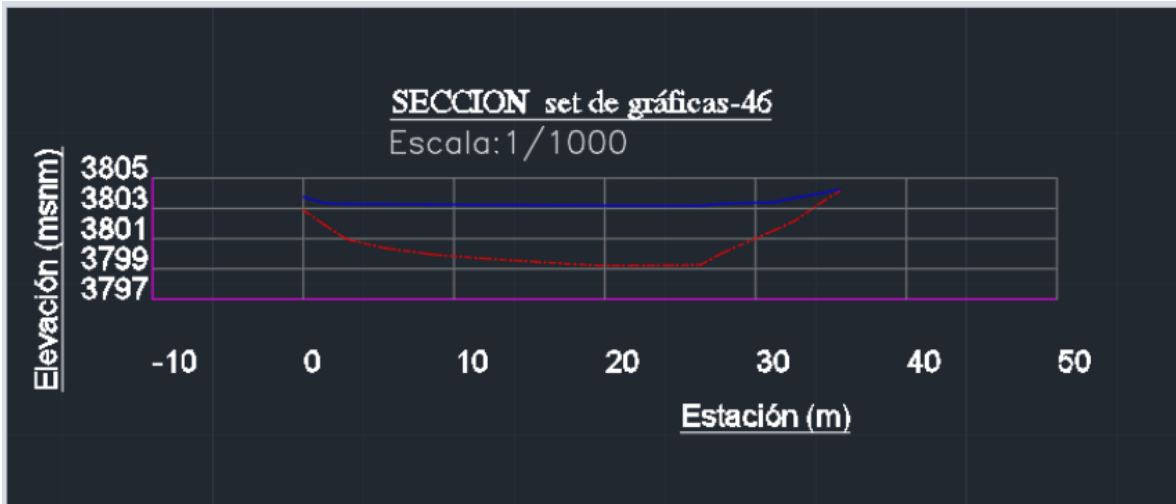


Figura 41. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la primera represa y la segunda represa.



Figura 42. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).



Figura 43. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la segunda represa y la tercera represa.



Figura 44. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).



Figura 45. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Secciones entre la tercera represa y la cuarta represa.



Figura 46. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

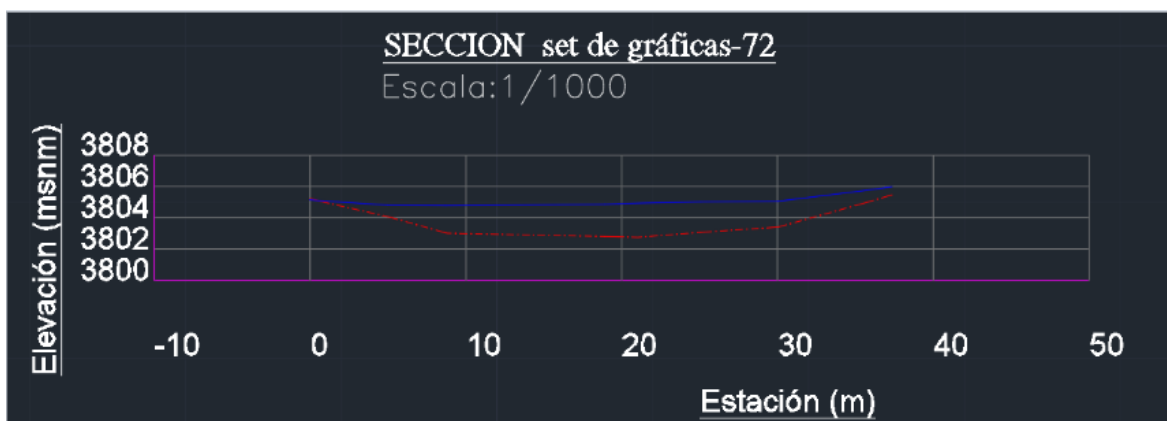


Figura 47. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Secciones después de la cuarta represa.



Figura 48. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).



Figura 49. Secciones cauce Huichichila periodo de retorno 20 años (Moreno. H, 2024).

Conclusiones.

Las propuestas de intervención sí presentan una mejoría en el calado del agua en el afluente aguas abajo después de las compuertas lo que nos interesa ya que pasando las compuertas aguas abajo las márgenes del Huichichila presentan asentamientos que durante la temporada de lluvias sufren de inundaciones generando daños económicos a los pobladores. Si bien presentan mejorías los modelos arrojan resultados que consideramos que estas mejorías son mínimas y se necesitan elaborar más estudios sobre el nivel del agua para calibrar los modelos y determinar la viabilidad del proyecto ya que los datos que estamos manejando son datos hipotéticos que se pueden corroborar haciendo visitas de campo en temporada de lluvias para tomar parámetros más acercados a la realidad y mejorar el diseño de esta propuesta de solución. Para la viabilidad de las represas y determinar su funcionamiento óptimo y su diseño se hablará en el análisis estructural de las represas.

6.2 Análisis de factibilidad en el diseño y construcción de represas en el arroyo Huichichila

Objetivo del Proyecto

El propósito del siguiente reporte consta de un objetivo tripartita:

- Determinar la viabilidad funcional de la construcción de un sistema de represas de concreto ciclópeo con el fin de crear un área recreativa en el arroyo Huichichila para la comunidad de San Juan de Abajo.
- Determinar la viabilidad funcional de la construcción de los muros de encauce en las laterales del arroyo en el área de estudio.
- Buscar dar solución al actual problema de socavación en la cimentación de las compuertas presentes en el arroyo Huichichila.

Introducción

El área de estudio es la microcuenca Río Huichichila/Huastitán donde se encuentra la localidad de San Juan de Abajo. Se trata de una cuenca exorreica de aproximadamente 68 km² de extensión, localizándose la comunidad antes mencionada en el extremo Sur de la misma, de manera contigua a su desembocadura en el Río Ameca.

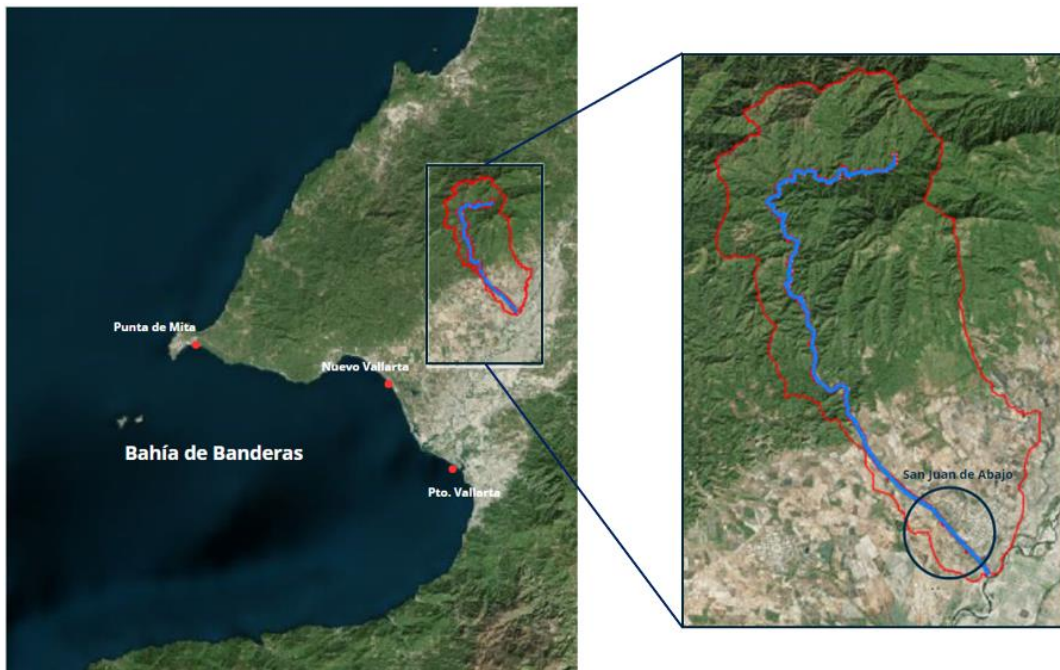


Figura 76. Localización del proyecto. (Google Earth, 2024).

El arroyo temporal de Huichichila es un cauce de aproximadamente 20km de longitud, comenzando en una elevación cercana a los 787 msnm y a su término con 25 msnm.



Figura 2. Perfil del Arroyo Huichichila. (Autoría propia).

Actualmente, el Arroyo Huichichila ya es un espacio de importante interacción social, pues es aprovechado por los locales como un espacio de entretenimiento en el temporal de lluvias, cuando el arroyo presenta un caudal estable y suficiente para cumplir con este fin.



Figura 3. Caudal formado cuando se encuentran abiertas las compuertas, (Recorriendo mi tierra, 2018).



Figura 4. Aprovechamiento del arroyo por la localidad en temporal de agua, (Recorriendo mi tierra, 2018).



Figura 5. Embalse formado con las compuertas cerradas, (Recorriendo mi tierra, 2018)

Este proyecto es análogo a un par ya existentes, en donde se buscó dar solución a un encauzamiento del arroyo, transformándolo en un espacio de recreación para la comunidad. Ejemplos son el balneario El Manto, ubicado en la localidad de El Rosario, Nayarit.

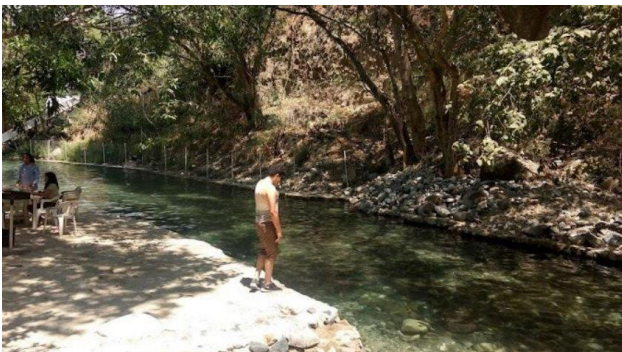


Figura 6. Vista del arroyo encausado, (elmanto, 2021)



Figura 7. La colocación de represas permite la formación de remansos de agua (elmanto, 2021)

El cual, es un espacio producto del encauzamiento del arroyo producido por un ojo de agua en una barranca cercana. Para formar el balneario, se construyeron represas que permitieran acumular un remanso de agua que posibilitara ser un espacio recreativo para los visitantes, así como muros de encauce. Sin embargo, éste es un espacio aprovechado en su totalidad en tiempo de secas, pues al llegar el temporal de lluvias, se remueven las represas y se da flujo libre al caudal formado por el peligro que representan las inesperadas crecidas del arroyo y con él, el flujo de detritos, rocas, ramas, árboles y basura que el agua lleva a su paso.

Se realizó una visita a este proyecto inspirador para revisar su estado actual durante el presente temporal de lluvias.



Figura 8. Colocación de represas para formar albercas en El Manto, Nay. (elmanto, 2021)



Figura 9. Durante temporal de lluvia se suspende uso de instalaciones en el arroyo (Moreno, 2024)

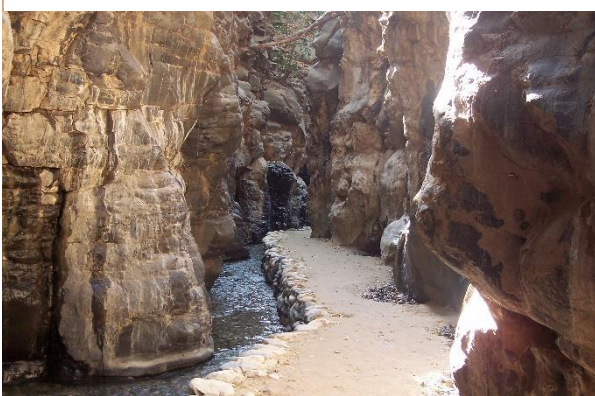


Figura 10. Camino a la cascada en El Manto, Nay. durante temporal de secas, (elmanto, 2021)

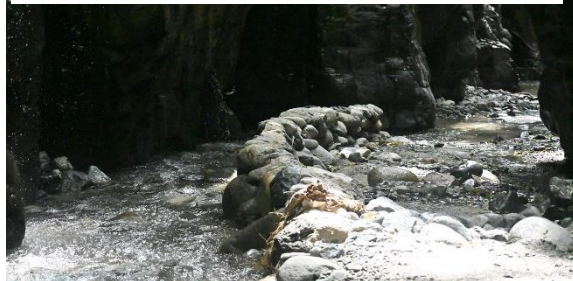


Figura 11. Camino a la cascada en El Manto, Nay. durante temporal de lluvia donde se el arroyo se llevó los caminos, (Moreno, 2024)

Propuestas constructivas posibles

Como parte de las propuestas de intervención al arroyo, por iniciativa de la localidad, se sugirió el diseño de un sistema de represas que propiciaran al arroyo mismo a ser un espacio con la infraestructura necesaria que lo equipara más formalmente a manera de un parque lineal.



Figura 177. Dibujo esquemático de la propuesta de intervención en el cauce del arroyo Huichichila, (Autoría propia).

Por parte de personas de la comunidad, se nos comunicó que el arroyo anteriormente había tenido intervenciones con gaviones y elementos de mampostería, y éstos no presentaron ser de utilidad alguna, pues a la primera crecida del río, todo fue arrastrado por el arroyo lo que significó en pérdidas económicas al tratarse de un proyecto utilidad nula.

Ante las pasadas experiencias, se decidió comenzar el esbozo de la propuesta empleando concreto ciclópeo, pues la zona provee en abundancia de los materiales principales para éste: roca y arena.

Para verificar la posibilidad del proyecto, se procedió a hacer un análisis de factibilidad teórica en la que se estiman las acciones a las que las represas estarían sometidas y así poder verificar si su comportamiento es satisfactorio a las solicitaciones propias del entorno.

Ubicación de las intervenciones



Figura 178. Proyección de la ubicación de las represas vista desde Civil 3D. (Autoría propia, 2024)

Durante nuestra visita de campo, determinamos la ubicación, a nuestro parecer, más conveniente de las represas considerando el largo, los posibles apoyos, la forma que tomará y su altura.

Sin embargo, el análisis de factibilidad estudiará el comportamiento de una represa genérica bajo las acciones esperadas.



Figura 179. Lugar potencial para la ubicación de la represa. (Autoría propia).

Propuestas constructivas y dimensionamiento de las represas

Para el diseño de las represas, se definió una altura útil de 1m, de manera que, en temporal de aguas, éstas formaran albercas continuas de aproximadamente un metro de profundidad.

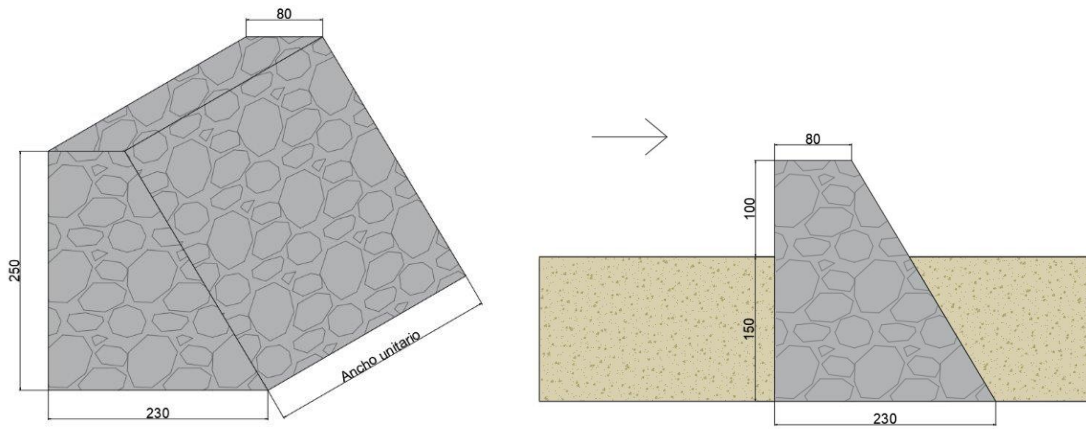


Figura 180. Propuesta de dimensionamiento de las represas. (Autoría propia, 2024)

Como es convención en todo diseño previo de geotecnia, todos los cálculos fueron hechos considerando un espesor o ancho unitario de la represa. Éstas fueron analizadas a las principales fallas a las que podrían estar sujetas:

- Falla por deslizamiento de la base: Esta falla sucede cuando el conjunto de fuerzas resistentes son menores que las acciones que tienden a desplazar al muro en la misma dirección que las fuerzas actuantes.
- Falla por volteo de la base: Es producida cuando los momentos actuantes son mayores que los momentos resistentes, es decir, se considera que las fuerzas actuantes forman un polígono de presiones y empujan al muro en el punto del centroide del polígono a través del brazo de palanca generado, produciendo así momentos que tienden a voltear o volcar al muro en un punto de rotación.

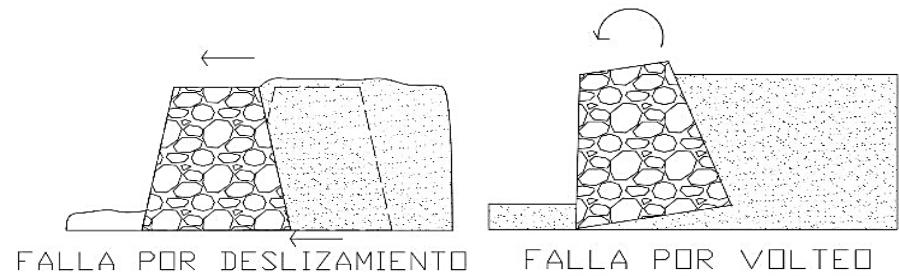


Figura 181. Tipos de falla en un muro de contención. (Autoría propia, 2024)

El diseño de estas represas se sustenta en el de un muro de contención, en la que se verifica su estabilidad mediante la estimación de la presión lateral de la tierra conocida, así como la verificación del posible vuelco, deslizamiento y fallas en la capacidad de carga del suelo (Das, 2013).

Evaluación Técnica

Para el proceso de diseño de una represa, se proponen 3 casos de análisis, que responden a 3 posibles escenarios críticos del entorno para evaluar la respuesta de la obra ante los mismos (valores obtenidos de las simulaciones con un periodo de retorno de 20 años). Éstos son:

1. Ausencia de agua aguas arriba y abajo de la represa: Cuando el arroyo se encuentra totalmente seco y no hay flujo de agua.

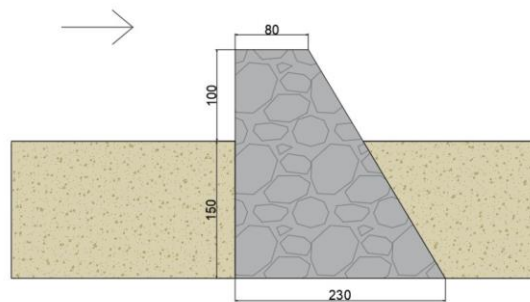


Figura 182. Dibujo esquemático del caso 1. (Autoría propia).

2. Presencia de agua únicamente aguas arriba de la represa: Durante la primera venida de aguas, éste es el momento en el que la represa recibe el primer escurrimiento sin que aún desborde.

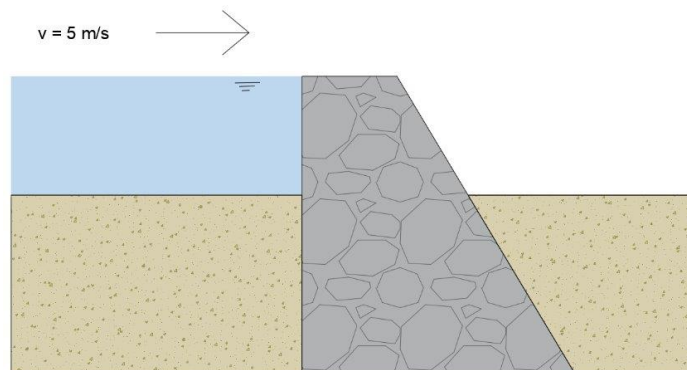


Figura 183. Dibujo esquemático del caso 2. (Autoría propia).

3. Presencia de agua en ambos lados de la represa: Este es el caso crítico, en el que se puede presentar una venida extraordinaria en el arroyo y se presenta un hundimiento completo de la obra, tanto aguas arriba como aguas abajo.

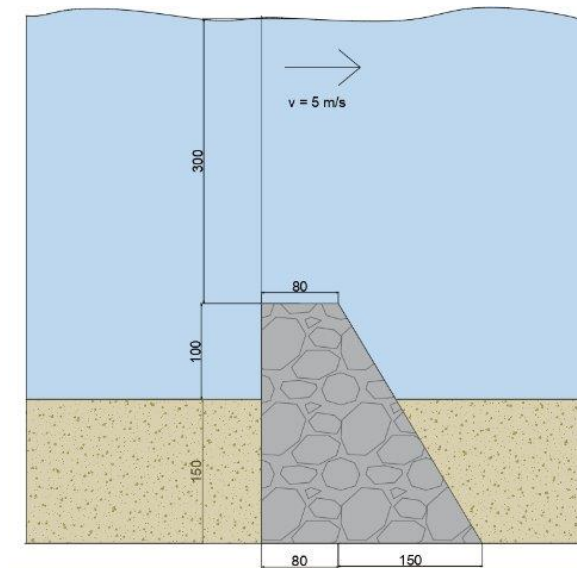


Figura 184. Dibujo esquemático del caso 3. (Autoría propia).

- A = área de la sección transversal de la represa o dique, (m^2)
- A_b = área de la base de la represa que está en contacto con el suelo (m^2)
- H = altura total del dique, (m)
- h = tirante que escurre sobre la corona del dique, (m)
- b = espesor de la represa, (m). Para facilidad de los cálculos, siempre se considera $b=1m$.
- z = profundidad de enterramiento de la represa, (m)
- g = constante promedio de la aceleración gravitacional, ($g = 9.8 m/s^2$).
- Wr = peso propio de la estructura, (t)
- σ_a = empuje activo que efectúa el suelo sobre el paramento aguas arriba de la represa, (t/m^2).
- σ_p = empuje pasivo que efectúa el suelo sobre el paramento aguas abajo de la represa, (t/m^2).
- σ_v = Esfuerzo vertical del suelo por peso propio y sobrecarga, (t/m^2).
- σ_b = Esfuerzo producido por el peso de la represa sobre suelo que se desplanta, (t/m^2).
- k_a = coeficiente de presión activa de Rankine.
- k_p = coeficiente de presión pasiva de Rankine.
- P_a = fuerza resultante del esfuerzo activo, (t)
- P_v = fuerza resultante del esfuerzo pasivo, (t)
- P_h = máximo empuje hidrostático, presente en la base del prisma de presiones, (t)
- A_e = área equivalente del prisma de presiones generado.
- P_{hT} = fuerza resultante del empuje hidrostático, (t).
- P_d = máximo empuje dinámico producido por la velocidad del fluido, presente en la base del prisma de presiones, (t)
- P_{dT} = fuerza resultante del empuje dinámico, (t).
- F_f = Fuerza de fricción producida por el peso de la estructura sobre el suelo, (t)
- τ = Esfuerzo cortante producido por el peso de la estructura sobre el suelo, (t/m^2).
- FS_{des} = factor de seguridad por deslizamiento.
- FS_{volt} = factor de seguridad por volteo.
- Fr_n = n ésima fuerza resistente, (t).
- Fa_n = n ésima fuerza actuante, (t).
- Mr_n = n ésimo momento resistente, ($t \cdot m$).

- M_{a_n} = enésimo momento actuante, (t·m).
- \bar{x} = ubicación del centroide en eje x, (m).
- \bar{y} = ubicación del centroide en eje y, (m).

Para el cálculo, se consideran valores típicos de los materiales.

- $\gamma_{mamp} = 2.4 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{arena} = 1.6 \text{ t/m}^3$
- $\phi_{arena} = 30$
- $\gamma_{agua} = 1.0 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{agua + sed} = 1.2 \text{ t/m}^3$
- $\rho_{agua} = 1 \text{ t/m}^3$
- $1\text{m} \leq h \leq 4\text{m}$ (tirante agua)
- $v = 5 \text{ m/s}$
- $C = 0$ (cohesión del material)

Análisis del Caso 1

Revisión por deslizamiento:

$$W_r = A \cdot b \cdot \gamma_{mamp} = \left(\frac{0.8+2.3}{2} \cdot 2.5\right) (1)(2.4) = 9.3t$$

$$k_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 30/2) = 1/3$$

$$\sigma_v = \gamma_{arena} \cdot z = (1.6)(1.5) = 2.4 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_a = k_a \cdot \sigma_v - 2c \sqrt{k_a} = 1/3 (2.4) - 2(0)(\sqrt{1/3}) = 0.8 \text{ t/m}^2$$

$$P_a = A_e \cdot z = (0.8+0)/2 \cdot 1.5 = 0.6t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5\text{m de la base.}$$

$$k_p = \tan^2(45 + \phi/2) = \tan^2(45 + 30/2) = 3$$

$$\sigma_p = k_p \cdot \sigma_v + 2c \sqrt{k_p} = 3 (2.4) + 2(0)(\sqrt{1/3}) = 7.2 \text{ t/m}^2$$

$$P_v = A_e \cdot z = (7.2+0)/2 \cdot 1.5 = 5.4t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5\text{m de la base.}$$

$$\sigma_b = W_r / b = 9.37/1 = 9.37 \text{ t/m}^2$$

$$\tau = \sigma_b \cdot \tan \phi = (9.37) \tan 30 = 5.4 \text{ t/m}^2$$

$$F_F = \tau \cdot A_b = (5.4) (2.3 \cdot 1) = 12.44t$$

$$FS_{des} = \Sigma F_r / \Sigma F_a = (5.4+12.44) / 0.6 \approx 30 > 1.5 \therefore \text{Sí cumple, no se presenta deslizamiento en CASO 1.}$$

Revisión por volteo: Por la geometría y dirección del flujo de agua, se considera como punto de rotación el extremo inferior derecho de la base de la represa

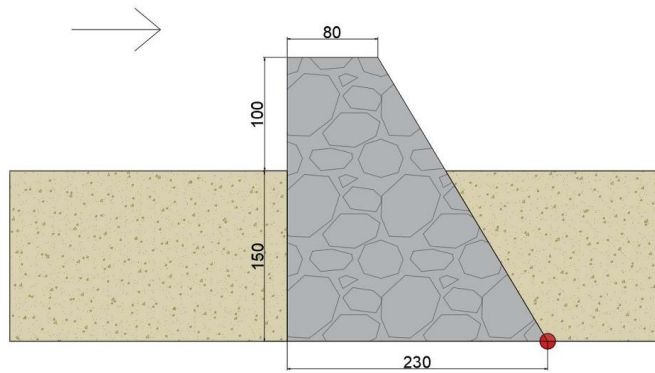


Figura 20. Dibujo esquemático del caso 1 donde se identifica el punto de volteo en la esquina inferior derecha de la represa. (Autoría propia).

$$Ma_1 = Pa (H/3) = (0.6) (1.5/3) = 0.3 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_1 = Pv (H/3) = (5.4) (1.5/3) = 2.7 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_2 = Wr (b - \bar{x}); \text{ donde por geometría, } \bar{x} = 0.835\text{m}$$

$$= (9.3) (2.3 - 0.835) = 13.6 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$FS_{\text{volt}} = \Sigma Mr / \Sigma Ma = (2.7+13.6) / 0.3 \approx 54 > 1.5 \therefore \text{Sí cumple, no se presenta volteo en CASO 1.}$$

Análisis del Caso 2

Revisión por deslizamiento: Partiendo de los cálculos efectuados en el caso 1, tenemos que:

$$W_r = 9.3\text{t}$$

$$k_a = 1/3$$

$$\sigma_v = 2.4 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_a = 0.8 \text{ t/m}^2$$

$$Pa = 0.6 \text{ t aplicada a } H/3 = 0.5\text{m de la base.}$$

$$k_p = 3$$

$$\sigma_p = 7.2 \text{ t/m}^2$$

$$Pv = 5.4\text{t aplicada a } H/3 = 0.5\text{m de la base.}$$

$$F_F = 12.44\text{t}$$

$$Ph = \rho_{\text{agua}} \cdot h^2 / 2 = (1)(1^2/2) = 0.5\text{t}$$

$$Ph_T = A_e = (0.5 + 0)(1) / 2 = 0.25\text{t, aplicada a } h/3 = 0.33\text{m de la base.}$$

$$Pd = \rho_{\text{agua}} \cdot h \cdot v^2 = (1)(1)(5^2) = 25\text{t}$$

$$Pd_T = A_e = (25 + 0)(1) / 2 = 12.5\text{t, aplicada a } h/3 = 0.33\text{m de la base.}$$

$$FS_{\text{des}} = \Sigma Fr / \Sigma Fa = (5.4+12.44) / (0.6+0.25+12.5) \approx 1.3 < 1.5 \therefore \text{No cumple, se presenta riesgo de deslizamiento en CASO 2.}$$

Revisión por volteo:

$$Ma_1 = Pa (H/3) = (0.6) (1.5/3) = 0.3 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Ma_2 = Ph_T (h/3) = (0.25) (1.0/3) = 0.08 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Ma_3 = Pd_T (h/3) = (12.5) (1.0/3) = 4.17 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_1 = Pv (H/3) = (5.4) (1.5/3) = 2.7 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_2 = Wr (b - \bar{x}) = 13.6 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$FS_{\text{voltage}} = \Sigma Mr / \Sigma Ma = (2.7+13.6) / (0.3+0.08+4.17) = 3.6 > 1.5 \therefore$ Sí cumple, no se presenta volteo en CASO 2.

Análisis del Caso 3

Revisión por deslizamiento: Partiendo de los cálculos efectuados en el caso 1, tenemos que:

$$W_r = 9.3t$$

$$k_a = 1/3$$

$$\sigma_v = 2.4 t/m^2$$

$$\sigma_a = 0.8 t/m^2$$

$$P_a = 0.6 t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5m \text{ de la base.}$$

$$k_p = 3$$

$$\sigma_p = 7.2 t/m^2$$

$$P_v = 5.4t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5m \text{ de la base.}$$

$$F_F = 12.44t$$

$Ph = \rho_{agua} \cdot h^2 / 2 = (1)(4^2/2) = 8.0t$, en este caso forma ya no un triángulo, sino un trapecio de presiones (Ilustración).

$Ph_T = A_e = (8.0 + 6.0)(1) / 2 = 7.0t$, aplicada en $= 0.47m$ de la base.

$$Pd = \rho_{agua} \cdot h \cdot v^2 = (1)(4)(5^2) = 100t$$

$Pd_T = A_e = (100 + 75)(1) / 2 = 87.5t$, aplicada en $\bar{y}_{PdT} = 0.47m$ de la base.

$FS_{des} = \Sigma Fr / \Sigma Fa = (5.4 + 12.44) / (0.6 + 7 + 87.5) \approx 0.19 < 1.5 \therefore$ No cumple, se presentará deslizamiento en CASO 3.

Revisión por volteo:

$$Ma_1 = P_a (H/3) = (0.6) (1.5/3) = 0.3 t \cdot m$$

$$Ma_2 = Ph_T (\bar{y}_{PhT}) = (7.0) (0.47) = 3.3 t \cdot m$$

$$Ma_3 = Pd_T (\bar{y}_{PdT}) = (87.5) (0.47) = 41.13 t \cdot m$$

$$Mr_1 = P_v (H/3) = (5.4) (1.5/3) = 2.7 t \cdot m$$

$$Mr_2 = W_r (b - \bar{x}) = 13.6 t \cdot m$$

$FS_{volt} = \Sigma Mr / \Sigma Ma = (2.7 + 13.6) / (0.3 + 3.3 + 41.13) = 0.36 < 1.5 \therefore$ No cumple, se presentará volteo en CASO 3.

Análisis optimizado

Como podemos observar, la falla por deslizamiento es más sensible a las condiciones dadas, es decir, se presentará primeramente el deslizamiento y posteriormente el volteo. Con el objetivo de determinar un diseño optimizado y ajustado a las acciones, con ayuda de una hoja de cálculo, se realizó un cálculo iterativo en el que se estimó el ancho óptimo para obtener un $FS_{des} = 1.5$ en el caso 3, lo que resultó de una base $b=78m$:

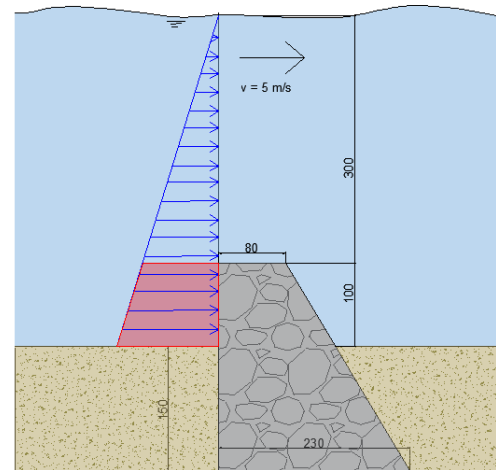


Figura 21. Dibujo esquemático del empuje hidrostático sobre la represa, donde se forma un trapecio de presiones. (Autoría propia).

se
 \bar{y}_{PhT}

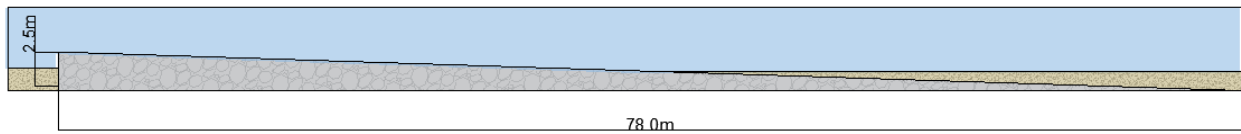


Figura 22. Dibujo esquemático de la represa optimizada. (Autoría propia).

De esta manera, obtendríamos el peso necesario de 237t por metro de represa para equilibrar las fuerzas resistentes a las actuantes.

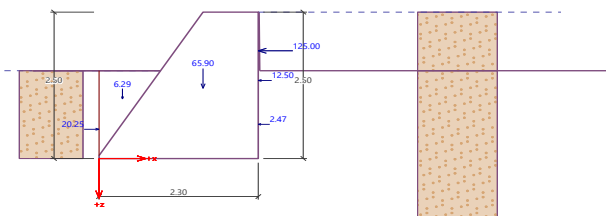
Simulación de los casos 2 y 3 en software GEO 5.

Con el propósito de verificar el anterior análisis, se simuló el escenario de los casos 2 y 3 con ayuda del software GEO 5.

Los parámetros de entrada fueron equivalentes a los mostrados con anterioridad:

Peso volumétrico suelo:	γ	=	18	kN/m ³
Estado de esfuerzos:	Efectivos			
Ángulo de fricción interna:	ϕ	=	30	°
Cohesión del suelo:	c_{ef}	=	0	kPa
Ángulo de fricción estructura-suelo*:	ϕ	=	20	°
Tipo de suelo:	Sin cohesión.			

Simulación del Caso 2 con GEO 5.



* Reducción del ángulo de fricción estructura/suelo reducido a 2/3 ϕ (AASHTO)

Figura 23. Fuerzas presentes en la simulación del caso 2. (Figura elaborada con ayuda del software GEO 5).

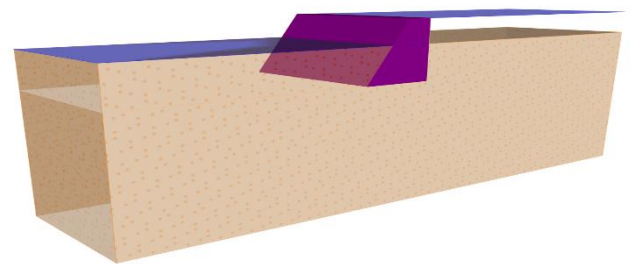


Figura 24. Render de la simulación del caso 2. (Figura elaborada con ayuda del software GEO 5).

Active horizontal force $H_{act} = 847.19 \text{ kN/m}$

Safety factor = $0.04 < 1.50$

Wall for slip is NOT SATISFACTORY

Overall check - WALL is NOT SATISFACTORY

Simulación del Caso 3 optimizado empleando anclas con GEO 5

Obtenido gracias al cálculo iterativo presentado anteriormente, realizamos la simulación de éste, en el que se propone una represa con una base de longitud de 78m:

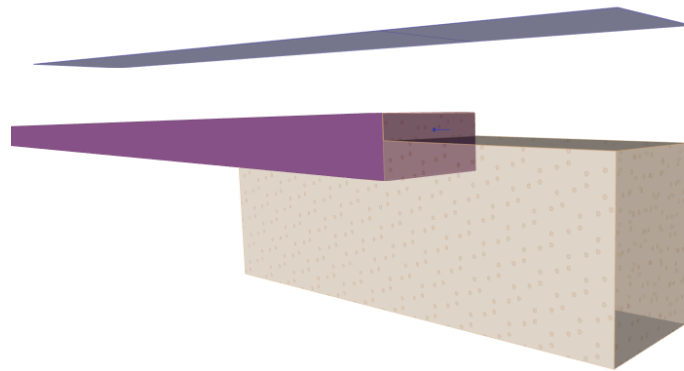


Figura 27. Render generado a partir de la simulación del caso 3 optimizado. (Figura elaborada con ayuda del software GEO 5).

Resultados del caso 3 optimizado:

- **Check for overturning stability**

Resisting moment $M_{res} = 80853.07 \text{ kNm/m}$

Overturning moment $M_{OVR} = 1710.05 \text{ kNm/m}$

Safety factor = $47.28 > 1.50$

Wall for overturning is SATISFACTORY

- **Check for slip**

Resisting horizontal force $H_{res} = 872.08 \text{ kN/m}$

Active horizontal force $H_{act} = 847.19 \text{ kN/m}$

Safety factor = $1.03 < 1.50$

Wall for slip is NOT SATISFACTORY

Overall check - WALL is NOT SATISFACTORY

En el que podemos observar que el resultado es positivo ante el vuelco, pero en el caso del deslizamiento, se presenta un factor de seguridad que de 1.03, es decir, que está apenas por encima de la solitud en su completitud, pero en realidad, sin un factor de seguridad que proporcione certidumbre de la obra.

Simulación del Caso 3 apoyado en anclas con GEO 5

Para ampliar el análisis, se simuló la respuesta de la represa bajo la posibilidad de instalar una serie de anclas. Las anclas funcionan como micropilotes de manera que cuando se someten a fuerzas horizontales (como las producidas por el empuje hidrostático y dinámico del cauce), los micropilotes resisten a la flexión sin dejar de soportar la carga vertical generada por la superestructura (Das, 2013).

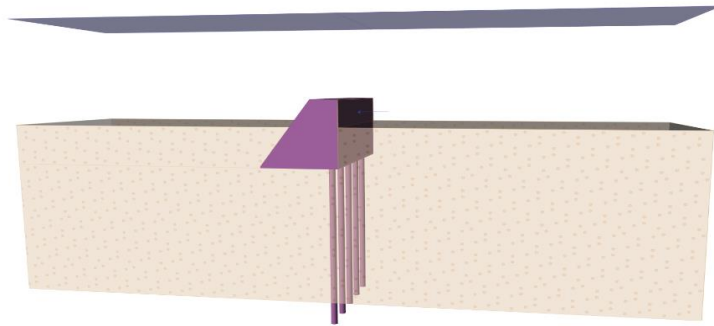


Figura 28. Render generado a partir de la simulación del caso 3 añadiendo las anclas. (Figura elaborada con ayuda del software GEO 5).

Características de las anclas:

- Profundidad $h = 6,00$ m
- Diámetro de perforación = $0,20$ m
- Distancia entre perforación = $1,00$ m
- Resistencia de entrada y salida $T_p = 100,00$ kN/m
- Resistencia de entrada del refuerzo $R_t = 100,00$ kN

Resultados del caso 3 con anclas:

- **Check for overturning stability**
Resisting moment $M_{res} = 282.07$ kNm/m
Overturning moment $M_{OVR} = 1710.05$ kNm/m
Safety factor = $0.16 < 1.50$
Wall for overturning is NOT SATISFACTORY
- **Check for slip**
Resisting horizontal force $H_{res} = 93.02$ kN/m

Active horizontal force $H_{act} = 847.19 \text{ kN/m}$

Safety factor = $0.11 < 1.50$

Wall for slip is NOT SATISFACTORY

Overall check - WALL is NOT SATISFACTORY

Análisis del Caso 3 considerando cimentación en roca sana.

Bajo la posibilidad de cimentar y anclar las represas directamente en roca sana tipo andesita, se presenta un análisis de la repuesta de los diques ante ese escenario. Para el cálculo, se consideran los siguientes valores de los materiales.

- $\gamma_{mamp} = 2.4 \text{ t/m}^3$
- $\gamma_{roca} = 2.5 \text{ t/m}^3$
- $\phi_{roca} = 45^\circ$
- $\gamma_{agua} = 1.0 \text{ t/m}^3$
- $z = 0.20 \text{ m}$
- $\gamma_{agua + sed} = 1.2 \text{ t/m}^3$
- $\rho_{agua} = 1 \text{ t/m}^3$
- $h = 4 \text{ m}$
- $v = 5 \text{ m/s}$
- $C_{andesita} = 280 \text{ t/m}^2$

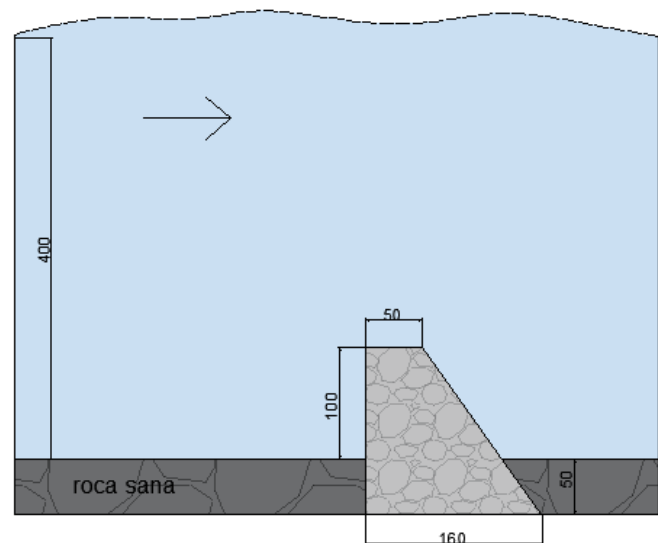


Figura 29. Análisis del caso 3 considerando cimentación de la represa en roca sana y con un redimensionamiento óptimo. (Autoría propia).

Revisión por deslizamiento:

$$W_r = A \cdot b \cdot \gamma_{mamp} = \left(\frac{0.5+1.6}{2} \times 1.5 \right) (1)(2.4) = 3.8t$$

$$k_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 45/2) = 0.172$$

$$\sigma_v = \gamma_{roca} \cdot z = (2.5)(0.5) = 1.25 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_a = k_a \cdot \sigma_v - 2c \sqrt{k_a} = 0.172 (1.25) - 2(280)(\sqrt{0.172}) = - 232 \text{ t/m}^2$$

debido a que se obtienen teóricamente un esfuerzo activo negativo, se supone un empuje mínimo (pues las fuerzas resistentes son más grandes que las actuantes) \therefore

$$\sigma_a = 0.01 \text{ t/m}^2$$

$$Pa = A_e \cdot z = (0.01+0)/2 \cdot 0.5 = 2.5e^{-3}t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5/3 = 0.17m \text{ de la base}$$

$$k_p = \tan^2(45 + \phi/2) = \tan^2(45 + 45/2) = 5.83$$

$$\sigma_p = k_p \cdot \sigma_v + 2c \sqrt{k_p} = 5.83 (1.25) + 2(280)(\sqrt{5.83}) = 1359 \text{ t/m}^2$$

$$Pv = A_e \cdot z = (1359+0)/2 \cdot 0.5 = 340t \text{ aplicada a } H/3 = 0.5/3 = 0.17m \text{ de la base.}$$

$$\sigma_b = W_r/b = 3.8/1 = 3.8 \text{ t/m}^2$$

$$\tau = \sigma_b \cdot \tan \phi = (3.8) \tan 45 = 3.8 \text{ t/m}^2$$

$$F_F = \tau \cdot A_b = (3.8) (1.6 \cdot 1) = 6.1t$$

$$Ph = \rho_{agua} \cdot h^2 / 2 = (1)(4^2/2) = 8t$$

$$Ph_T = A_e = (8 + 6)(1) / 2 = 7t, \text{ aplicada a } h/3 = 0.33m \text{ de la base.}$$

$$Pd = \rho_{agua} \cdot h \cdot v^2 = (1)(4)(5^2) = 100t$$

$$Pd_T = A_e = (100 + 75)(1) / 2 = 87.5t, \text{ aplicada a } h/3 = 0.33m \text{ de la base.}$$

$$FS_{des} = \Sigma Fr / \Sigma Fa = (340+6.1) / (2.5e^{-3}+8+87.5) \approx 3.6 < 1.5 \therefore \text{Sí cumple, no se presenta riesgo de deslizamiento en CASO 3 cimentado en roca.}$$

Revisión por volteo:

$$Ma_1 = Pa (H/3) = (2.5e^{-3}) (0.5/3) \approx 0 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Ma_2 = Ph_T (h/3) = (7) (0.5/3) = 1.17 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Ma_3 = Pd_T (h/3) = (87.5) (0.5/3) = 14.58 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_1 = Pv (H/3) = (340) (0.5/3) = 56.67 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_2 = W_r (b - \bar{x}) = 3.8(1.6-0.57) = 3.9 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$FS_{volt} = \Sigma Mr / \Sigma Ma = (56.67+3.9) / (0+1.17+14.58) = 3.8 > 1.5 \therefore \text{Sí cumple, no se presenta volteo en CASO 3 cimentado en roca.}$$

Propuesta constructiva y dimensionamiento de los muros de encausamiento

Con el objetivo de encausar el arroyo y propiciar un espacio más apto para albergar a la comunidad en el periodo de temporal de lluvias, se propuso la construcción de muros de encausamiento que, aunado a lo anterior, permitirían estabilizar el cauce de la actual erosión; pues durante la visita de campo se pudo visibilizar la actual condición de deterioro de los márgenes.



Figura 30. Raíces expuestas de un gran árbol, producto de erosión de las márgenes. (Autoría propia).

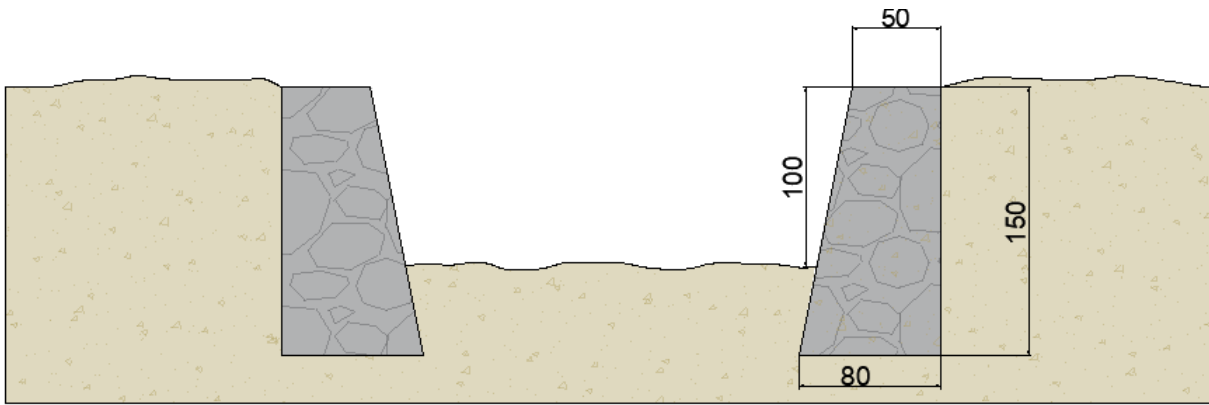


Figura 31. Dimensionamiento de los muros de contención de las márgenes. (Autoría propia).

El diseño de los muros de encausamiento es totalmente análogo al del diseño de las represas: se diseñan y calculan como muros de contención y se verifica su respuesta al volteo y al deslizamiento de la base. Éstos se analizarán en su condición más crítica, que se presenta después de una crecida y no hay presencia de agua pero el suelo de los costados permanece saturado y por ende actúa el empuje activo de las tierras junto con el hidrostático en su totalidad sobre los muros.

$$W_r = A \cdot b \cdot \gamma_{mamp} = \left(\frac{0.8+0.5}{2} \times 1.5 \right) (1)(2.4) = 2.3t$$

$$k_a = \tan^2(45 - \phi/2) = \tan^2(45 - 30/2) = 1/3$$

$$\sigma_{v_activo} = \gamma_{arena} \cdot z = (1.6)(1.5) = 2.4 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_{v_pasivo} = \gamma_{arena} \cdot z = (1.6)(0.5) = 0.8 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_a = k_a \cdot \sigma_{v_activo} - 2c \sqrt{k_a} = 1/3 (2.4) - 2(0)(\sqrt{1/3}) = 0.8 \text{ t/m}^2$$

$$P_a = A_e \cdot z = (0.8+0)/2 \cdot 1.5 = 0.6t \text{ aplicada a } H/3 = 1.5/3 = 0.5m \text{ de la base.}$$

$$k_p = \tan^2(45 + \phi/2) = \tan^2(45 + 30/2) = 3$$

$$\sigma_p = k_p \cdot \sigma_{v_pasivo} + 2c \sqrt{k_p} = 3 (0.8) + 2(0)(\sqrt{1/3}) = 2.4 \text{ t/m}^2$$

$$P_v = A_e \cdot z = (2.4+0)/2 \cdot 0.5 = 0.6t \text{ aplicada a } h/3 = 0.5/3 = 0.17m \text{ de la base.}$$

$$\sigma_b = W_r / b = 2.3/1 = 2.3 \text{ t/m}^2$$

$$\tau = \sigma_b \cdot \tan \phi = (2.3) \tan 30 = 1.35 \text{ t/m}^2$$

$$F_F = \tau \cdot A_b = (1.35) (0.8 \cdot 1) = 1.08t$$

$$FSdes = \Sigma Fr / \Sigma Fa = (0.6+1.08) / 0.6 \approx 2.8 > 1.5 \therefore \text{Sí cumple, no se presenta deslizamiento.}$$

Revisión por volteo: Por la geometría y dirección del flujo de agua, se considera como punto de rotación el extremo inferior derecho de la base de la represa.

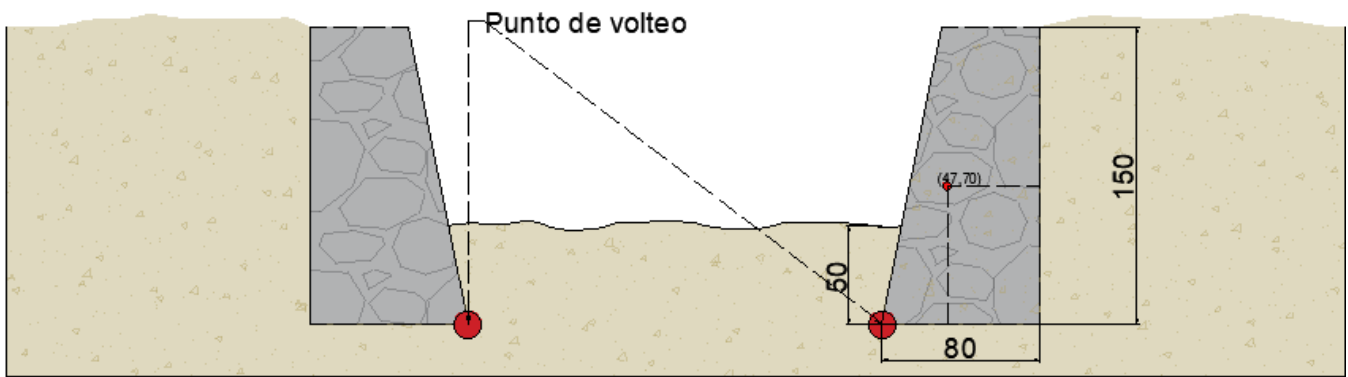


Figura 32. Dibujo esquemático donde se presentan el centroide de la sección transversal del muro, así como los puntos de vuelco de la misma. (Autoría propia, 2024)

$$Ma_1 = Pa (H/3) = (0.6) (1.5/3) = 0.3 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_1 = Pv (h/3) = (0.6) (0.5/3) = 0.1 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$Mr_2 = Wr (b - \bar{x}); \text{ donde por geometría, } \bar{x} = 0.47\text{m}$$

$$= (2.3) (0.8 - 0.47) = 0.76 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$FS_{\text{vuelto}} = \Sigma Mr / \Sigma Ma = (0.1 + 0.76) / 0.3 \approx 2.9 > 1.5 \therefore \text{ Sí cumple, no se presenta vuelto.}$$

La colocación de muros de encauzamiento tiende a ver socavada su cimentación debido a la acción erosiva del flujo de agua. Una solución típica a esto es la colocación de elementos de mayor dimensión como rocas, así como un mejoramiento del suelo receptor, de manera que no se friccionen directamente la superficie baja del muro.

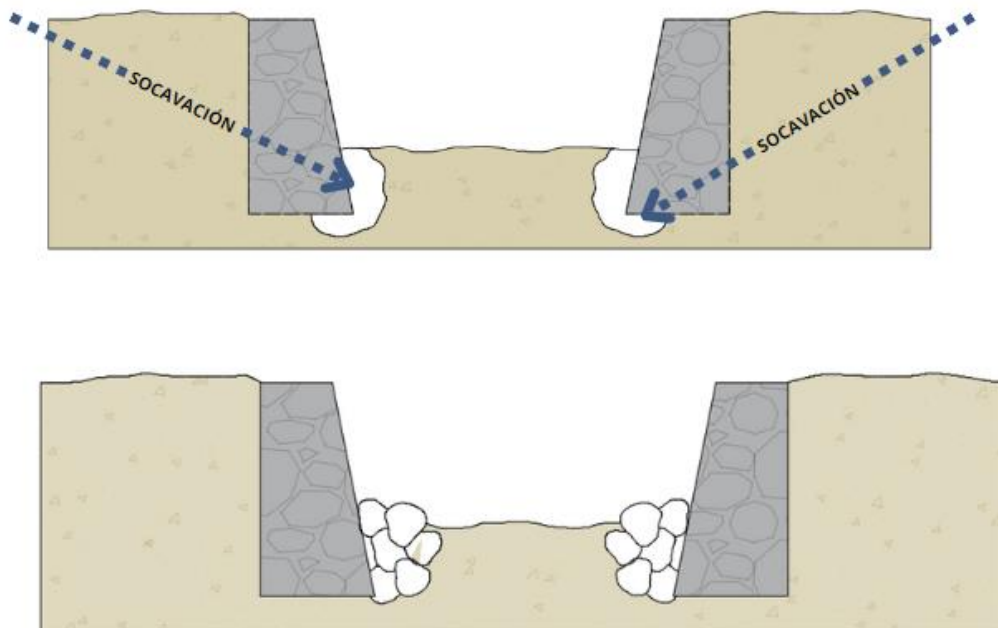


Figura 33. Zonas de socavación por el flujo de agua (figura superior). Rigidización de la parte baja del muro para evitar erosión en parte baja del muro (figura inferior). (Autoría propia).

Dando respuesta al tercer objetivo del presente proyecto, se presenta una posible solución a la socavación en la cimentación de las compuertas presentes en el arroyo Huichichila.



Figura 34. Forma de la caída de agua con las compuertas abiertas, (Recorriendo mi tierra, 2018).

Debido a la forma de la caída del agua del cauce (figura 34), se observó que la parte baja de las compuertas ya se encuentra socavada y dañada por la acción de la caída del agua sobre el paramento inferior (figura 35).

Anteriormente, a la salida de las bocas de las compuertas, se encontraba una plancha empedrada para recibir el cauce, sin embargo, ésta fue degradada por la gran fuerza del agua hasta desaparecerla por completo.

A manera de exponer una posible solución a la problemática, se propone el dimensionamiento de un tanque disipador con el objetivo de reducir la gran energía cinética producida por el flujo y de esa forma evitar la erosión del aliviadero o compuerta.



Figura 35. Resultado de la acción de la fuerza ejercida por el flujo de agua que cae sobre el paramento de la cimentación de las compuertas. (Autoría propia).

La Oficina Estadounidense de Recuperaciones (USBR por sus siglas en inglés), propone una serie de modelos de tanques amortiguadores que se adaptan al fenómeno existente, de manera que se proponga un dimensionamiento de acuerdo con las condiciones donde se empleará.

A continuación, se despliega el listado de las variables a utilizar:

- V_1 = Velocidad aguas arriba del aliviadero (m/s)
- V_2 = Velocidad aguas abajo del aliviadero (m/s)
- y_1 = Tirante aguas arriba del aliviadero (m)
- y_2 = Tirante aguas abajo del aliviadero (m)
- Fr = Número de Froude
- g = constante promedio de la aceleración gravitacional, ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).

Para el cálculo, se consideran valores provenientes de un periodo de un caudal con un PR=20 años.

- $V_1 = 5 \text{ m/s}$
- $V_2 = 2 \text{ m/s}$
- $y_1 = 4 \text{ m}$
- $y_2 = 1 \text{ m}$

Proceso de dimensionamiento

$$Fr = V_1 / \sqrt{(g \cdot y_1)} = 5 / \sqrt{(9.8 \cdot 4)} = 0.71 \therefore \text{El modelo más acercado es el tipo USBR I.}$$

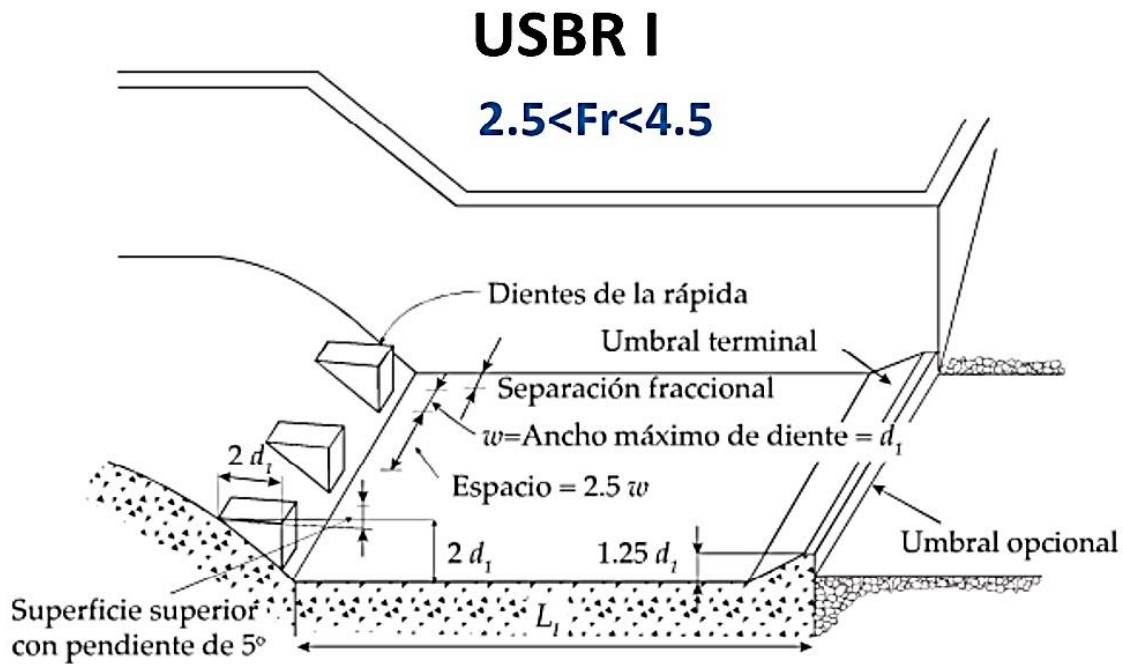


Figura 36. Dimensionamiento del tanque USBR I. (Arreguín & Alcocer, 2011)

Atendiendo a lo anterior, se propone el siguiente dimensionamiento.

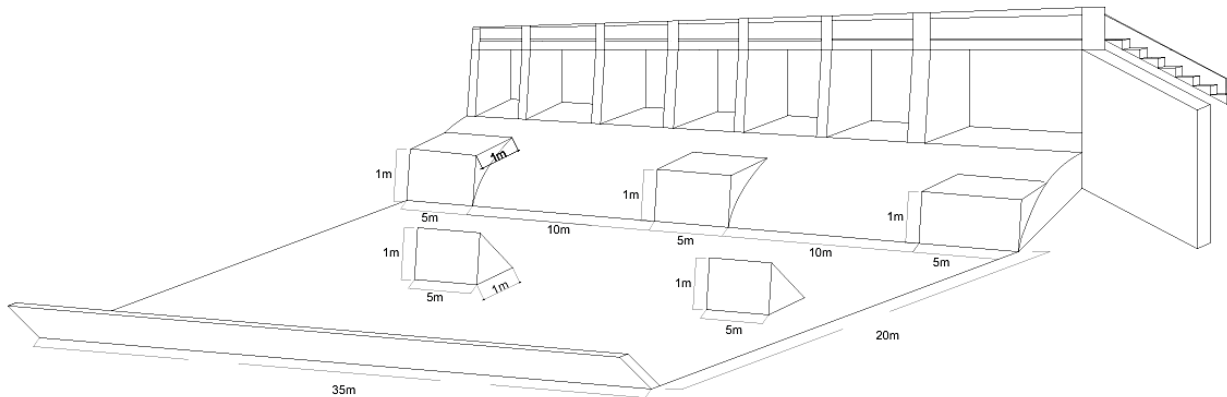


Figura 37. Dibujo esquemático y sin escala real del resultado del dimensionamiento del tanque amortiguador cercano al tipo USBR I, colocado aguas abajo de las compuertas existentes. (Autoría propia).

De acuerdo a los estándares que propone el *United States Army Corps of Engineers (USACE)*, podemos clasificar los riesgos asociados a una obra hidráulica considerando la altura de la presa, su capacidad de almacenamiento y las posibles pérdidas de vidas y económicas (Arreguín & Alcocer, 2011).

Tabla 10. Clasificación del riesgo potencial de falla en presas según el Programa Nacional de Inspección de presas de los EUA, (Arreguín & Alcocer, 2011).

Categoría	Almacenamiento (m ³)	Altura de la presa (H _p) (m)
Tamaño de la Presa		
Pequeña	61,600 a 1,233,500	7.6 a 12.0
Intermedia	1,233,500 a 61,600,000	12.0 a 30.0
Grande	más de 61,600,000	más de 30.0
Categoría	Pérdida de vidas	Pérdidas económicas
Riesgo potencial		
Bajo	No esperadas (no hay estructuras permanentes para habitación humana).	Mínimas (sin desarrollo alguno o estructuras para agricultura).
Significativo (intermedio)	Pocas (no hay desarrollo urbano y no hay más que unas cuantas estructuras pequeñas habitables).	Apreciable (industria agrícola importante o estructuras).
Alto	Más que algunas.	Excesivo (comunidad extensiva, industria o agricultura).

Tabla 11. Comparación de la capacidad de los vertedores, de acuerdo al riesgo potencial y tamaño de la presa según varias agencias, (Arreguín & Alcocer, 2011).

Instituciones	Clase de riesgo								
	Alto			Significativo			Bajo		
	Tamaño de la presa			Tamaño de la presa			Tamaño de la presa		
	Grande	Inter-media	Pequeña	Grande	Inter-media	Pequeña	Grande	Inter-media	Pequeña
USBR	Amp	Amp	Amp						
USACE	Amp	Amp	½ Amp	Amp	½ Amp a Amp	100 años a ½ Amp	½ Amp a Amp	100 años a ½ Amp	50 a 100 años
Instituto de Ingenieros Civiles de Londres	Amp	Amp	Amp	0.5 Amp o la mayor de las avenidas de T _r =10,000 años			0.3 Amp o la mayor de las avenidas de T _r =1,000 años		
Sociedad Americana de Ingenieros Civiles	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp	Amp			
Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD)	Amp	Amp		Amp	Amp				
Comité de Grandes Presas de USA (USCOLD)				No ha emitido criterio					

Podemos clasificar las compuertas existentes como de un riesgo potencial bajo (tabla 1), pues se clasifican como estructuras para la agricultura (debido a que su función principal es alimentar el canal de riego); así como de una clase de riesgo baja por considerar el tamaño de la represa como pequeña (tabla 2). Es así como podemos inferir que el dimensionamiento del tanque amortiguador no es indispensable se ajuste perfectamente a lo establecido por la USBR, sino más bien, su diseño debe atender a ser funcional y viable técnica y constructivamente.

Conclusiones

Sin duda alguna, el primer objetivo en la generación de infraestructura es propiciar un bien mayor y común. Bajo esta premisa, se obtienen las siguientes conclusiones del proyecto presentado.

1. Analizar y cuestionar a profundidad el costo-beneficio de cada una de las 3 obras de intervención propuestas (construcción de represas, muros de encauce y tanque disipador). Actualmente el arroyo ya funge como un

espacio de esparcimiento del que los locales se han apropiado adecuadamente, por lo que las intervenciones propuestas deberán tender a habilitar *un poco más* la zona a ser un sitio de mayor aprovechamiento recreativo para los locales, atendiendo a ser obras que propicien mayor seguridad a los usuarios.

2. Como se demostró anteriormente, la construcción de las represas dentro del caso 2 y 3 no es viable, únicamente bajo la posibilidad del caso 3 cimentado en roca. Lo anterior responde a ser un análisis teórico e ideal, sin embargo, se expone que es de vital importancia contar con la información real de campo, es decir, se requiere indiscutiblemente realizar pruebas de caracterización de los materiales de la zona, granulometría, pruebas de socavación, SPT, PCA, mecánica de rocas, o cualquier otra que nos arroje más información sobre las condiciones reales del contexto de trabajo.
3. Inclusive a determinar el correcto anclaje de las represas de manera que sean capaces de soportar cualquiera de los escenarios presentados, se presenta la alta posibilidad de su tendencia a azolverse rápidamente (representando un costo económico la continua remoción de sedimentos para que el proyecto continúe siendo de utilidad), por lo que resultaría de gran provecho el realizar un adecuado estudio de flujo sedimentos en el cauce.
4. Se propone idear acciones que sumen a la habilitación del complejo más de tipo *ecoturístico* en el que no se realicen intervenciones tan irruptoras, sino más bien, en facilitar y otorgar al espacio a ser un espacio de mayor aprovechamiento, seguridad y dinamismo social, de manera que las intervenciones a realizar no supongan la posibilidad de grandes pérdidas (tanto humanas y económicas) ante la acción violenta del arroyo.
5. Lo anteriormente presentado corresponde a un análisis de viabilidad teórica, por lo que es indispensable sopesar la viabilidad técnica del proyecto. Para esto, es forzoso verificar con precisión los puntos a intervenir para estudiar el suelo donde se habrán de desplantar; verificar accesos al sitio, viabilidad económica del proyecto; al igual que repensar si el proyecto a ejecutar responderá a ser de tipo permanente o temporal.
6. Como se expuso, los cálculos de las represas y muros de contención se realizan bajo el supuesto teórico de considerar un muro de espesor unitario. De tener la medida real de cada una de las represas, los cálculos presentados anteriormente serán equivalentes a cuando se tengan las medidas reales.
7. Como podemos ver en la figura 22, el peso de un muro de 237t es el que daría solución a las acciones del caso más crítico, he aquí la respuesta de por qué los gaviones no fueron una solución anteriormente. Se figura que la anterior intervención no fue analizada con precisión.
8. No está demostrado con entereza que la construcción de las represas dé solución a problemas de inundación por agua o por flujo descontrolado de detritos a la localidad aguas abajo.
9. Al análisis del caso 3 con anclas mediante el *software* Geo, supone un estrato continuo de arena más allá de la profundidad de los pilotes, por lo que, para obtener resultados reales, es necesario realizar un estudio de mecánica de suelos para determinar la profundidad de un posible lecho rocoso fiable.
10. En el caso de los muros de contención, se debe analizar y verificar el contenido de humedad a manera de determinar si se debe o no considerar el posible empuje hidrostático del agua de un suelo saturado o semi-saturado que contienen.
11. Debido a que las compuertas se clasifican como de riesgo bajo, para dar respuesta a la construcción del tanque disipador, podría resultar factible la adecuada colocación y anclaje de rocas que se aproximen al dimensionamiento del mismo a manera de dentellones de manera que cumplan con el objetivo de un tanque.

6.3 Simulación de Escenarios y Propuesta de Intervención para la Mitigación de Inundaciones en la Zona Poniente de Guadalajara.

6.3.1. Arroyo Tecolote

Reconocimiento

Se realizó un recorrido por diferentes puntos en la cuenca del arroyo, desde el bosque La Primavera hasta la ciudad. Los lugares revisados representan posibilidades de intervención, para la implementación de sistemas de gestión del agua. Se visitó una de las zonas en las que se concentran problemas de inundaciones, en el límite de la cuenca, en la descarga de un canal de El Tecolote al Arroyo Seco. De acuerdo con la situación observada y testimonios locales, se pudo confirmar la existencia de un problema de inundaciones. Unas cuerdas antes, se identificó un terreno vacío, por el que atraviesa El Tecolote. Por su posición y características, se propuso como zona de intervención para implementar un proyecto de solución.



Figura 19. Reconocimiento en sitio de zona de inundaciones, intersección arroyos El Tecolote y Seco



Figura 20. Terreno vacío que se propone como lugar de intervención, en una ubicación cercana al punto de inundaciones

El terreno específico para el proyecto, en la cuenca El Tecolote, se eligió de acuerdo con la información ambiental presentada previamente, así como el trabajo de campo y los modelos computacionales. La selección del lugar permitió trabajar con características ambientales más concretas. También implicó la oportunidad de reconocer mejor las características sociales y económicas de la región.

A continuación se muestra el polígono de la cuenca El Tecolote, poniente sur del AMG, en la que se plantea desarrollar la propuesta de infraestructura. También se registra, como referencia, la cuenca Arroyo Seco, que colinda con la del proyecto y cuyo cauce tiene efectos directos en el problema de inundaciones estudiado. Después se señala la ubicación específica del terreno sugerido, en el AMG, colonia La Florida. También se incluye una figura de su área, de 61,357.5 km².



Figura 21. Cuenca Arroyo El Tecolote



Figura 22. Cuenca Arroyo Seco

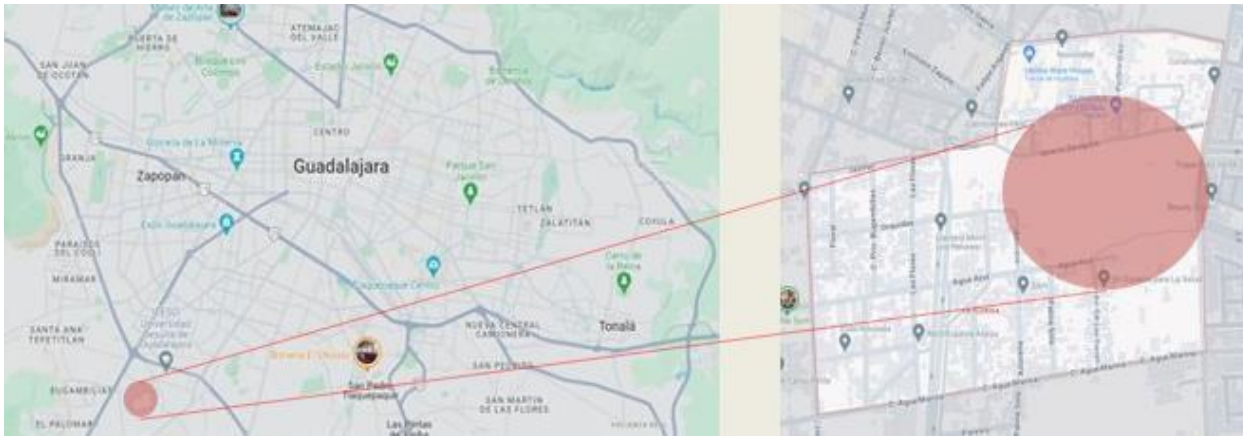


Figura 23. Localización de la zona de intervención propuesta, AMG

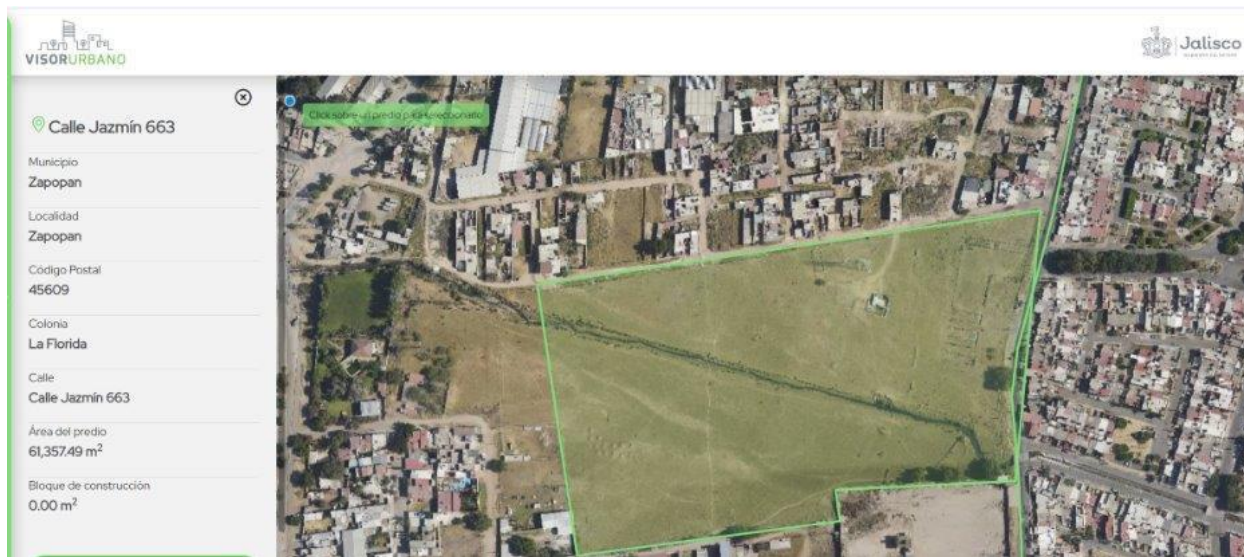


Figura 24. Polígono del área de intervención

El curso del agua baja desde el bosque La Primavera, en un extremo de la cuenca, y viaja siguiendo la pendiente del territorio, hasta La Florida, en el otro extremo. En esa ubicación, desemboca en el Arroyo Seco, del que por lo tanto consituye una subcuenca. El terreno del vaso se localiza poco antes de la salida aguas abajo. Se planea que la estructura acumule un volumen de agua que excedería la capacidad de carga del canal en caso de lluvias intensas. Este estancamiento disminuye el caudal, lo que controla el desbordamiento y evita inundaciones. Posteriormente a la lluvia, el agua continúa fluyendo afuera del vaso, con el gasto máximo que puede contener el aforo del cauce.

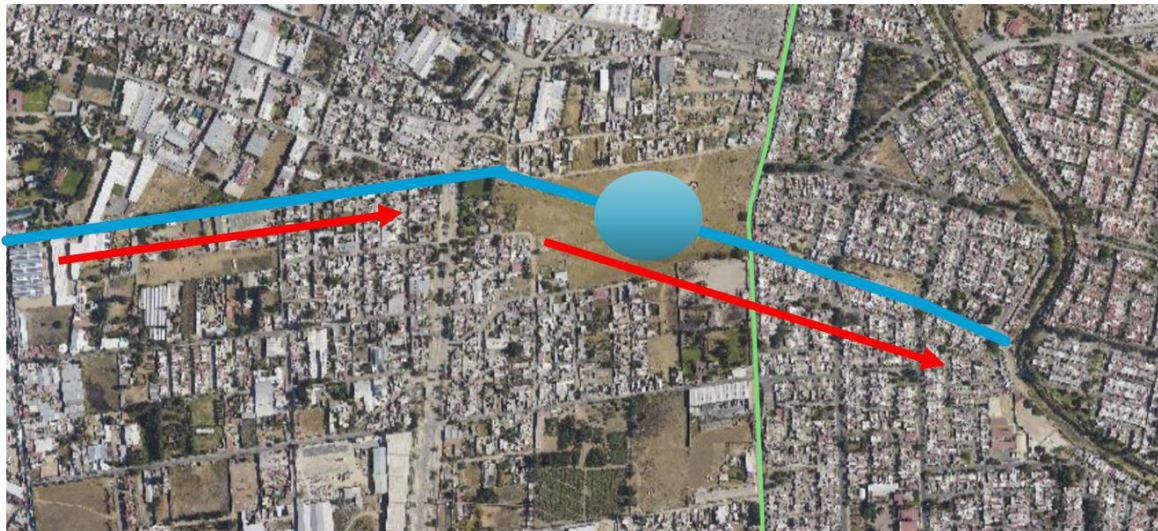


Figura 25. Diagrama de la trayectoria del cauce y la posición del vaso regulador

El Plan de desarrollo urbano, según el Visor Urbano, implica que la parcela en cuestión se sugiere utilizar para fines comerciales, habitacionales e infraestructura pública. Pero el desarrollo de vías públicas, que se parecía señalar, se dificulta en la actualidad. En donde hubiera sido la continuación de las calles planteadas (y lo que parece un parque lineal), ahora se encuentran construidas viviendas. Así pues, si el predio no se puede usar para los fines propuestos anteriormente, se puede buscar que se aproveche para otra infraestructura pública, en este caso, el vaso y áreas verdes.

Los problemas que conllevaría la urbanización del predio son discutidos en un apartado posterior. Por otro lado, hay líneas de electricidad instaladas en el lugar, lo que obstaculizaría la construcción de casas o comercios. Otra consideración administrativa que se tiene que revisar es la legislación que establece que las riberas afectadas por inundaciones, como es el caso de esta superficie, son zonas federales.



Figura 26. Detalle del Plan de desarrollo urbano, en la ubicación del proyecto

Uno de los principales desafíos para la construcción del vaso se deriva de la situación de propiedad de la zona de intervención. Como se comprueba en el Registro agrario nacional (según se puede revisar en Mapas Jalisco), es terreno ejidal, zona parcelada. Esto implica la necesidad de negociar con la junta ejidal para poder implementar cualquier infraestructura en la localización.

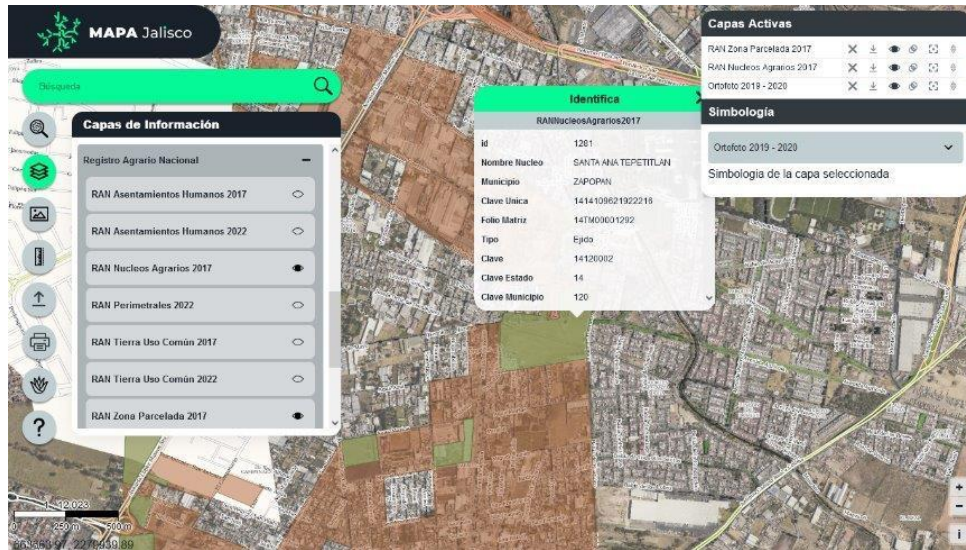


Figura 27. Detalle del Registro agrario nacional en la ubicación del proyecto

Descripción de la Intervención

Descripción de la propuesta

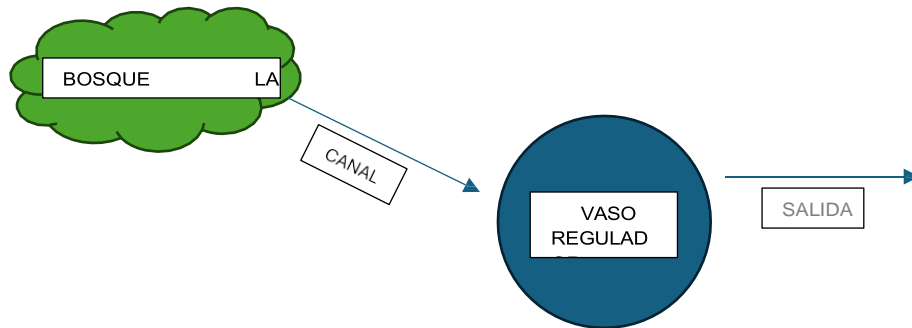
El vaso regulador estará compuesto por una serie de componentes diseñados para gestionar eficazmente el flujo de agua. La estructura principal consistirá en un gran estanque o depósito subterráneo con capacidad suficiente para manejar las lluvias más severas esperadas en la región. Este depósito contará con un sistema de entrada y salida de agua, canales y tuberías que dirigirán el agua hacia el vaso regulador durante las lluvias y permitirán su liberación controlada una vez que el evento haya pasado.

Antes de la liberación, el agua almacenada pasará por un sistema de filtración y tratamiento, garantizando que cualquier contaminante sea removido y que el agua devuelta al medio ambiente esté limpia y segura. Esta medida es crucial para proteger los cuerpos de agua circundantes y la salud pública.

Además de su función principal, el vaso regulador será integrado con áreas verdes y paisajismo, creando un espacio recreativo para la comunidad y mejorando la estética del área. Las zonas verdes actuarán como amortiguadores adicionales, absorbiendo parte del exceso de agua y proporcionando beneficios ecológicos y sociales.

El funcionamiento del vaso regulador se espera que siga un ciclo eficiente: captación del agua durante las lluvias, almacenamiento temporal en el depósito, filtración y tratamiento, y liberación controlada del agua. Este proceso reducirá la probabilidad de inundaciones, protegerá la infraestructura local y mejorará la resiliencia de la comunidad ante eventos climáticos extremos.

La implementación de este vaso regulador no solo proporcionará una solución técnica para el manejo del agua pluvial, sino que también contribuirá a un desarrollo urbano sostenible y resiliente. Al integrar espacios verdes y áreas recreativas, la propuesta también busca mejorar la calidad de vida de los residentes de la Colonia La Florida y promover un entorno más seguro y saludable.



El gráfico ilustra el proceso de captación, almacenamiento y liberación del agua pluvial mediante el vaso regulador. Los componentes principales son mencionados a continuación.

Captación de agua: el agua pluvial es dirigida hacia el vaso regulador desde el área de captación.

Vaso regulador: el agua se almacena temporalmente en este estanque para evitar inundaciones.

Liberación controlada: el agua almacenada se libera gradualmente para no sobrecargar el sistema de drenaje.

Esta intervención está diseñada para manejar grandes volúmenes de agua pluvial, reducir el riesgo de inundaciones y proteger la salud y la infraestructura de la Colonia La Florida.

Tecnologías similares a la propuesta

Existen varias tecnologías y soluciones similares a un vaso regulador que se utilizan para gestionar y mitigar el impacto de las inundaciones urbanas y el exceso de agua pluvial.

Reservorios subterráneos

Similar a los vasos reguladores, estos reservorios almacenan agua bajo tierra. Pueden ser tanques grandes o sistemas de celdas modulares que captan y retienen el agua pluvial temporalmente, liberándola lentamente para evitar inundaciones.

Pozos de infiltración

Estos pozos permiten que el agua de lluvia se infiltre en el suelo, recargando los acuíferos subterráneos y reduciendo el volumen de escorrentía superficial.

Sistemas de retención de agua en superficie

Incluyen estanques y lagunas artificiales diseñados para retener el agua pluvial. Estos sistemas permiten que el

agua se acumule durante eventos de lluvia intensa y se libere gradualmente.

Jardines de lluvia

Son áreas ajardinadas diseñadas para capturar y absorber el agua de lluvia. Utilizan plantas nativas y suelos permeables para facilitar la infiltración y reducir la escorrentía.

Techos verdes

Cubiertas vegetales instaladas en los techos de edificios que absorben y retienen el agua de lluvia, reduciendo la cantidad de agua que llega al sistema de drenaje urbano.

Pavimentos permeables

Superficies pavimentadas que permiten la infiltración del agua pluvial en lugar de rechazarla. Son útiles para estacionamientos, calles y aceras.

Tanques de tormenta

Grandes estructuras subterráneas que almacenan agua de lluvia durante eventos de alta precipitación, liberándola de manera controlada posteriormente.

Pertinencia para la ciudad

El personal de IMEPLAN expresó que la idea del vaso regulador es muy buena y les gustaría implementarla. No obstante, hicieron hincapié en que es necesario desarrollar una propuesta que integre un espacio público. También señalaron la importancia de verificar la titularidad del terreno en cuestión, ya que es crucial determinar si es de carácter ejidal, municipal o privado. Para obtener esta información, recomendaron consultar el Registro agrario nacional, entre los mapas de Jalisco. Destacaron que, en caso de que el terreno sea ejidal, el proyecto se enfrentaría con un problema administrativo sumamente complejo. Por lo tanto, es fundamental aclarar la situación de la propiedad del terreno antes de avanzar con la propuesta del vaso regulador.



Imagen 3. Ortofoto (vista satelital) del área propuesta para la implementación del vaso regulador, también se observa la zona de inundaciones aguas abajo

En la página de Mapas Jalisco (Imagen 3) se confirma que el terreno es ejidal. Sin embargo, se decidió continuar con la propuesta de intervención. La negociación con el ejido será necesaria como parte de las actividades de seguimiento en relación con el proyecto. Se sugiere la integración de la infraestructura con espacios públicos, habitacionales y comerciales, para aumentar el valor comercial del terreno. Esto puede ayudar al buscar un acuerdo con los actuales propietarios.

Sitio elegido

Ubicación

La colonia La Florida se encuentra en los municipios de Tlaquepaque y Zapopan, en el estado de Jalisco, México. Esta área está situada en la microcuenca del arroyo El Tecolote, que desciende desde el Bosque de la Primavera. En la Imagen 4 se observa la topografía del lugar.

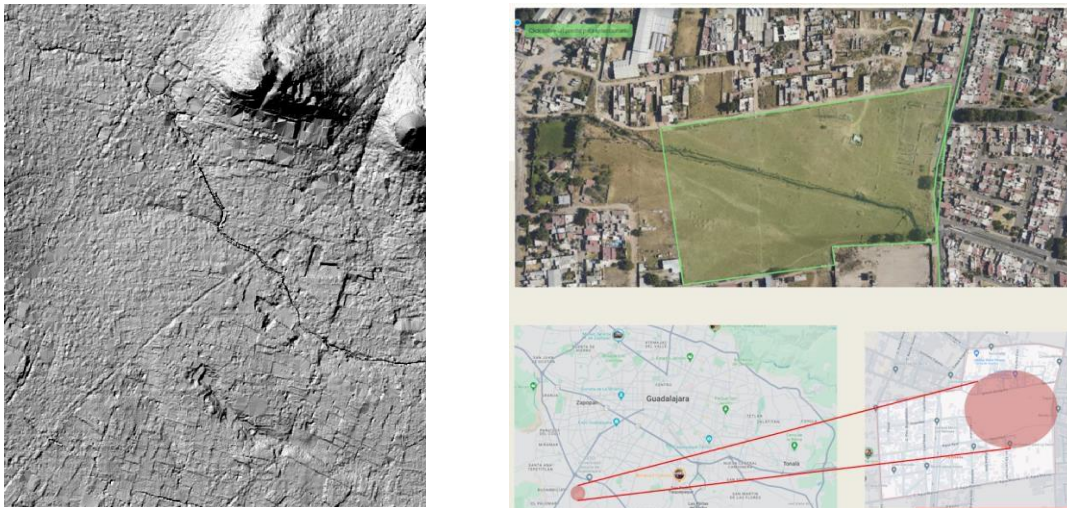


Imagen 4. Detalle del Mapa digital de elevación de la zona y sus alrededores en el poniente sur del Área metropolitana de Guadalajara

Imagen 5. Delimitación del polígono del terreno propuesto como zona de intervención, también se muestra su localización en el Área Metropolitana de Guadalajara

Estudios de Mecánica de Suelos

Para el análisis de mecánica de suelos, se ha elegido el sitio más cercano a la colonia La Florida. Según estudios recientes, los suelos en esta área presentan las siguientes características:

Tipos de Suelo

- Arcilloso: con alta retención de agua y baja permeabilidad.
- Arenoso: con buena capacidad de drenaje y alta permeabilidad.
- Limoso: con características intermedias entre los suelos arcillosos y arenosos. Permeabilidades del Suelo
- Arcilloso: permeabilidad baja (10^{-7} a 10^{-9} m/s).
- Arenoso: permeabilidad alta (10^{-3} a 10^{-5} m/s).
- Limoso: permeabilidad moderada (10^{-5} a 10^{-7} m/s).

La elección de estos tipos de suelo se basa en estudios previos de la región, indicando una mezcla de estas características en la microcuenca del arroyo El Tecolote.

Hidrología

Problema a nivel cuenca

El arroyo El Tecolote recoge agua pluvial del Bosque de la Primavera, conduciendo grandes volúmenes de agua hacia la colonia La Florida durante eventos de lluvia intensa. La microcuenca, que incluye áreas urbanizadas y naturales, enfrenta problemas de manejo de aguas pluviales debido a la combinación de topografía y cambios en el uso del suelo.

Factores hidrológicos

- Escorrentía superficial: aumentada por la urbanización, que reduce las áreas permeables.
- Nivel freático: según un estudio de IMEPLAN, el nivel freático en esta área es relativamente alto, lo que contribuye a la saturación del suelo durante las lluvias intensas.
- Infiltración: reducida en áreas urbanizadas debido a superficies impermeables, lo que aumenta la escorrentía superficial.

Propuesta de intervención: vaso regulador

Ubicación del vaso regulador

El vaso regulador se ubicará estratégicamente en un terreno disponible dentro de la microcuenca, cerca del punto donde el arroyo El Tecolote entra a la Colonia La Florida. Este sitio permitirá capturar el máximo volumen de agua pluvial antes de que cause inundaciones en áreas residenciales.



Imagen 6. Representación sobre el plano del vaso regulador y el cauce de agua

Componentes y funcionamiento

- Área de captación: captará agua pluvial desde el arroyo y superficies urbanas adyacentes.
- Estructura de almacenamiento: un gran estanque subterráneo con capacidad para manejar eventos de lluvia severa.
- Sistema de entrada y salida: canales que dirigen el agua hacia el vaso regulador y controlan su liberación.
- Áreas verdes y paisajismo: zonas ajardinadas para mejorar la absorción del agua y ofrecer espacios recreativos.

Beneficios esperados

- Reducción del riesgo de inundaciones: almacenar temporalmente grandes volúmenes de agua pluvial y liberar el exceso de manera controlada.
- Protección de infraestructuras: minimizar el impacto de las inundaciones en infraestructuras críticas y residenciales.
- Espacios verdes: crear áreas recreativas y mejorar la estética del entorno urbano.
- Sostenibilidad y resiliencia: fomentar un desarrollo urbano sostenible y resiliente ante eventos climáticos extremos.

Esta intervención representa una solución integral basada en los estudios hidrológicos y de mecánica de suelos, adaptada a las necesidades específicas de la Colonia La Florida y sus características ambientales.



Imagen 7. Estado actual de la parcela desocupada en que se pretende construir el vaso regulador

Imagen 8. Zona de inundaciones aguas abajo, en el punto de intersección entre los arroyos El Tecolote y Río Seco

Simulación de la Propuesta

Se consideran tres escenarios posibles: el estado actual, la urbanización y la implementación del vaso regulador. El primero se representó en el análisis de cuenca. En ese caso, continúan los problemas hidrológicos presentes. Pero lo más probable es que en un futuro se busque urbanizar el terreno señalado. Esta posibilidad se ha modelado en IBER. Los resultados se adjuntan a continuación.

Como se observa en los mapas de calado máximo, el cambio de suelo a uso urbano provocaría mayor retención de agua en el terreno que hasta ahora se encuentra desocupado. Al mismo tiempo, se reduce el calado aguas abajo. Sucede algo similar en los mapas de peligrosidad. Si bien, la peligrosidad disminuye en el área de inundaciones actual, se incrementa en el terreno de la hipotética construcción urbana. Este escenario conlleva entonces mayores problemas que el estado actual de cosas. Aumenta considerablemente la cantidad de agua y peligrosidad en puntos, ahora urbanizados, donde se encontrarían personas en sus casas o en actividades económicas.

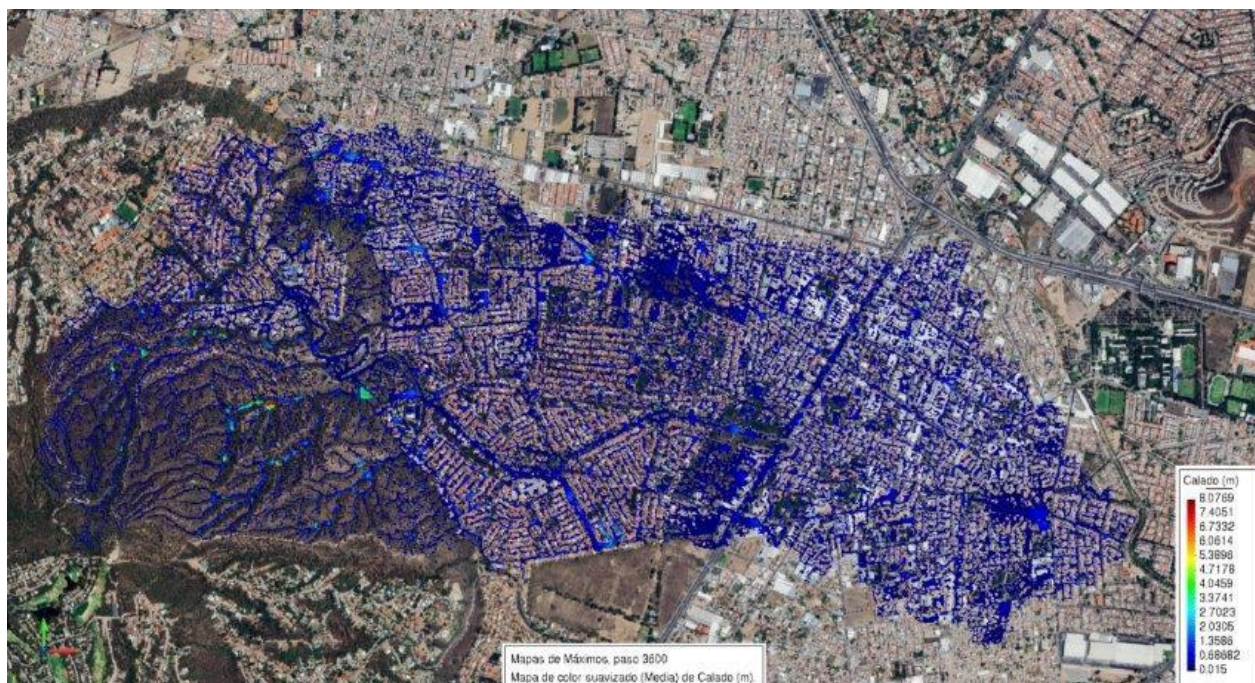


Figura 28. Mapa de calado máximo, escenario de urbanización en la zona considerada para intervención, cuenca El Tecolote



Figura 28. Mapa de calado máximo, acercamiento al escenario de urbanización en la zona considerada para intervención

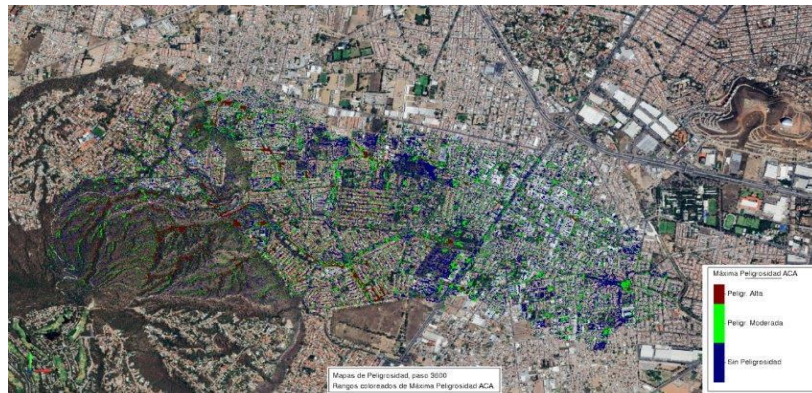


Figura 28. Mapa de peligrosidad máxima, escenario de urbanización en la zona considerada para intervención, cuenca El Tecolote



Figura 28. Mapa de peligrosidad máxima, acercamiento al escenario de urbanización en la zona considerada para intervención

La simulación en IBER permite estimar los efectos de un vaso regulador en el punto del cauce que se ha mencionado. En los mapas, hay un incremento del calado en el vaso y una disminución aguas abajo. Lo mismo sucede con la peligrosidad (hay unos sectores en los que aún hay alta peligrosidad después del vaso, esto se debe a la acumulación de agua en la salida al Arroyo Seco). La ventaja de este escenario es que reduce el riesgo para la población que actualmente vive en áreas de inundaciones, sin trasladarlo a otras personas. La concentración de agua y peligrosidad se queda en la infraestructura del vaso. Esto significa que, según la aproximación de IBER, el vaso cumple con su función planeada.

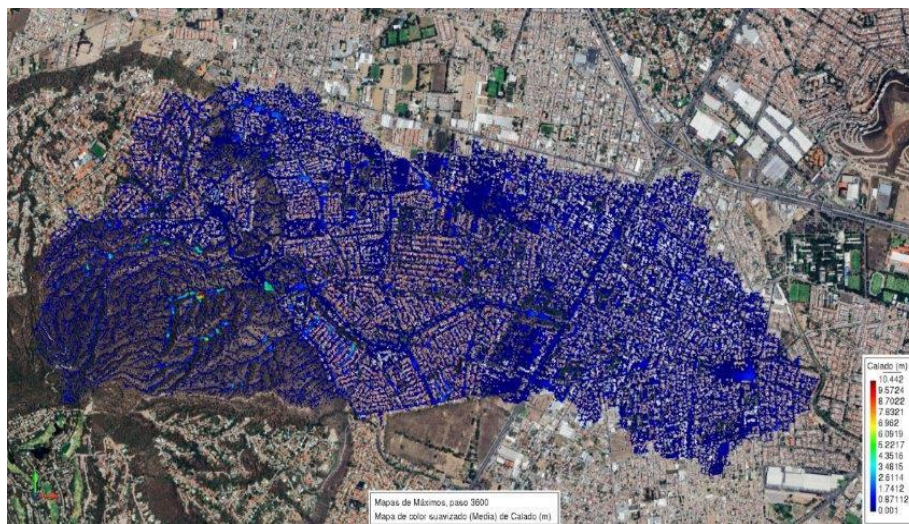


Figura 29. Mapa de calado máximo, escenario de implementación de un vaso regulador en la zona considerada para intervención, cuenca El Tecolote



Figura 30. Mapa de calado máximo, acercamiento al escenario de implementación de un vaso regulador en la zona considerada para intervención

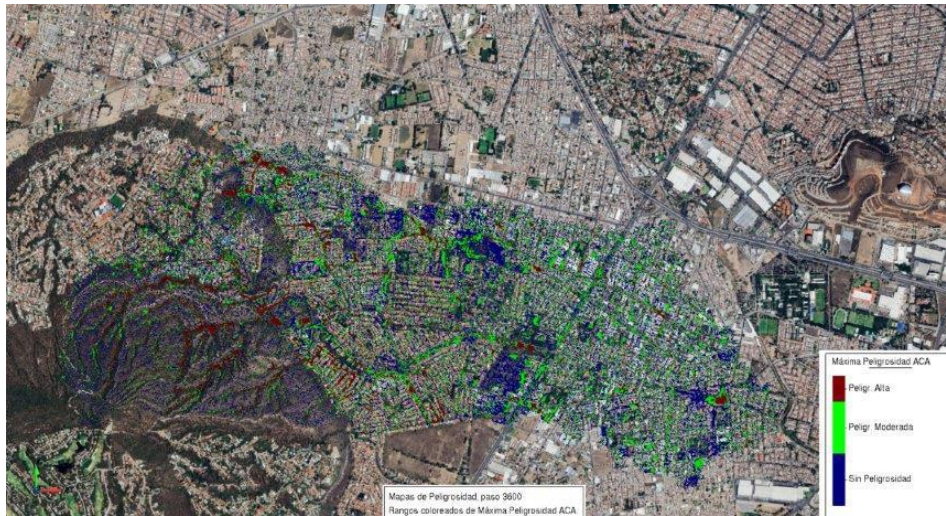


Figura 31. Mapa de peligrosidad máxima, escenario de implementación de un vaso regulador en la zona considerada para intervención, cuenca El Tecolote

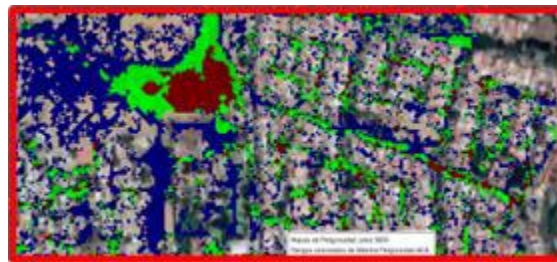


Figura 32. Mapa de peligrosidad máxima, acercamiento al escenario de implementación de un vaso regulador en la zona considerada para intervención, cuenca El Tecolote

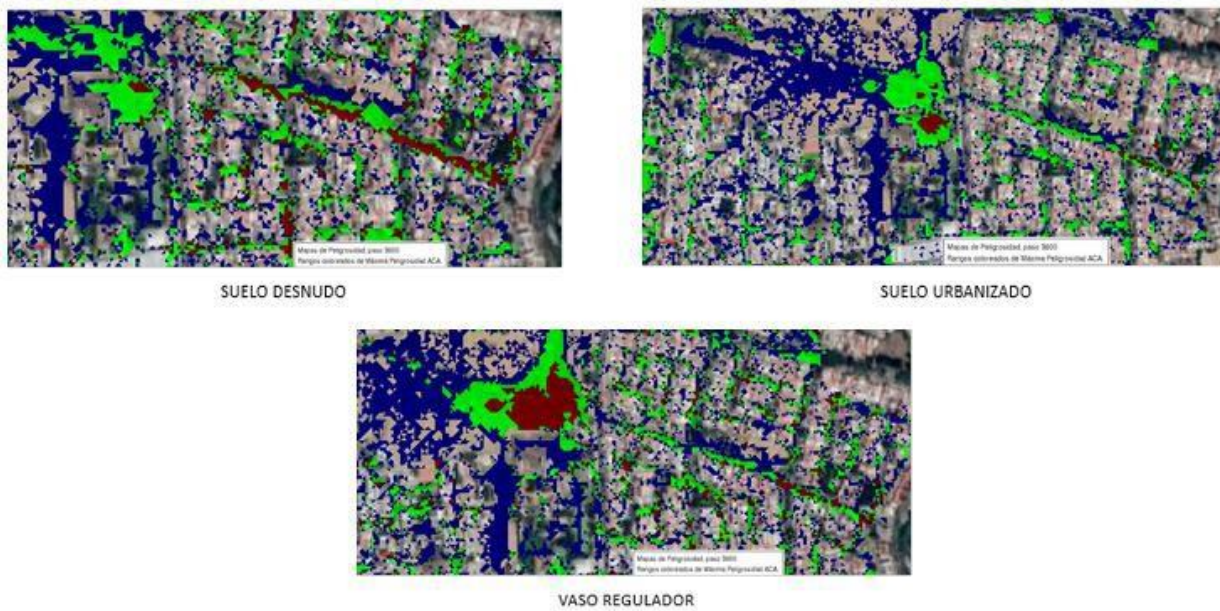


Figura 33. Mapas de peligrosidad en la zona de intervención, comparaciones entre los diferentes escenarios

Análisis y Discusión

El modelo en IBER permite aproximar información de los efectos, en la cuenca, de la propuesta de vaso regulador. En el detalle de la Imagen 10, el calado es alto en el terreno que ocuparía el proyecto. El mayor nivel se concentra en la salida del vaso, porque el movimiento del agua se dirige hacia la desembocadura. Pero esta acumulación implica que el vaso capta más agua que la que deja salir, lo que significa que cumple con su propósito como mecanismo de retención.

El volumen estancado en ese punto, de otra forma, se encontraría distribuido en la cuenca, con un mayor caudal. El calado aguas abajo es comparativamente menor. Al final del canal todavía hay cierta altura de agua, lo que se debe a que es un punto de descarga en que interseca con el Arroyo Seco.

Los mapas de peligrosidad, que consideran calado y velocidad, son otra forma de comprender el impacto del vaso. En la Imagen 12, el comportamiento de esta variable es similar al observado en los mapas de calado. Hay un alto nivel de peligrosidad en el área de intervención, pero se encuentra contenida por el vaso. La mayor peligrosidad coincide con la acumulación de agua en la estructura.

Tanto en magnitud como en extensión, la peligrosidad es menor después de la salida del vaso. Se encuentra en un nivel medio en la trayectoria del canal, lo que se debe al volumen de agua transportado por el mismo. Siguiendo su trayectoria, conforme se acerca a la desembocadura el valor de peligrosidad aumenta. Los altos niveles corresponden al mayor calado que causa el encuentro con el Río Seco.

Conclusiones

La solución propuesta es un proyecto que mejora las condiciones de la cuenca El Tecolote, en relación con la problemática hidrológica. Se basa en las principales características ambientales, urbanas y sociales del sistema. Se sustenta en trabajo científico, reconocimiento en sitio y modelos computacionales. La simulación obtenida refleja resultados positivos, según lo esperado.

Según se puede evaluar con la información reportada, el proyecto de vaso regulador logra los resultados planteados como objetivos. En los casos de los indicadores revisados, en particular calado y peligrosidad, se puede notar que el mecanismo propuesto cumple con su función de amortiguamiento y concentra altos niveles de las variables. De no encontrarse esta infraestructura, como en la actualidad, los efectos de esa carga hídrica impactan en el resto de la cuenca de El Tecolote. En especial, continuarían los problemas aguas abajo en el canal del arroyo, punto de mayor riesgo por la intersección con otro cauce. Además de la idea que proporciona al respecto el programa en IBER, esto ha sido confirmado por el reconocimiento de campo que se realizó en el sitio. También se verifica por el testimonio de vecinos que viven ahí.

En cambio, la propuesta de implementación del vaso permite predecir menores niveles en los parámetros revisados, en el área más afectada en la actualidad. Por lo tanto, el impacto del vaso es benéfico y de acuerdo con lo planeado. Se espera que esto se vea reflejado en la seguridad y economía local, así como en el medio ambiente.

Hay algunas líneas a seguir para continuar con el proyecto. Se busca mejorar el modelo en IBER, con herramientas computacionales e información precisa del medio ambiente. La infraestructura se puede complementar, por ejemplo, en los componentes arquitectónicos o económicos, entre otros. Es importante establecer comunicación

con los propietarios ejidales. Es muy recomendable complementar el mecanismo de control de inundaciones con un sistema de infiltración para la recarga de acuíferos, a nivel localización o cuenca.

Se recomienda continuar desarrollando el proyecto. Hay aspectos de la estructura que aún se pueden especificar. El modelo será más exacto con información que se debe recopilar en campo. Esto, junto con la aplicación de más funciones y herramientas de IBER, permite diseñar una simulación más precisa, que aporte una mejor idea de las posibilidades y limitaciones del proyecto.

La opción de agregar espacios públicos hace el proyecto más interesante para las instituciones de planeación urbana y amplía el componente arquitectónico. Otro punto clave del seguimiento es que será necesario negociar con el ejido, lo cual complejiza la cuestión política y administrativa. Es necesario establecer pláticas con la junta ejidal para confirmar la viabilidad. Además de los beneficios a la comunidad, hay algunas estrategias que pueden mejorar la posición de la propuesta en los diálogos.

Por ejemplo, las características del vaso hacen posible construirlo como un subterráneo, lo que permitiría el aprovechamiento de la superficie para obras habitacionales o comerciales. Esto, si bien aumenta la dificultad del desafío estructural desde el punto de vista de la ingeniería civil, hace la propuesta más atractiva en el aspecto de inversión y venta, lo que facilita la promoción de la idea.

El potencial de contribución es positivo en términos del principal objetivo del proyecto, que es la reducción de inundaciones. El plan se puede complementar con sistemas de infiltración y recarga de acuíferos, sea en relación con la infraestructura en cuestión o al nivel cuenca. En la región urbana, se pueden aprovechar pozos existentes o algunas características de la industria y los espacios verdes. La cercanía con el bosque es otro factor que puede contribuir a seguir con la elaboración de soluciones.

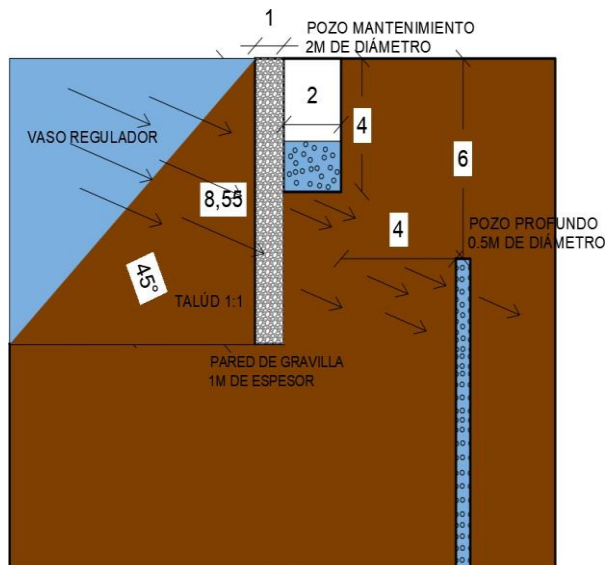
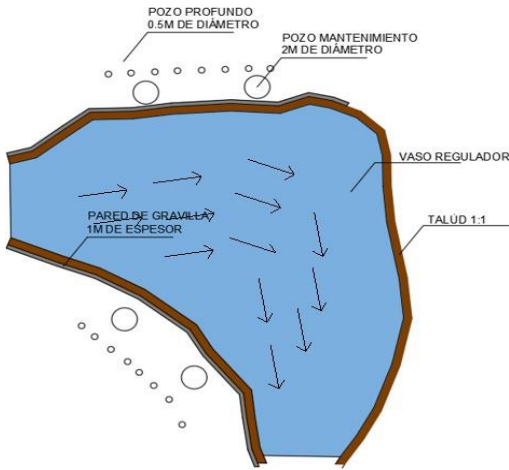
6.3.2. Arroyo Seco

Objetivo de la intervención

Optimizar el funcionamiento del vaso regulador existente mediante recarga en profundidad para reducir la sobrecarga de agua y recargar el manto acuífero de la zona en la cuál será implementada la propuesta. El punto de intervención está en Colorines 25, La Floresta del Colli, Colinas de la Primavera, 45068 Zapopan, Jal. Se eligió esta zona, principalmente por la calidad del agua que presenta el arroyo y por la fácil intervención que tiene al no estar rodeado de zonas urbanas.

Explicación del método a utilizar. Recarga en profundidad

Inyectar el agua en el acuífero mediante pozos verticales o galería de infiltración. La propuesta del proyecto es infiltrar 1 m^3 al manto acuífero. Utilizaremos el método de Bourguet (1971). También se harán simulaciones de la zona a trabajar, donde lograremos destacar la importancia de intervenir en la zona seleccionada y el comportamiento que tendrá, siendo así IBER la plataforma seleccionada y Rockscience para los temas de infiltración.



Pertenencia para la ciudad

Retroalimentación IMEPLAN.

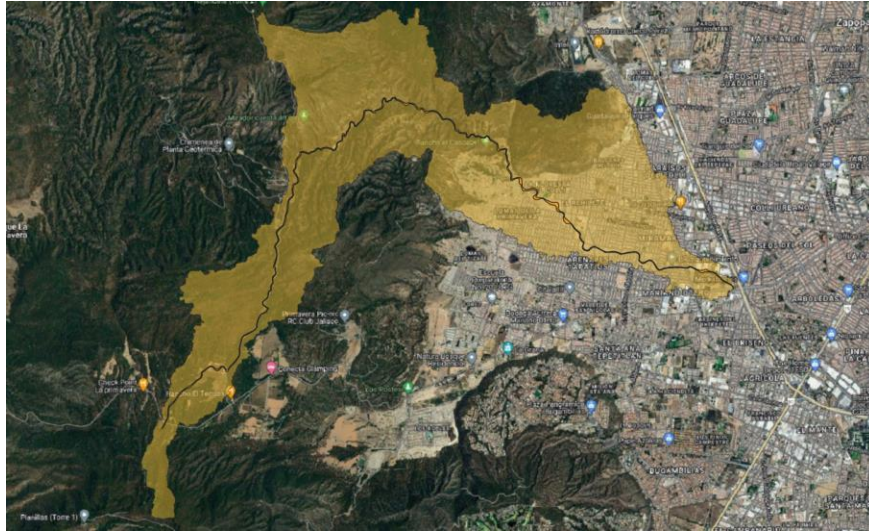
Después de platicar con el titular de la dirección de planeación metropolitana Josué Díaz Vázquez, logramos obtener un visto bueno a la implementación que se busca colocar en el vaso regulador antes mostrado. El único problema que se

logró apreciar fue el quien es dueño del terreno y cómo podemos seguir avanzando con ello para que se pueda implementar el proyecto. Logramos llevar un reporte estructurado con información concreta y variada del razonamiento del proyecto, logrando así la satisfacción del personal.

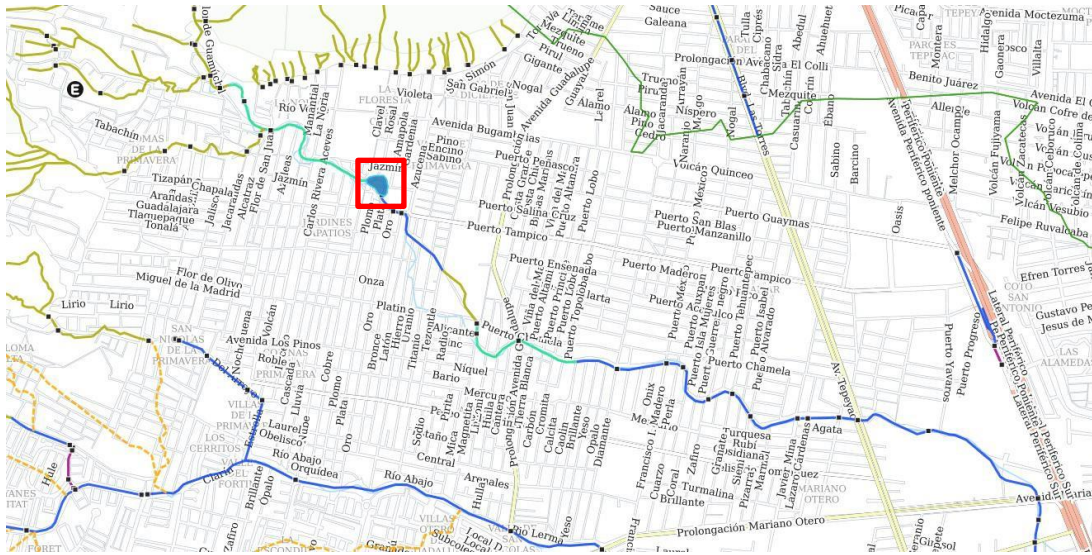
Sitio elegido

Explicación:

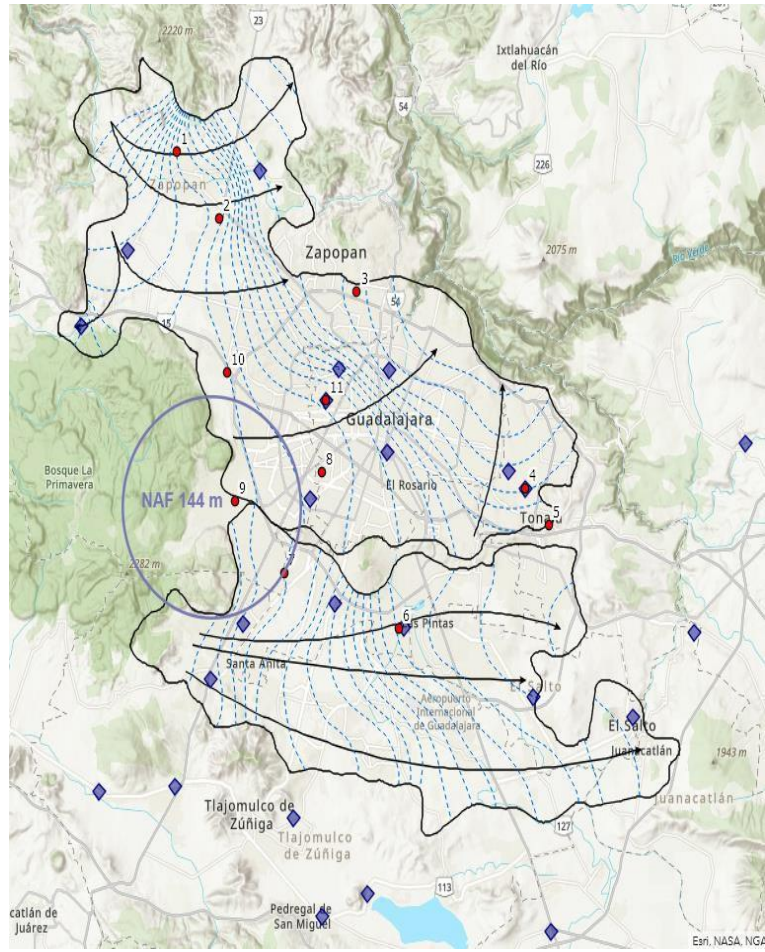
Cuenca



Arroyo seco y vaso regulador correspondiente



Nivel freático y flujo de agua desde la primavera



Hidrología

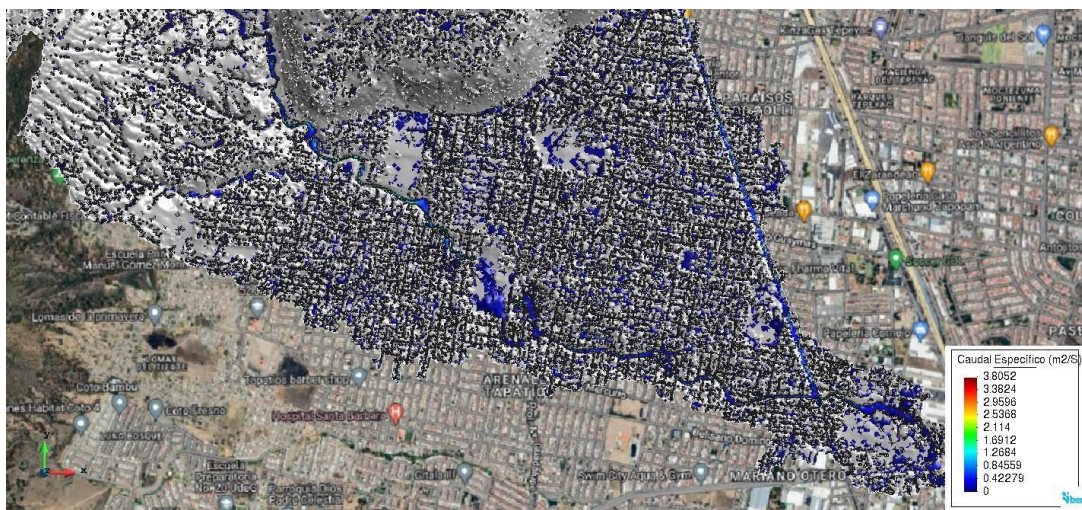
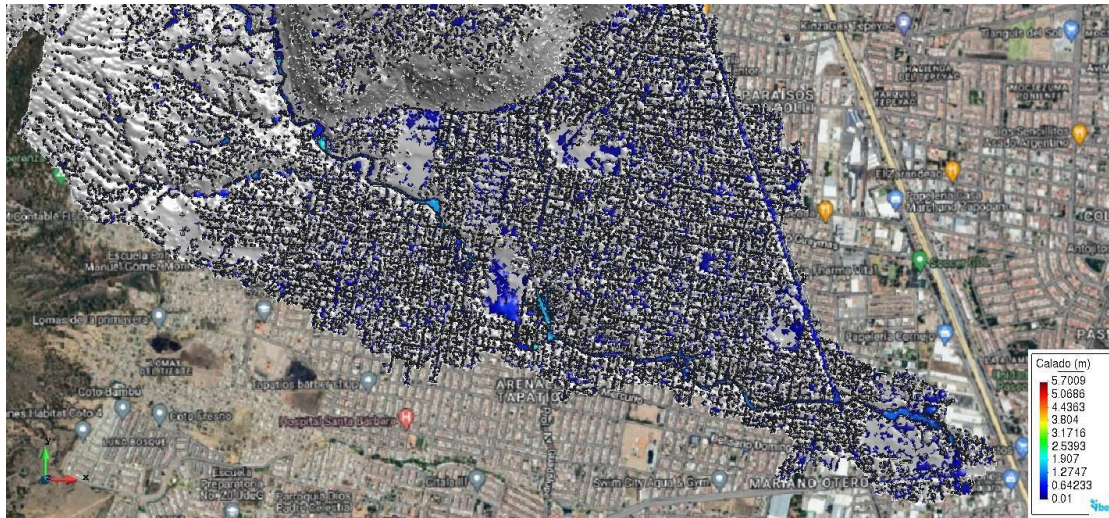
Tabla 18. Lluvias de diseño correspondientes a una duración de 60 minutos para diferentes periodos de retorno.

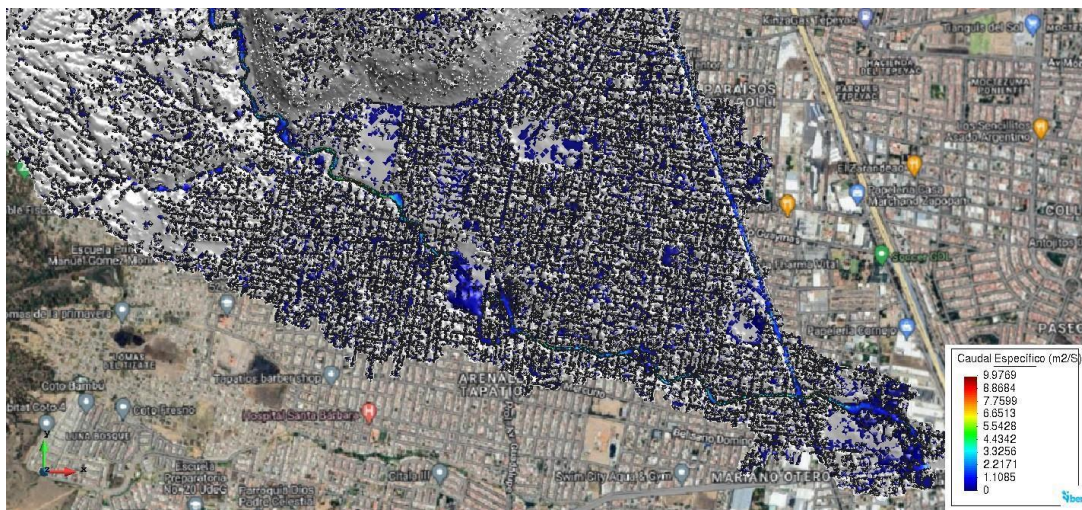
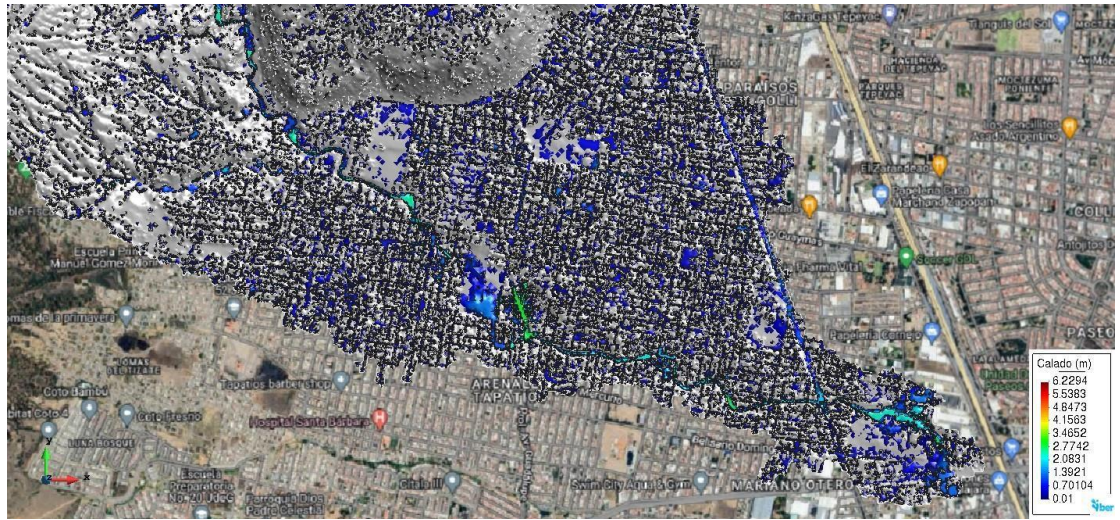
Tiempo		Precipitación acumulada en mm asociada a un periodo de retorno en años				
min	TR - 2	TR - 5	TR - 10	TR - 15	TR - 20	TR - 25
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	7.35	9.33	10.63	11.48	12.26	12.85
12	17.21	21.85	24.88	26.87	28.70	30.08
18	32.09	40.74	46.38	50.09	53.50	56.08
24	42.13	53.49	60.89	65.77	70.23	73.63
30	49.75	63.16	71.90	77.66	82.94	86.95
36	52.64	66.83	76.08	82.17	87.76	92.00
42	54.94	69.76	79.41	85.77	91.60	96.03
48	56.08	71.20	81.05	87.55	93.50	98.02
54	56.81	72.13	82.11	88.69	94.71	99.29
60	57.33	72.79	82.86	89.50	95.58	100.20

Tiempo		Precipitación acumulada en mm asociada a un periodo de retorno en años				
min	TR - 50	TR - 100	TR - 500	TR - 1,000	TR - 5,000	TR - 10,000
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	14.04	15.31	17.61	18.78	21.19	22.38
12	32.86	35.85	41.23	43.97	49.60	52.38
18	61.26	66.84	76.86	81.98	92.46	97.66
24	80.43	87.75	100.91	107.63	121.39	128.21
30	94.97	103.62	119.16	127.10	143.35	151.40
36	100.49	109.64	126.08	134.48	151.68	160.20
42	104.89	114.45	131.60	140.37	158.32	167.21
48	107.06	116.82	134.33	143.28	161.60	170.68
54	108.45	118.33	136.07	145.14	163.70	172.89
60	109.45	119.42	137.32	146.47	165.20	174.48

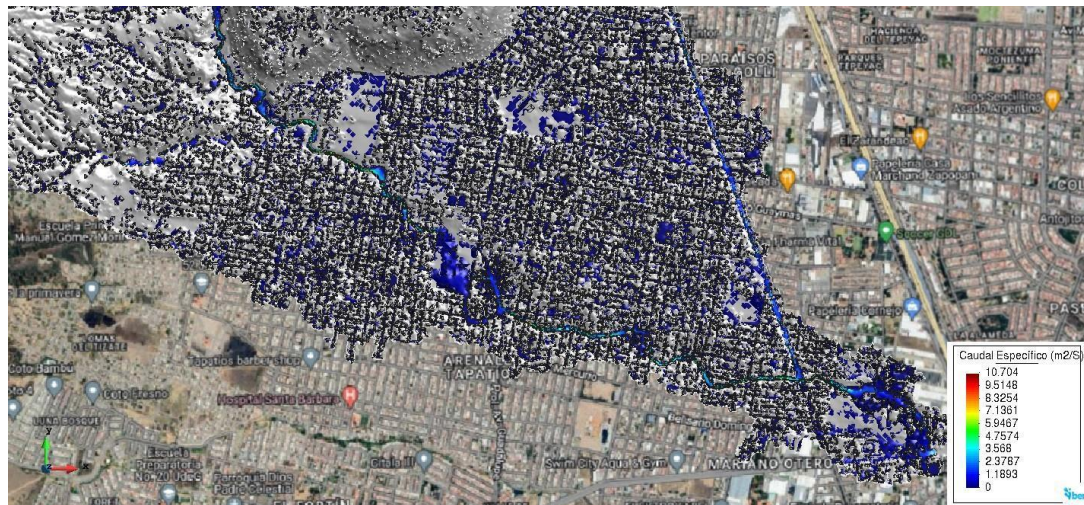
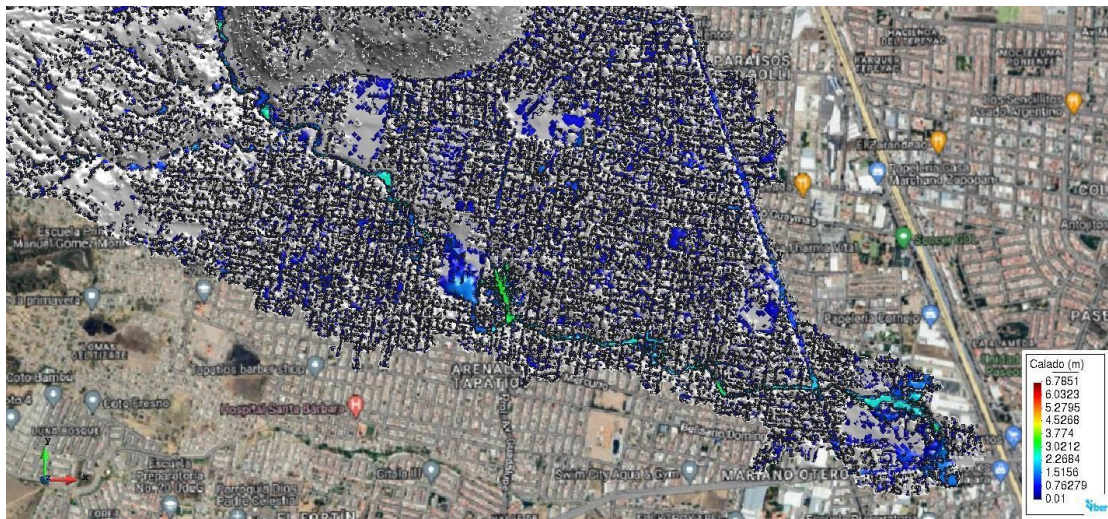
Resultados

Simulaciones IBER antes de la intervención: Período de retorno 2 años:



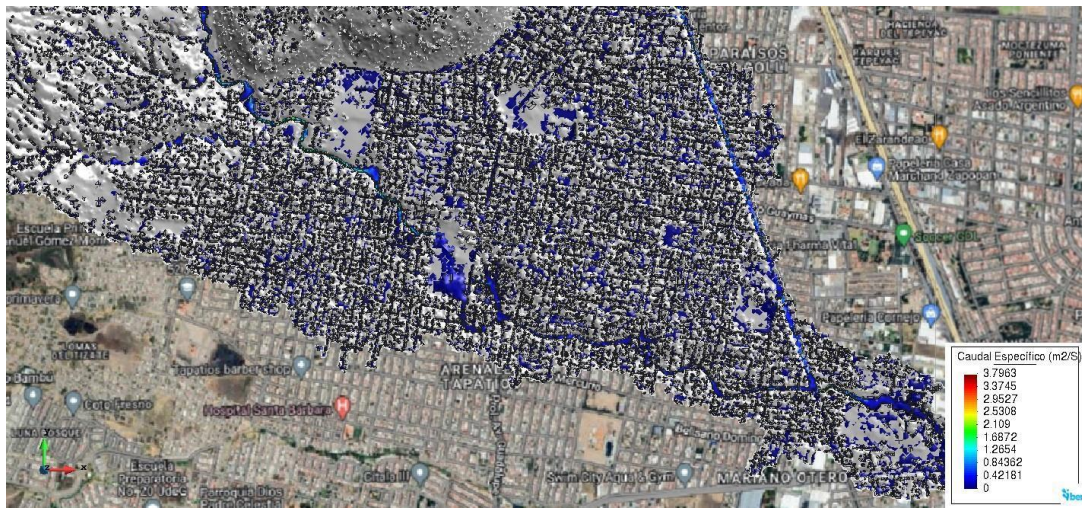
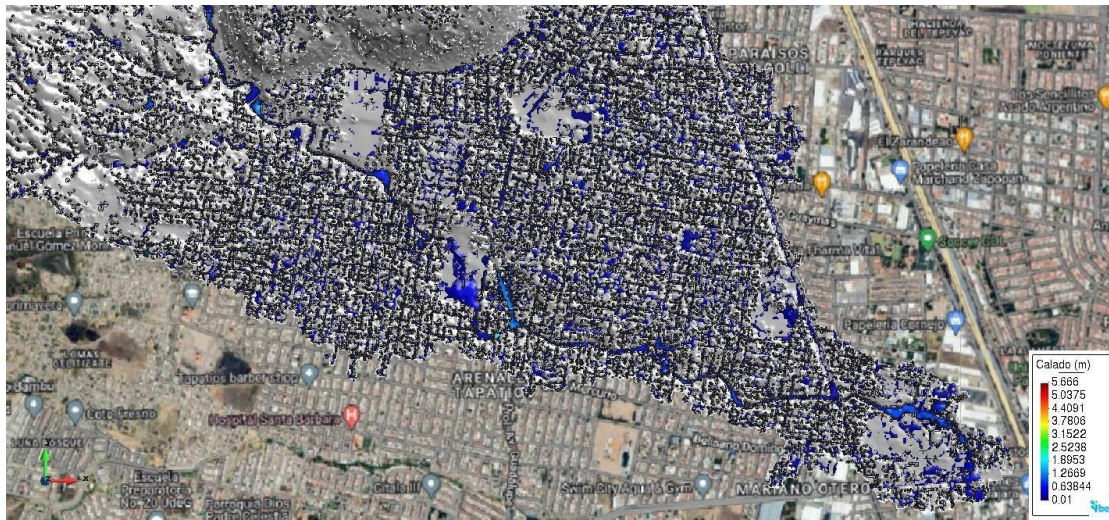


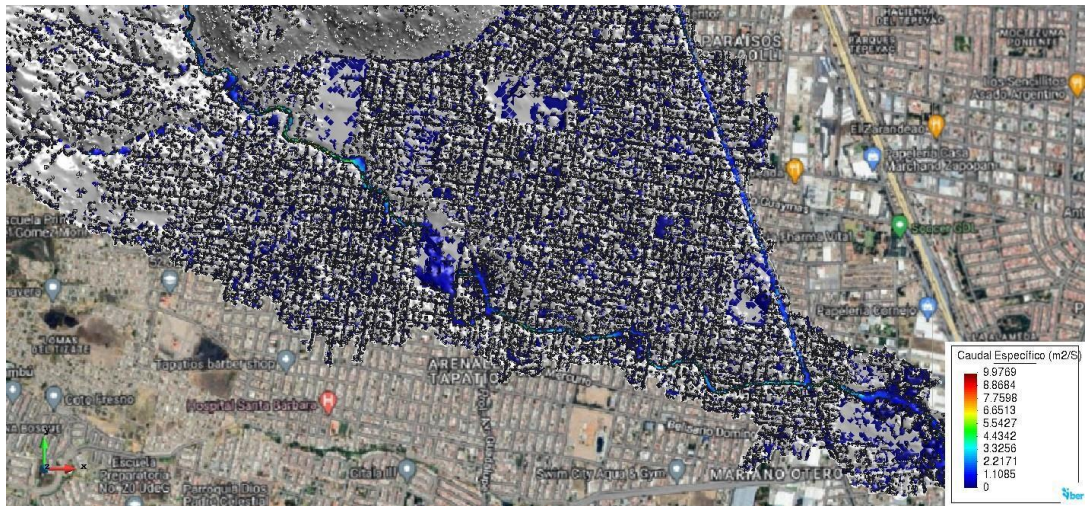
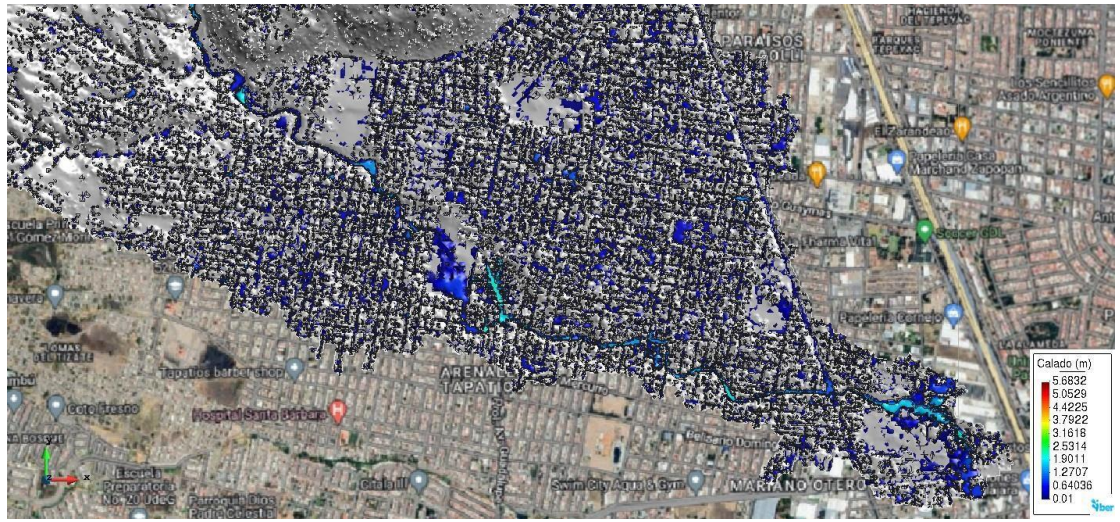
Período de retorno 50 años:



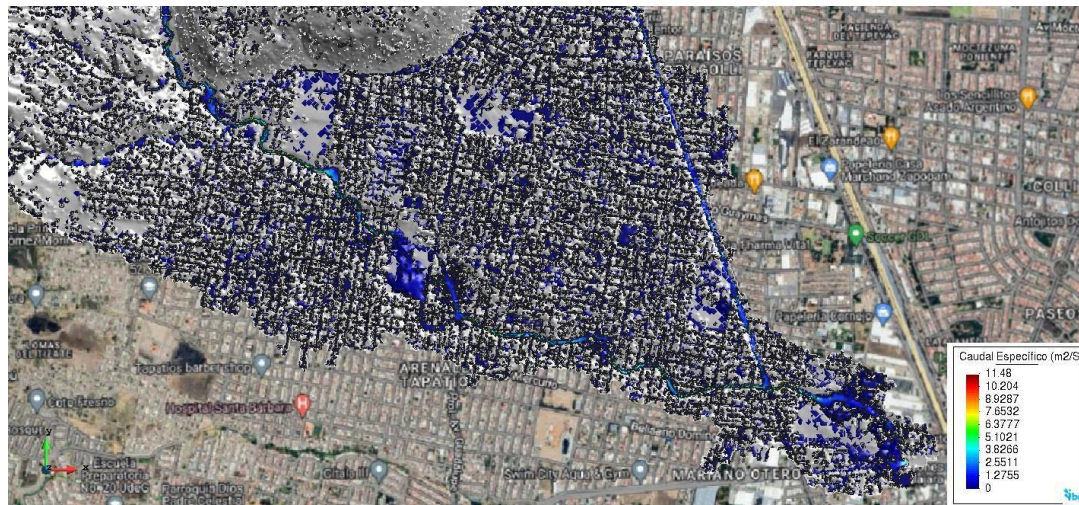
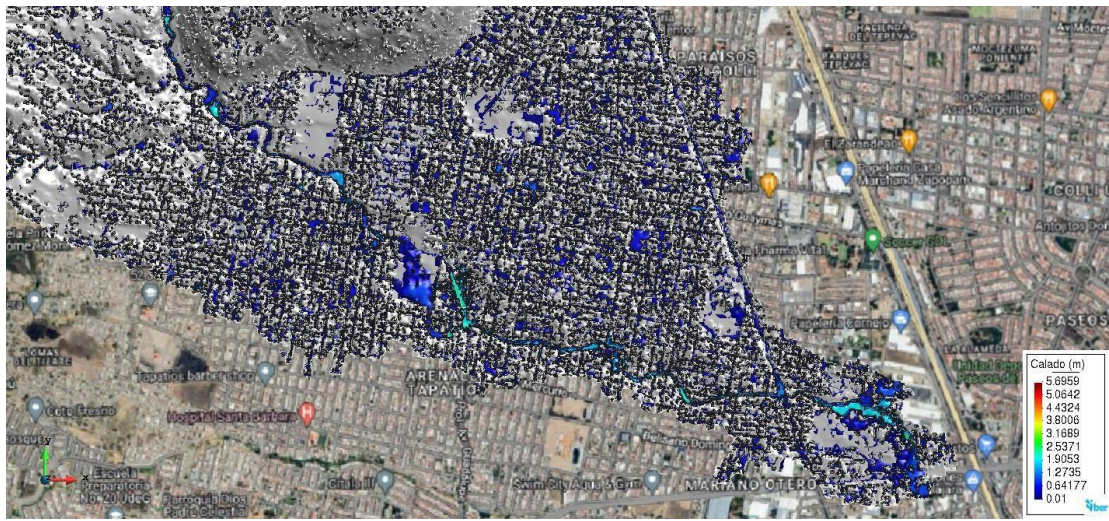
Simulaciones IBER después de la intervención:

Período de retorno 2 años:





Período de retorno 50 años:



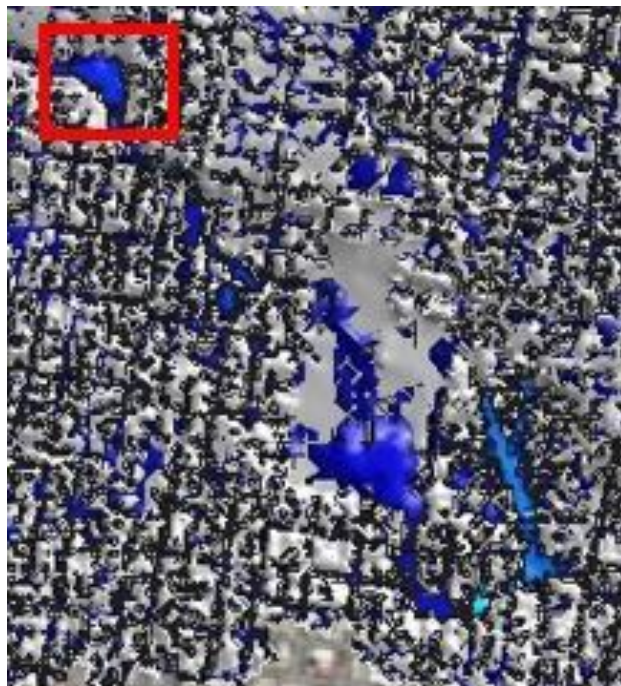
Análisis y discusión:

Diferencias sin intervención vs intervención. Retorno 2 años:

Sin intervención



Infiltrando 1 m³/s

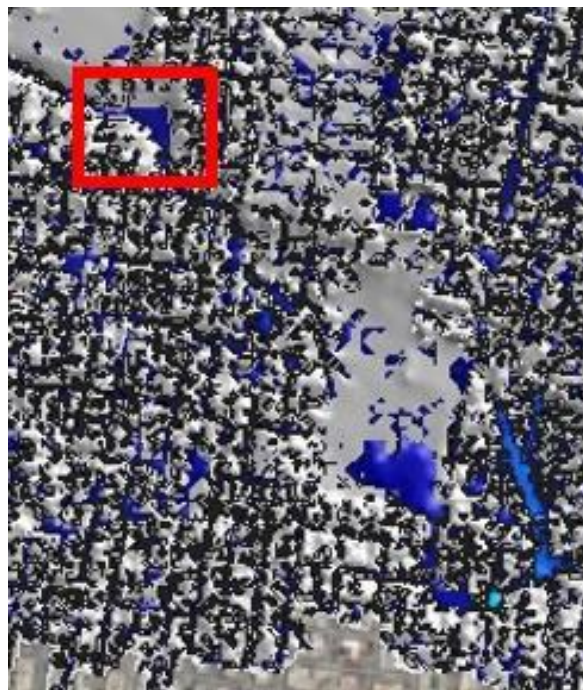


Realizando simulaciones en donde logramos infiltrar $6\text{m}^3/\text{s}$, logramos tener mejores resultados, pero en ese caso, se necesita trabajar con otro vaso regulador que existe en la parte superior del arroyo y también hacer un mejoramiento de la propuesta para lograr estos resultados.

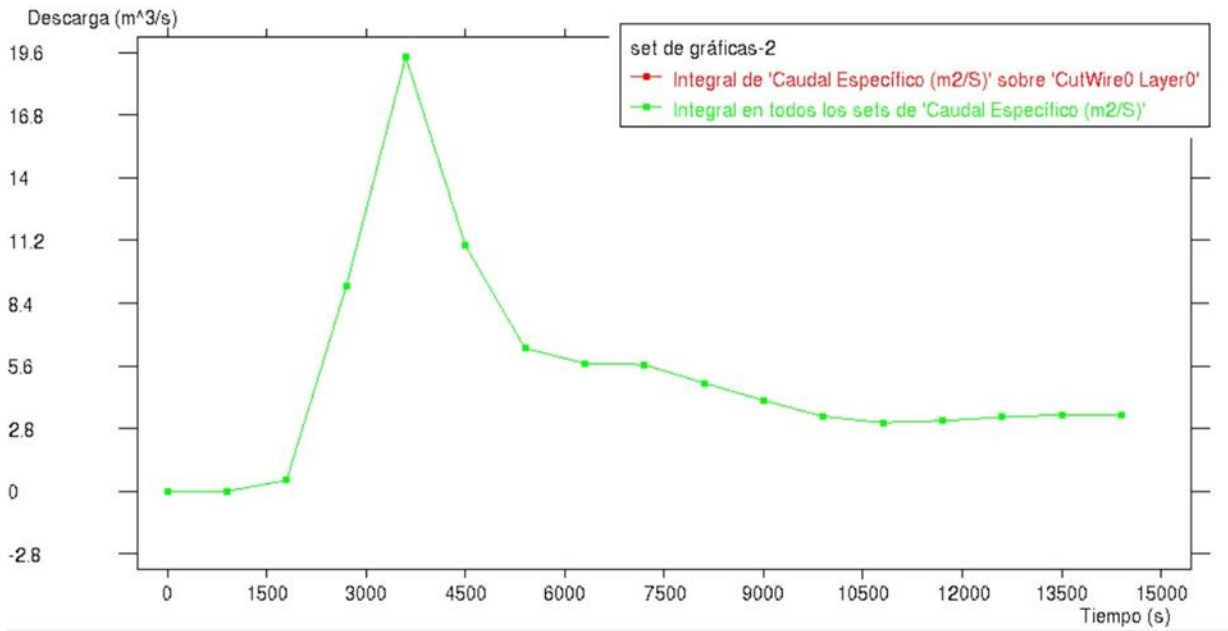
Sin intervención



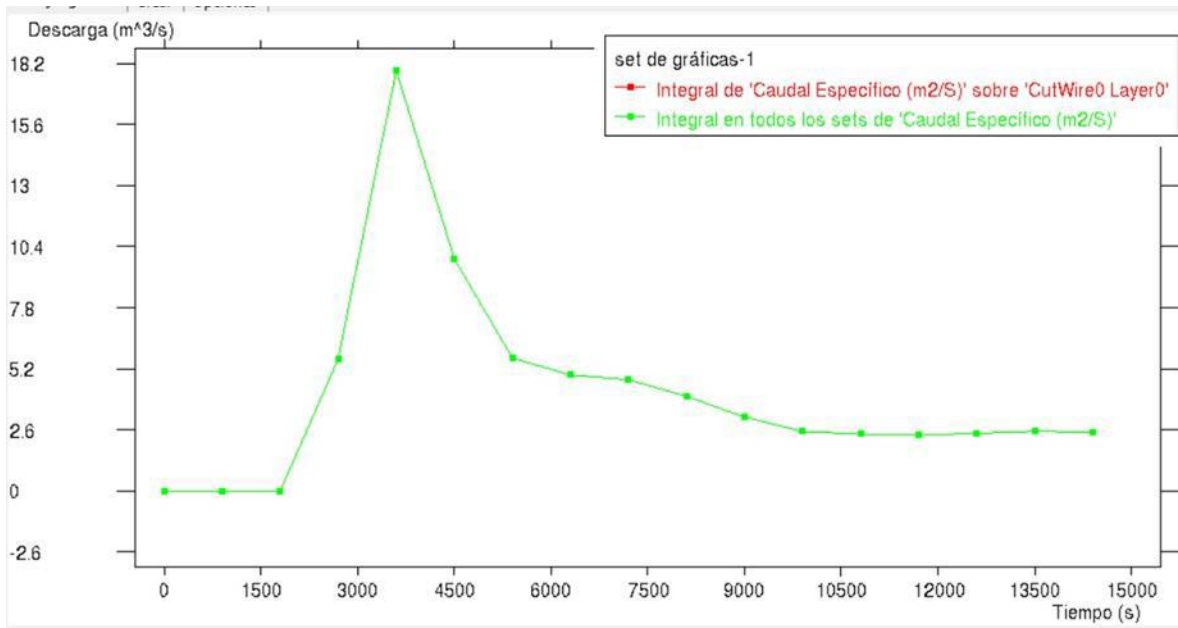
$6\text{m}^3/\text{s}$



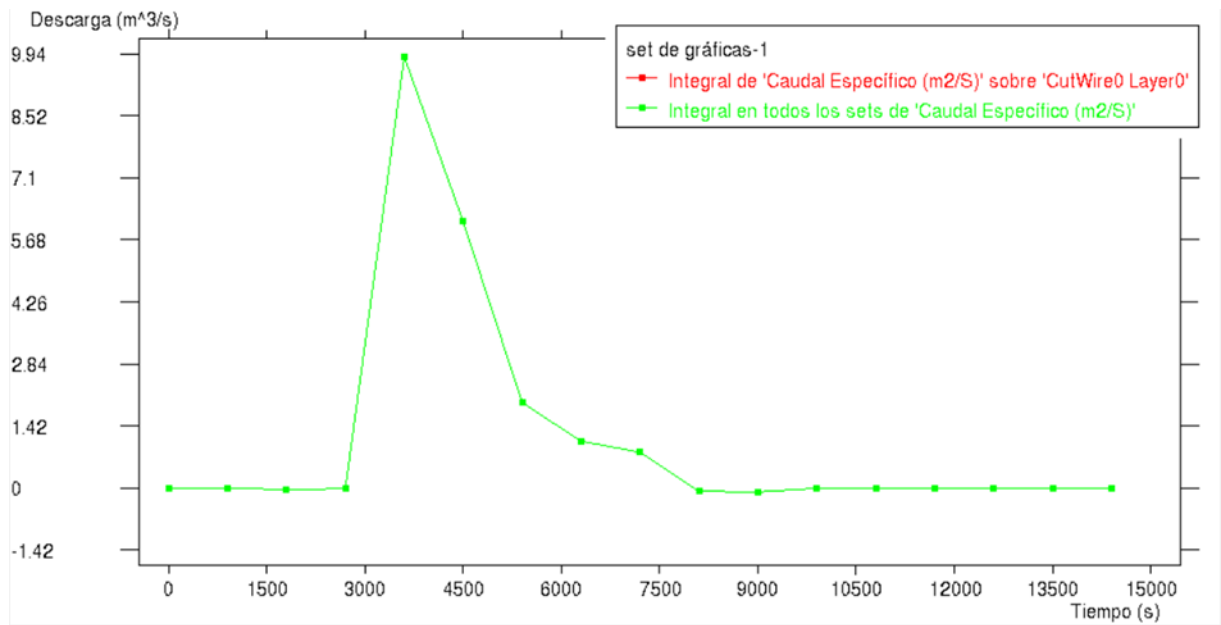
Hidrogramas. Retorno 2 años:



Sin intervención



1m³/s



6m³/s

Conclusiones

- El vaso regulador, se puede optimizar de la manera en que nosotros hicimos nuestra propuesta, logrando así resultados satisfactorios, pero se puede mejorar de muchas maneras y lograr alcanzar un mejor resultado dentro de nuestras simulaciones.
- Creemos que, como planes a futuros, se podría implementar un parque inundable, junto con un mejoramiento de las zonas verdes que existen alrededor del vaso regulador.
- A pesar de no tener nuestras simulaciones en Rockscience, se puede utilizar RS3, la cuál es un programa que ayuda a modelar en 3D este tipo de proyectos y en un futuro lograremos tener un mejor modelo de lo que se busca realizar.

Anexo 1. Caracterización del comportamiento geohidrológico de los suelos de la ZMG ante condiciones de recarga.

Objetivo del proyecto:

El objetivo del proyecto es realizar un método fiable para determinar la permeabilidad de un material conforme se va saturando, en este caso, se busca desarrollar un permeámetro que tenga la capacidad de darnos estos datos a partir de un sistema controlado.

Después de realizar las pruebas se pretende comprobar los datos en el modelo matemático y así determinar valores reales y fiables de la capacidad de recarga del suelo en el experimento, el propósito en si es mejorar la comprensión y gestión de la conductividad hidráulica en diferentes condiciones de saturación del suelo en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Este estudio podría funcionar para mejorar las condiciones y vialidades de las ciudades que padecen de inundaciones o sequías asegurando el desagüe de las lluvias hacia los mantos freáticos y recargarlos de manera que no se sufra por falta de agua e inundaciones ya que actualmente la ciudad de Guadalajara sufre de ambos problemas y no se ha podido encontrar una solución sustentable.

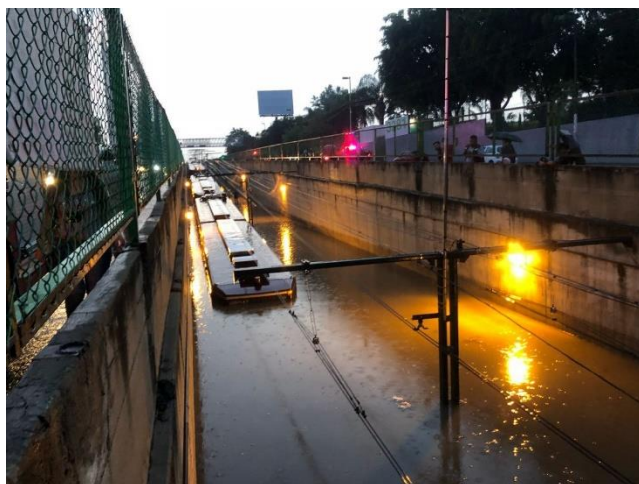


Ilustración 1. Fotografía del estado de Tren Ligero.



Ilustración 2. Fotografía Avenida López Mateos.

Hoy en día es de vital importancia buscar una solución sustentable y económica para resolver estos problemas ya que las consecuencias a largo plazo serían una amenaza para la infraestructura de Guadalajara.

La geología de Guadalajara se encuentra dentro de una estructura geológica conocida como Bloque de Jalisco. Comprende parte de los estados de Jalisco, Colima, Nayarit y Michoacán. A su vez, se reconocen fallas continentales activas debido a los esfuerzos tectónicos que genera la subducción sobre el Bloque Jalisco.

En el entorno de Guadalajara se han identificado zonas activas de fallas normales con componente lateral. Están ubicadas en la barranca del río Grande de Santiago al norte, en la la Sierra de la Primavera al oeste y suroeste y en la montaña de Cerro Viejo-Sierra del Travesaño al sureste. El estado de Jalisco se localiza dentro de la provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana. Esta se caracteriza por una litología volcánica de diferentes composiciones. Las rocas volcánicas presentan una gran potencia dado que son el resultado de sucesivas etapas eruptivas, desde el Terciario hasta el presente.

Este es el mapa geológico en la que se encuentra la ciudad de Guadalajara:

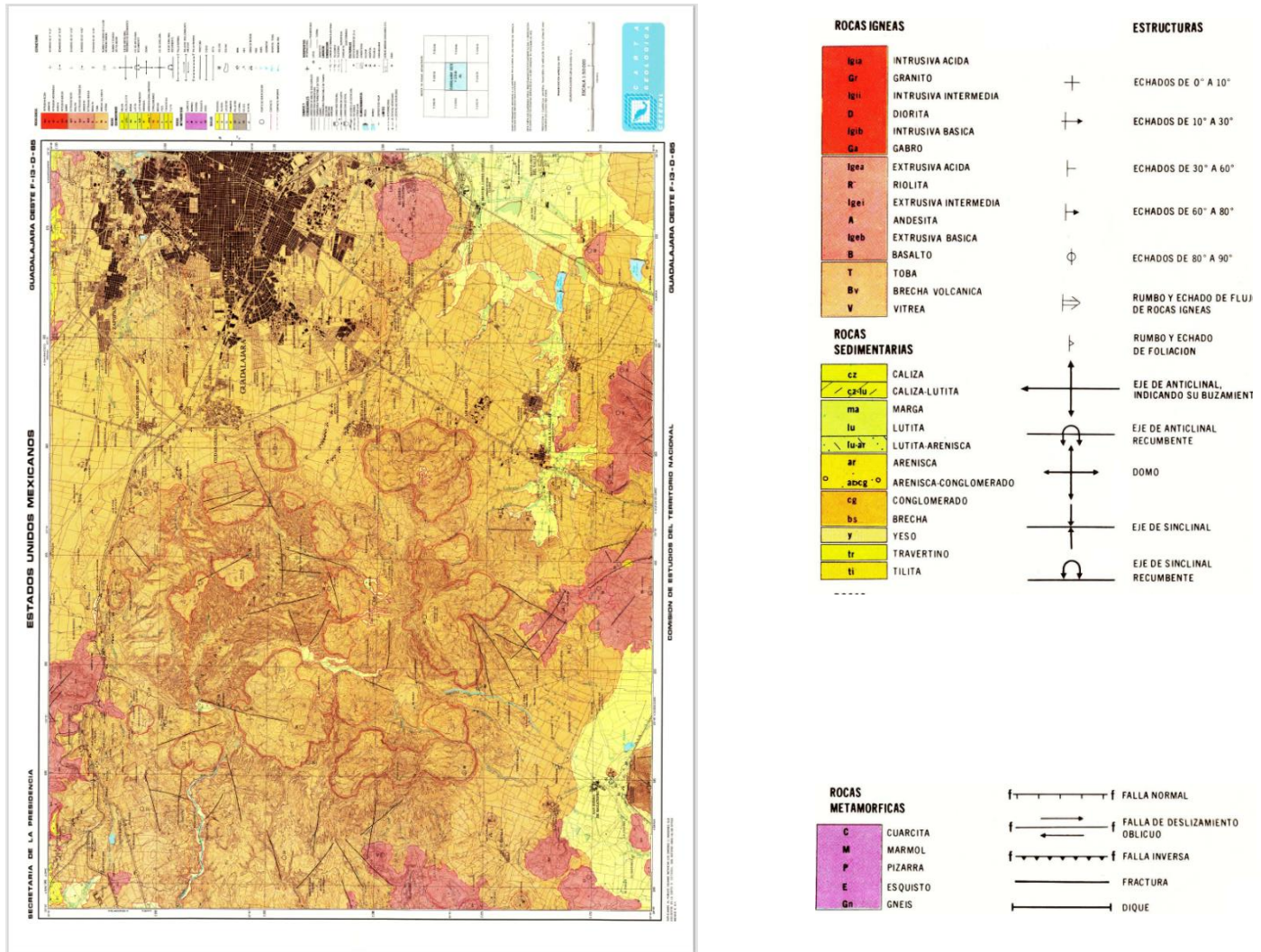


Ilustración 3. Mapas geológicos y tablas de tipo de roca del área de la AMG.

En Guadalajara se tiene alrededor de 9 tipos de suelos, los cuales proveen de diferentes características de permeabilidad, en su gran mayoría son del tipo arenoso conocido como Jal, este material proviene de rocas volcánicas. A continuación, se describen algunas características de los suelos en Guadalajara:

- Arenoso: Suelo de textura ligera, permeabilidad alta y retención de agua baja. Ideal para cultivos de frutales y hortalizas, pero requiere de riego constante.
- Arcilloso: Suelo pesado, con baja permeabilidad y alta retención de agua. Adecuado para cultivos de trigo y maíz.
- Ahumado: Suelo rico en materia orgánica, con alta capacidad de retener nutrientes y agua. Ideal para cultivos de café y frutales.
- Litosol: Suelo poco profundo, con baja fertilidad y retención de agua. Se encuentra principalmente en zonas montañosas.

- Regosol: Suelo poco desarrollado, con baja acumulación de materia orgánica y nutrientes. Se encuentra en áreas de transición entre zonas áridas y semihúmedas.
- Feozem: Suelo rico en minerales, con alta retención de agua y nutrientes. Ideal para cultivos de agave y vid.
- Negro: Suelo rico en materia orgánica, con alta retención de agua y nutrientes. Ideal para cultivos de caña de azúcar y agave.
- Calcisol: Suelo rico en calcio, con baja retención de agua y nutrientes. Adecuado para cultivos de frutales y hortalizas, pero requiere de riego constante.
- Solónchak: Suelo salino, con alta concentración de sales y baja retención de agua. Se encuentra principalmente en zonas desérticas.

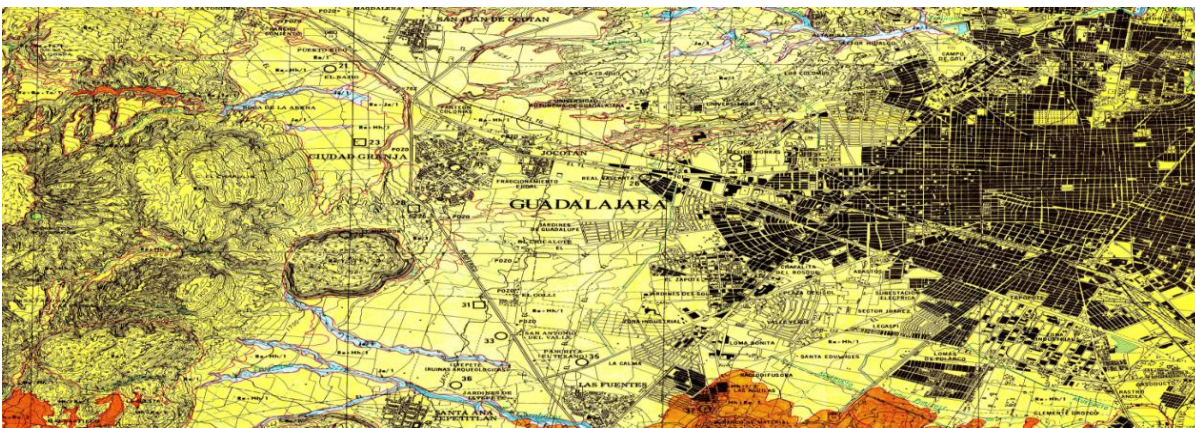


Ilustración 4. Mapa edafológico de la ciudad de Guadalajara.

A partir de estas descripciones de los materiales en la zona metropolitana de Guadalajara, es necesario mencionar que uno de los factores por los que existen estas inundaciones es por la ya mencionada permeabilidad. A continuación, se muestra una tabla de coeficientes de permeabilidad según el tipo de suelo:

LEYENDA

UNIDADES DE SUELO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES DE SUELO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES DE SUELO	DESCRIPCIÓN
A	ACRISOL	F	FERRALSOL	P	PODZOL
Ap	PLINTICO	Fp	PLINTICO	Pp	PLACICO
Aq	GLEYICO	Fh	HUMICO	Pg	GLEYICO
Ah	HUMICO	Fa	AGRICO	Ph	HUMICO
Al	FERRICO	Fo	RODICO	Ps	ORTICO
Aa	ORTICO	Fx	XANTICO		
T	ANDOSOL	J	FLUVISOL	D	PODZOLUISOL
Tm	MOLICO	Jt	TONICO	Dg	GLEYICO
Th	HUMICO	Jg	GLEYICO	Dd	DISTRICO
Tc	CRONICO	Jc	CALCARICO	De	EUTRICO
Tv	VITRICO	Jd	DISTRICO	U	RANKER
Q	ARENOSOL	G	GLEYSOL	R	REGOSOL
Qp	ALBICO	Gp	PLINTICO	Ra	SELICO
Ql	LUVICO	Gv	VERTICO	Rc	CALCARICO
Qf	FERRALICO	Gm	MOLICO	Rd	DISTRICO
Qc	CAMBICO	Gh	HUMICO	Re	EUTRICO
B	CAMBISOL	Gc	CALCARICO	E	RENZINA
Ba	GLEYICO	Gq	DISTRICO	Zg	GLEYICO
Bg	GLEYICO	Ge	EUTRICO	Zt	TAFRICO
Bv	VERTICO	C	HISTOSOL	Zm	MOLICO
Bc	CALCICO	Ca	DISTRICO	Zo	ORTICO
Bh	HUMICO	Co	EUTRICO	S	SOLONETZ
Bf	FERRALICO	I	LITOSOL	Sp	GLEYICO
Bc	CRONICO	L	LUVISOL	Sa	ALBICO
Bd	DISTRICO	Lp	PLINTICO	Sm	MOLICO
Ba	EUTRICO	Lg	GLEYICO	So	ORTICO
K	CASTAÑOZEM	Lv	VERTICO	V	VERTISOL
Kl	LUVICO	Lc	CALCICO	Vp	PELICO
Kh	HAPLICO	Lp	ALBICO	Vc	CRONICO
C	CHERNOZEM	Lf	FERRICO	X	XEROSOL
Cl	LUVICO	Lc	CRONICO	Xl	LUVICO
Cc	CALCICO	Lo	ORTICO	Xg	GLEYICO
Ch	HAPLICO	N	NITOSOL	Xk	CALCICO
H	FEOZEM	Nh	HUMICO	Xh	HAPLICO
Hp	GLEYICO	Nd	DISTRICO	Y	YERMOZOL
Hl	LUVICO	Nc	EUTRICO	Yl	LUVICO
Hc	CALCARICO	W	PLANOSOL	Yg	GLEYICO
Hh	HAPLICO	Wt	SOLOICO	Yk	CALCICO
		Wm	MOLICO	Yh	HAPLICO
		Wb	HUMICO		
		Wd	DISTRICO		
		Ws	EUTRICO		

PUNTOS DE VERIFICACION

○ SIN MUESTRA △ CON MUESTRA

□ PERFIL CON DESCRIPCION Y ANALISIS DETALLADO

Ilustración 5. Tabla de suelo de referencia del tipo de Guadalajara.

Guadalajara cuenta con dos tipos de suelos prominentes los cuales son el Jal que es un suelo arenoso granular y el tepetate que es un suelo del tipo arenoso arcilloso. Esto indica que se tiene potencial tanto impermeable como permeable dependiendo de la zona donde se descargue el agua.

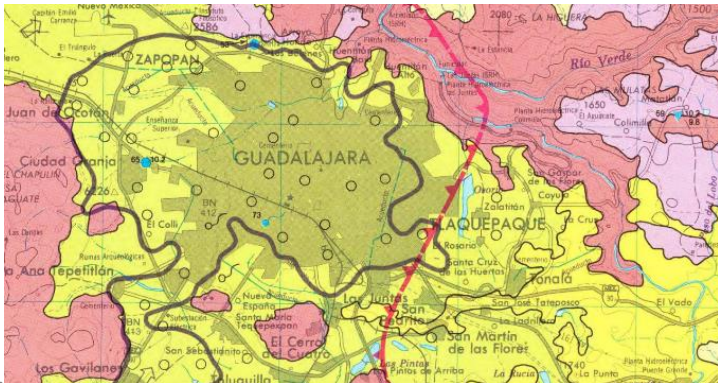
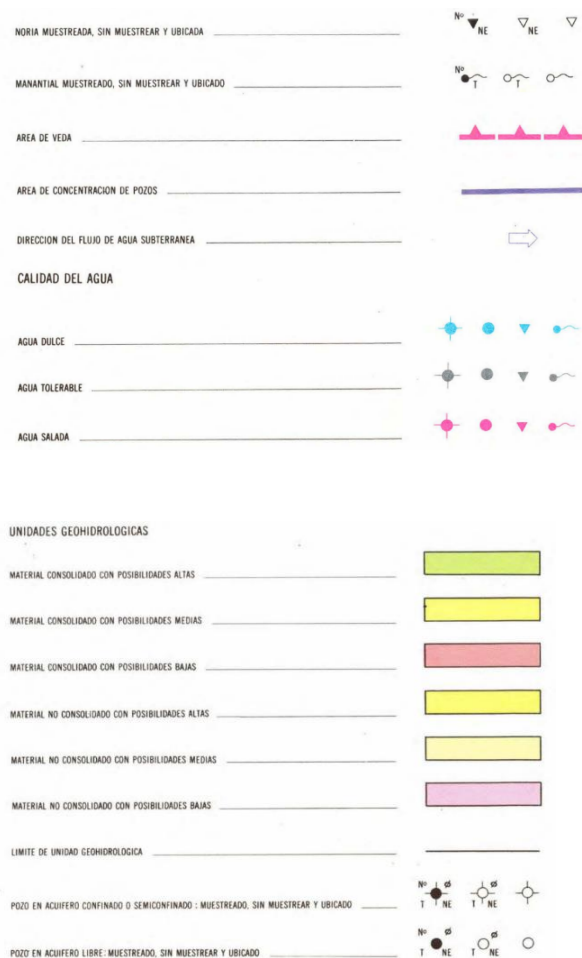


Ilustración 6. Características geohidrológicas de la AMG, posteriormente su leyenda.



La hidrogeología de la Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es un tema de gran importancia debido a la creciente demanda de recursos hídricos y al impacto de las actividades humanas sobre el medio ambiente. Para comprender mejor

la dinámica del agua en esta región, es crucial estudiar las propiedades de los suelos locales, como su permeabilidad, granulometría y grado de saturación. Estos conceptos teóricos son fundamentales para la evaluación de la capacidad de los suelos para infiltrar, almacenar y transmitir agua.

La permeabilidad es una propiedad del suelo que determina la facilidad con la que el agua puede fluir a través de sus poros. Es un parámetro esencial en la hidrogeología, ya que influye en la recarga de acuíferos y en el comportamiento de las aguas subterráneas. En suelos como el Tepetate, caracterizado por tener granos muy finos y una estructura compacta, la permeabilidad es muy baja, lo que limita la infiltración del agua y puede llevar a problemas de escorrentía superficial. En contraste, el Jal, una grava fina con mayor permeabilidad, permite un flujo más rápido del agua a través del suelo, facilitando la recarga de acuíferos y reduciendo la escorrentía.

El grado de saturación es otra propiedad clave que indica la proporción de los poros del suelo que están llenos de agua. Este factor es crucial para entender la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y su disponibilidad para las plantas y otros usos. En suelos saturados, todos los poros están llenos de agua, lo que puede influir en la estabilidad del suelo y en la conductividad hidráulica. La relación entre el grado de saturación y la permeabilidad es compleja, ya que la permeabilidad puede cambiar significativamente con variaciones en la saturación. En suelos no saturados, la permeabilidad tiende a ser menor debido a la presencia de aire en los poros, lo que restringe el flujo del agua.

La granulometría, que describe la distribución del tamaño de las partículas del suelo, también juega un papel vital en la determinación de la permeabilidad y la saturación. Los suelos con granulometría fina, como el Tepetate, tienen partículas pequeñas y densamente empaquetadas, lo que reduce los espacios porosos y, en consecuencia, la permeabilidad. Por otro lado, suelos con granulometría más gruesa, como el Jal, tienen partículas más grandes y poros más grandes, lo que facilita un mayor flujo de agua.

Realizar un estudio detallado de estos parámetros en la ZMG es esencial debido a la necesidad de gestionar de manera eficiente los recursos hídricos en una región con alta densidad poblacional y crecientes demandas de agua. Entender cómo la permeabilidad y la saturación varían con la granulometría de los suelos locales permitirá diseñar estrategias de manejo del agua más efectivas, como la optimización de la recarga de acuíferos y la reducción de la escorrentía superficial. Además, este conocimiento puede ayudar a mitigar los impactos de las inundaciones y a mejorar la calidad del agua subterránea, asegurando un suministro sostenible para las futuras generaciones. En resumen, el estudio de la hidrogeología y los tipos de suelo en la ZMG es fundamental para abordar los desafíos relacionados con la disponibilidad y gestión del agua en una de las regiones más dinámicas de México.

Metodología:

La primera parte en el desarrollo de esta prueba fue obtener los parámetros iniciales, los cuales fueron utilizados tanto en el modelo experimental como en el modelo digital. Estos parámetros de caracterización del suelo fueron: La conductividad hidráulica en estado saturado, la granulometría, y la capacidad de carga de agua del volumen conocido del sedimento, para de esta manera ir obteniendo su grado de saturación.

Lo siguiente fue elaborar el modelo experimental. Este nos permitía graficar en tiempo real el nivel de saturación del sedimento, y las presiones hidrostáticas en diferentes puntos sobre la altura del sedimento, de esta manera se pudo obtener en tiempo de real el cambio de la conductividad hidráulica contra el grado de saturación.

El siguiente paso fue realizar un modelo digital usando el paquete de *RockScience 3 groundwater simulations*. Este modelo se realizó recreando la geometría del modelo experimental. Se le introdujeron los parámetros iniciales obtenidos en la sección de “caracterización de suelo”, y se fue calibrando, usando modificadores temporales, para de esta manera replicar el comportamiento observado en el modelo experimental.

Una vez obtenido un modelo digital calibrado, se realizaron los cálculos para obtener las ecuaciones que describieran el comportamiento del suelo, es decir una ecuación que relacione el grado de saturación del suelo, con su cambio en conductividad hidráulica.

Desarrollo:

Para los parámetros iniciales, se realizaron pruebas de caracterización del suelo. La primera fue obtener la conductividad hidráulica en estado saturado. Para obtener este valor se utiliza la conductividad de Darcy, la cual es una ecuación que relaciona la diferencia de cargas de presión en diferentes puntos de un sedimento, y el caudal o gasto de agua fluyendo a través de él. El dispositivo que se utilizó fue un permeámetro, el cual consiste en un cilindro uniforme, el cual se llena con sedimento compactado, este cilindro tiene una entrada y una salida de agua. La entrada de agua se conecta a una carga hidráulica fija, y la salida de agua está al nivel del suelo del sedimento, y en esta salida se mide el caudal. Este permeámetro es de particular utilidad ya que al establecer la carga hidráulica como fija, y la altura del sedimento y el área transversal son fijos, la única variable que queda por medir es el caudal.



Ilustración 7. Permeámetro.

Ecuación 1. Permeabilidad de Darcy.

$$K = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h}$$

- K Es la conductividad hidráulica, expresada en unidades de distancia sobre tiempo.
- Q Es el caudal o gasto, expresado en unidades de volumen sobre tiempo.
- A es el área transversal del cilindro, expresada en unidades de área.
- Δh es la diferencia de altura entre los puntos donde se está midiendo la carga hidráulica, en este caso la altura donde se coloca la carga fija y la altura del suelo (0), expresado en unidades de distancia.
- L Es la longitud o altura del sedimento, expresada en unidades de distancia.

Todo el desarrollo de este trabajo se realizó con unidades del SI.

La siguiente parte de la caracterización fue obtener la capacidad de carga máxima de agua del sedimento, es decir la capacidad de un volumen o masa conocido de sedimento para absorber agua en sus poros, se puede expresar en unidades de masa o de volumen, pero para este caso se trabajó con relaciones volumétricas.

Para esta parte de la caracterización, se llenó un cilindro con sedimento compactado, conociendo su volumen. Después se tomó un matraz aforado de 1 litro, y se fue vertiendo lentamente agua en el sedimento, para impulsar la infiltración,

se hicieron pequeñas perforaciones. Una vez que el suelo dejó de retener agua, se dejó de infiltrar y se registró el dato sobre la cantidad de agua que era capaz de retener.

Ecuación 2. Grado de saturación.

$$S_r = \left(\frac{V_w}{V_v} \right) \times 100\%$$

- S_r es el grado de saturación, en %.
- V_w es el volumen de agua, en unidades de volumen.
- V_v Es el volumen de espacios vacíos, en unidades de volumen.

La siguiente parte de la caracterización fue la prueba de granulometría.

La prueba de granulometría consiste en determinar los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

La prueba que realizamos sufrió unas modificaciones ya que se experimentó con agua corriente para saber cómo se comportarían los sedimentos a través de los tamices.

Los resultados fueron los siguientes:

mall	canitdad retenida
#4	0.92
#10	0.82
#20	0.64
#50	1.7
#60	0.84
#100	0.62
#200	0.6

Tabla 12. Resultados granulometría Tepetate.

Modelo experimental:

Para el modelo experimental se utilizó una cubeta de pintura, se escogió ya que era el material disponible, además al ser utilizada para almacenar y transportar pintura está diseñado para retener líquidos presurizados. El experimento consistía en agarrar una masa conocida de sedimento, la cual había sido secada para eliminar cualquier contenido de agua, esta se colocaba en la cubeta y se anotaba la altura del sedimento, para de esta manera conocer su volumen. A la cubeta se le hicieron 3 perforaciones equidistantes sobre una de sus paredes, estas perforaciones fueron conectadas a una tabla con mangueras, para que de esta manera funcionaran como piezómetros y poder saber los valores de presión hidrostática en diferentes puntos. A esta cubeta se le conectó una manguera en la superficie superior, la cual fue conectada a un dispositivo de carga constante, el cual aseguraba que la carga hidráulica se mantuviera constante durante la realización del experimento. También se le hizo una perforación en la parte inferior, para servir de drenaje de agua cuando el

experimento concluyera, en versiones iniciales no había salida de aire, pero tras varias corridas de prueba, se determinó que era necesario colocar una perforación para servir de salida de aire en la parte superior. Todo el sistema era colocado en una báscula, para de esta manera saber la cantidad de agua que efectivamente estaba entrando al sistema. Al momento de realizar las pruebas. Una vez establecida la carga, el sistema fue grabado para de esta manera obtener valores de presión y masa de agua entrando al sistema a través del tiempo.

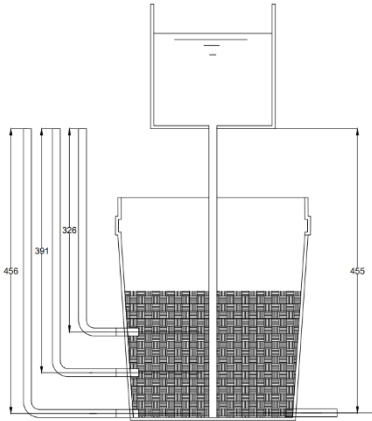


Ilustración 8. Esbozo de modelo experimental.

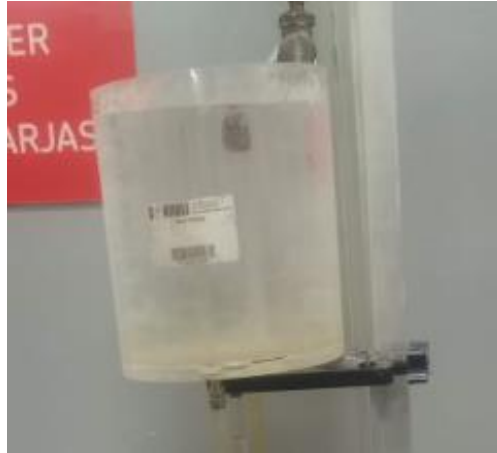


Ilustración 9. Dispositivo de carga hidráulica constante.



Ilustración 10. Sistema siendo pesado.

Para el modelo digital, se recreó la geometría de la cubeta, incluyendo la altura de su carga hidráulica y sus dimensiones. Para los parámetros iniciales de simulación, se introdujeron los datos obtenidos en la caracterización del suelo, es decir, su conductividad hidráulica en estado saturado, su cantidad de volumen vacío en estado seco, y sus tamaños de partículas. El modelo digital fue utilizado para simular el mismo periodo de tiempo de la prueba (aproximadamente una hora) y utilizando la herramienta “Query” pudimos obtener los datos de presión hidrostática en puntos específicos, estos queries fueron colocados a la misma altura que los piezómetros en el modelo experimental, para de esta manera poder recrear los resultados.

El proceso de calibración consistía en modificar los “stage factors” de la simulación, es decir, aunque el tiempo total de simulación fue de 60 minutos, cada 10 minutos se introducían modificadores temporales que afectaban la conductividad y la cantidad de espacios vacíos, para de esta manera recrear los resultados obtenidos en la prueba experimental.

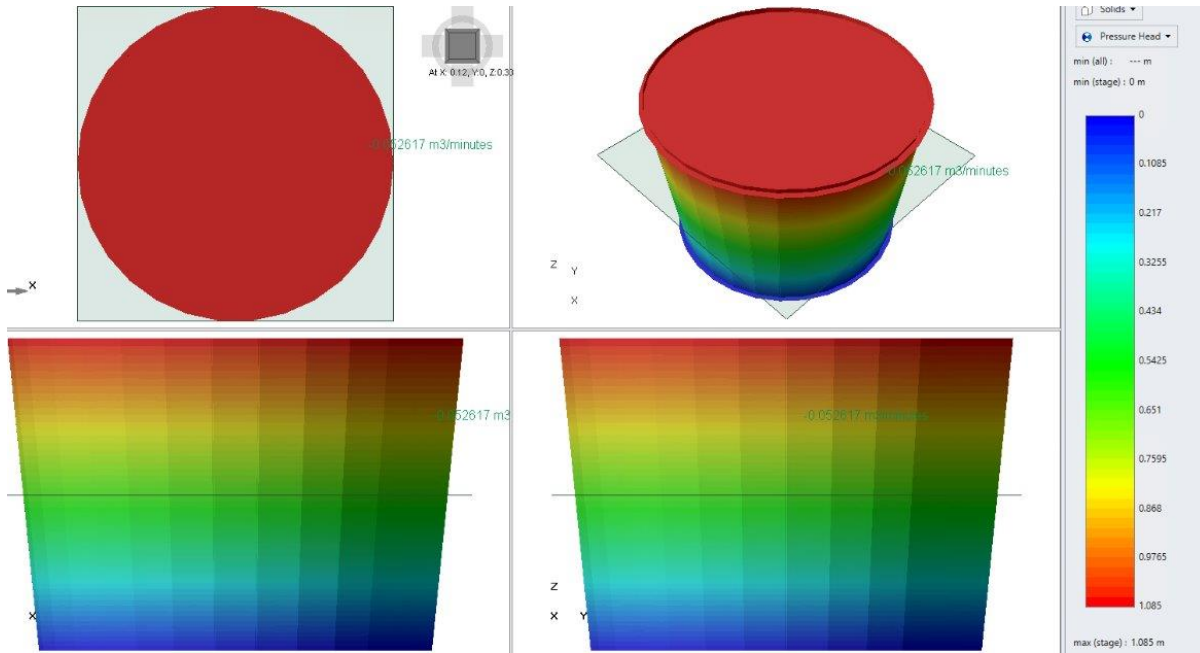


Ilustración 11. Recreación del modelo digital en RockScience 3.

Resultados:

La caracterización dio los siguientes resultados.

Área del cilindro (m ²)	Altura de material (m)	Altura de carga (m)	Gasto (m ³ /s)	k (m/s)
0.017203	0.17	0.78	3.31E-06	4.1878E-05

Tabla 13. Resultados de conductividad saturada del Tepetate.

Para el Jal se hizo la misma prueba, dando un resultado de 0.022799 m/s.

Para la prueba de saturación y de volúmenes vacíos los resultados son los siguientes.

Prueba de saturación			
H (m)	0.2		
V en H (m3)	0.00743		
		Razón masa JAL/masa agua (saturación)	Razón vol JAL/vol agua saturación
M seca (kg)	6.24		
M agua (kg)	3.88		
V agua (m3)	0.0039	1.608	1.905

Tabla 14. Resultados de prueba de saturación Jal.

Los resultados para Tepetate fueron: Relación Tepe masa/ agua masa: 1.9

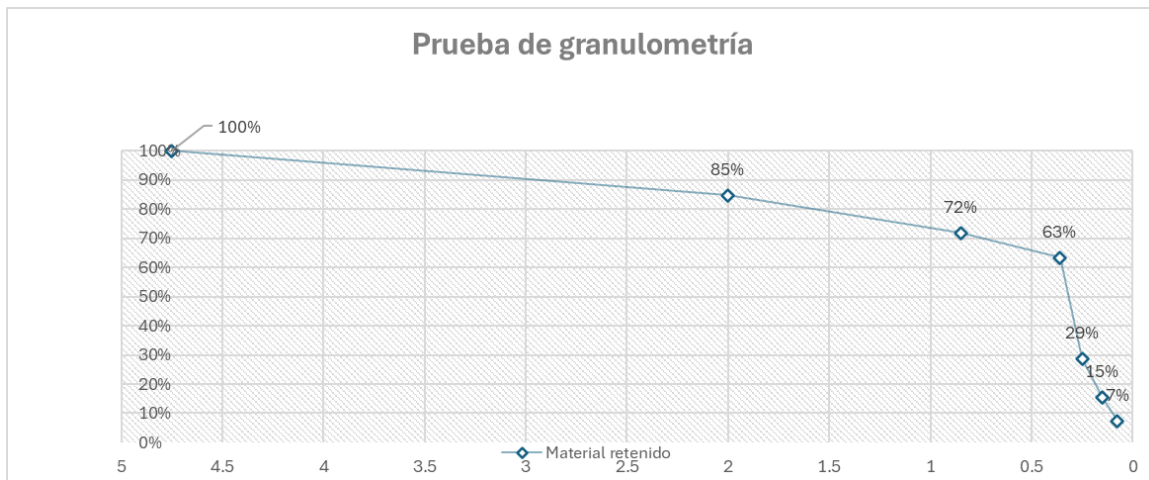
Relación Tepe volumen/ agua volumen: 2.105.

Los resultados de granulometría fueron:

Para la granulometría se siguió el procedimiento descrito en Juárez Badillo (1999) para determinar la cantidad de sedimento acumulado en cada malla con una apertura específica.

KG	WR	WMUESTRA	W peso acumulado	porcentaje	
cantidad retenida KG					100%
0.92	0.3	0.62	0.62	15%	85%
0.82	0.3	0.52	1.14	13%	72%
0.64	0.3	0.34	1.48	8%	63%
1.7	0.3	1.4	2.88	35%	29%
0.84	0.3	0.54	3.42	13%	15%
0.62	0.3	0.32	3.74	8%	7%
0.6	0.3	0.3	4.04	7%	0%

Tabla 15.1. Resultados granulometría Tepetate.



Gráfica .1. Resultados granulometría Tepetate.

Los datos de la prueba de granulometrías modificadas nos indica que la mayor cantidad del material retenido con contenido de agua se alojó en la malla del #50 con una apertura de 3.5 mm aproximadamente. La hipótesis del comportamiento los resultados es que cuando comenzó el agua a saturar el material y con el movimiento de la malla, puede que se halla saturado el material con las partículas finas creando una masa arcillosa que era impermeable causando que el agua se contuviera en esa zona.

A continuación, se muestra la serie de datos que se obtuvieron para el Jal, registrando cada intervalo de tiempo que ocurría un cambio significativo en la masa o en la altura de los piezómetros.

tiempo (s)	Masa agua (kg HP1 (cm)	HP2(cm)	HP3(cm)	V agua (m3)	Qagua (m3/m)	
1446	3.18	145	145	144.7	0.00319639	0.00013263
1449	3.2	145	145	144.5	0.00321649	0.00013319
1452	3.22	145	145	144.4	0.0032366	0.00013374
1455	3.24	145	145	144.3	0.0032567	0.0001343
1464	3.26	145	145	144	0.0032768	0.0001343
1471.2	3.28	145	145	143.4	0.00329691	0.00013446
1575	3.36	145	145	140	0.00337732	0.00012866
1578	3.48	145	145	139.7	0.00349794	0.000133
1582.2	3.5	145	145	139.4	0.00351804	0.00013341
1587	3.52	145	145	139.2	0.00353814	0.00013377
1593.6	3.54	145	145	138.7	0.00355825	0.00013397
1622.4	3.56	145	145	138.2	0.00357835	0.00013234
1627.8	3.58	145	145	137.8	0.00359845	0.00013264
1633.2	3.6	145	145	137.4	0.00361856	0.00013294
1639.8	3.62	145	145	137	0.00363866	0.00013314
1645.2	3.64	145	145	136.6	0.00365876	0.00013343
1650.6	3.66	145	145	136	0.00367887	0.00013373
1680	3.68	145	144.8	135.6	0.00369897	0.00013211
1686	3.7	145	144.5	135.1	0.00371907	0.00013235
1692	3.72	145	143.5	134.7	0.00373918	0.00013259

Tabla 16. Resultados reportados Jal.

(La densidad del agua fue tomada como 995 kg/m³, debido a la temperatura promedio medida durante la realización de las pruebas a 29 C)

Estos datos entonces fueron utilizados para obtener la conductividad hidráulica promedio en cada intervalo de tiempo, calculando la conductividad entre cada piezómetro utilizando la Ecuación 1 y promediando las 3. Esto se hizo ya que, debido al comportamiento irregular del agua en el suelo, tomar los valores de conductividad promedio entre diferentes puntos se consideró como la mejor manera de evaluar el comportamiento. Con el volumen de sedimento conocido para la prueba, y la cantidad de masa de agua entrando al sistema, se obtiene el grado de saturación en cada punto. (Tomando en cuenta la densidad de agua a 29 C)

K prom (m/min)	Sr (%)
0.00221469	29.43
0.00219561	29.91
0.00219096	30.38
0.00218644	30.85
0.00214726	31.33
0.00207804	31.80
0.00170731	33.70
0.00174565	36.55
0.00173245	37.02
0.00172506	37.50
0.00169888	37.97
0.00165141	38.44
0.00163487	38.92
0.00161913	39.39

Tabla 17. Resultados calculados Jal.

Cabe recalcar que las tablas mostradas en esta sección no incluyen todos los resultados obtenidos, ya que las memorias de cálculo son muy extensas. Son porciones representativas para mostrar el tipo de datos que se obtuvieron.

Análisis de resultados:

Los resultados importantes fueron las conductividades promedio contra el tiempo, y el grado de saturación contra el tiempo.

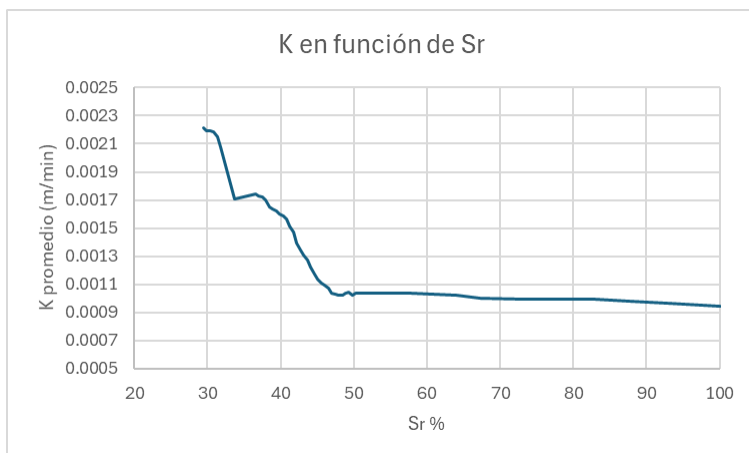


Ilustración 12. Gráfico de conductividad en función de grado de saturación.

A partir de esta gráfica y estos datos, se hizo un análisis de regresión para de esta manera obtener una ecuación que satisfaga estos valores. Se determinó que la mejor manera sería utilizando un análisis de regresión polinomial de segundo orden o grado. Ya que este y el de sexto grados tenían valores R2 (coeficiente de determinación) similares, sin embargo, debido a que casi la mitad de los datos se empiezan a comportar semi linealmente, un grado seis tiende a sobre ajustarse, por lo que el de segundo grado se escogió.

$$K_{prom} = 0.00464 - 0.0001068 \cdot Sr + 7.264 \times 10^{-7} \cdot Sr^2$$

Ecuación 3. Conductividad del Jal dependiente del grado de saturación.

Esta fue la ecuación que satisface la curva de conductividad con respecto al grado de saturación, con un coeficiente de determinación R2 de 0.89.

Para la calibración del modelo digital, se utilizaron los valores obtenidos experimental, y la ecuación 3, evaluándola en los diferentes tiempos de la simulación, para de esta manera saber a qué valor se debía modificar el multiplicador temporal de K y de volumen de agua y volúmenes vacíos, a continuación, se muestra una comparativa de los resultados experimentales y los resultados del modelo digital calibrado.

MODELADO				LABORATORIO				COMPARATIVA
Etapa	P1	P2	P3	Etapa	P1	P2	P3	%error
0-10min	0.01	0.01	0.01	0-10min	0.01	0.01	0.01	0.000
10-20min	0.02	0.055	0.015	10-20min	0.01	0.045	0.01	33.333
20-30min	0.035	0.095	0.2	20-30min	0.04	0.105	0.183	1.665
30-40min	0.045	0.155	0.35	30-40min	0.04	0.175	0.343	4.384
40-50min	0.092	0.215	0.45	40-50min	0.104	0.241	0.406	0.735
50-60min	0.165	0.305	0.55	50-60min	0.177	0.322	0.493	1.430

Tabla 18. Comparativa de resultados obtenidos experimentalmente y modelado digital.

Donde P1-P3 indica la presión hidrostática en cada uno de los piezómetros, expresada en metros de agua. Como se puede observar, el % de error en la primera etapa es de 0, debido a que este fue tomando exactamente los mismos parámetros de caracterización, el error más grande es el del segundo tiempo, esto es posible que se pueda atribuir a que, en el sistema experimental, suele haber mayor variabilidad debido a la aleatoriedad del acomodo del sedimento, y las posibles tubificaciones que crea el agua, mientras que el modelo digital no tiene estos problemas. El porcentaje de error se estabiliza conforme pasa el tiempo ya que vemos que estas irregularidades y posibles tubificaciones se estabilizan conforme el sistema empieza a llegar a un estado de equilibrio.

Conclusión:

Los resultados obtenidos en este experimento no deben ser utilizados para modelar específicamente estos tipos de suelo, si no este documento describe la metodología para entender como un tipo de suelo puede ser caracterizado y saber cómo se comporta en diferentes grados de saturación. Su utilidad e implementación dependen del propósito que se esté buscando simular. Sin embargo, pese a las limitaciones técnicas, se obtuvieron resultados satisfactorios que concuerdan

con la literatura reportada sobre el comportamiento del agua en el subsuelo. En un futuro, si se le fuera a dar seguimiento a esta metodología, se podría buscar realizar más pruebas de caracterización de suelo, además de implementar un modelo experimental más rígido que otorgue valores más certeros. De esta manera, podría expandirse la metodología descrita en este documento.

Referencias

- Abellán, A. (2016). Áreas de biorretención. Obtenido de SuD Sostenible: <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/areas-de-biorretencion/>
- Acosta Godínez, A. (1990). Modernización de la red hidroclimatológica de la República Mexicana. <https://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/download/626/543/947>
- 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>
- 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>
- Armillas, Pedro, "Notas sobre sistemas de cultivo en Mesoamérica. Cultivos de riego y humedad en la cuenca del Río Balsas" [1949] en Teresa Rojas Rabiela (ed.), Pedro Armillas: Vida y obra, México, CIESAS / INAH, 1991a, t. I.
- Arquitectura y empresa. (2021). Techos Verdes. Obtenido de Arquitectura y Empresa: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/techos-verdes>
- Arreguín Cortés, F. I., & Alcocer Yamanaka, V. H. (2011), Diseño hidráulico de vertedores. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- 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>
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Wastewater Treatment and Reuse*. McGraw-Hill Education.
- 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>

Balneario y Villas El Manto (s.f.). Balneario. Sitio oficial: www.elmanto.com.mx

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)

Boelens, R., Escobar, A., Bakker, K., Hommes, L., Swyngedouw, E., Hogenboom, B., Huijbens, E. H., Jackson, S., Vos, J., Harris, L. M., Joy, K. J., de Castro, F., Duarte-Abadía, B., Tubino de Souza, D., Lotz-Sisitka, H., Hernández-Mora, N., Martínez-Alier, J., Roca-Servat, D., Perreault, T., ... Wantzen, K. M. (2023). Riverhood: political ecologies of sociocultural commoning and translocal struggles for water justice. *Journal of Peasant Studies*, 50(3), 1125–1156. <https://doi.org/10.1080/03066150.2022.2120810>

Bourguet, L. (1971). INVENTAIRE INTERNATIONAL DES AMENAGEMENTS D'ALIMENTATION ARTIFICIELLE / DEPOUILLEMENT ET SYNTHÈSE DES REPONSES. *International Association of Scientific Hydrology*.

Braja, M. D. (2013), *Fundamentos de la ingeniería geotécnica*. Cengage Learning, (4ta Edición).

Bustos, M. L., Ferrelli, F., & Piccolo, M. C. (2024). Ciencia ciudadana para el monitoreo meteorológico de la costa de la provincia de Buenos Aires, República Argentina. *FACENA*, 33(1), 58–75. <https://doi.org/10.30972/fac.3317370>

[calderon-nivel-pese-a-lluvias/ar2666957](https://doi.org/10.30972/fac.3317370)

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.

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%20Jordan%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>

Ceccaroni, L., Lemmens, R., Perelló, J., Ponti, M., Samson, R., & Wagenknecht, K. (s/f). Katrin Vohland · Anne Land-Zandstra.

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>.

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>.

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>

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>

CITA -15: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico/#:~:text=Aun%20cuando%20el%20MSM%20inici%C3%B3,el%20USDM%20y%20el%20NADM>.

CityAdapt. (2023, 21 agosto). Pozos de absorción - CityAdapt. https://cityadapt.com/sbn_cityadapt/ pozos-de-absorcion/

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 (2024) Derechos por explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, ..., Datos Abiertos CONAGUA. Available at: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/derechos-por-explotacion-uso-o-aprovechamiento-de-aguas-nacionales-segun-zonas-de-disponibilidad>

CONAGUA. (1 de Marzo de 2021). Calidad del agua en México. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>

CONAGUA. (2015). PMPMS para Usuarios Urbanos de Agua Potable y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT.

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

CONAGUA. (2020). Acuíferos Jalisco. Obtenido de Disponibilidad Aguas Subterráneas Jalisco: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html>

CONAGUA. (2023). Estaciones meteorológicas [KML]. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>

CONAGUA. (2023). Estaciones meteorológicas [KML]. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>

CONAGUA. (22 de August de 2019). Sistema de Información Hidrológica (SIH). Obtenido de <https://sih.conagua.gob.mx/>

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.

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.

Craig, J. R., Vaughan, D. J., & Skinner, B. J. (2007). *Recursos de la Tierra*. Madrid: Pearson prentice hall.

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>.

Crites, R. W., Tchobanoglous, G., & Ovidio, J. A. (1998). *Natural Wastewater Treatment Systems*. CRC Press.

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.

Davis Instruments. (2023). *WeatherLink Air Quality & Temperature Map*. <https://www.weatherlink.com/map>

Davis Instruments. (2023). *WeatherLink Air Quality & Temperature Map*. <https://www.weatherlink.com/map>

De Diputados, C., Congreso De, D. H., & Unión, L. A. (s/f). REGLAMENTO DE LA LEY DE AGUAS NACIONALES.

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>

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.

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. (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>

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>

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

Etter, S., Strobl, B., van Meerveld, I., Seibert, J., & Simon Etter, C. (2020). Calidad y oportunidad de las observaciones colectivas de clases de nivel de agua. <https://doi.org/10.1002/hip.13864>

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., & Villarroja, 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

FIRCO. (s. f.). Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gob.mx. Recuperado 28 de septiembre de 2023, de <https://www.gob.mx/firco>

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

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>

Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

Garzón, A. G. (2020). COMEII. 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).

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. (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. (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. (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. (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>

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 Partnership. (2013). GWP in Action 2013 Annual Report. Obtenido de GWP in Action 2013 Annual Report: https://issuu.com/gwp-publ/docs/gwp_in_action_2013_annual_report

Gobierno de Zapopan. (2020). DIRECCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS E INFRAESTRUCTURA. Obtenido de Gobierno de Zapopan: https://www.zapopan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/08/INVITACIONES_011-20_Censurado.pdf

Gómez 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>

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.

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.

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, 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>.

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>.

Hernández-Antonio, A., Mahlkecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., . . . Eastoe, C. J. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3937–3950. doi:10.5194/hess-19-3937-2015

Hidrología Sostenible. (s.f.). Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS. Obtenido de Hidrología Sostenible Web Site: <http://www.hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>

Holcim. (2013). Informe de Desarrollo Sostenible 2013. <https://www.holcim.com.co/sites/colombia/files/images/IDS2013-11.pdf>.

IGRAC. (2021). MAR Portal. Obtenido de <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal>

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>

INECC. (2014). *Án­alisis 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. (2013, diciembre). *SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/

INEGI. (2020). rea Metropolitana de Guadalajara. Obtenido de <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>

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

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua . (2019). gob.mx. Obtenido de Aguas Subterrneas: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterrneas>

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*, pgs. 132-143.

Jonatan Godínez Madrigal, por, ter Horst, R., Tran, B., & Alba, R. (s/f). Los modelos no piensan. <https://www.water-alternatives.org/index.php/blog/models>

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>

Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., . . . Pak, C. (2016). Smarter Stormwater Systems. *Environmental Science & Technology*.

Kondolf, G. M. (1997). Hungry Water. En *Gestión Ambiental* (Vol. 21). www.ced.berkeley.edu/kondolf/www.onlinedoctranslator.com

Kondolf, G. M., & Bizzi, S. (2022). Stream Geomorphology. *Encyclopedia of Inland Waters*, Second Edition, 2, 249–257. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00186-9>

Kuroiwa, J. M. (2002). Daños a Infraestructuras por Erosión de Cauces y Riberas. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

KWR. (2020). City Blueprint. Obtenido de Water Research Institute: <https://www.kwrwater.nl/en/tools-producten/city-blueprint/>

Lagos, R. H. (2002). Línea base de la calidad del agua subterránea en el valle del Yeguaré, Honduras. ZAMORANO. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2270/1/IAD-2002-T024.PDF>

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>

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.

LEY DE AGUAS NACIONALES (2023).

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.

Linton, J., & Budds, J. (2014a). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>

Linton, J., & Budds, J. (2014b). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>

López C., F. (1988), Corrección de torrentes y estabilización de cauces. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

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.

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>

M. Kondolf, & S. Bizzi. (2009). Geomorphology of Streams and Rivers. En *Encyclopedia of Inland Waters* (pp. 387–395). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00043-0>

MACCAFERRI. (2023). **Gaviones**. <https://www.maccaferri.com/mx/productos/gaviones-3/>

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.

Manual de integración, estructura orgánica y funcionamiento de la CONAGUA, 2015.

Maplogs (s.f.). Lugares en Amatlán de Cañas, Nay., México. sunrise.maplogs.com/es/amatl_n_de_ca_as_nayarit_mexico.42104.html

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~eF9uknr40YEUnbMuNOAACimxnGfIS5TNcuqhZGtC5IkGmV2bbEMIdMTbTIRglxriPwX~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/>

Meléndez, V. (2023, 31 agosto). Baja presa Calderón nivel pese a lluvias. *Mural*.

Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2013). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.

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>

Middlebrooks, E. J., & Crites, R. W. (2000). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.

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>

Montejo, E. (2023). La sexta extinción masiva está destruyendo ramas enteras del árbol de la vida. National Geographic en español. <https://www.ngenespanol.com/animales/la-sexta-extincion-masiva-esta-destruyendo-ramas-del-arbol-de-la-vida/>

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

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>

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>

NOM_011_CNA_2000, NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.

OAS. (s. f.). *Capitulo 8. Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones*. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/ch13.htm>

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.

Ochoa-García, H. (2024). Mechanisms of access to land and water: transformations near rivers in Mexico. www.iss.nl/ldpi

- Ogazon, V. C. (25 de 07 de 2021). Se desborda arroyo en Zapopan y causa daños en siete colonias. Obtenido de udgtv.com/noticias/se-desborda-en-arroyo-zapopan-causa-danos-siete-colonias/#:~:text=Una%20fuerte%20tormenta%20en%20los,Zapopan%20de%20Respuesta%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.
- Pardo Gómez, R. (2018) Disipadores de energía – parte I: El salto hidráulico, 39 (3). scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382018000300108
- Paus, K., & Braskerud, B. (2014). Suggestions for Designing and Constructing Bioretention Cells for a Nordic Climate. *Water Management and Research*, 139-150.
- Pedroza González, Edmundo P54 El molinete, importancia, fundamentos y buenas prácticas / Edmundo Pedroza González -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2017. 108 p.
- Peluso, N. L., & Ribot, J. (2020). Postscript: A Theory of Access Revisited. En *Society and Natural Resources* (Vol. 33, Número 2, pp. 300–306). Routledge. <https://doi.org/10.1080/08941920.2019.1709929>

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>

PERCOT. (s. f.). *Pozo de absorción*. Recuperado 8 de octubre de 2023, de <https://www.percot.com.mx/>

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.

Perrozzi, A. (2022). Parques inundables: el rol del espacio público en la gestión del agua. *Transecto*. <https://transecto.com/2020/05/parques-inundables/>

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>

Planet. (2023). *Planet Monitoring—Satellite Imagery and Monitoring*. Planet. <https://www.planet.com/products/monitoring/>

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>

Porse, E. C. (2013). Stormwater Governance and Future Cities. *Water*, 5(1), 29-52. doi:10.3390/w5010029

Pourrut, P. (Ed.). (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.

Pozos y zanjas de infiltración. (2016, 24 agosto). *SuD Sostenible*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/ pozos-y-zanjas-de-infiltracion/>

Press, F., & Siever, R. (2001). UNDERSTANDING EARTH. FREEMAN AND COMPANY.

Programa Nacional Hídrico 2020-2024 Resumen Comisión Nacional del Agua. (s/f).

Rain Water Harvesting and Conservation. (s. f.). Scribd. <https://es.scribd.com/doc/128890095/34474270-Rain-Water-Harvesting-and-Conservation>

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.

Recorriendo mi tierra (2018). Arroyo Huichichila. Facebook. Publicado el 01/10/2018. <https://www.facebook.com/recorriendomiterraMx/videos/arroyo-huichichila-/334833250605417/>

Recuperado 2 de octubre de 2021, de <https://www.mural.com.mx/baja-presa->

Reel Resilience Network. (2023). Impactos ambientales y beneficios. *The Nature Conservancy*. <https://reefresilience.org/es/management-strategies/aquaculture/environmental-impacts-and-benefits/>

Reforma, Ú. (s/f). REGLAMENTO INTERIOR DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA.

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

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.

Science for Environment Policy. (2012). Soil Sealing. European Commission, Directorate-General Environment . Bristol: University of the West of England.

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%2C%20camar%C3%B3n%20y%20lango stino>

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

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 (Servicios de Agua Potable y Alcantarillado). (2014). *CRITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES*. Obtenido de SIAPA

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). ¿Qué está pasando con el agua en el AMG? Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://www.siapa.gob.mx/suministro>

SIAPA. (2021). Funciones Públicas. Obtenido de SIAPA: https://www.siapa.gob.mx/funciones_publicas

SIGEA. (2023). *Mapa de ordenamiento*. <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>

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>

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/>

Sistemas de captación de agua pluvial y filtración a base de zeolitas – zeolitas. (s. f.). <https://zeolitas.mx/sistemas-captacion-pluvial/>

SMN (2022) RESEÑA DE LA TEMPORADA DE CICLONES TROPICALES 2021 Y PRONÓSTICO OFICIAL DE CICLONES TROPICALES Y TEMPORADA DE LLUVIAS 2022. Available at: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Ciclones%20Tropicales/pronosticoTemporada/PronosticoCT2022.pdf>

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.

Suárez, C. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.

Susdrain. (2021). Component: Infiltration trenches. Obtenido de https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/infiltration_trench.html

Susdrain. (s.f.). Obtenido de Sustainable Drainage: <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.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>

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/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

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)

von Sperling, M. (2016). **Stabilization Ponds: Biological Wastewater Treatment**. IWA Publishing.

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>

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)

<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf> https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf

<http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf> https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf

<http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>

<http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>

<http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>

https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

<https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>

[https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=\(rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=(rain+water+trench+well)

[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/CN111877461A/en?q=CN111877461A>

[https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=\(rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=(rain+water+trench+well)

<https://patents.google.com/patent/CN211571235U/en?q=CN+211571235+U>

[https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=\(rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=(rain+water+trench+well)

[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/KR20090090987A/en?q=KR2009-0090987A> <https://chat.openai.com/c/2711ba0f-264c-460b-961e-c31adb302990>

[https://patents.google.com/patent/US11096386B2/en?q=\(infiltration+trench%2c+wells%2c+rain+garden\)&oq=infiltration+trench%2c+wells%2c+rain+garden](https://patents.google.com/patent/US11096386B2/en?q=(infiltration+trench%2c+wells%2c+rain+garden)&oq=infiltration+trench%2c+wells%2c+rain+garden)

https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf

https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf

https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf

<https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/pozo-de-absorci%C3%B3n>

<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/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)

[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)

https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial- infraestructura-y-obra-publica_1.pdf

https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial- infraestructura-y-obra-publica_1.pdf

https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial- infraestructura-y-obra-publica_1.pdf

<https://umamexico.com/red-de-parques-sobre-el-rio-tizates/>

https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA

https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA

https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA

<https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=734510&fecha=17/04/2002#gsc.tab=0