

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, ingeniería mecánica
- Antonio Ávalos Loaiza, ingeniería civil
- Juan Pablo Carballo Velasco, ingeniería ambiental
- Edgar Saul Chávez Casillas, ingeniería civil
- Héctor Iván Moreno Contreras, ingeniería civil
- Luis Arturo Peña Galaviz, ingeniería ambiental
- Edgar Alfonso Ramos Gómez, ingeniería civil

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

ÍNDICE

Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas.....	10
Presentación Institucional de los Proyectos de Aplicación Profesional	11
1. Introducción	12
1.1 Problemática.....	12
1.2 Justificación	14
1.3 Primeros avances.....	18
1.3.1 Primavera 2020	18
1.3.2 Otoño 2020.....	21
1.3.3 Primavera 2021	25
1.3.4 Verano 2021.....	31
1.3.5 Otoño 2021	35
1.3.6 Primavera 2022	40
1.3.7 Verano 2022.....	46
1.4 Objetivos del proyecto.....	46
1.5 Descripción de los equipos de trabajo.....	46
2. Marco Teórico.....	47
2.1 Ciclo Hidrológico.....	47
2.2 Aguas Subterráneas	51
2.2.1. Acuíferos	54
2.3 Impermeabilización Urbana de Suelos.....	63
2.4 Calidad del agua.....	67

2.4.1 Calidad del agua superficial	70
2.4.2 Calidad del agua subterránea	72
2.5 Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) o Sistemas de Diseño Urbano Sensibles al Agua (WSUDS)	74
2.6 Métodos de Recarga Artificial de Acuíferos	89
2.6.1 Recarga superficial	91
2.6.2 Recarga profunda	92
2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano	96
2.7.1 Gestión informada del agua	97
2.7.2 Proyectos de monitoreo a nivel internacional	103
2.7.3 Tecnologías existentes y desarrollo a futuro	107
3. Marco Contextual	108
3.1 San Juan de Abajo 3.1.1 Introducción	108
3.1.2 Uso de suelo	108
3.1.4 Caracterización hidrológica preliminar	114
3.2 Zona Poniente de Guadalajara	125
3.2.1 Introducción	125
3.2.2 Definición del área de estudio.....	125
3.2.3 Demografía	126
3.2.4 Desarrollo Urbano.....	127
3.2.5 Uso de suelo.....	128
4. Metodología	129
4.1 San Juan de Abajo 4.1.1 Introducción	129
1.2 Definición del área de estudio	130
.1.3 Recopilación de datos	133

4.1.3.1 Topografía	134
4.1.3.2 Usos del suelo	134
4.3.3 Litología y edafología	136
4.3.4 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio.....	137
4.1.3.5 Información meteorológica.....	138
4.1.4 Modelado hidrológico.....	139
4.1.4.1 Metodología de proceso para primera iteración de simulación.	139
4.1.4.2 Resultados primera iteración	141
aracterización territorial.....	145
4.1.5.1 Topografía	145
4.1.5.2 Hidrología	146
4.1.5.3 Litología.....	146
4.1.5.4 Uso de suelo	147
4.1.6 Evaluación de la hidrología superficial.....	148
4.1.8 Estudio de eventos extremos	151
4.1.9 Validación y calibración.....	152
4.1.10 Evaluación de impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros	152
4.2 Zona Poniente de Guadalajara	153
4.2.1 Planteamiento Metodológico para un Análisis Hidrológico.....	153
4.2. Introducción.....	153
4.2.3. Definición del Área de Estudio	154
4.2.4. Recopilación de Datos	156
4.2.5. Modelado Hidrológico	156

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.	168
5. Resultados	169
5.2 San Juan de Abajo	169
2.5.1 Definición dl área de estudio	171
5.2.2 Recopilación y preparación de datos	173
5.2.3 Mapeo de puentes y presas en el área de estudio	176
2.5 Parametrización del modelo	177
5.2.6 Escenarios de simulación	181
5.2.7.1 Escenario 1. Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 5 años	185
Calado máximo.....	186
Velocidad máxima.	187
Peligrosidad máxima.	188
5.2.7.2 Escenario 2 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 10 años	189
Calado máximo.....	189
Velocidad máxima.	190
Peligrosidad máxima.	191
5.2.7.3 Escenario 3 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 20 años.	192
Calado máximo.....	193
Velocidad máxima.	194
Peligrosidad máxima.	195

5.2.7.3 Escenario 4 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 50 años.	196
Calado máximo.....	197
Velocidad máxima.	198
Peligrosidad máxima.	199
Futuras líneas de investigación:.....	200
5.3 Propuestas arquitectónicas y constructivas en San Juan de Abajo	203
LOCALIZACIÓN DE REPRESAS.....	211
DESARROLLO DE PROPUESTA ARQUITECTONICA.....	212
5.4 Zona poniente de Guadalajara	213
A continuación, se mostrará un mapa de la delimitación del área geográfica de la cuenca y causes del Río Garabato.....	214
5.4.2 Recopilación y Preparación de Datos.....	215
5.4.3 Selección del Modelo Hidrológico	216
5.4.4 Parametrización del Modelo	216
5.4.5 Escenarios de Simulación	217
5.4.6 Desarrollo de la Simulación.....	218
5.4.7.1 Escenario.....	225
4.8 Discusión y.....	234
5.6. Propuestas arquitectónicas para la Zona Poniente de Guadalajara.....	234
José Manuel Almanza Vallarta	256
Luis Alberto Alvarez Ibarra.....	257
Yoshiro Susumu Azano Carrillo.....	258
Luis Ernesto Hernández Yerenas	259
Sofía Limón Ochoa.....	260
Héctor Iván Moreno Contreras	260

Valeria Ordoñez de la Garza	261
Roberto Alyanic Rodriguez Gonzalez	262
Rogelio Adrian Gutierrez Castro	264
Referencias	265
Referencias Marco Teórico	265
Referencias Marco Contextual	280
Referencias Resultados	282
Anexo 1	290
1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional.....	291
1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto.....	291
1.2 Caracterización de la organización o comunidad	296
Geomorfología de los Ríos Pequeños	297
1.3 Identificación de la(s) problemática(s)	300
Metodología Actual de Monitoreo	300
Monitor de Sequia.....	308
Monitoreo en Pequeños Ríos.....	308
1.4 Enfoque del problema.....	309
CrowdWater	311
REFERENCIAS	312

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.....	30
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.	42
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).	44
Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.....	44
Figura 38. Equipos propuestos para el desarrollo del proyecto “Campus Hidrológico”	45
Figura 39. El ciclo del agua (United States Geological Survey [USDG], s.f.).....	50
Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).....	54
Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).	55
Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).	56
Figura 43. Acuífero colgado (Sánchez San Román).	56
Figura 44. Derrumbes por descenso de los niveles freáticos (Milenio, 2017).....	57
Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).	59
Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).....	60
Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).	62
Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).	64
Figura 49. Erosión de pista urbana Arequipa (Kuroiwa, 2002).	64

Figura 50. Inundación en la zona de Plaza del Sol (Orozco, 2020).	65
Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).	77
Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).	79
Figura 53. Ejemplo de un área de biorremediación (Abellán, 2016).	79
Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).	80
Figura 55. Diseño base techo verde (Arquitectura y empresa, 2021).	81
Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)	82
Figura 57. Barril de lluvia para riego de huertos urbanos, estrategia de gestión de escorrentía de aguas pluviales (Jennings et al., 2013).	84
Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.....	86
Figura 59. Experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo (IGRAC, 2021).	88
Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971	92
Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971	95
Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).....	102
Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).	104
Figura 64 Ciudades esponja (China-Britain Business Focus, 2016).....	106
Figura 1. Área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo).	131
Figura 2. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).....	132
Figura 3. Modelo digital de elevación .(Geografía INEGI, 2014).....	133
Figura 4. Clasificación supervisada de la vegetación.	136
Figura 5. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).	137
Figura 6. Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.	141
Figura 7. Mapa de máximo calado en el área de estudio.....	142
Figura 8. Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio.	142
Figura 9. Mapa de máxima velocidad en el área de estudio.	143
Figura 10. Mapa de máxima peligrosidad ACA.	144
Figura 11. Determinación de peligrosidad ACA (Gracia et al., 2010).....	145

Índice de Tablas

Tabla 1. Variables preliminares para muestrear y su metodología de medición.	36
Tabla 2. Propuestas de intervención (descripción de escenarios).	41
Tabla 3. Distribución del agua en el mundo, (Craig, Vaughan, & Skinner, 2007).	52
Tabla 4. Propiedades de acuíferos.	60
Tabla 5. Tipos de plantas más comunes para techos verdes (Molano, 2016).	81
Tabla 6. Síntesis de los beneficios de los distintos tipos de SuDS (Susdrain, s.f.).	86
Tabla 7. Roles de la gestión y gobernanza del agua (Grigg, 2011).	98
Tabla I. Cuerpos de agua superficiales de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).	148
Tabla II. Características de los acuíferos pertenecientes a la microcuenca de San Juan de Abajo. (SIGEIA, 2023).	150

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).



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.

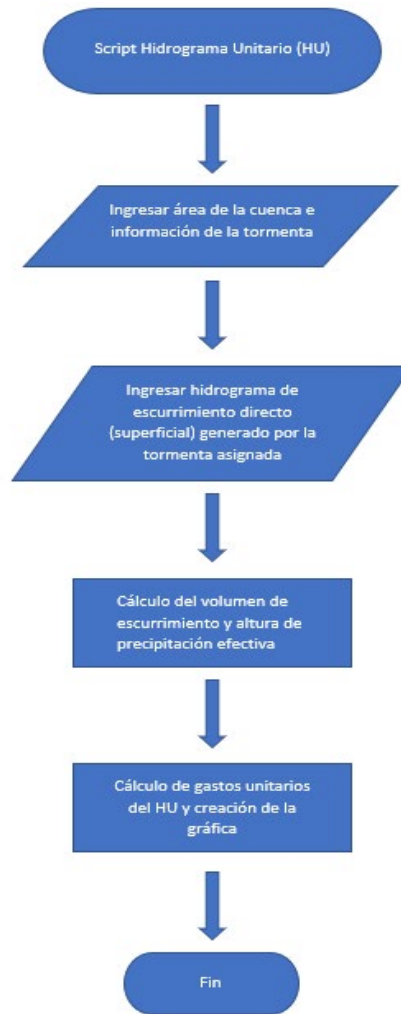


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología para la determinación del hidrograma unitario.

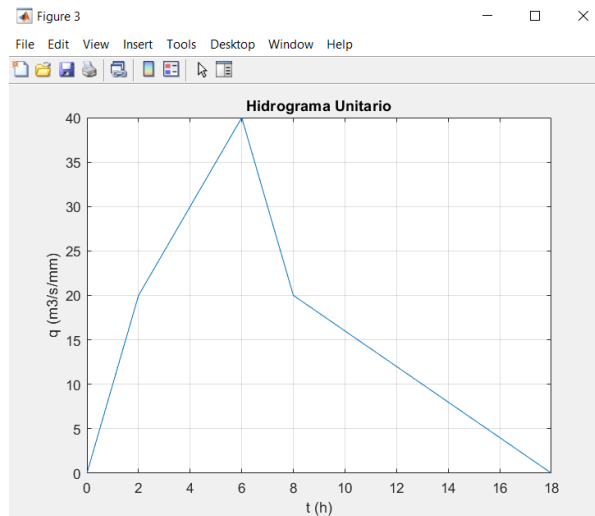


Figura 4. Hidrograma unitario resultante para la tormenta y el hidrograma anterior.

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 microcuenca "El Chicalote".

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

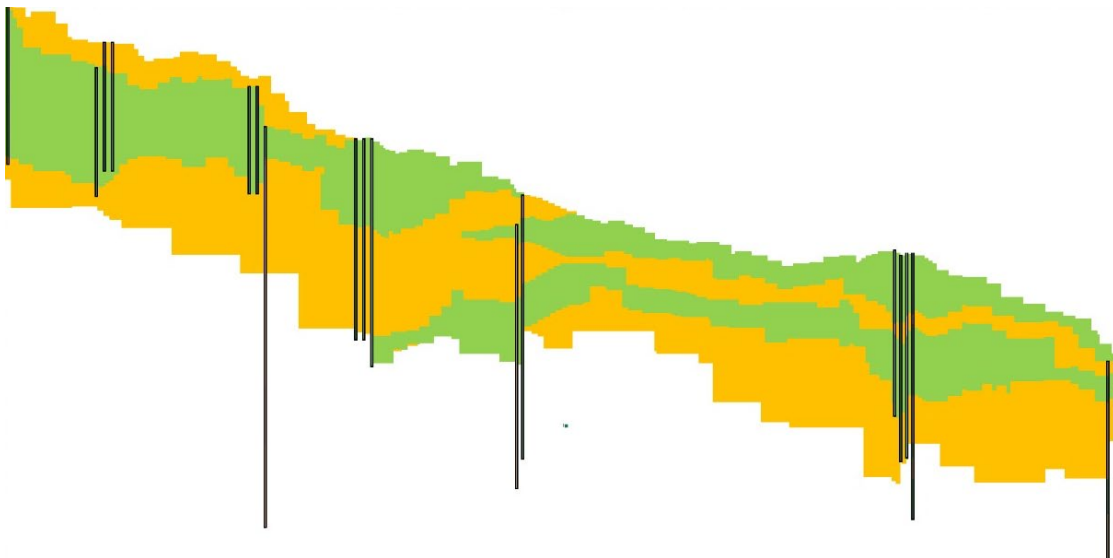


Figura 11. Perfil de suelos sur.

1.3.3 Primavera 2021

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

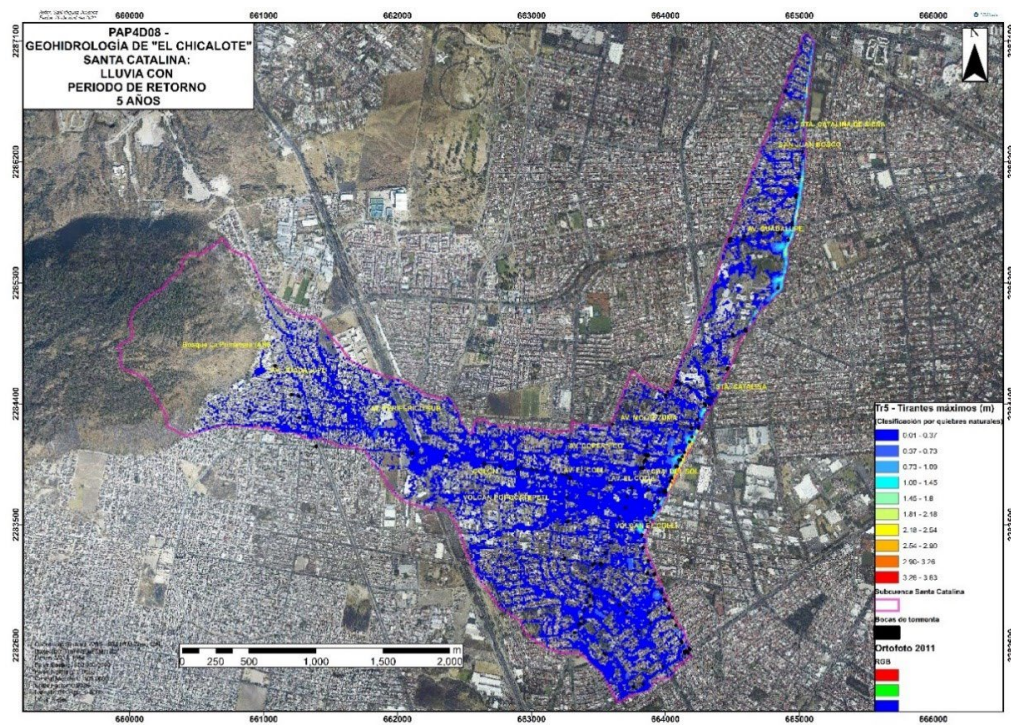


Figura 12. Mapa de tirantes máximos para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

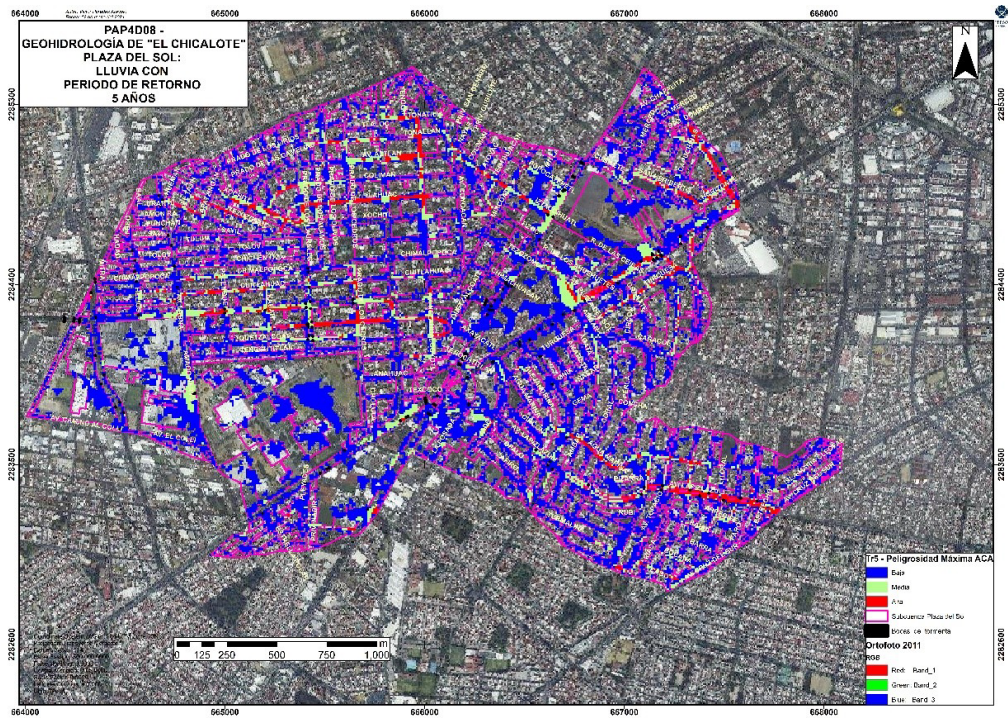


Figura 13. Mapa de peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Plaza del Sol.

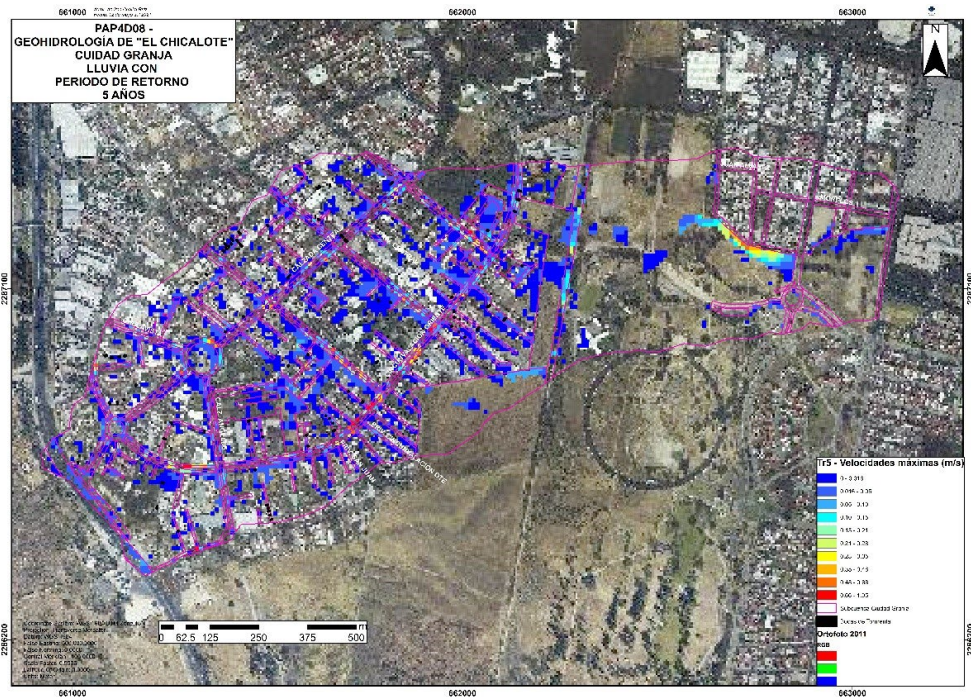


Figura 14. Mapa de velocidades máximas para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Ciudad Granja.

Se realizaron levantamientos en el vaso de Arroyo Seco, desde la barda de la represa (Figura 15) hasta aproximadamente 150 metros aguas arriba. Esto con la finalidad de crear un Model Space, curvas de nivel con la mayor exactitud posible e incorporarlas en un modelo digital de elevación. 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.

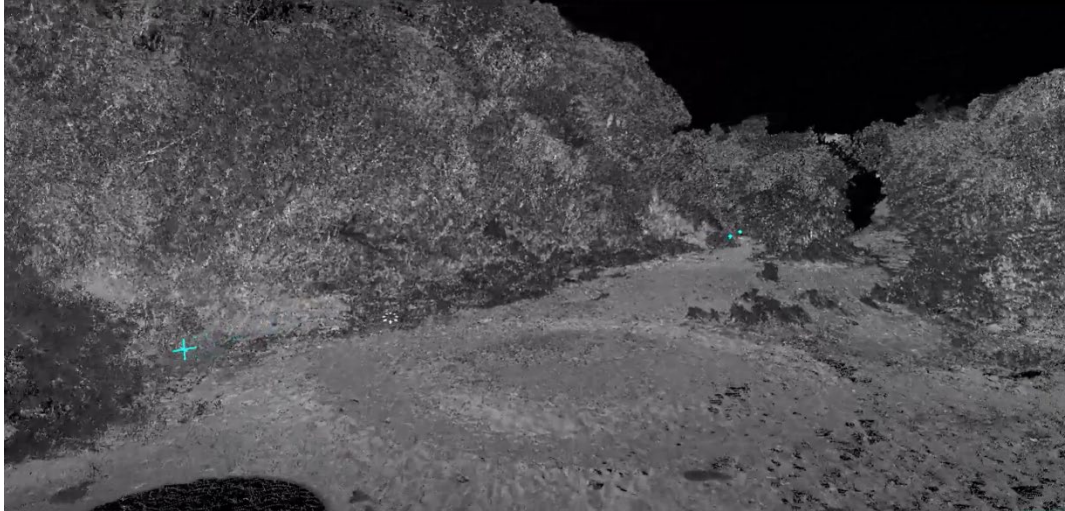


Figura 16. Captura de pantalla del Model Space de Arroyo Seco en Cyclone.



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)
RUB = result['ParticulasHorarioResult'].encode("utf-8")

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

Figura 19. Descarga y decodificación de datos de SEMADET.

```
Headers = ["Est", "Clave", "longitude", "latitude", "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], "longitude":dic[s][0], "latitude":
                                "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)
    csv_item
    print("Elemento publicado correctamente")
```

Figura 22. Publicación de capa en ArcGIS Online®.

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

Figura 23. Rutina de actualización de la capa.

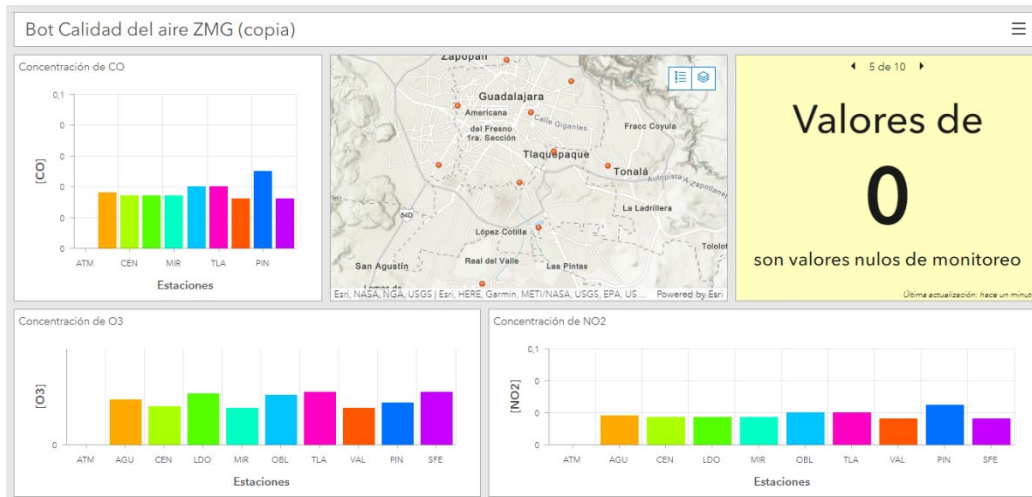


Figura 24. Tablero de monitoreo de calidad de aire.

Finalmente, en el área de monitoreo de calidad del agua, se continuó con el trabajo previo de otoño 2020. Se corrigió, sintetizó y complementó el reporte de “Estudio preliminar y programa de muestreo para la calidad del agua en los cauces de escorrentía superficial de la subcuenca “El Chicalote”. Paralelo a las propuestas de infiltración, se trabajó en el estudio de los principales contaminantes 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

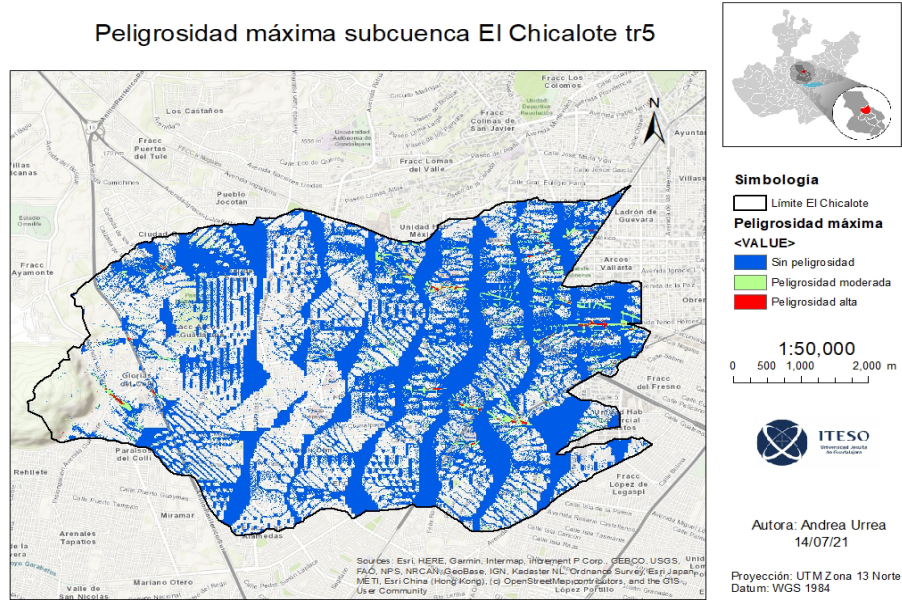


Figura 25. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en la microcuenca del Viejo Chicalote.

Máxima Peligrosidad subcuenca Sta. Catalina tr5

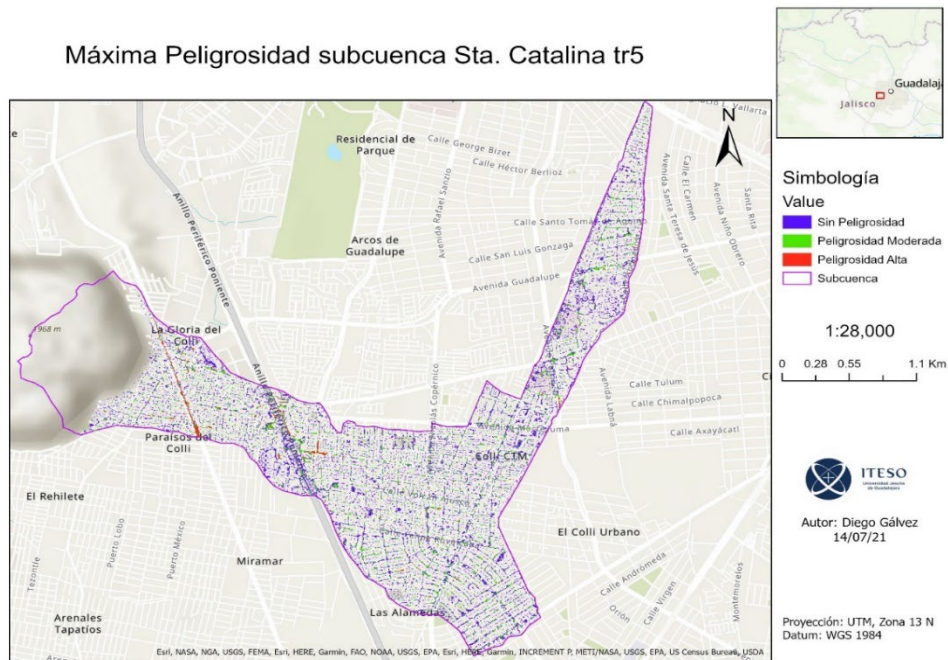
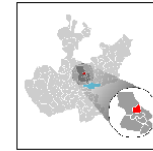
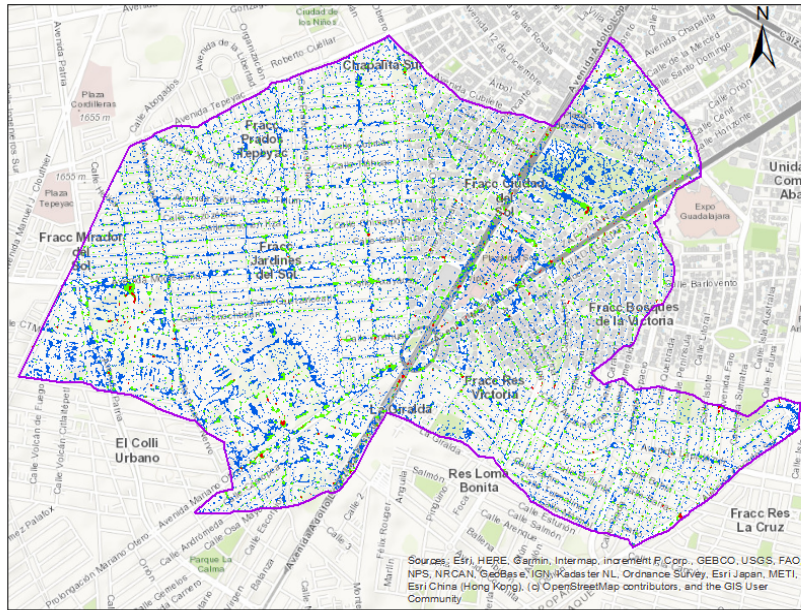


Figura 26. Mapa de máxima peligrosidad para una lluvia con periodo de retorno de 5 años en el área de captación Santa Catalina.

Máxima Peligrosidad ACA área de captación Plaza del Sol tr5



Simbología

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

1:20,000
0 100 200 400 m

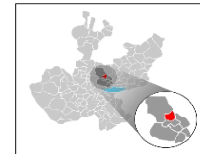
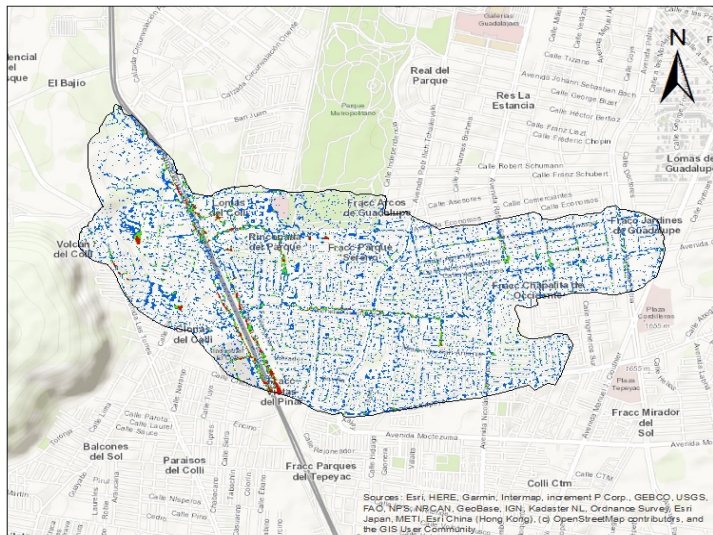


Autor: Mariana Monroy
14/07/21

Proyección: UTM, Zona 13 N
Datum: WGS1984

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

Máxima Peligrosidad ACA Área de captación Tchaikovsky - Tr 5 años



Simbología

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

1:20,000
0 100 200 400 m



Autor: Leslie Sacramento Ornelas
14/07/2021

Proyección: UTM Zona 13N
Datum: WGS1984

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

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

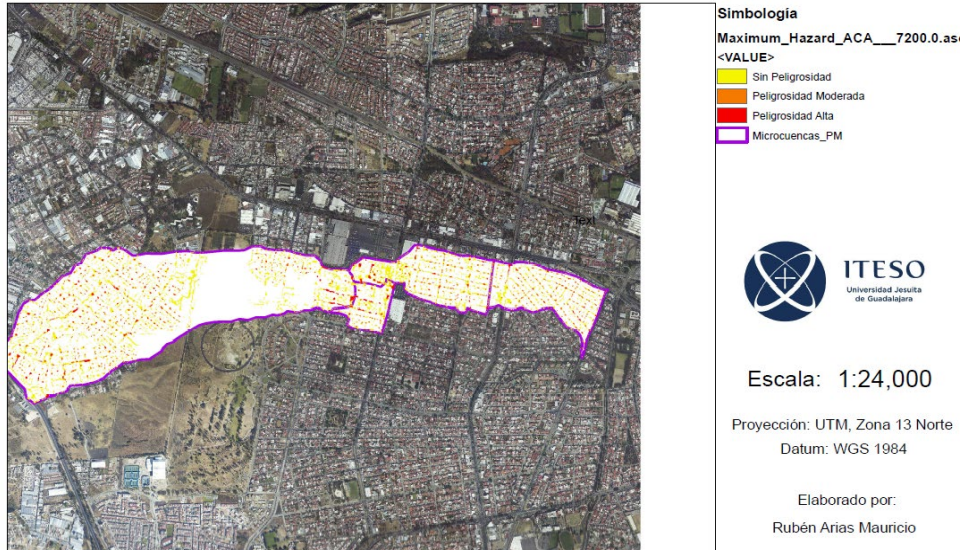


Figura 29. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación de Parque Metropolitano.

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

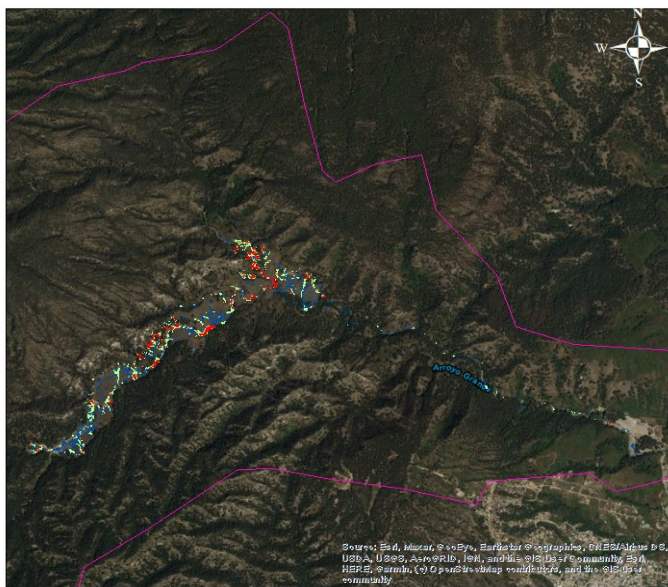


Figura 30. Peligrosidades máximas modeladas para una tormenta con tiempo de retorno de 5 años en el área de captación del Arroyo Seco.

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

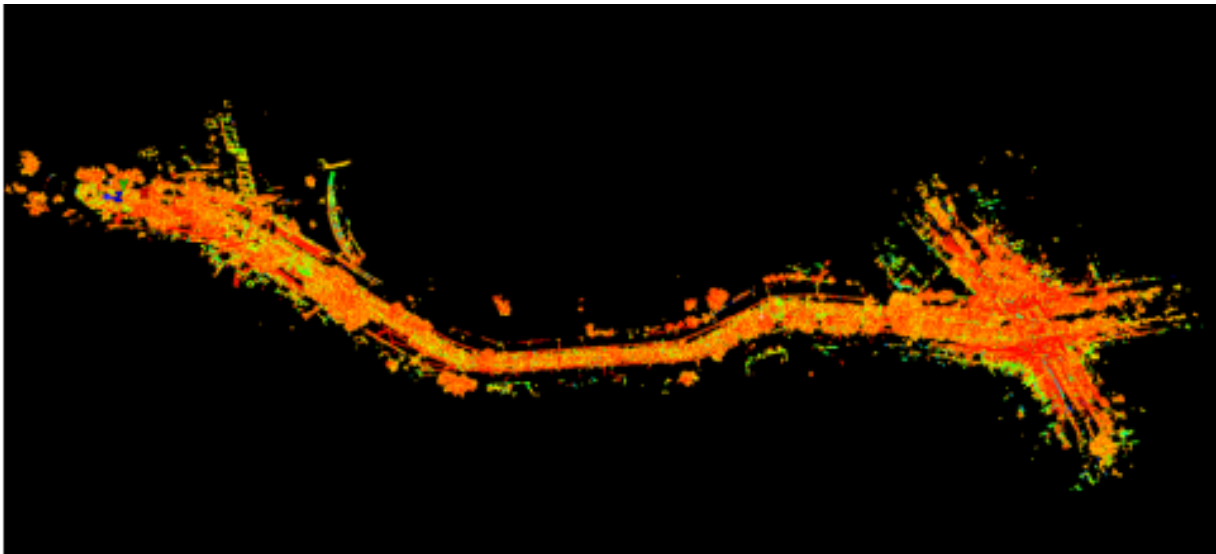


Figura 31. Captura de pantalla del Model Space del Canal de Santa Catalina y su cruce con Av. Guadalupe.

1.3.5 Otoño 2021

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-01-SEMARNAT-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 tapar 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			
	Nitritos como NO ₂ ⁻	10	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible			
	Nitratos como NO ₃ ⁻	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	Descable			
	Cd [mg/l]	0.005	NOM-127-SSA1-1994	Descable			
	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	Descable			
	Ni [mg/l]	0.01	Ley Federal de Descargas	Descable			
	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	Descable			
	Na ⁺ [mg/l]	200	NOM-127-SSA1-1994	Descable			
Br ⁺ [mg/l]	-	-	Descable				
Mg ⁺² [mg/l]	-	-	Descable				
Ca ⁺² [mg/l]	-	-	Descable				
Variable biológica	E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	no detectables	NOM-127-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	Descable	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, dimetotoa, diazinón.	-	-				
Emergentes	Hidrocarburos	Benceno	10	NOM-127-SSA1-1994	Imprescindible	Espectroscopio	Se identifican cada una de las variables mediante la técnica de espectroscopia 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	-	-	Descable	MEFS-CG-EM	Utilización de la técnica de microextracción en fase sólida, cromatografía de gases y espectrofotometría de masas. (Peña-Álvarez, A. y Castillo-Alanís, A. 2015)
		Paracetamol	-	-	Descable		
		Clonazepam	-	-	Descable		
		Antibióticos	-	-	Descable		
		Inhibidores de bomba de protones. (omeprazol, pantoprazol, etc.)	-	-	Descable		
		IFCAS.	-	-	Descable		
Cuidado personal	Carbamacepínas	-	-	Descable	Cromatógrafo	Utilización de la técnica de cromatografía de gas. (Durán-Álvarez <i>et al.</i> 2012)	
	Bisphenol A	-	-	Descable			
	Triclosan	-	-	Descable			
	Drogas legales e ilegales	-	-	Descable	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 Alda, M. J. 2008)	

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

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

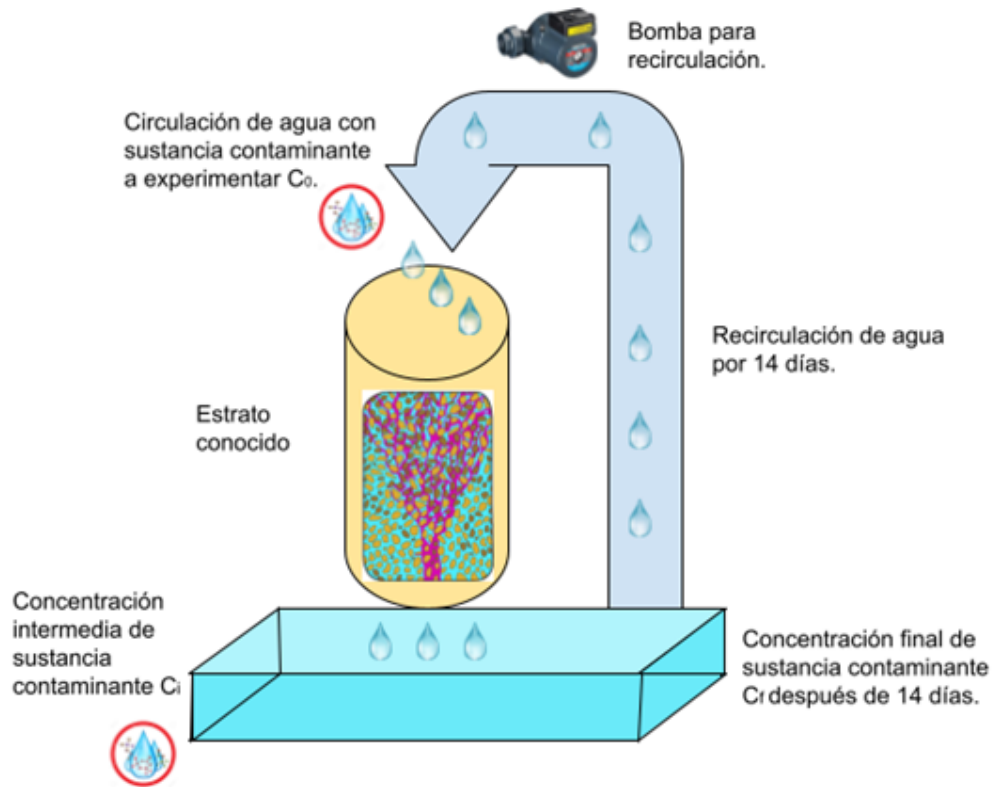


Figura 32. Prototipo para determinar la atenuación natural de diversos contaminantes en los suelos del AMG.
Elaboración propia.



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

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

- Topografía del área modelada con una cuadrícula de celdas de 100 x 100 metros
- Capa de grosor de la toba tala elaborada a con datos estratigráficos de pozos existentes
- Capa de la profundidad de la roca basáltica en el área del modelo.
- Condiciones de frontera del modelo a partir de datos del nivel estático del agua en 2018 de pozos existentes
- Propuesta de un pozo de infiltración de 45 metros de profundidad en el Parque Metropolitano
- Tiempos de funcionamiento del pozo de infiltración teórico bas dos en un estudio anterior (Vanegas, 2017) con el fin de comparar los resultados de ambos modelos

Se llevaron a cabo distintas simulaciones del funcionamiento del pozo de infiltración y se analizó el comportamiento del flujo del agua subterránea a causa de este. Se analizó 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.

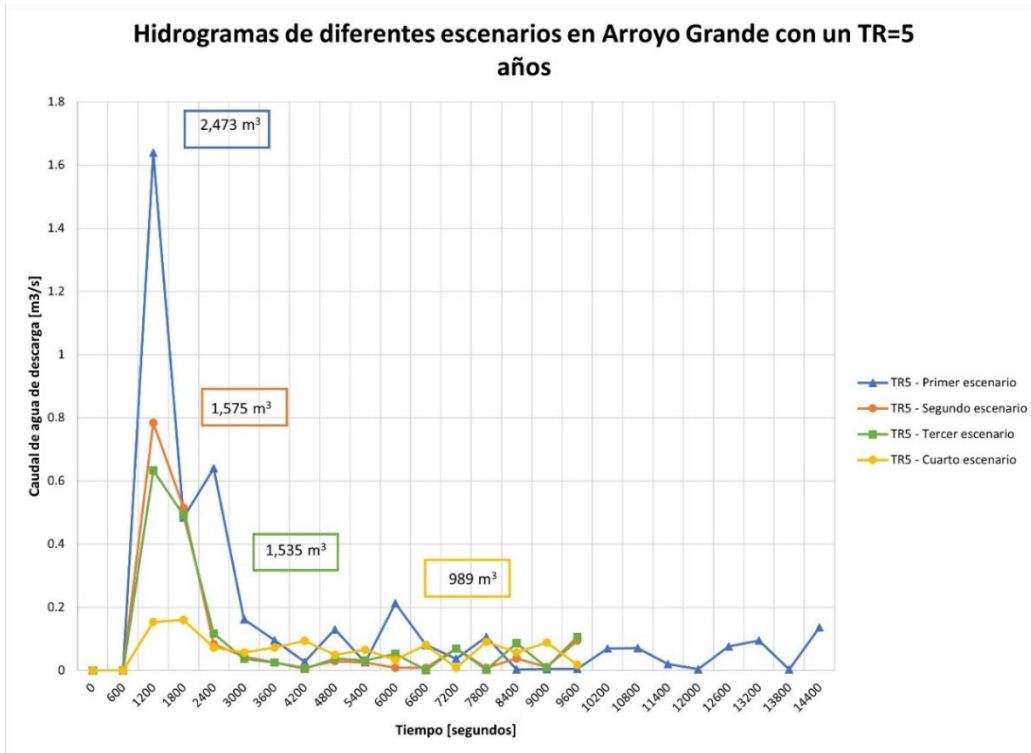


Figura 34. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 5 años.

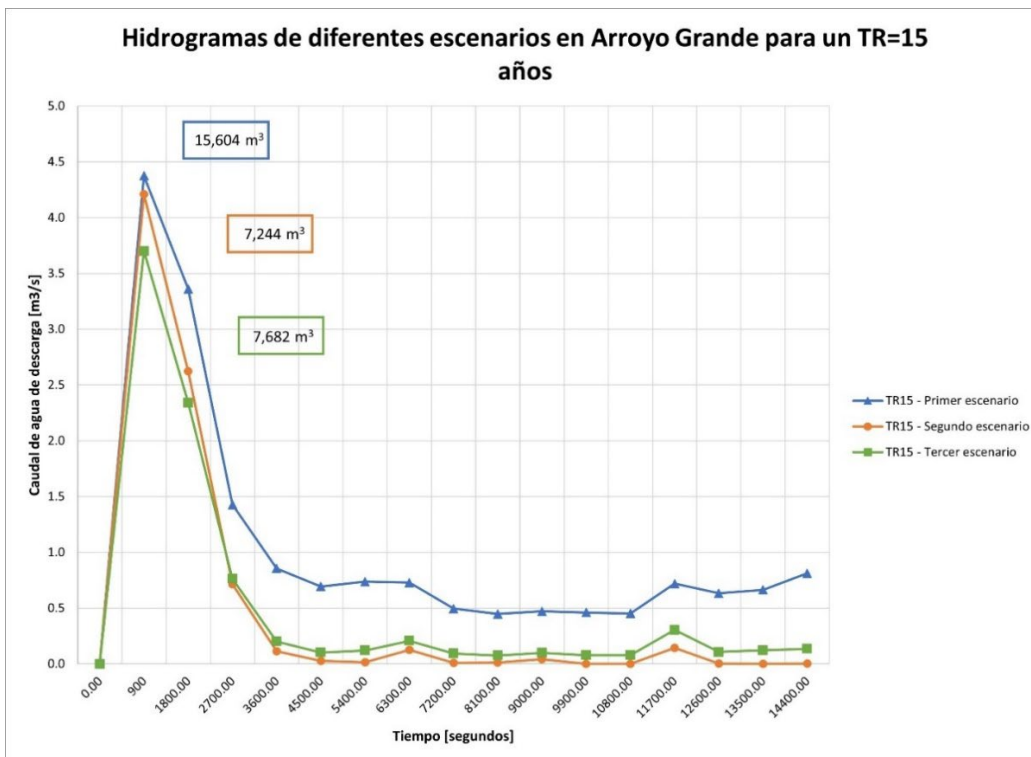


Figura 35. Gráfica de diferentes escenarios con un tiempo de retorno de 15 años.

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.

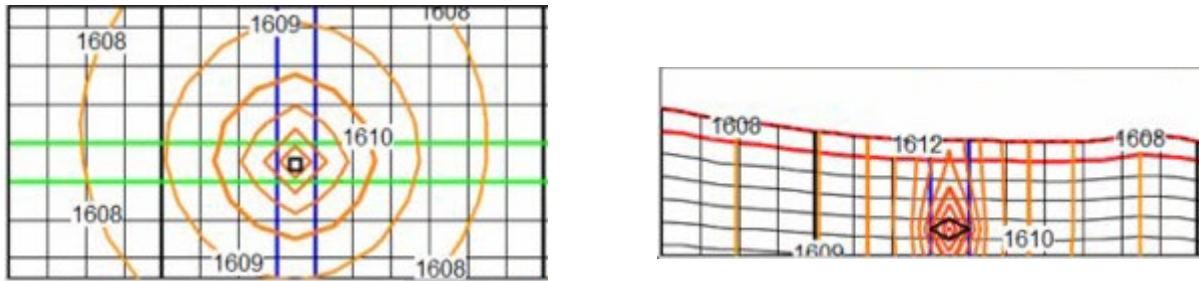


Figura 36. Resultados de la simulación. Vista aérea (izquierda) y de corte (derecha).

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:

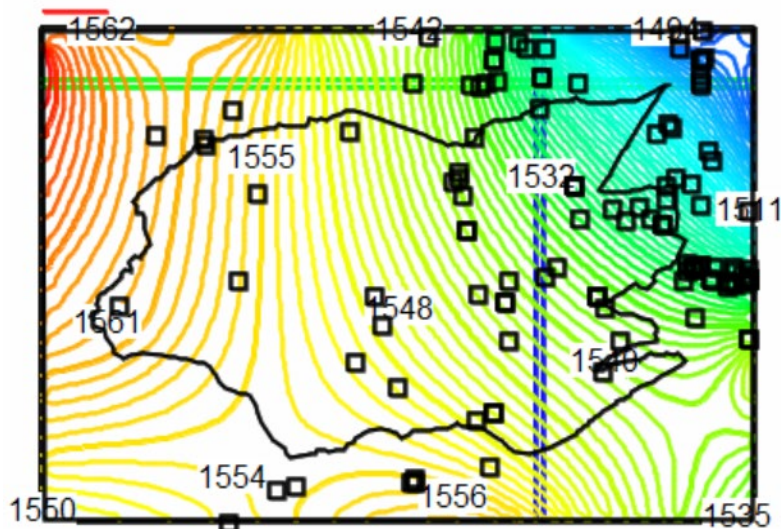


Figura 37. Iteración con pozos de extracción en funcionamiento.

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".

1.3.7 Verano 2022

1.4 Objetivos del proyecto

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

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

1.5 Descripción de los equipos de trabajo

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 [USGS], 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.
- Acuicludo: formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero no permite que circule a través de ella.
- Acuitardo: formación geológica semipermeable que contiene agua en cantidad apreciable, pero circula lentamente y con dificultad, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas.
- Acuífugo: formación geológica subterránea que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella. Son materiales no porosos ni fisurados e impermeables.

2.2.1. Acuíferos

Existen varias clasificaciones de acuíferos según sus características. Los tipos de acuíferos según la presión a la que se encuentra el agua son: libres, confinados, semiconfinados y colgados. Los acuíferos libres 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.

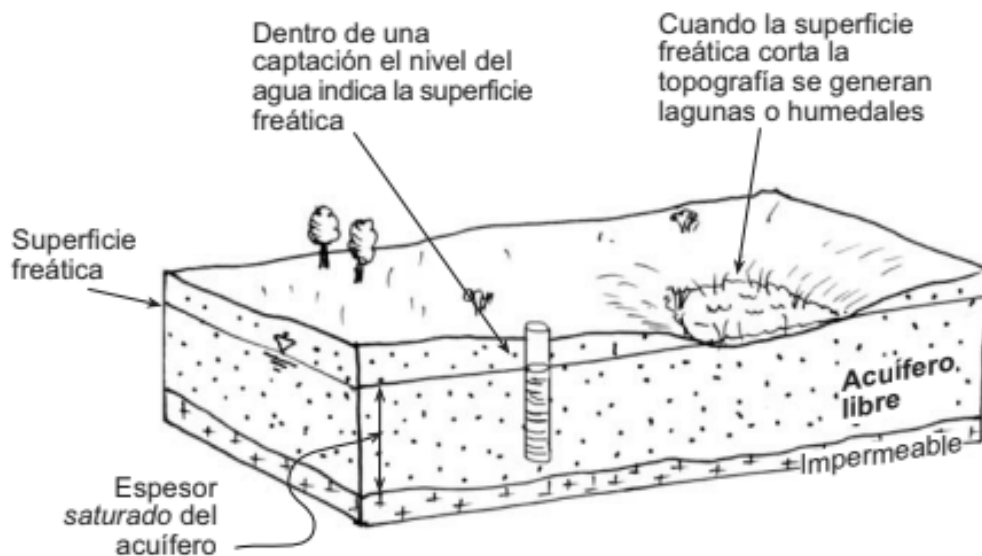


Figura 40. Acuífero libre (Sánchez San Román).

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.

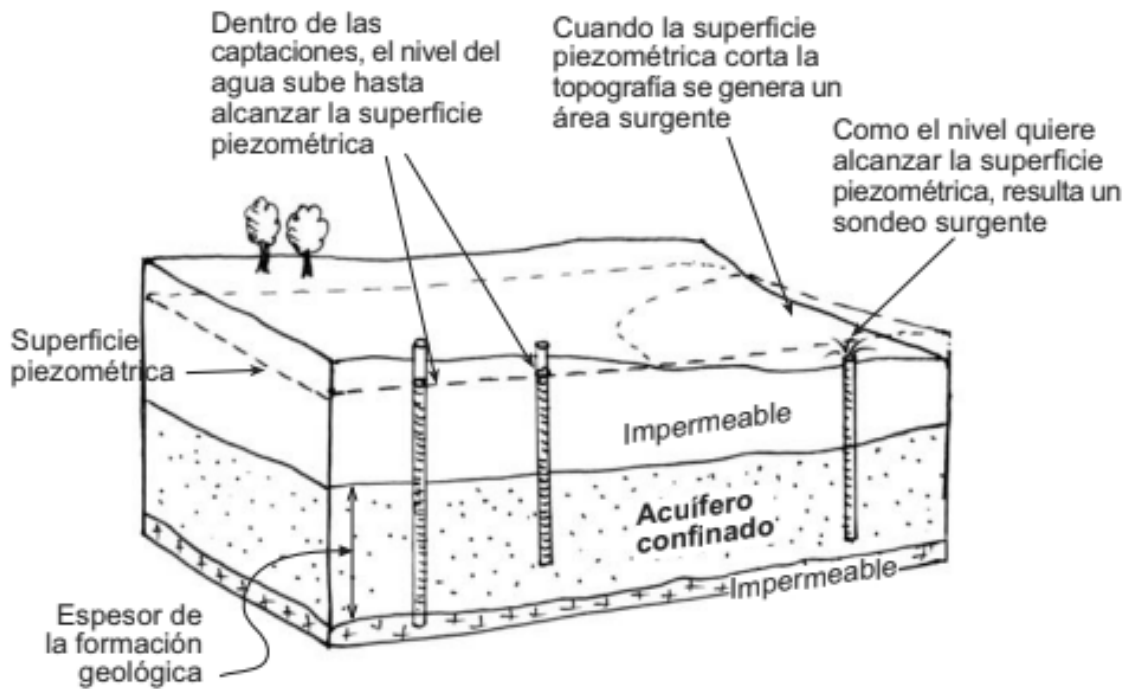


Figura 41. Acuífero confinado (Sánchez San Román, s.f.).

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).

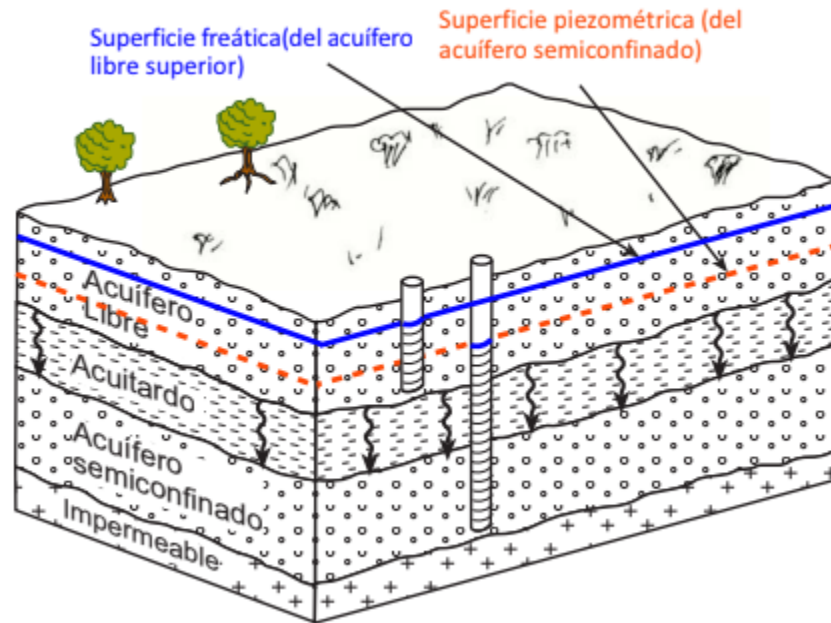


Figura 42. Acuífero semiconfinado (Sánchez San Román).



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.

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

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.

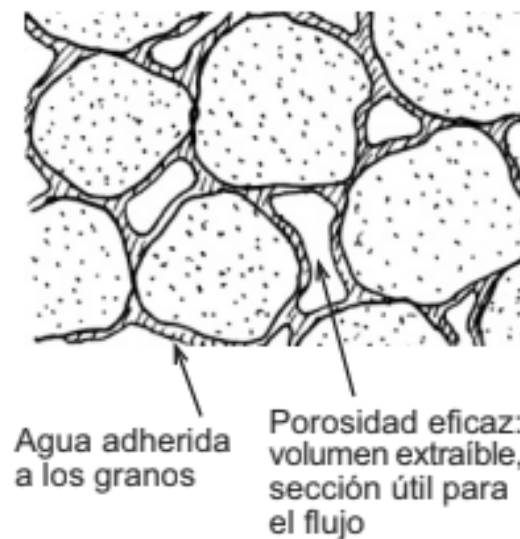


Figura 45. Porosidad eficaz (Sánchez San Román).

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.):

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

Donde:

Q = Caudal [=] L³/T

A = Área transversal [=] L²

K = Conductividad hidráulica [=] L/T

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

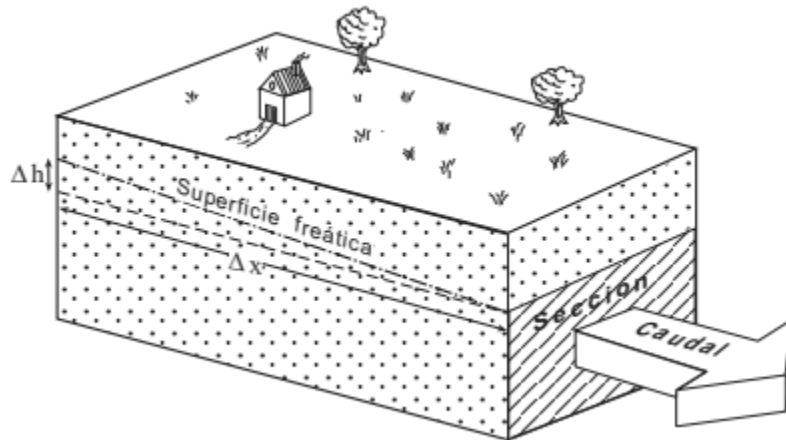


Figura 46. Gradiente hidráulico (Sánchez San Román).

La 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):

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

Donde:

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

$$K[=] \text{ L}/\text{T}$$

$$\text{espesor[=]} \text{ L}$$

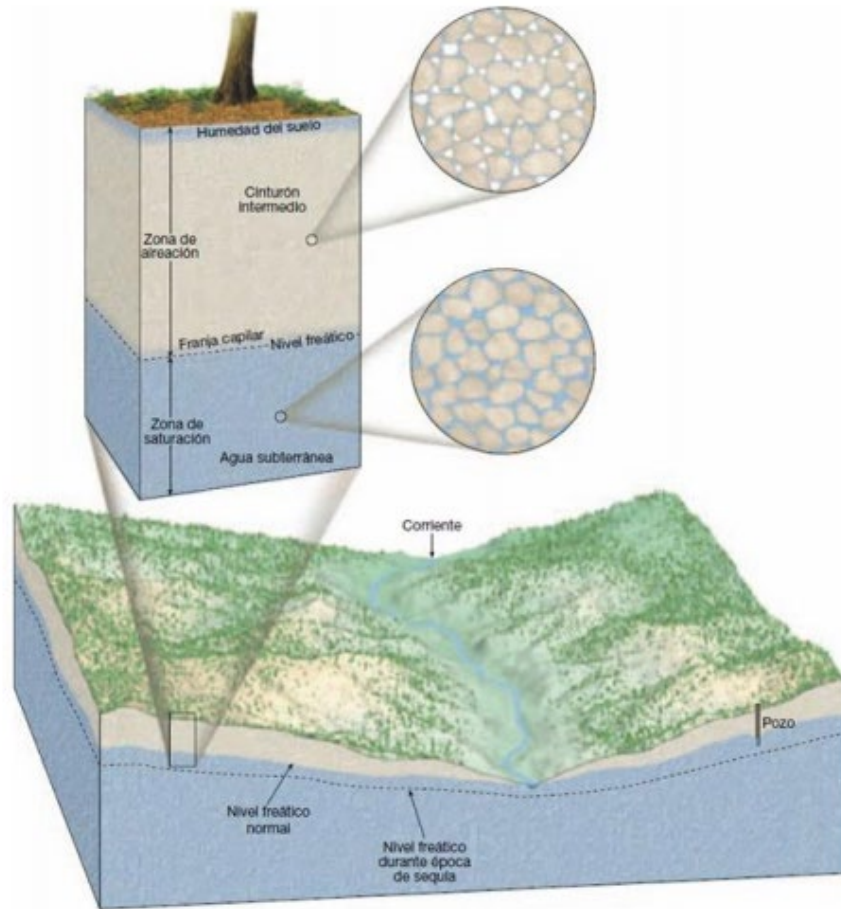


Figura 47. Distribución del agua subterránea (Tarbuck & Lutgens, 2005).

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).

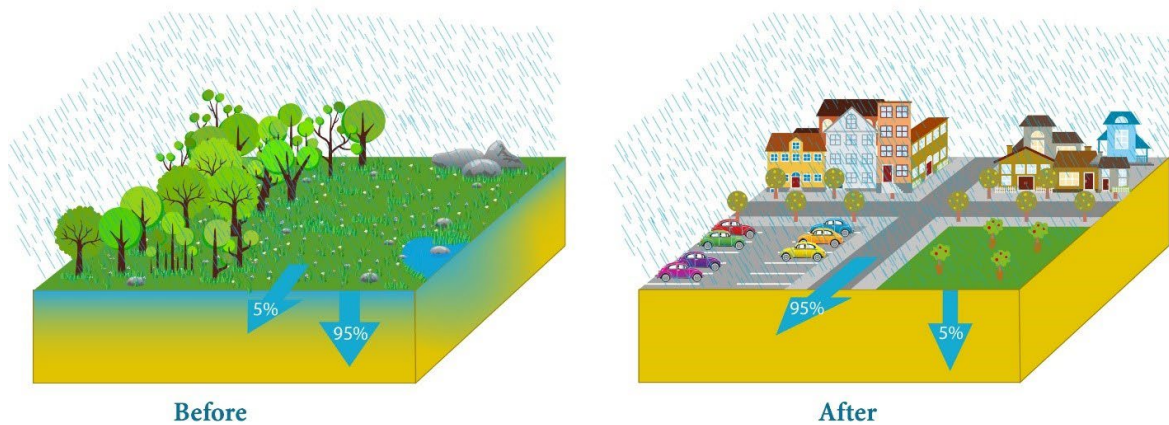


Figura 48. Comparación gráfica del uso de suelo forestal vs. urbano (Hidrología Sostenible, s.f.).

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., O₂) disuelto y los metales pesados. El oxígeno disuelto en el agua indica presencia de materia orgánica, siendo importante para evaluar y controlar el tratamiento de las aguas de desecho. Por otro lado, la medición de metales pesados es importante, ya que su extrema abundancia resulta peligrosa por su carácter no biodegradable y la toxicidad que ejercen, tanto en el uso del agua para riego agrícola, como para uso doméstico (Mancilla-Villa et al., 2012). Otros componentes inorgánicos son alcalinidad, Cl⁻, F⁻, P⁻ (**Organización Meteorológica Mundial, 1994**).

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

2.4.1 Calidad del agua superficial

Las fuentes de agua superficial son el eje de desarrollo de los seres humanos, permitiendo el abastecimiento para las diferentes actividades socioeconómicas llevadas a cabo en los asentamientos poblacionales. No obstante, de forma paradójica, muchas de estas actividades causan alteración y deterioro de 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.

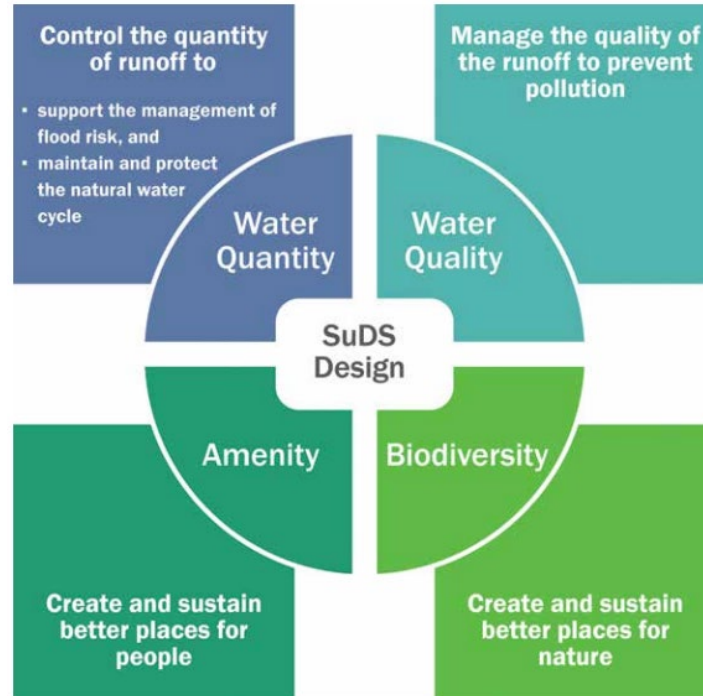


Figura 51. Cuatro pilares de los SuDS (Woods Ballard et al., 2015).

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.

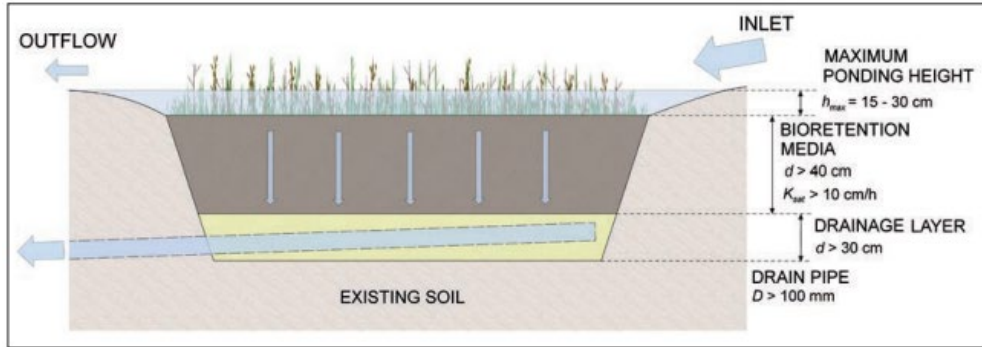


Figura 52. Diseño base de un área de biorremediación (Paus & Braskerud, 2014).



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.

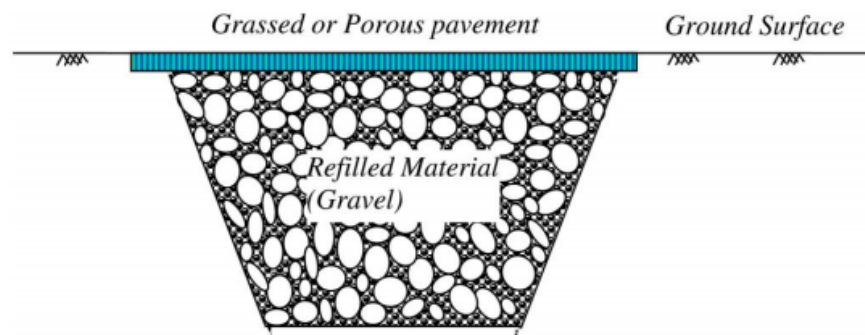


Figura 54. Diseño base zanja de infiltración (Susdrain, 2021).

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.

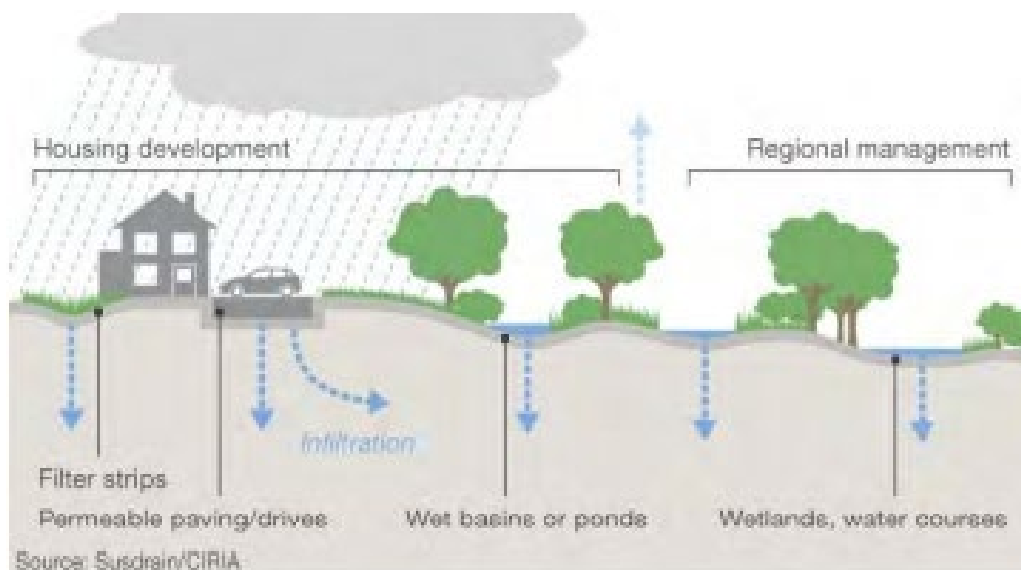


Figura 56. Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS) (Susdrain/CIRIA, 2014)

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).

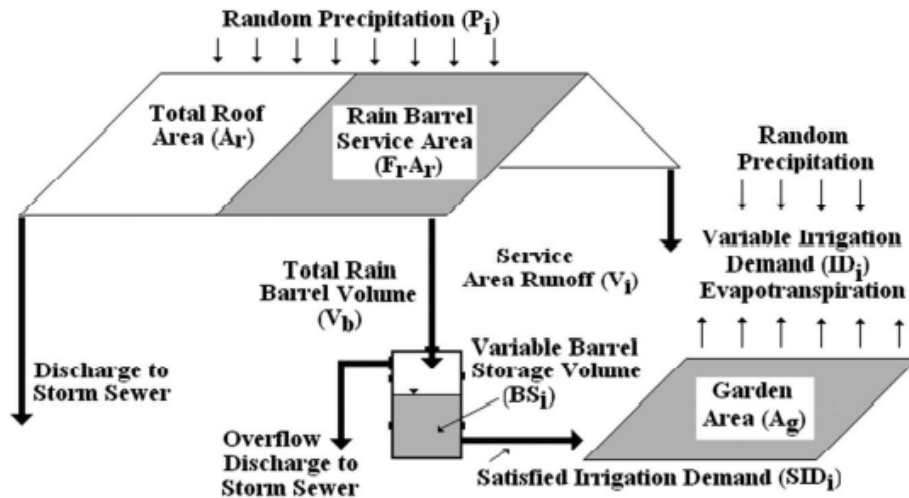


Fig. 1. Rain barrel for urban garden irrigation stormwater runoff management strategy

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.

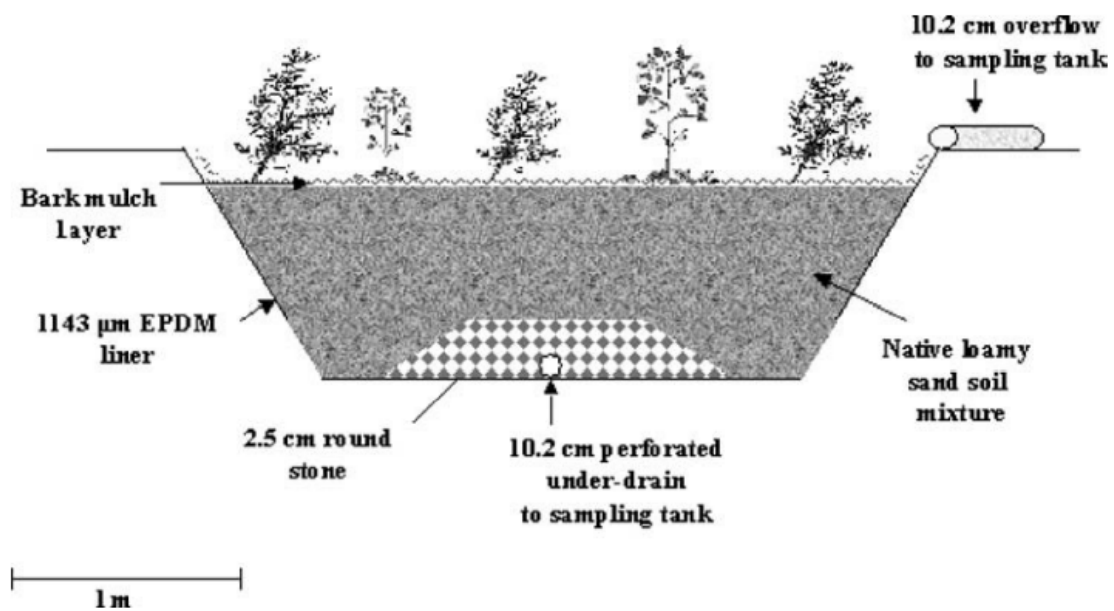


Figura 58. Sección transversal de jardín de lluvia.

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.

- Infiltración por extensión
- Filtración inducida
- Recarga por pozos
- Modificación en cauces
- Recolección de agua de lluvia y escorrentía



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):

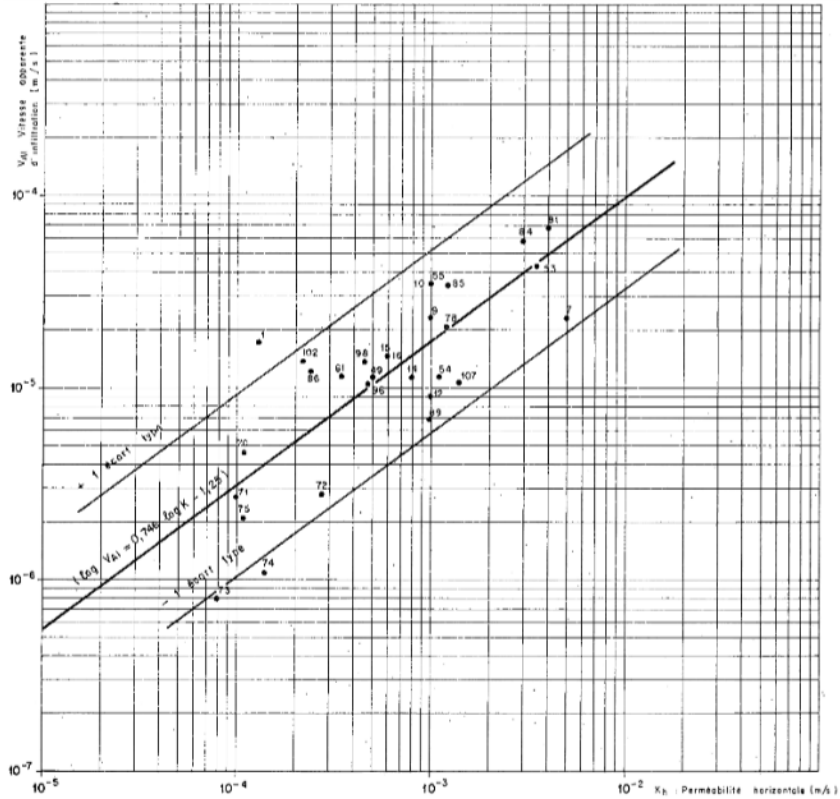


Figura 60. Método de infiltración de Bourguet, 1971

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

Donde:

K = Permeabilidad horizontal [10⁻⁵ m/s]

VAI = Velocidad aparente de infiltración [10⁻⁵ m/s]

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

2.6.2 Recarga profunda

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

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

Con este método se suelen recargar los estratos con menor extracción de agua subterránea pues, de este modo, se logra un mayor recorrido del agua en el acuífero. Por consiguiente, esto ayuda a que el agua pueda pasar con facilidad de un nivel a otro, evitando problemas de contaminación y logrando una mezcla más homogénea entre el agua inyectada y la que se encuentra en el acuífero (Custodio, 1996).

Dentro de esta categoría se incluyen los sondeos de inyección, el aprovechamiento de simas y dolinas, la implementación de drenes y galerías.

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

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

- Análisis positivo de la relación costo-beneficio.
- Mejoramiento del nivel de vida.
- Mitigación de inundaciones.
- Control de la contaminación.
- Ahorro de espacio superficial para el almacenamiento del agua.

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

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

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

disponibilidad de terreno, el espesor saturado y el volumen del agua disponible para la recarga en un determinado tiempo (Ojeda, 2016).

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

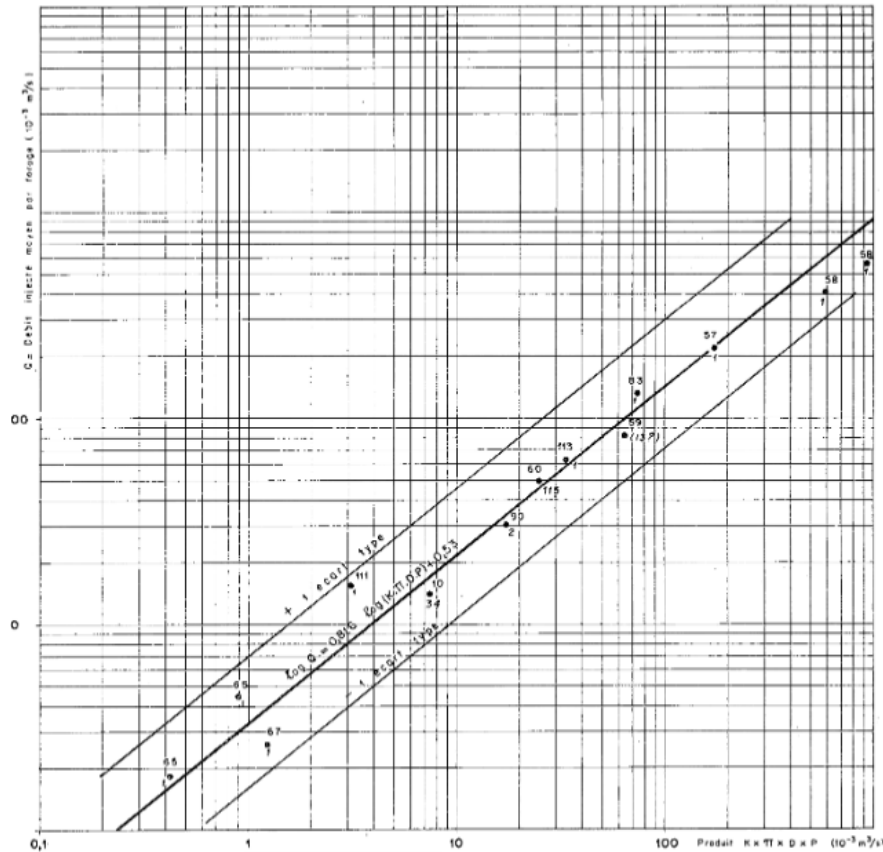


Figura 61. Método de Bourguet para recarga profunda, 1971

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

Donde:

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

K = Permeabilidad horizontal del acuífero [m/s]

D = Diámetro del pozo [m]

P = Profundidad del pozo [m]

Esta ecuación se obtuvo a partir de una regresión logarítmica, la cual obtuvo un coeficiente de correlación de $\rho = 0.976$, lo que brinda una primera aproximación bastante confiable a la infiltración de un pozo cuando se conoce la permeabilidad horizontal del acuífero.

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

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

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

Donde:

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

W: término de fuente o sumidero

S: rendimiento específico o coeficiente de almacenamiento

2.7 Monitoreo ambiental a nivel urbano

El monitoreo es el proceso de recolección, verificación, evaluación y utilización de información en una determinada zona o sitio de interés particular, buscando definir el impacto causado en este, sea positivo o negativo. Su concepto metodológico supone un sistema integral de seguimiento continuo de observaciones y mediciones de las diferentes características del

ambiente para su evaluación y el pronóstico de los cambios experimentados bajo la influencia antrópica y de los factores naturales (Perevochtchikova, 2009).

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

2.7.1 Gestión informada del agua

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	Regular la asignación y el drenaje, empoderar a los sistemas de riego,

	zonas irrigadas y las alimentadas por la lluvia.	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).

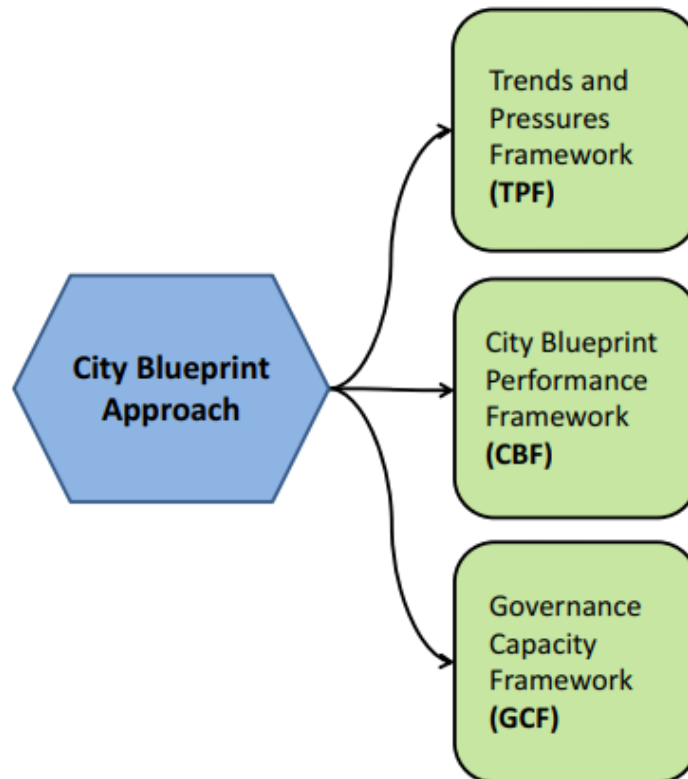


Figura 62. Metodología City Blueprint (Feingold et al., 2018).

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.

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**.

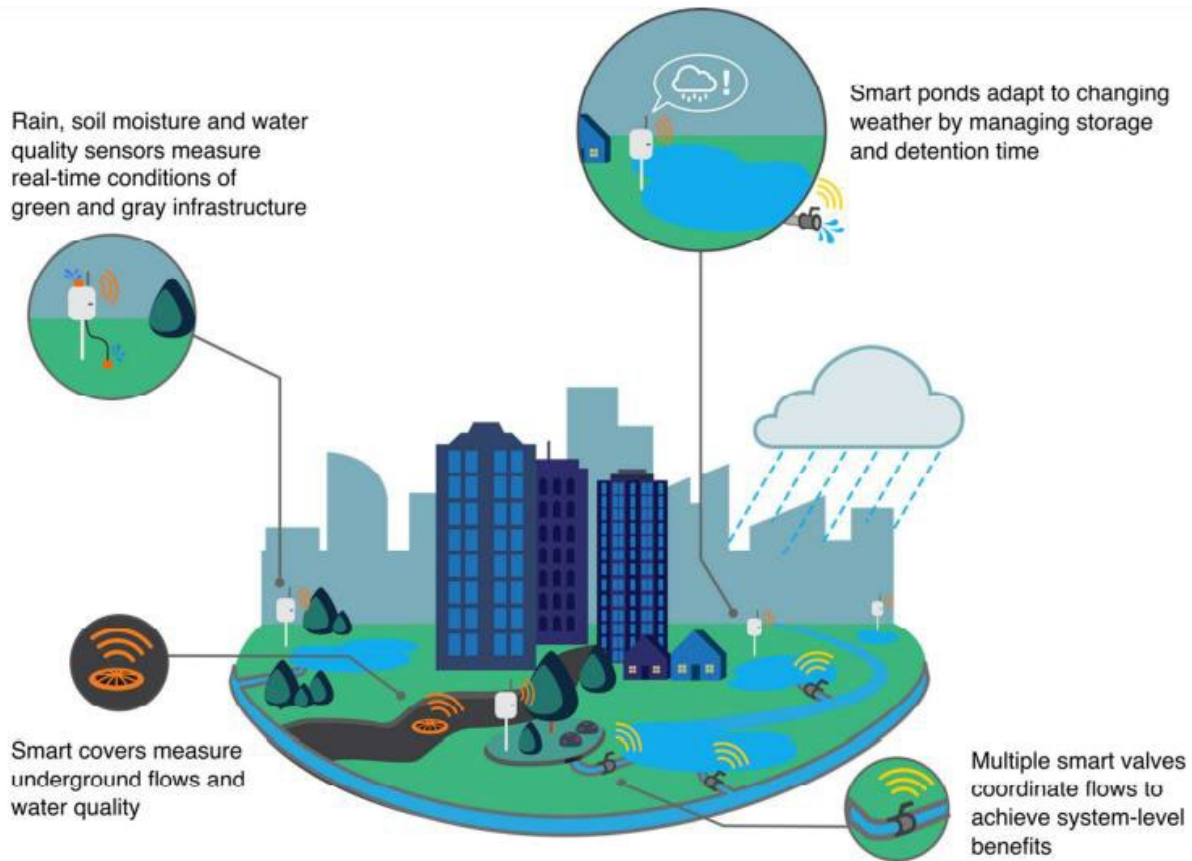


Figura 63. Sistemas de aguas pluviales inteligentes (Kerkez et al., 2016).

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.

Una tecnología existente para el monitoreo de humedales inundados estacionalmente es el espectro-radiómetro de imágenes de media resolución (MODIS). Este instrumento se encuentra en satélites que capturan la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en distintas longitudes de onda (NASA, 2020). Se diseñó 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

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).

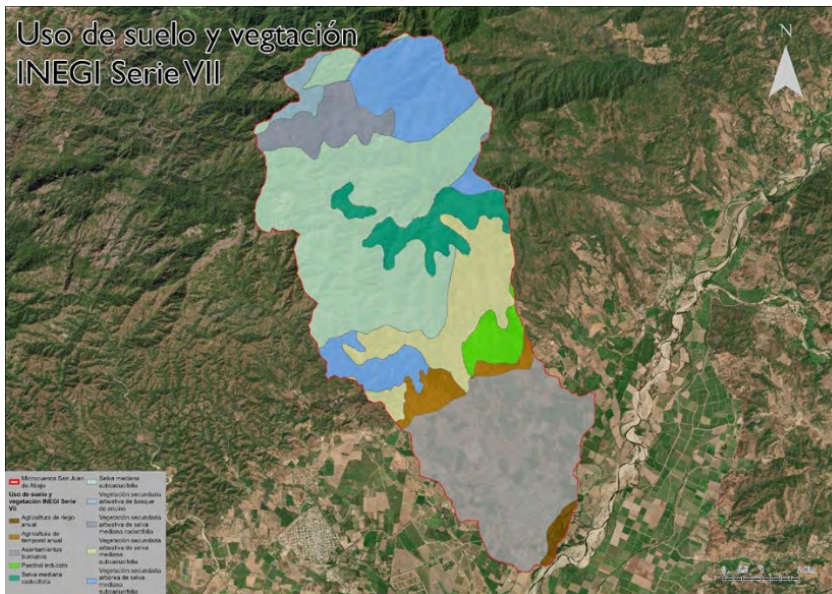


Figura 1. Uso de suelo y vegetación INEGI Serie VII (INEGI, 2021).

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.

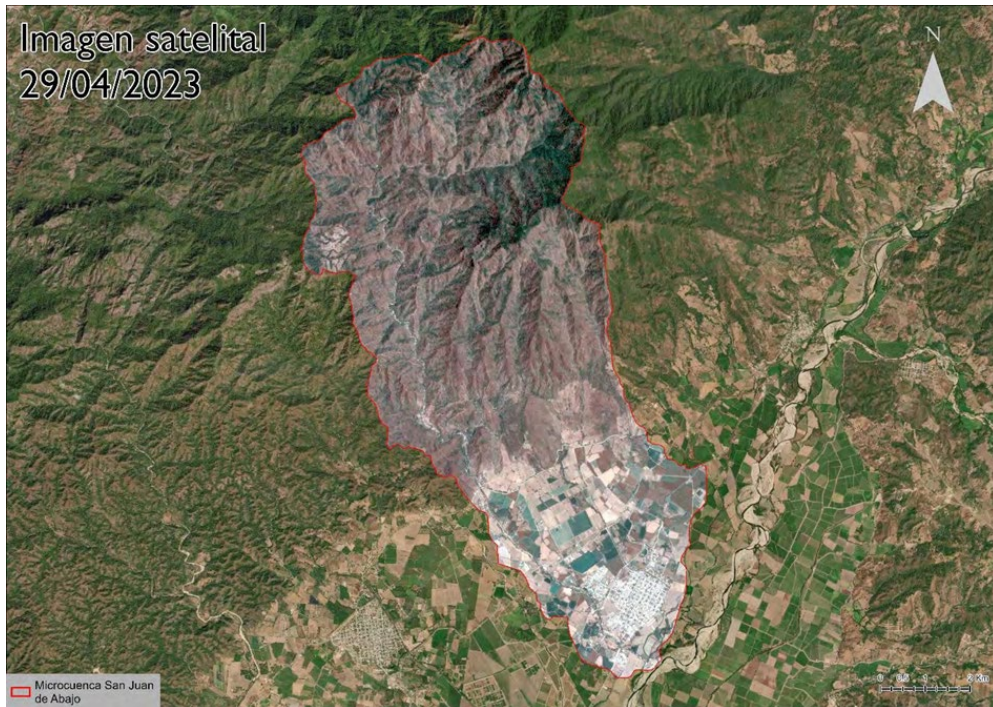


Figura 2. Imágen satelital del 29 de abril de 2023 (Planet, 2023).

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).

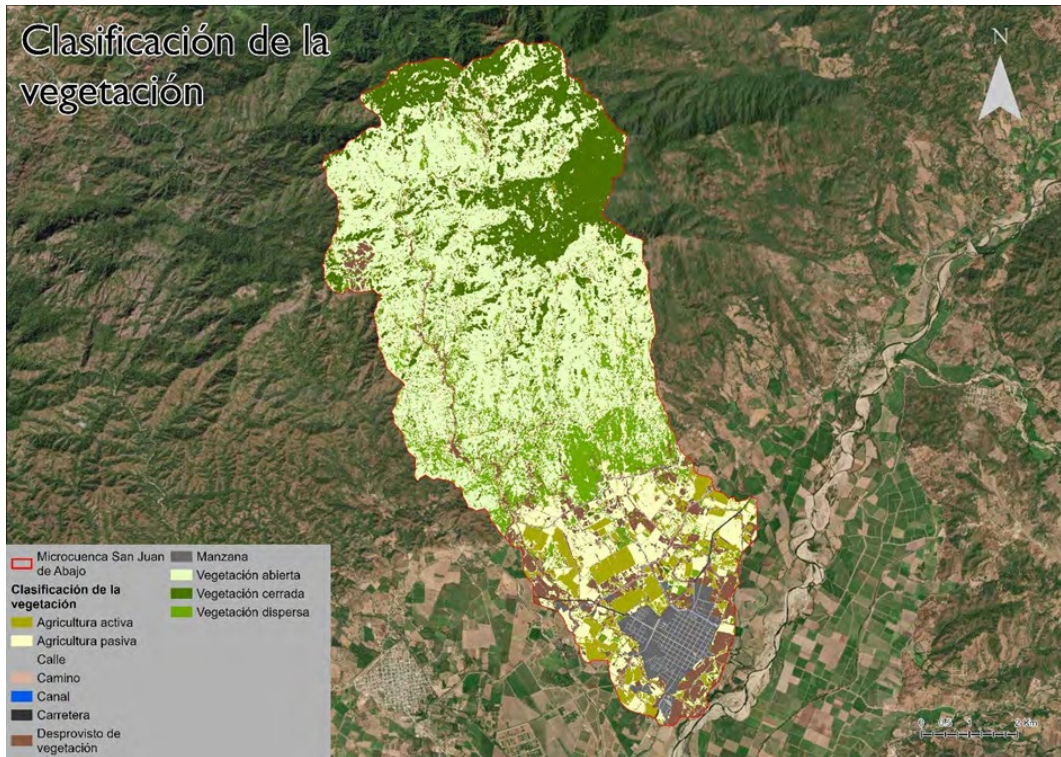


Figura 3. Clasificación de la vegetación (Elaboración propia de alumnos del semestre pasado).

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 del semestre anterior

Según el estudio de los compañeros del semestre pasado 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.

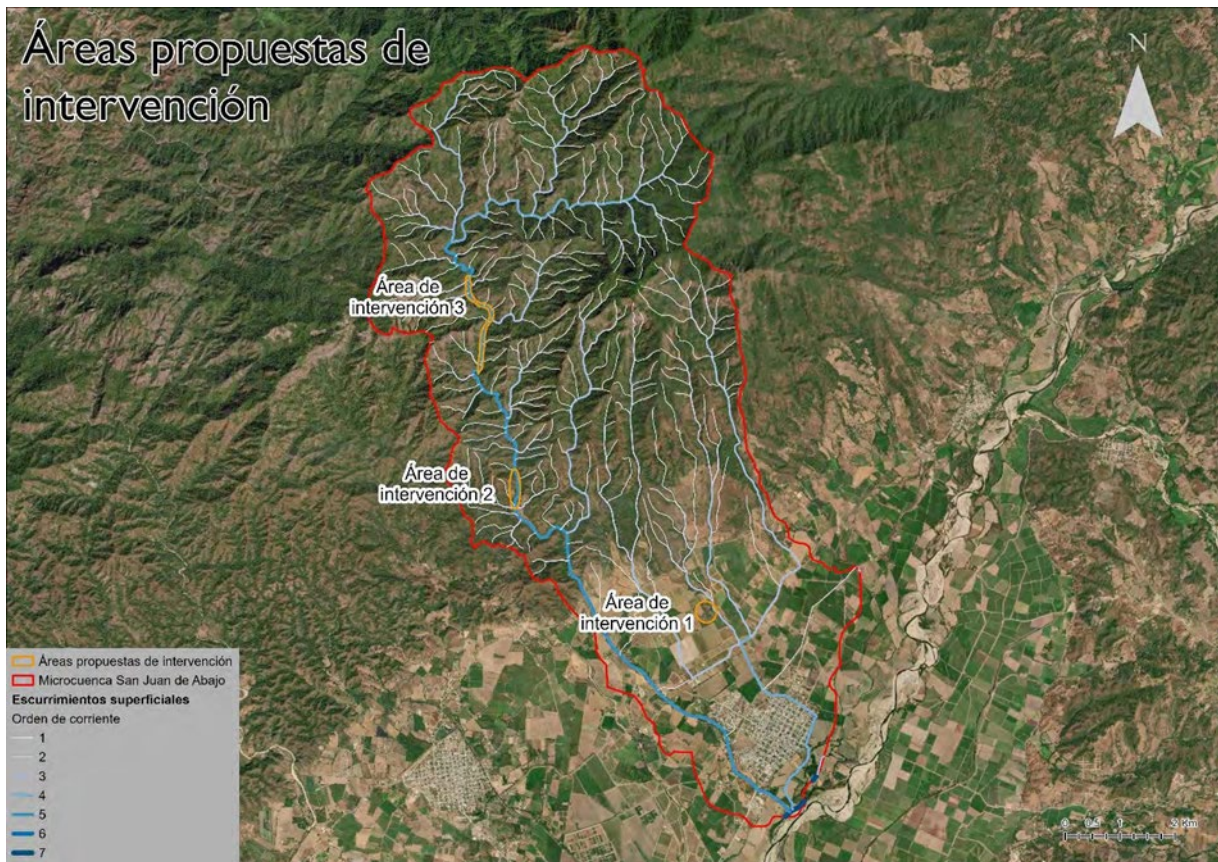


Figura 4. Áreas propuestas de intervención.

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:

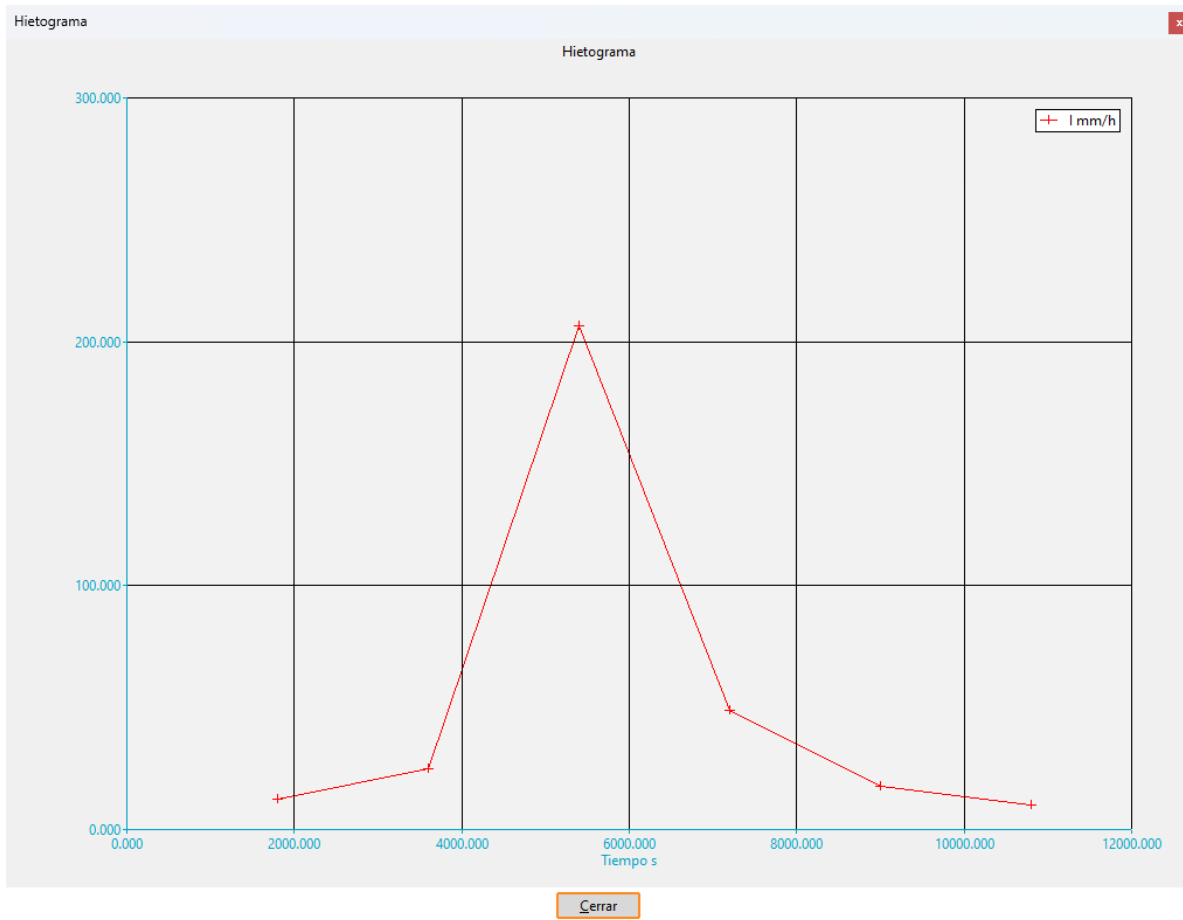
- Se generó una tormenta de diseño para el área de estudio con una precipitación máxima promedio y una duración de 3 horas.

Beneficios:

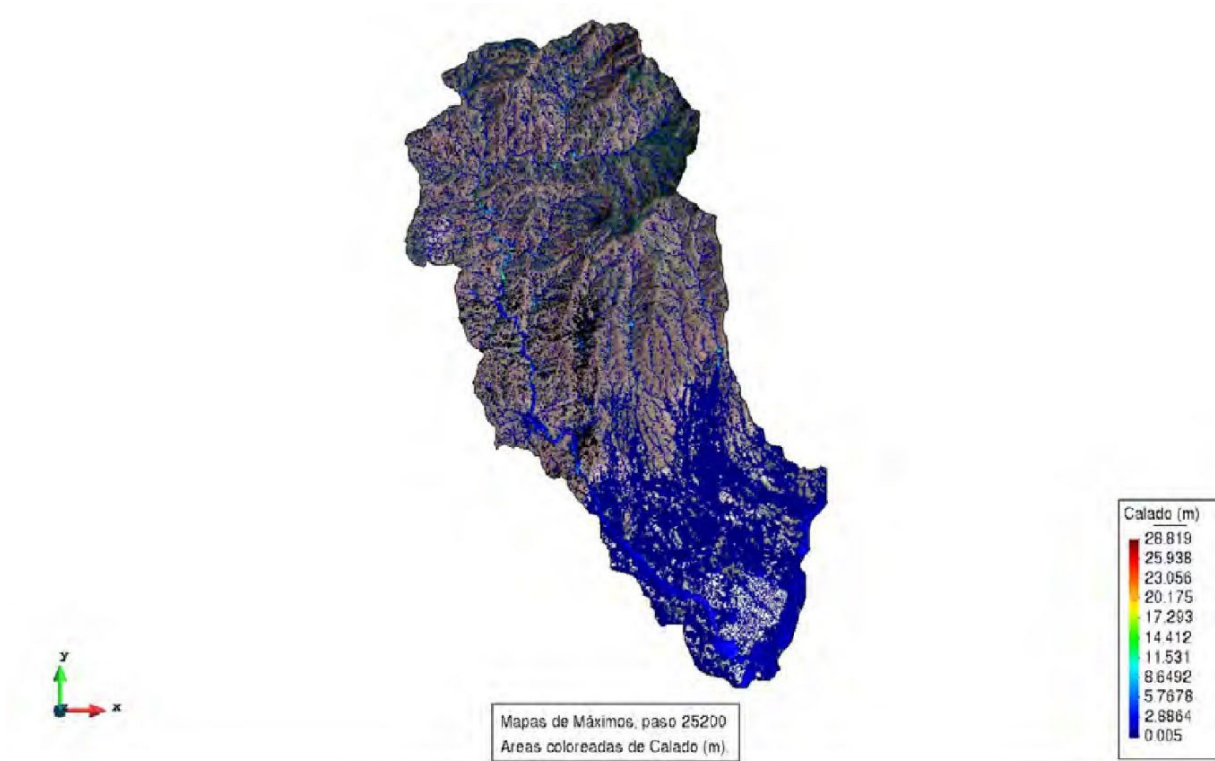
- Permite realizar simulaciones hidrológicas más precisas en el área de estudio.
- Aporta información valiosa para el diseño de infraestructura hidráulica.
- Reduce el riesgo de inundaciones y otros desastres relacionados con el agua.

Modelación y resultados de IBER.

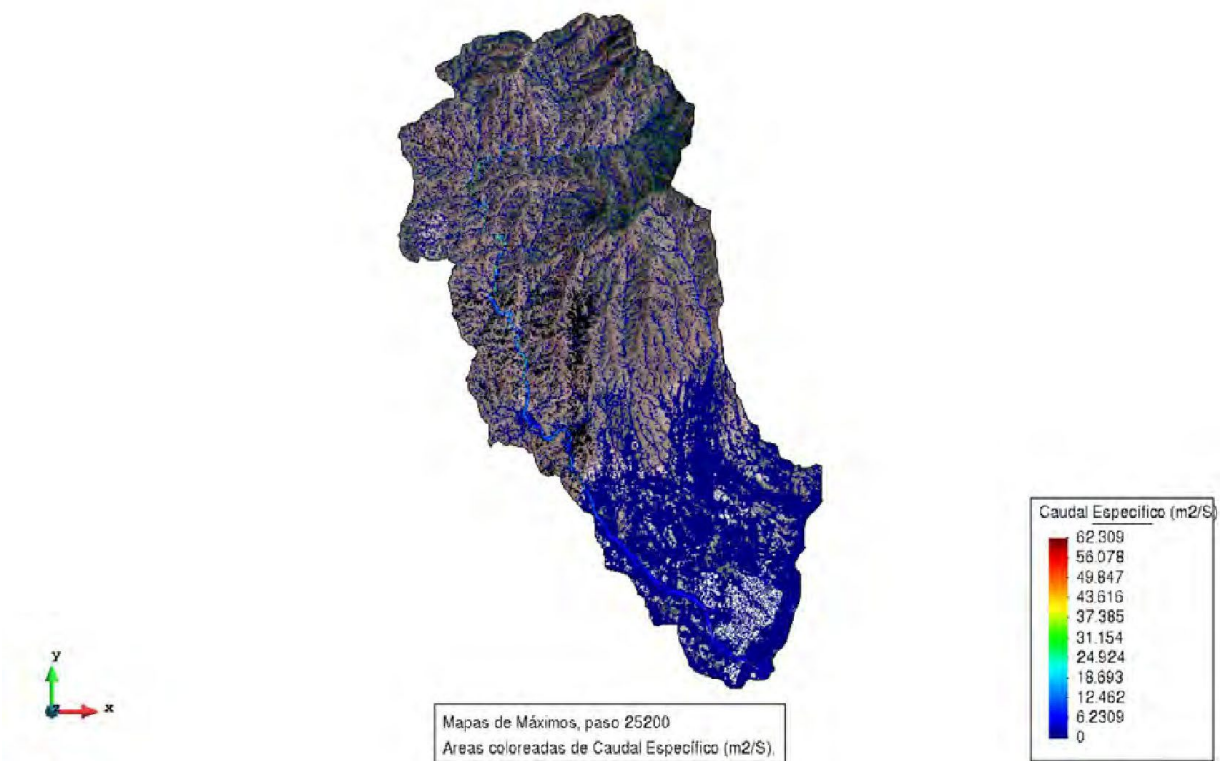
Para realizar el modelo los compañeros realizaron un preprocesamiento de la información recabada mediante el uso del software de SIG ArcGIS pro. Primero se transformó la información correspondiente al modelo digital de elevación tipo superficie de formato ráster a formato ASCII, ya que es el formato 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.

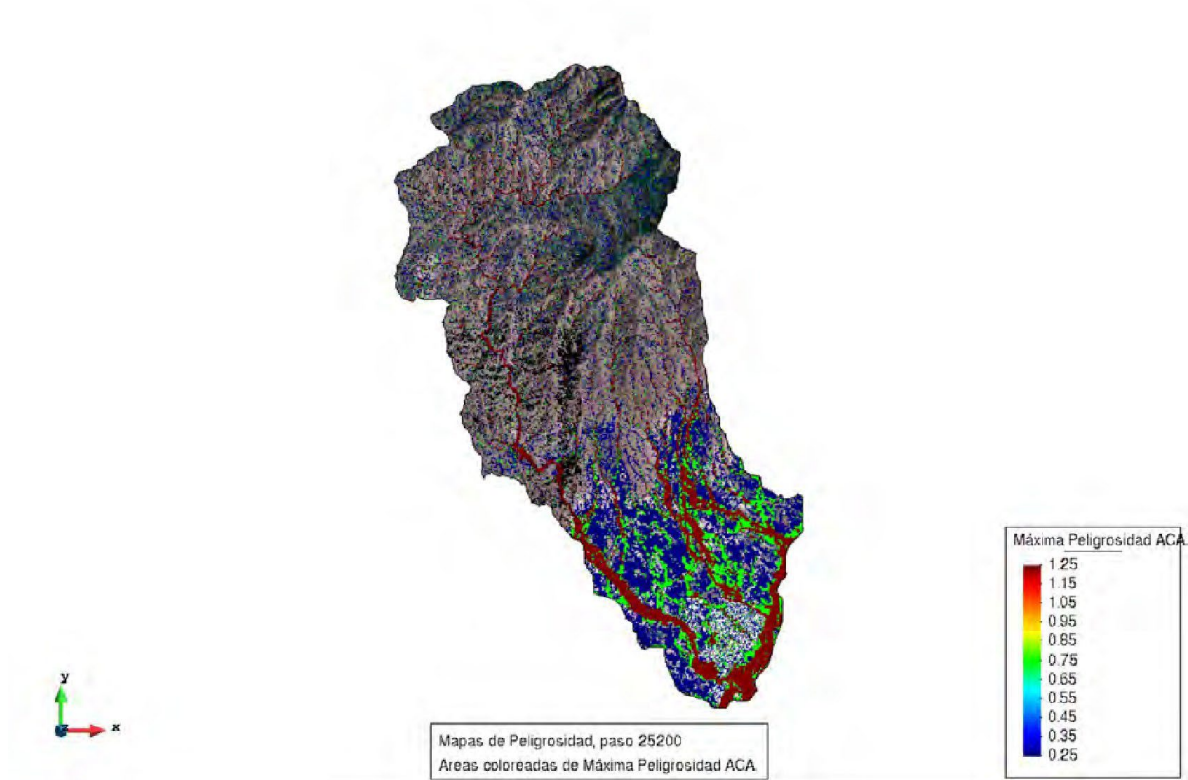


Mapa de máximo calado en el área de estudio.



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 caudal 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 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 corrientes intermitentes	y de	A. Guastitán	Corriente intermitente	8,782.22
Arroyos y corrientes intermitentes	y 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)	la	Superficie de incidencia (n
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			2'351,616.8
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 Banderas	Río Ameca-Ixtapa	Valle de Banderas	7	78,351
					206,186
					144,330
					149,828
					127,835
					180,069
					116,838
					203,436
					185,568
					141,581
					89,347
					45,361
					114,089
					166,323
					156,701
123,711					
65,979					
104,467					

De acuerdo con la tabla 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

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.
3. Mejora de la gestión del agua y prevención de inundaciones: Al comprender mejor la hidrología de San Juan de Abajo, se podrán desarrollar propuestas y estrategias que ayuden a gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente y reducir el riesgo de inundaciones. Esto es fundamental para la seguridad y el bienestar de la comunidad.

El área de estudio (Microcuenca de San Juan de Abajo) fue definida a partir de la microcuenca del Río Huichichila/Huastitán, en la que se tomó como punto de desfogue la desembocadura de dicho río sobre el río Ameca. No obstante, con la finalidad de también considerar la desembocadura del segundo de los escurrimientos de la zona se amplió el área de estudio en la parte sur de la microcuenca más allá del punto de desfogue establecido inicialmente (**Figura 1**). La microcuenca de estudio 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 1**, se presentan los órdenes de las corrientes superficiales. De esta figura es posible observar que el cauce de mayor orden y con mayor relevancia dentro de la microcuenca de estudio corresponde al Río Huichichila, dado que éste cruza la microcuenca desde la parte alta hasta la parte baja. No obstante, al noreste de la microcuenca es posible observar otro cauce relevante que drena la sección noreste de la microcuenca y que finalmente se une con el Río Huichichila previo a su descarga en el Río Ameca.

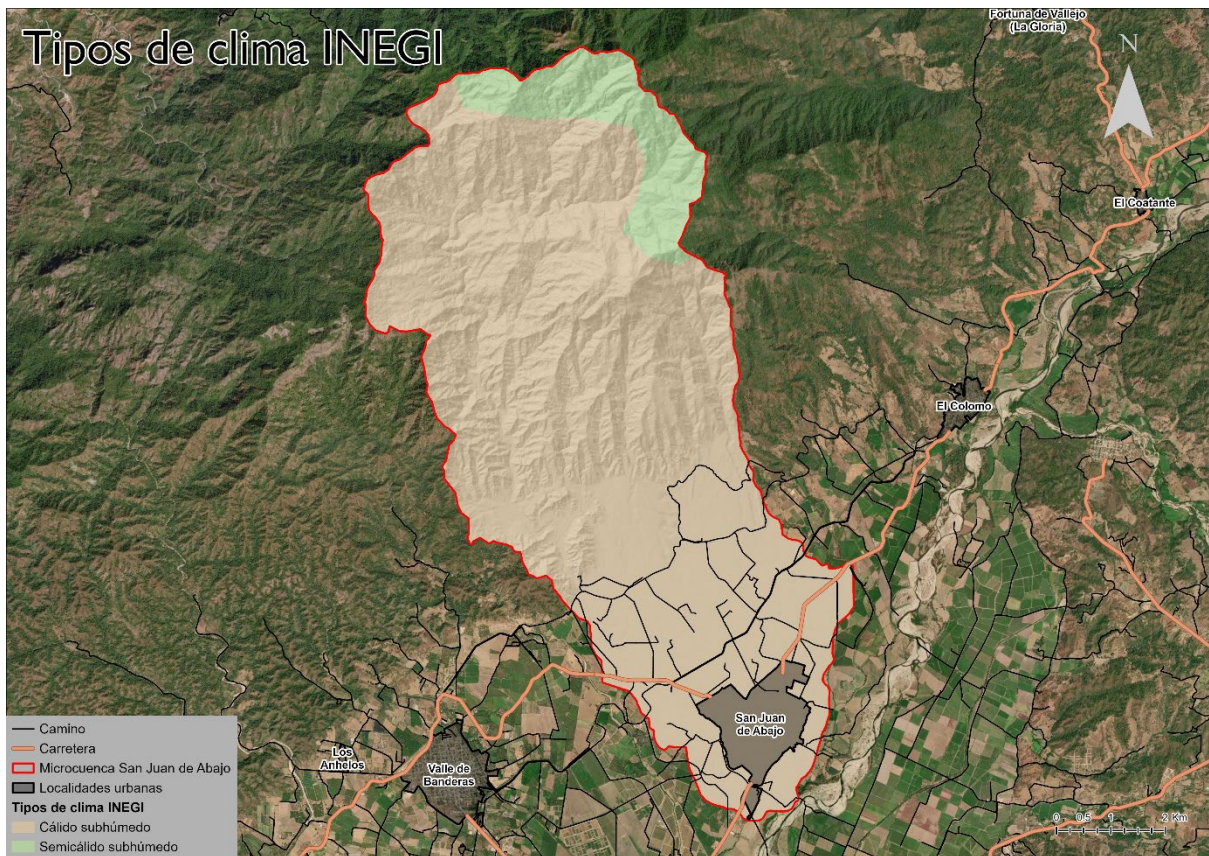


Figura 66. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).

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).

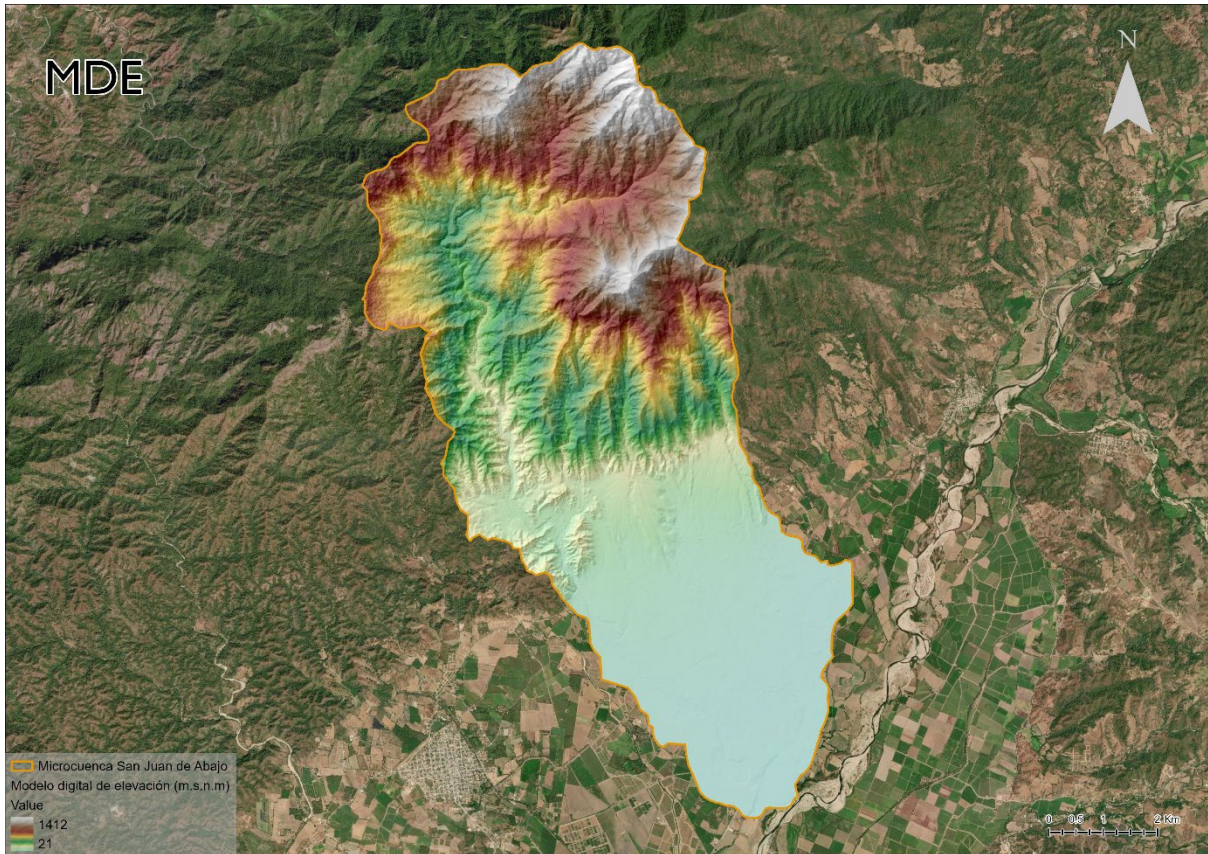


Figura 67. Modelo digital de elevación.(Geografía INEGI, 2014).

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 1), es posible identificar dos zonas principales dentro del área de estudio. La primera de las zonas, ubicada al noroeste de la cuenca (parte alta) se tiene una topografía accidentada al contar con cambios abruptos en la elevación del terreno y donde se tienen pendientes pronunciadas. Por otro lado, en la parte baja de la cuenca ubicada al sureste del área de estudio, se cuenta con una topografía plana con pendientes bajas (Geografía INEGI, 2014).

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.

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 1)

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 3**).

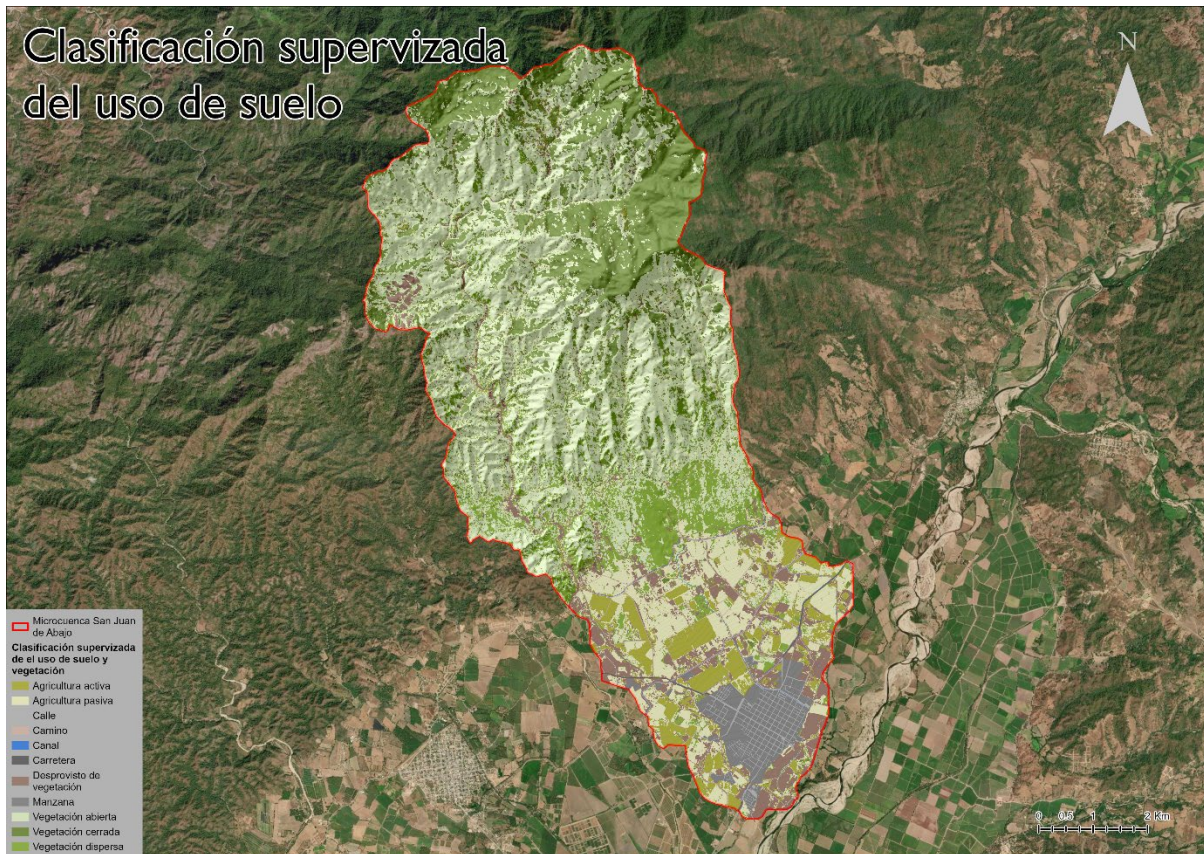


Figura 68. Clasificación supervisada de la vegetación.

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

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

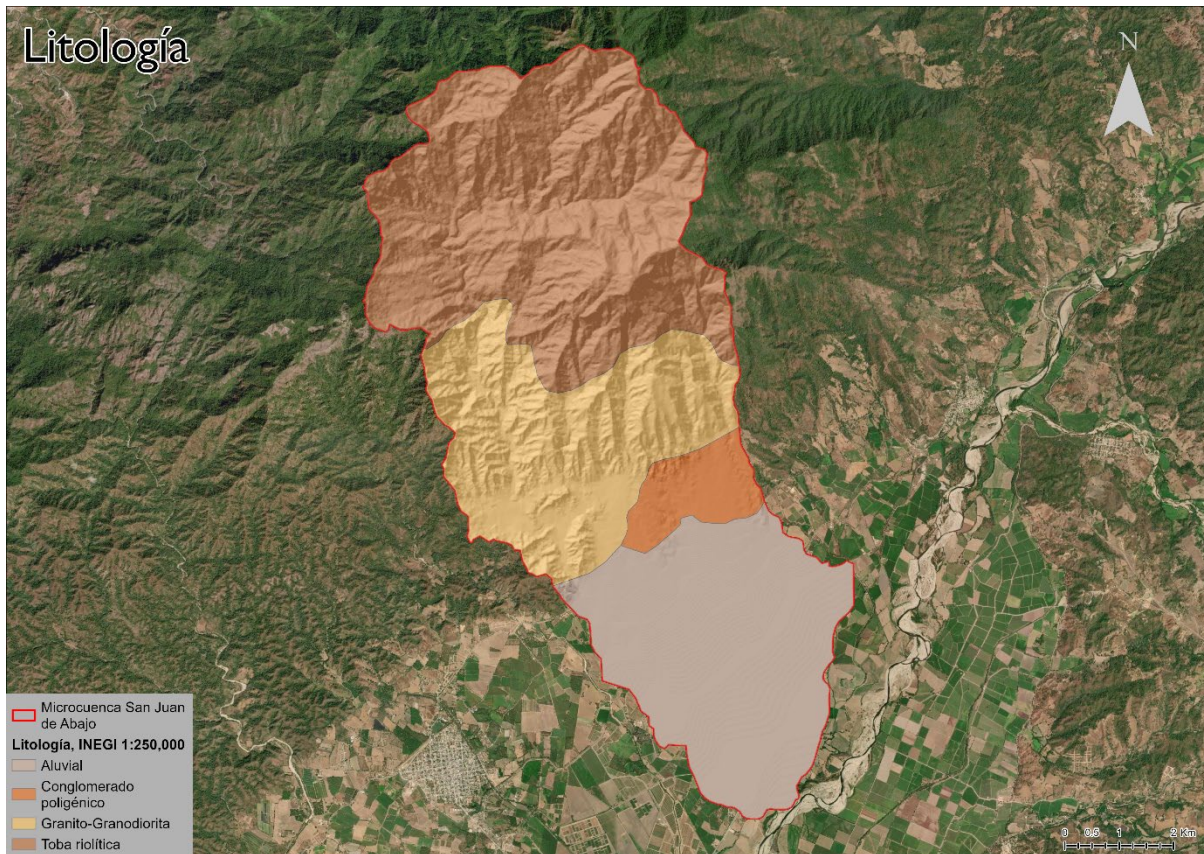


Figura 69. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

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.

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.

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.

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

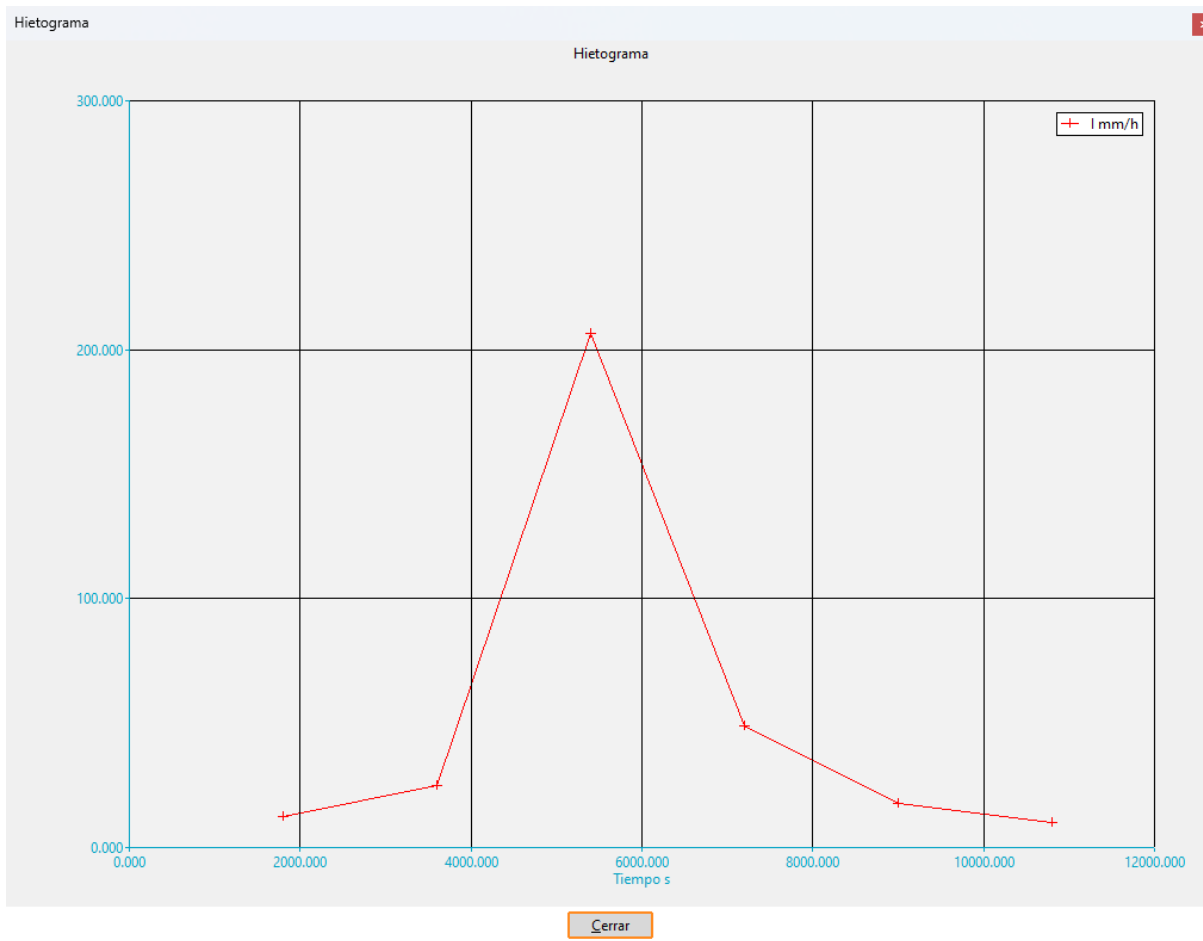


Figura 70. Hietograma asignado para la primera iteración en IBER.

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.

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

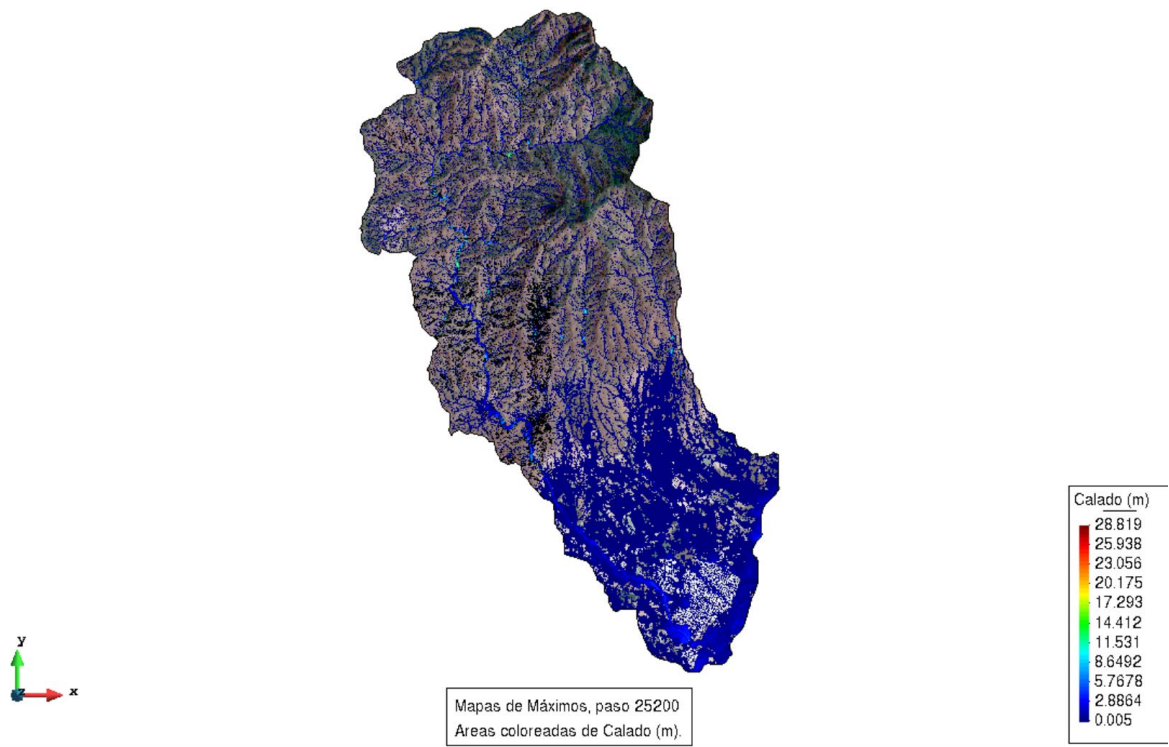


Figura 71. Mapa de máximo calado en el área de estudio.

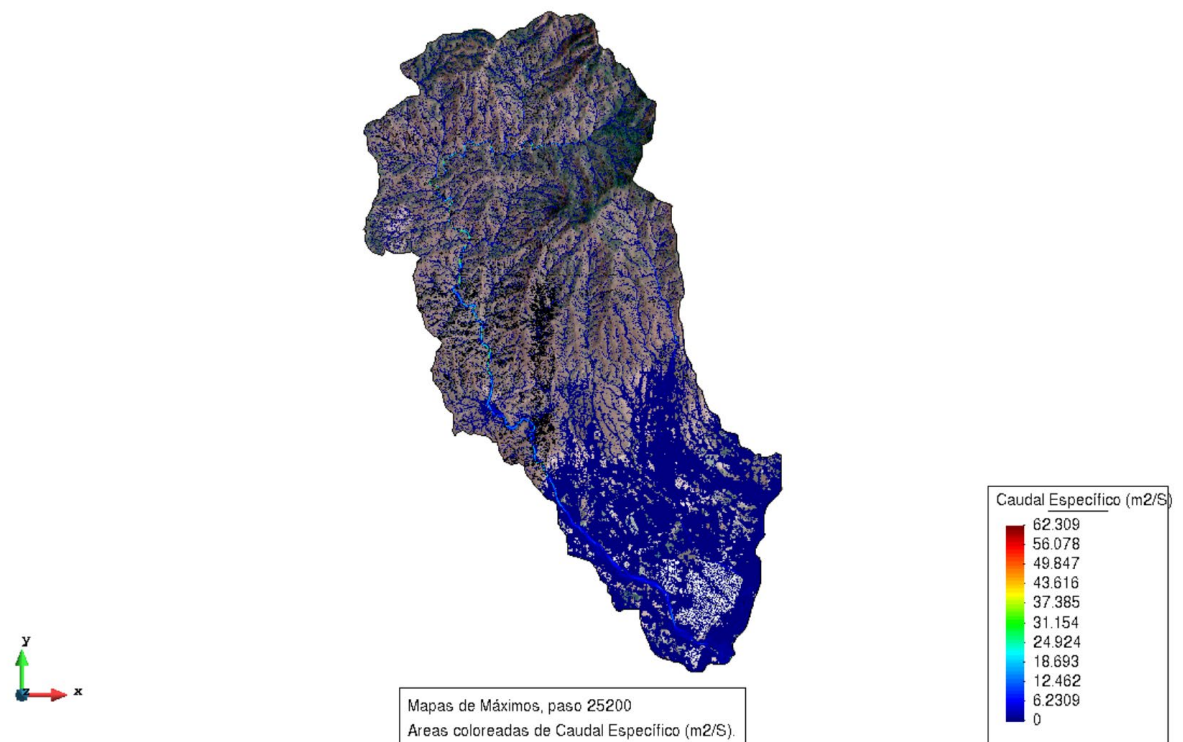


Figura 72. Mapa de máximo caudal específico en el área de estudio.

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

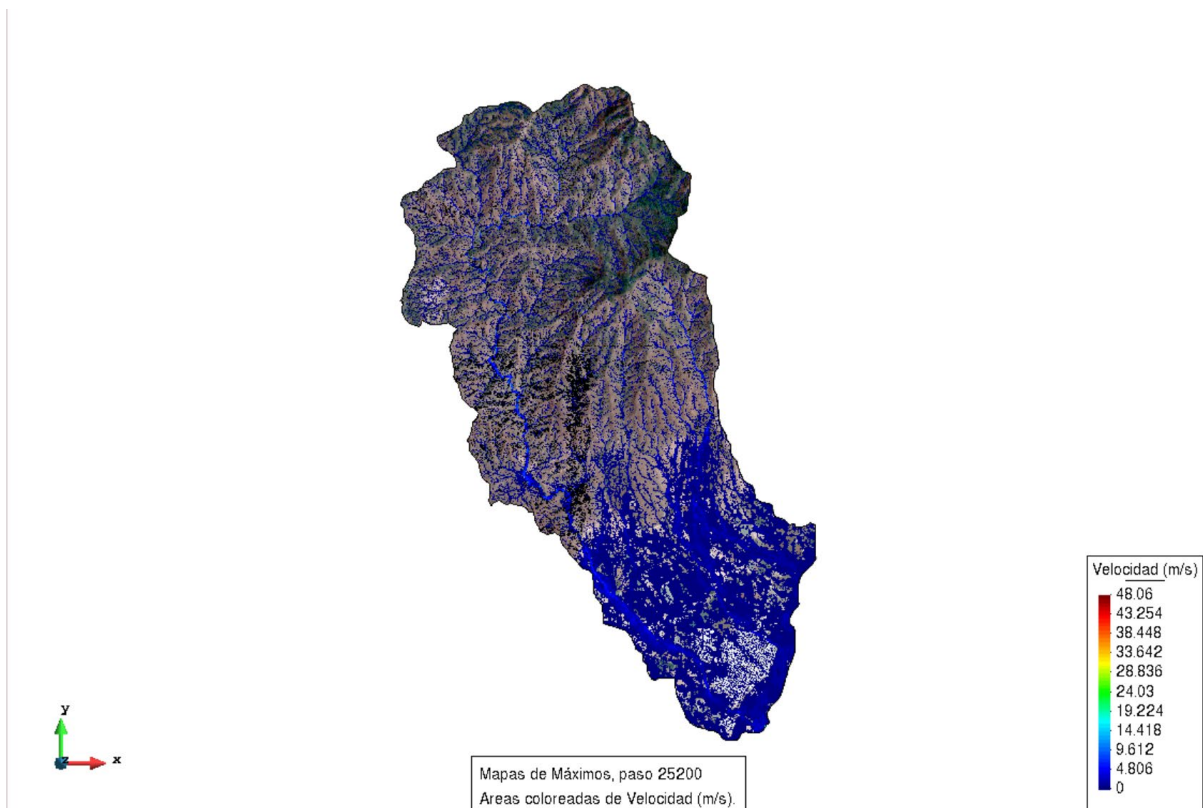


Figura 73. Mapa de máxima velocidad en el área de estudio.

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.

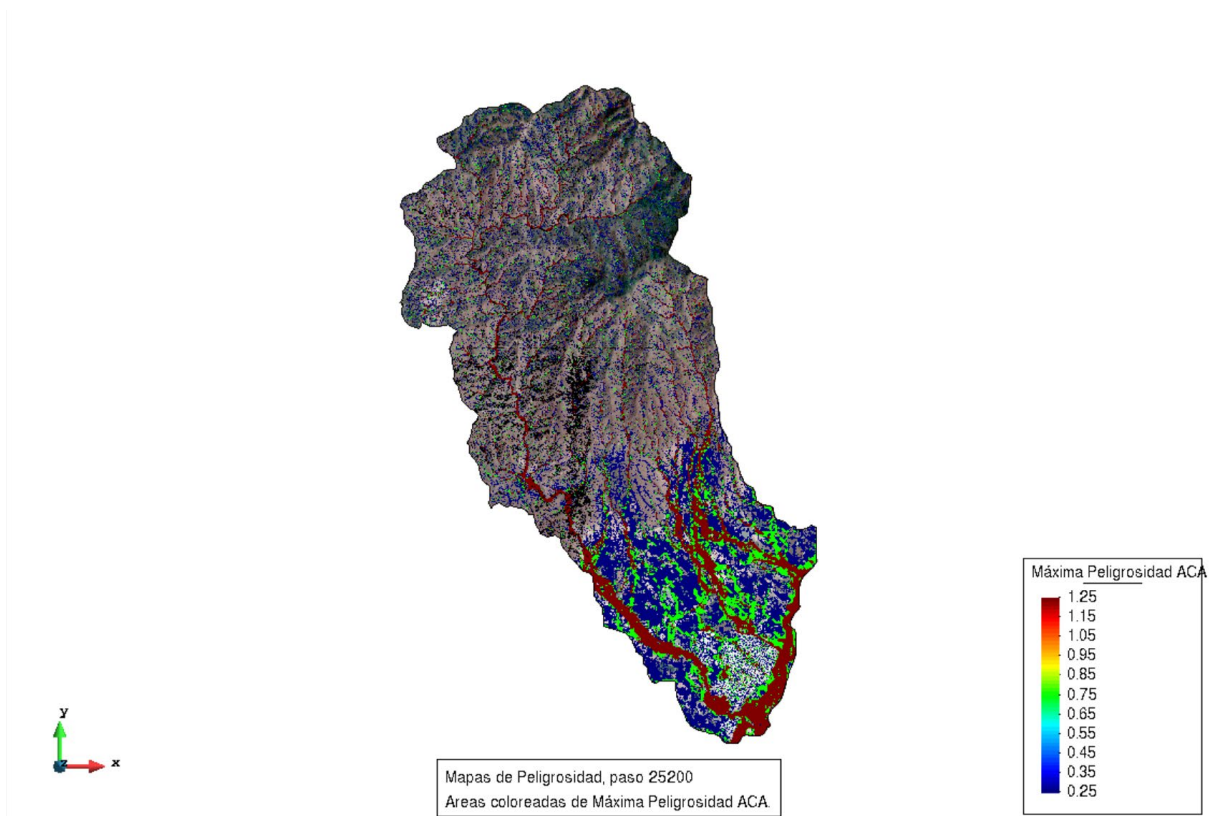


Figura 74. Mapa de máxima peligrosidad ACA.

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

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

Figura 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.

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.

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.

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.

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.

4.1.7 Análisis de la hidrología subterránea

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

Tabla 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 m3
Nayarit				7	78,351

	Bahía de Banderas	Río Ameca-Ixtapa	Valle de Banderas		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.

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.

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 adquiriera una cultura de cuidado del agua, y que pueda aprovechar responsablemente los espacios recreativos naturales.

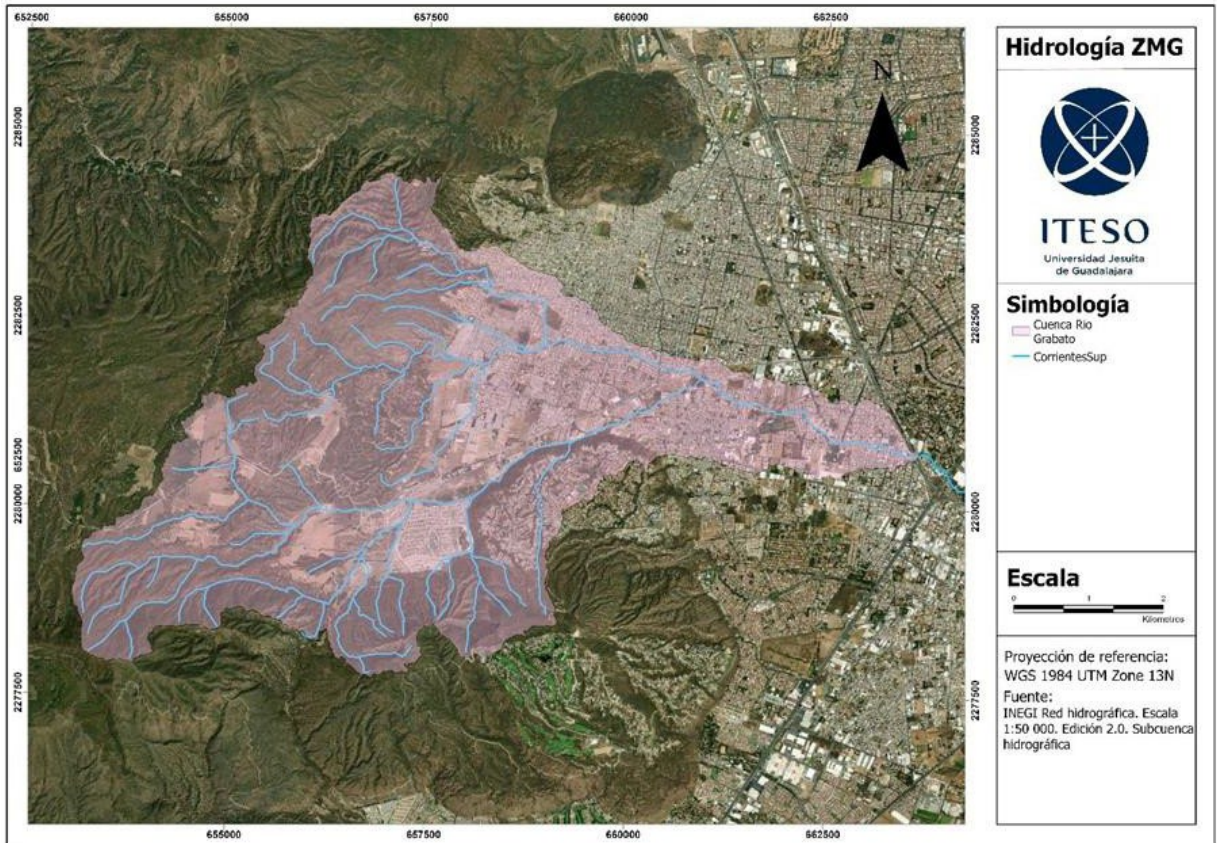
4.2 Zona Poniente de Guadalajara

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.

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.

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



Mapa de la cuenca y cauces del río garabato.

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

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

La cuenca delimitada para este río abarca un extenso territorio de 3164.44 hectáreas, caracterizado por un río principal, el Garabato, acompañado por unos 20 afluentes tributarios intermitentes. No hay mucha información acerca de este río.

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.

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

IBER es una herramienta de modelación matemática bidimensional para la simulación del flujo del agua en lamina libre en 2 dimensiones de origen español, lo que quiere decir que utiliza el

método de volúmenes finitos que permite mayor flexibilidad en la malla para resolver ecuaciones parciales y de esta manera nos ayuda a poder predecir los valores de las variables hidráulicas como lo es el calado, velocidad y caudal. Asimismo, esta herramienta está compuesta por un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé et al., 2012).

El módulo hidrodinámico consiste en un conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos; es decir la solución numérica de las ecuaciones de conservación de momento y de masa en un fluido. Por lo cual, permite entender qué variables controlan el movimiento del agua y cómo la misma se verá afectada ante diferentes modificaciones. Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos de microcuencas urbanas se siguieron una serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER, la cual se basó en:

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

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

1. Rugosidad del Suelo
2. Depende de las variaciones de uso de suelo asignado a esa área de la ciudad, si es área urbanizada, no urbanizada, protegida, vegetación, pavimento, arbustos, etc.
3. Numero de Curva
4. Este es un parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca, a partir de la cobertura del suelo. Por lo tanto, cada tipo de suelo tienen diferente número de curva.

4.2.6. Modelo Digital de Elevaciones

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

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

Para poder realizar los archivos ASCII se obtuvo información vectorial por cada tipo de uso de suelo. Luego, se agregaron ambos valores en una tabla de atributos y se convirtieron a ráster, para después convertirlos a ASCII y ser importados a IBER. En el caso del MDE del límite de la cuenca, se utilizó un modelo digital de elevación del año 2017 con escala 1:10,000 y curvas a cada 5 m.

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

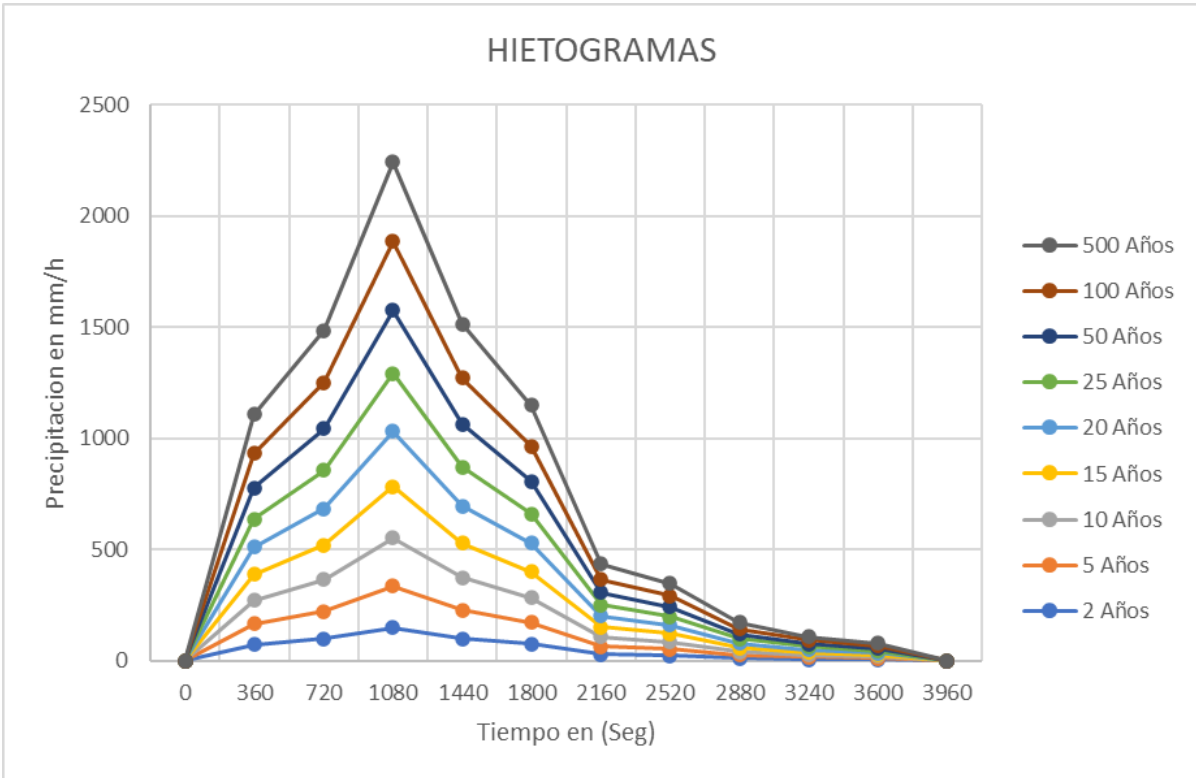
En la siguiente tabla se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), para determinar correctamente los parámetros necesarios para estimar el número de curva. De igual manera se analizaron las cartas edafológicas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

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

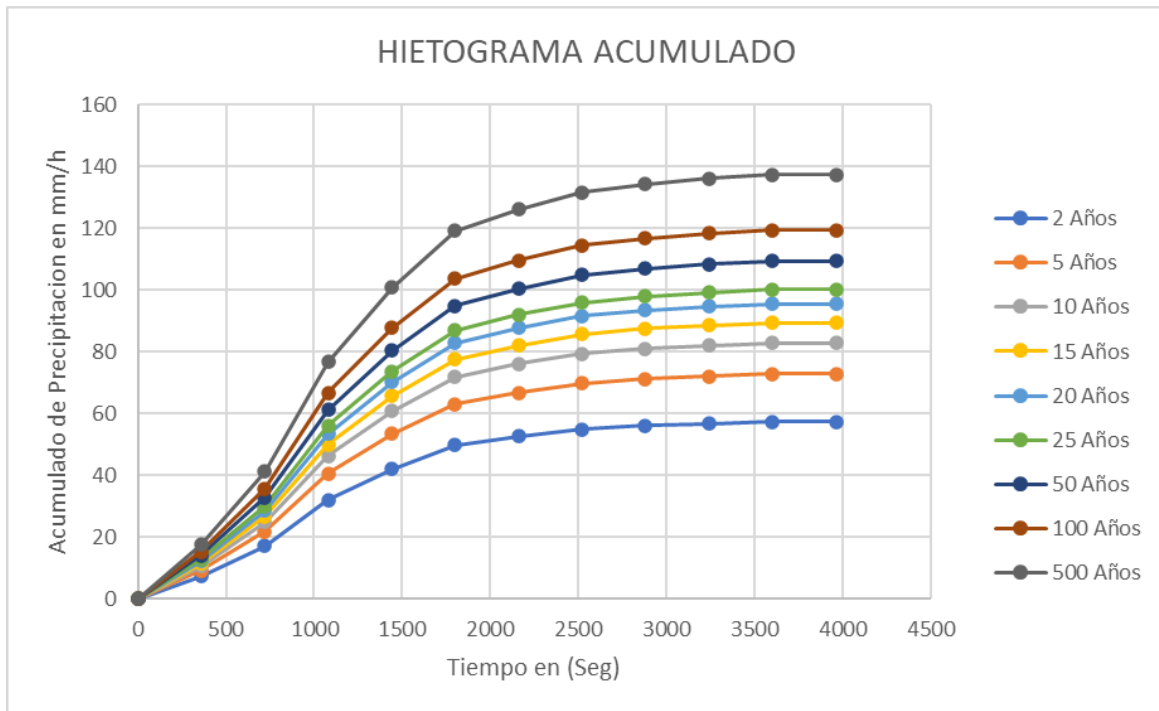
Uso de suelo Coeficiente de Manning	
Bosque	0.12
Arbustos	0.05
Arboles	0.12
Vegetación Urbana	0.032
Hormigón	0.018
Residencial	0.15

Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación los archivos shapefile de las manzanas, calles y la delimitación de la cuenca que se está estudiando, para posteriormente crear una malla la cual hará referencia a pequeñas porciones del terreno a las cuales se les asignaran las elevaciones formando puntos mediante triángulos, por lo cual en IBER se creó un nuevo archivo donde se importaron las elevaciones de la cuenca mediante el relieve; se utilizó una tolerancia de 20 metros para el área del bosque de la primavera en donde no es necesario tener una malla tan refinada ya que los datos tendrán menos variación porque es el mismo tipo de terreno y la elevación no varía a grandes escalas, por otro lado dentro del área urbana se asignó una malla de 5 metros la cual tendría más definición para poder ver de manera más real la elevación de las áreas pavimentadas, calles, casas, fraccionamientos, plazas, etc. Después se asignaron las condiciones iniciales, en las cuales todas las áreas de captación se utilizó un valor de 0 m de profundidad de agua en toda la zona. Enseguida se agregaron las condiciones de contorno, es decir los lugares de salida de los escurrimientos. Las salidas asignadas en cada área fueron seleccionadas a partir del punto de menor elevación de cada microcuenca.

Se prosiguió por agregar y asignar a toda la zona un hietograma con tiempo de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación; los cuales se presentan en la siguiente figura. Dichas tormentas fueron generadas por el Mtro. Diego Rojas en su tesis de maestría (Rojas & González, 2015).



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



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

Posteriormente, se asignó un valor de rugosidad y número de curva a toda el área mediante los archivos que se habían generado anteriormente donde ya se habían obtenido estos datos para de esta manera finalmente pasar al proceso de simulación en donde se inició el tiempo de simulación en (0 segundos) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 300 segundos. Ya que fue la suma de la duración de la tormenta y el tiempo de concentración según cada área de captación; se corrió el cálculo del modelo, y se seleccionaron los siguientes resultados a visualizar: tirantes máximos, velocidades y peligrosidad máximas.

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

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

4.2.7. Caracterización territorial

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

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

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

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

Por último, para obtener una comprensión más precisa de los patrones de escorrentía en el área de estudio, hicimos uso de la información proporcionada por el INEGI sobre los ríos existentes en la región. Además, consultamos los registros históricos de áreas propensas a inundaciones proporcionados por el IMEPLAN.

En el caso de los ríos, 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.

4.2.8. Evaluación de la Hidrología Superficial

La evaluación hidrológica del área se llevó a cabo mediante el empleo del modelo Iber, un software de simulación numérica que utiliza un modelo bidimensional para simular el flujo superficial libre en ríos. Iber resuelve las ecuaciones completas de aguas poco profundas, promediadas para calcular tanto la profundidad del agua como los dos componentes horizontales de la velocidad promediada en profundidad. Estas ecuaciones se resuelven mediante un solucionador de volúmenes finitos no estructurado y explícito en el tiempo. Los algoritmos implementados en el modelo se han validado y aplicado en estudios anteriores relacionados con inundaciones fluviales y corrientes de marea en estuarios y ríos. En particular, Iber utiliza las ecuaciones de simulación 2D de Saint Venant, un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas que describen el flujo debajo de una superficie de presión en un fluido. A través de este software, se logró determinar variables cruciales como los caudales en puntos específicos y las cotas del agua, proporcionando así una comprensión detallada de la hidrología del territorio evaluado.

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

4.2.9. Análisis de la Hidrología Subterránea

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

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

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

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

4.2.10. Estudio de Eventos Extremos

Las inundaciones pueden ocurrir debido a lluvias intensas, desbordamiento de ríos, deslizamientos de tierra u otros eventos climáticos extremos. En Guadalajara, como en muchas otras ciudades, el desarrollo urbano, la topografía y la infraestructura de drenaje pueden influir en la susceptibilidad a inundaciones. Los eventos extremos de lluvias pueden provocar desafíos significativos en términos de evacuación de personas, daños a la propiedad y la infraestructura.

El análisis de fenómenos climáticos extremos como inundaciones o sequías implica una combinación de métodos y técnicas interdisciplinarios. A continuación, se muestran algunas técnicas comunes utilizadas para analizar estos eventos:

Observación y recogida de datos

Utilice estaciones meteorológicas para recopilar datos sobre precipitación, temperatura y otros parámetros climáticos. Utilice imágenes satelitales para observar patrones climáticos y cambios en la cobertura del suelo a gran escala.

Modelos climáticos

Aplicar modelos climáticos para simular y predecir patrones climáticos. Esto puede ayudar a comprender la probabilidad de eventos extremos en función de las condiciones climáticas actuales y futuras.

Hidrología y modelos hidráulicos

Utilice modelos hidrológicos para comprender cómo las precipitaciones afectan los ríos y las cuencas. Los modelos hidráulicos simulan el comportamiento del agua durante las inundaciones y evalúan zonas de riesgo

Análisis de series de tiempo

Estudie datos a lo largo del tiempo para identificar tendencias y cambios en los patrones climáticos y eventos extremos

Índice climático

El alcance y la duración de las sequías se cuantifican utilizando índices climáticos como el Índice de Severidad de la Sequía (SPI) o el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI).

Tecnología de teledetección

Utilice tecnología de teledetección para monitorear los cambios en la vegetación, la temperatura de la superficie del mar y otros indicadores relacionados.

Evaluación de Impacto y Vulnerabilidad

Analice cómo los fenómenos meteorológicos extremos impactan a las comunidades, la agricultura, los recursos hídricos y la infraestructura.

Análisis estadístico

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

Sistema de Información Geográfica (SIG)

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

Monitoreo en tiempo real

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

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

La aplicación de estas técnicas no solo contribuye a una comprensión más profunda de los eventos climáticos extremos, sino que también facilita la toma de decisiones informada para la gestión de riesgos y la planificación de la adaptación. La integración de tecnologías

modernas, como la teledetección y los sistemas de monitoreo en tiempo real, mejora la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia al proporcionar alertas tempranas.

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

4.2.11 Validación y Calibración

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

4.2.12 Evaluación de Impactos, propuestas de intervención y escenarios futuros

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

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

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

5. Resultados

5.2 San Juan de Abajo

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 terminar la capacidad de la región para soportar la expansión urbana y el desarrollo de las infraestructuras de manera sostenible.

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

- 1 Creación de hidrogramas y hietogramas: Un hidrograma es la representación gráfica del agua en una cuenca o arroyo (en este caso cuenca) a lo largo del tiempo, mientras que un hietograma muestra la distribución temporal de la lluvia. Estos elementos son

esenciales para poder comprender cómo las precipitaciones se convierten en escorrentía y pueden ayudar a predecir inundaciones y gestionar los recursos hídricos.

- 2 Simulaciones en ArcGIS e IBER: Utilizar herramientas de software como ArcGIS para simular eventos de lluvia permite modelar y evaluar escenarios hidrológicos en la región. Esto ayudará a visualizar cómo los cambios en el uso de la tierra o las prácticas de gestión del agua pueden afectar la hidrología local. Las propuestas hechas en el

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

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



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

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

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

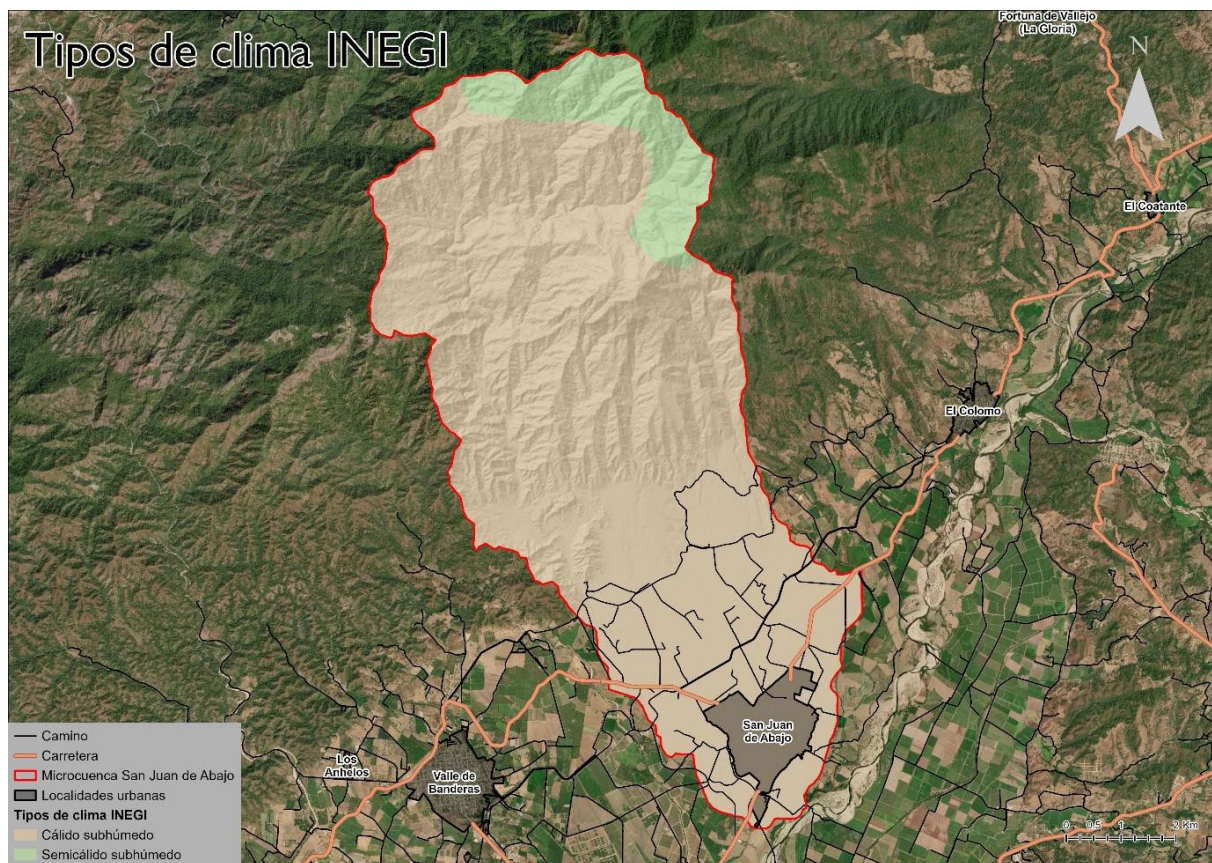


Figura 2. Tipos de clima dentro del área de estudio (Geografía INEGI, 2005).

Al analizar los tipos de clima presentados por el INEGI a escala 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).

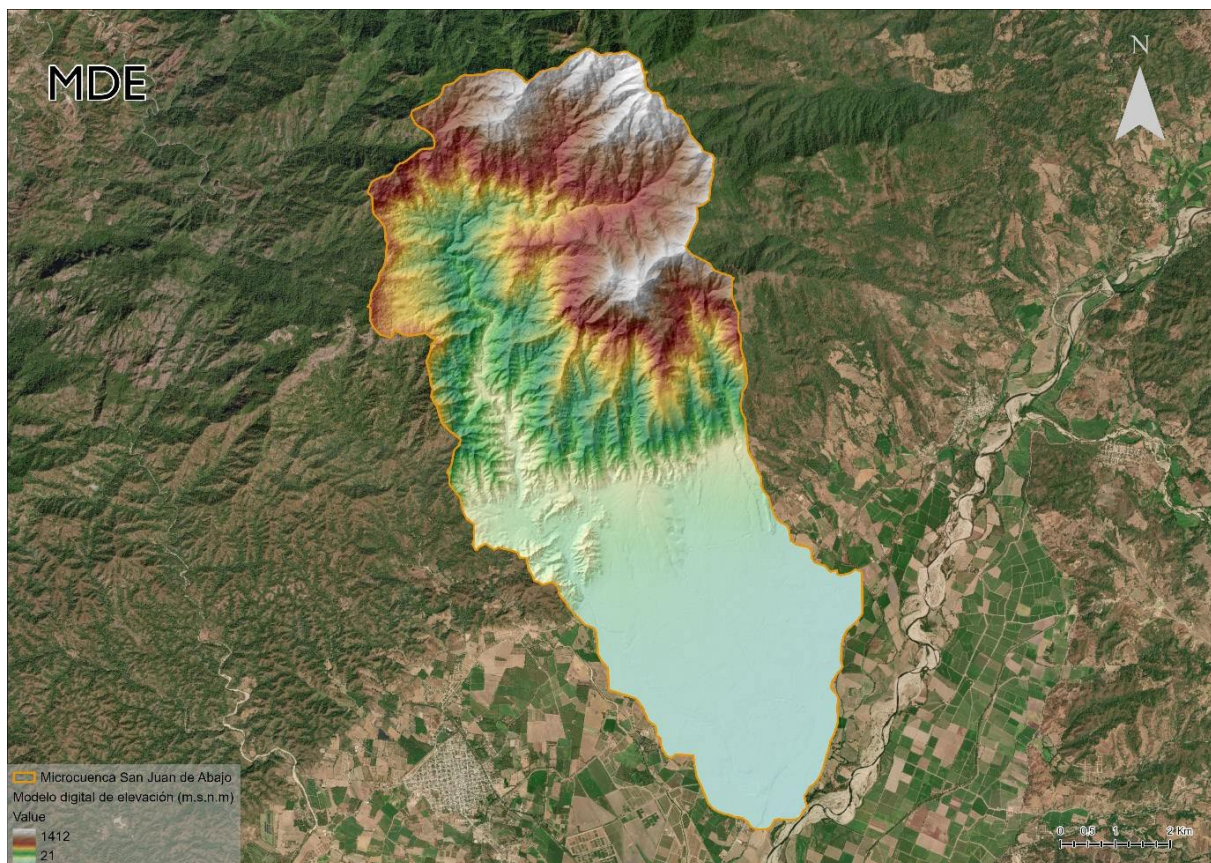


Figura 3. Modelo digital de elevación (Geografía INEGI, 2014).

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

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.

5.2.2.1 Topografía

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

plataforma 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 1).

5.2.2.2 Usos del suelo

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 4).

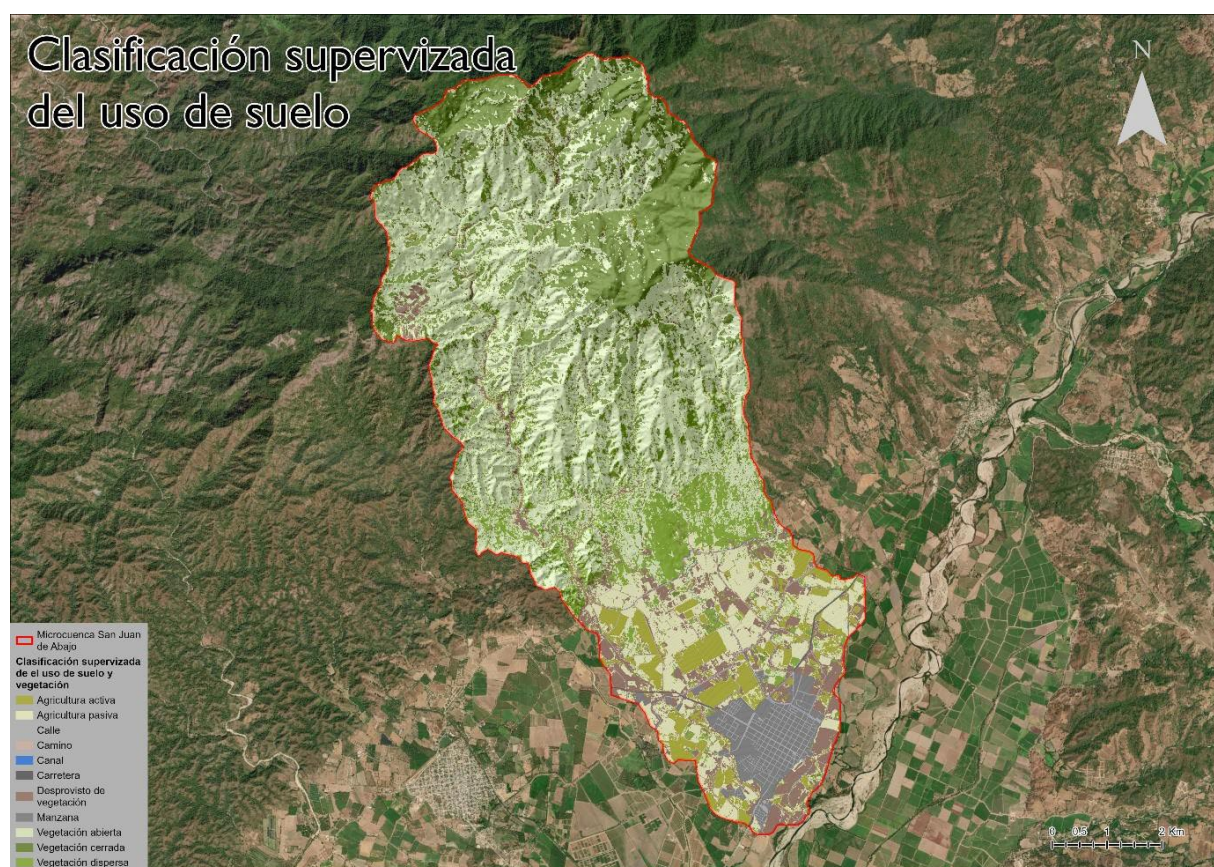


Figura 4. Clasificación supervisada de la vegetación.

5.2.2.3 Litología y edafología

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

otro archivo vectorial. La capa resultante de la herramienta “Clip” conserva los atributos de la capa original para todos los archivos vectoriales que dentro de los límites de corte (Figura 5).

Además de la información presentada en la Figura 5, se consultaron las cartas geológica y edafológica elaboradas por el INEGI a escala 1:20,000 para la zona de san juan de abajo. Dicha información se presenta en los Anexos 1 y 2 para no perder resolución en la información (Geografía INEGI, 2005).

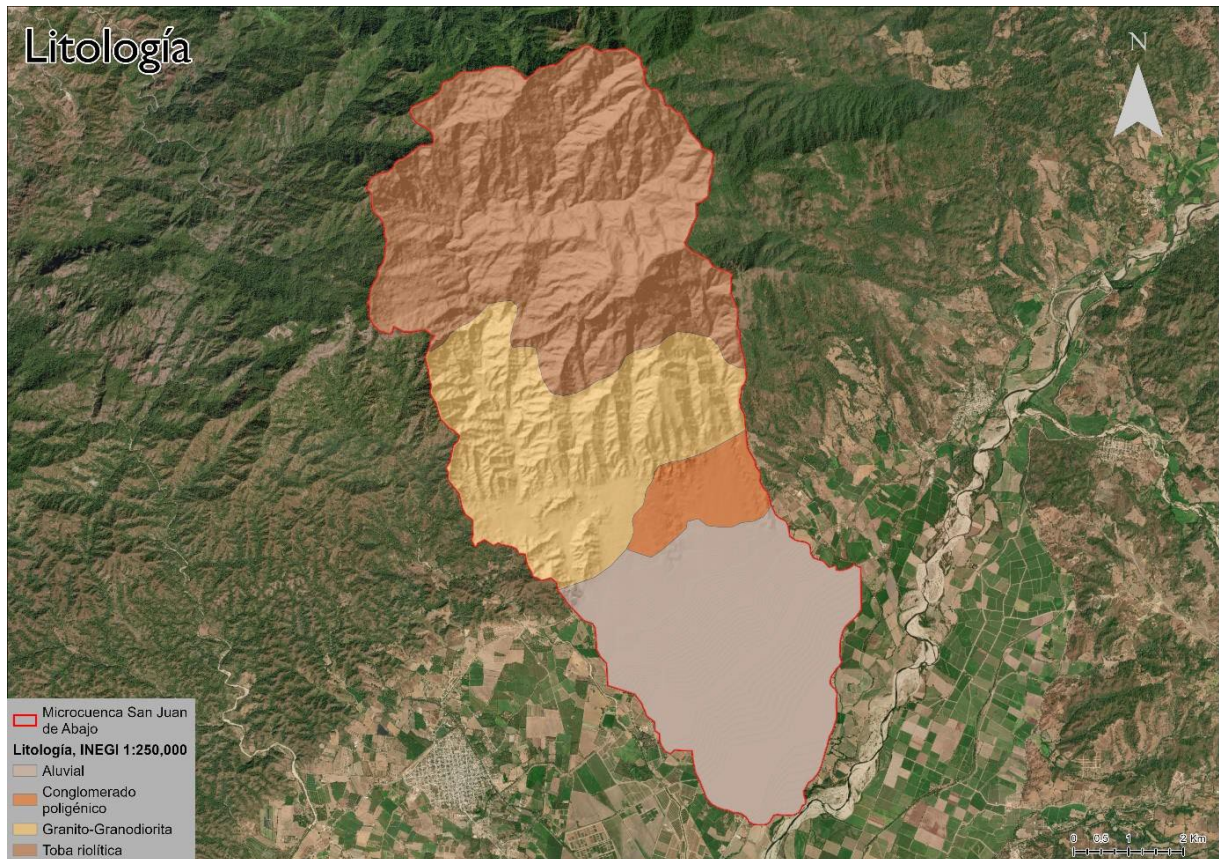


Figura 5. Litología para la microcuenca de San Juan de Abajo (Geografía INEGI, 2005).

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.

5.2.4 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 analizar la precipitación fueron: San José del Valle (18030), La Desembocada (14081) y Las Gaviotas (18021); de las que se obtuvieron 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 mencionadas consistió en identificar cuáles disponibles estaba a una menor distancia del área de estudio y 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 (Anexo #). El código realizado tiene la función de iterar sobre cada elemento de la base de datos, identificando valores diferentes a cero y agrupándolos cuando estos sean consecutivos temporalmente. 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.

El modelo hidrológico seleccionado para realizar la simulación conjunta de la información recopilada, para emular las condiciones naturales del área de estudio que influyen en los flujos de agua superficial y determinar su comportamiento ante un evento de lluvia esperado en un periodo de retorno.

Para la parametrización del modelo hidrológico seleccionado se comenzó generando una malla a partir del modelo digital de superficie en el área de estudio, que funcionaría como unidad de cálculo del modelo hidrológico. Para evitar la generación de una malla a la que no se pudiera asignar atributos, dado que los demás atributos de la malla se encuentran definidos solo al área de estudio, se realizó un recorte de 8 metros al modelo digital de elevación tipo superficie desde los límites del área de estudio, mediante la herramienta buffer de ArcGIS pro.

Esta malla fue generada de manera automática con una tolerancia de 0.6 metros, un tamaño de celda mínimo de 1 metro y un tamaño de celda máximo de 100 metros; los tamaños de celda más pequeños eran generados en las zonas más accidentadas topográficamente, mientras que las celdas de mayor tamaño eran generadas en zonas planas. Este comportamiento de la generación de la malla busca optimizar el procesamiento del modelo generando más detalle en las zonas que así lo requieren y disminuyendo la resolución de cálculo en las zonas que se espera compartan las mismas características. Después, se definieron las condiciones del contorno y las iniciales del modelo, donde las primeras corresponden a salidas de agua del sistema, en la parte baja de la cuenca, y las segundas a la altura inicial del agua en la simulación.

Las condiciones del contorno del sistema fueron asignadas según la revisión de los flujos de agua superficiales presentes en la zona de estudio y mediante el trabajo en campo. Las condiciones iniciales del sistema se asignaron según el escenario en el que la cuenca no contiene agua al inicio de la simulación.

Como paso siguiente, se llevó a cabo la asignación del número de curva y la rugosidad al modelo. Este procedimiento se realizó, asignando a cada uno de los usos del suelo, establecidos mediante la clasificación espectral de la vegetación, su rugosidad y número de curva de la SCS correspondiente, mediante el software ArcGIS pro. Estos números de curva y rugosidades fueron asignados de manera automática en el software IBER a partir de archivos ASCII. Cabe aclarar que, para asignar la rugosidad, se debe generar un archivo CSV con la numeración asignada a cada suelo, colocando dicho archivo en la carpeta del ordenador que el archivo ASCII generado. Para consultar el archivo CSV generado revisar el Anexo 3.

El siguiente proceso realizado, para llevar a cabo la parametrización del modelo, fue la asignación de las estructuras (puentes y presas). Este proceso se realizó manualmente en el software IBER colocando cada puente como alcantarillas. Este proceso consistía en generar una línea perpendicular a la estructura en dirección al cauce donde se encuentran instalados y asignar los atributos de las dimensiones registradas en campo.

Para asignar los hietogramas IBER, se realizó un proceso que consiste en dos pasos. En primera instancia se definieron dichos hietogramas en el sistema, relacionando la intensidad de lluvia con el tiempo transcurrido en segundos formando una gráfica, tal como se muestra en la Figura 6. Posterior a la definición de los hietogramas, se realizó la asignación de cada uno de estos a los elementos de la malla, según cada uno de los escenarios de simulación a modelar.

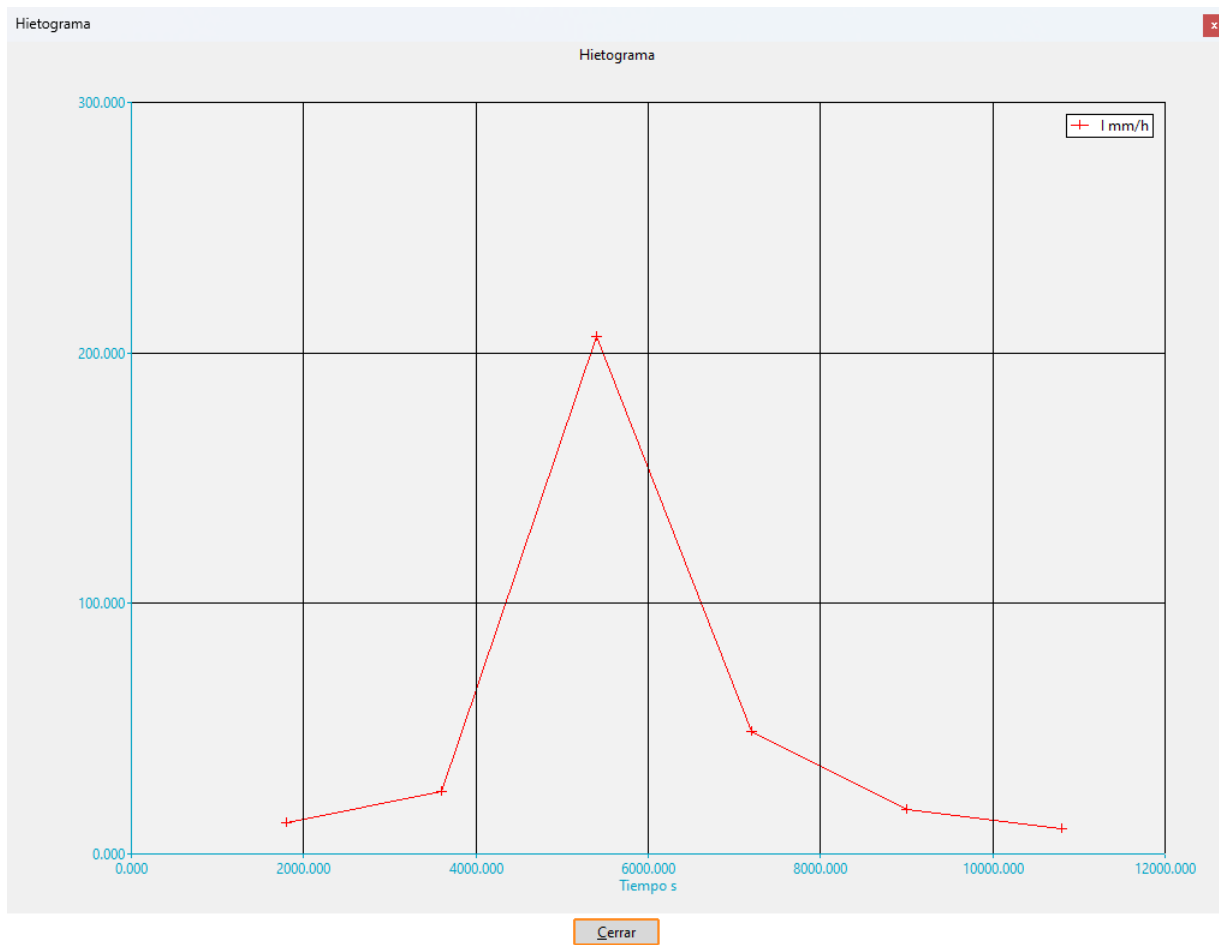


Figura 6. Ejemplo de definición de histograma en IBER.

Una vez establecido lo anterior, se llevó a cabo el cálculo del tiempo de retención hidráulica del modelo a partir del Plugin “Time of concentration and Lag Time” de QGIS. Esta herramienta aplica diferentes ecuaciones empíricas para calcular el tiempo de concentración hidráulica de la cuenca, a partir de datos establecidos por el usuario. En la Tabla I se presentan algunos de los parámetros necesario para el cálculo de cada una de las ecuaciones empíricas utilizadas por el Plugin de QGIS (Maldonado, 2019).

Tabla I. Variables necesarias para calcular el tiempo de retención hidráulica mediante cada ecuación empírica (Maldonado, 2019).

Ecuación para el cálculo del tiempo de concentración hidráulica	Ecuación	parámetros	Tiempo de concentración hidráulica (h)
Williams	$Tc = \frac{L * A^{0.4}}{D * S^{0.25}}$		4.7
Kirpich	$Tc = 0.06628 * \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}}\right)^{0.77}$	Área de la cuenca Longitud del cauce	1.3

Clarck	$Tc = (0.335 * (A * \sqrt{S}))^{0.593}$	principal -Pendiente promedio de la cuenca	2.5
Temez	$Tc = 0.3 * \left(\frac{L}{S_0^{0.25}}\right)^{0.76}$		1.9
Pilgrim	$Tc = 0.76 * A^{0.38}$		3.8

Ecuación para el cálculo del tiempo de concentración hidráulica	Ecuación	parámetros	Tiempo de concentración hidráulica (h)
Valencia y Zuluaga	$Tc = 0.30 * \left(\frac{L}{S^{0.25}}\right)^{0.75}$		2.6
Venturas - Heras	$Tc = 0.2426L * \left(\frac{1}{A^{0.1} S^{0.2}}\right)$		2.0
Bransby - Williams	$Tc = \frac{0.0136 * L^{0.8} * \left(\left(\frac{100}{CN} - 9\right)^{0.7}\right)}{S^{0.5}}$		2.4
SCS	$Tc = 0.87019 * \left(\frac{L}{C_{MAX} - C_{MIN}}\right)^{0.385}$	Área de la cuenca Longitud del cauce principal Pendiente promedio de la cuenca Número de curva	4.1

A partir del máximo tiempo de concentración hidráulica establecido en la Tabla I (4.7 horas), se definió el tiempo de simulación, donde fueron asignadas dos horas extra a este tiempo máximo, con la finalidad de evitar la pérdida de resultados importantes. En los datos del problema se definió como instante inicial de simulación el tiempo de 0 segundos, mientras que el final se estableció como 25 600 segundos (7 horas), con un intervalo de resultados cada 300 segundos.

Finalmente, para llevar a cabo la parametrización de los modelos realizados con las estructuras de infiltración se establecieron estas, dada su naturaleza, como vertederos. Este proceso se realizó en el software IBER asignando a cada uno de los vertederos la cota a superar por el agua.

Las simulaciones realizadas pretenden generar información para analizar los comportamientos de los flujos de agua superficial en la zona de estudio. Para este análisis se establecieron escenarios de

simulación, determinando así el comportamiento de la cuenca ante diferentes eventos de lluvia. En la Tabla II se presenta un resumen de las simulaciones llevadas a cabo, así como el objetivo de cada una de ellas.

Tabla II. Resumen de escenarios de simulación realizados.

Escenario de simulación	Descripción de escenario	Objetivo(s)
Lluvia con periodo de retorno de 100 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Definir máximos calados esperados en la cuenca. Definir máxima peligrosidad en la mayor cantidad de área. Plantear áreas con potencial para urbanización. Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 50 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 20 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Definir máximo calado en escenario de simulación. Definir máxima peligrosidad en escenario de simulación. Definir máxima velocidad del agua en escenario de simulación. Generar un análisis comparativo entre los demás

		escenarios de simulación. Establecer la zona federal de la cuenca.
Lluvia con periodo de retorno de 5 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).
Lluvia con periodo de retorno de 2 años sin estructuras propuestas	Modelación de las condiciones actuales de la cuenca, con una lluvia generada a partir de la tormenta de diseño planteada.	Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas). Establecer el escenario de lluvia con mayor ocurrencia en la cuenca de San Juan de Abajo. Definir máximo calado en escenario de simulación. Definir máxima peligrosidad en escenario de simulación.

Escenario de simulación	Descripción de escenario	Objetivo(s)
Lluvia con periodo de retorno de 10 años con estructuras propuestas	Modelación de las condiciones hidrológicas esperadas en la cuenca tras la instalación de las propuestas de intervención planteadas.	<p>Generar un análisis comparativo con escenario de referencia (Lluvia con periodo de retorno de 10 años sin estructuras propuestas).</p> <p>Determinar el calado máximo esperado tras la instalación de las propuestas de intervención.</p> <p>Determinar la velocidad máxima del agua esperada tras la instalación de las propuestas de intervención.</p> <p>Determinar la máxima peligrosidad del agua esperada tras la instalación de las propuestas de intervención.</p>

5.2.7.1 Escenario 1. Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 5 años

Se realizó un estudio del flujo de agua en el cauce colocando las represas en el río Huichichila utilizando un hidrograma de una lluvia con periodo de retorno de 5 años con un tiempo de duración de 4 h. Los datos que se estudiaron son: Calado máximo, Velocidad y la Peligrosidad máximas. Las represas propuestas por los compañeros del semestre pasado en la zona de intervención se diseñaron con una altura de 1.5 m y de 1 m respectivamente además de determinar las condiciones de nuestras compuertas. Se realizó un análisis mediante una

simulación de nuestro modelo en el programa Iber donde arrojó los resultados que se presentan en las figuras siguientes.

Calado máximo.

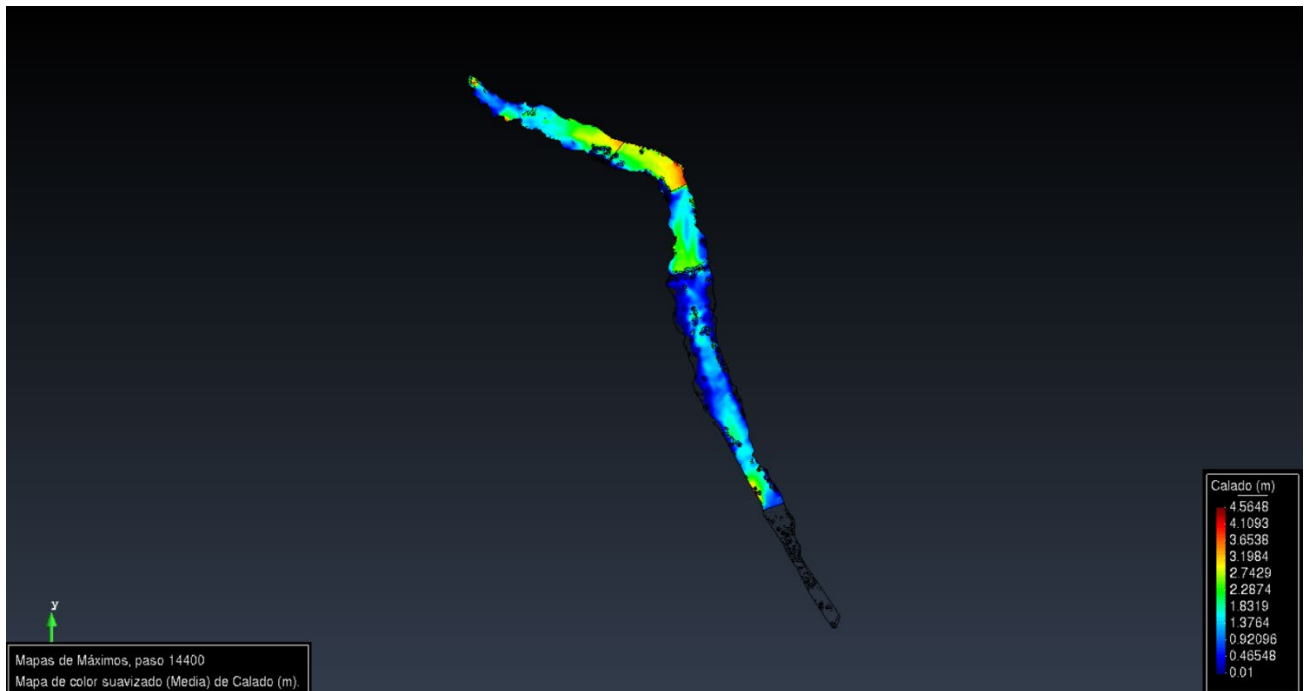


Figura 75. Calado máximo simulación con lluvia de retorno 5 años (2024).

El nivel máximo del agua es de 4.5 m ubicado entre las dos represas propuestas. En la zona entre las represas propuestas y las compuertas existentes hay un nivel del agua de 2.29 m y 1.37 m, lo que indica una gran diferencia de nivel de agua entre las represas propuestas y las existentes.

En el tramo que se encuentra después de las compuertas aguas abajo el análisis arrojó un nivel de agua más bajo con alturas de entre 1.38 m y 0.01m lo que implica que el agua tiene menos probabilidades de desbordarse de los márgenes del río y que pueda afectar a los pobladores que se encuentran en esta zona del área de estudio ya que están asentados cerca del cauce aguas abajo antes de llegar a las compuertas, además que el nivel de agua en el camino que es zona de cruce el nivel del agua es de 1 cm lo que implica mayor seguridad para cruzar.

Velocidad máxima.

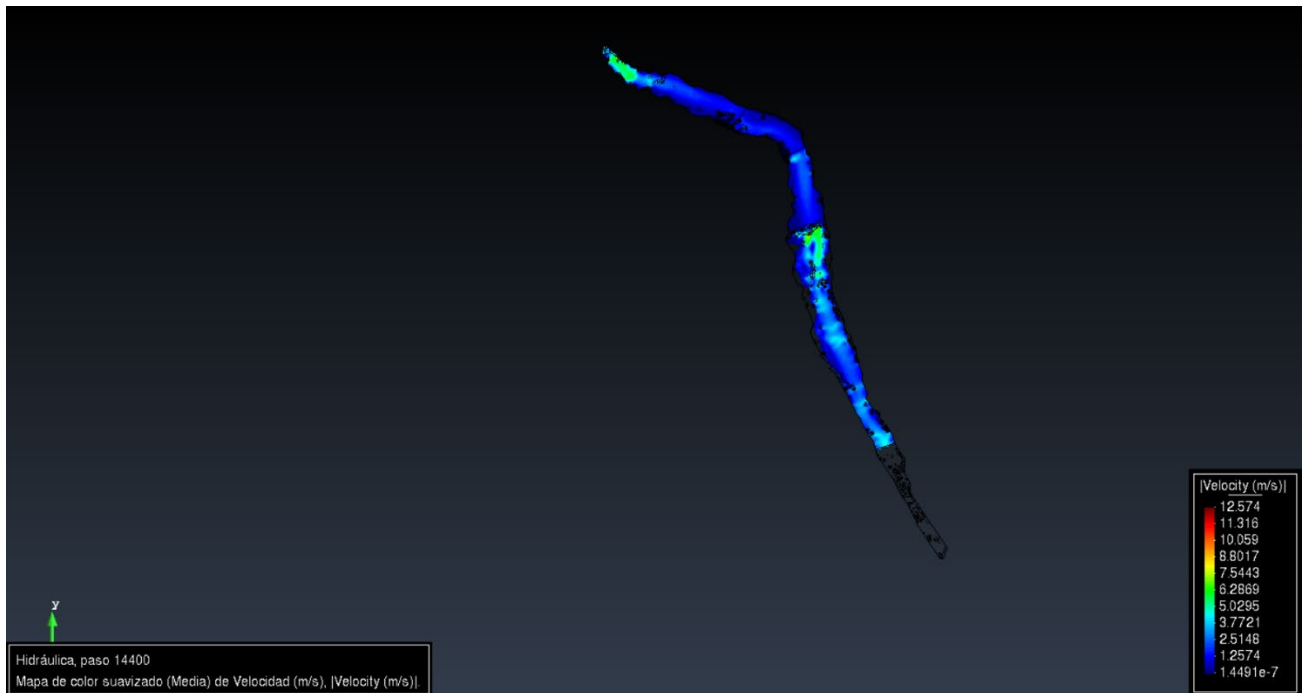


Figura 76. Velocidad máxima simulación con lluvia de retorno 5 años (2024).

La velocidad de entrada en nuestro modelo resultó de 12.57 m/s al igual que en nuestra salida en las represas tiene una velocidad de 0.0000001449 m/s y algunas zonas presentan 3.77 m/s. Después de las compuertas existentes presentó velocidades entre 5.02 m/s y 1.25 m/s y en el vado presentó velocidades de 3.77 m/s y 2.51 m/s.

Peligrosidad máxima.

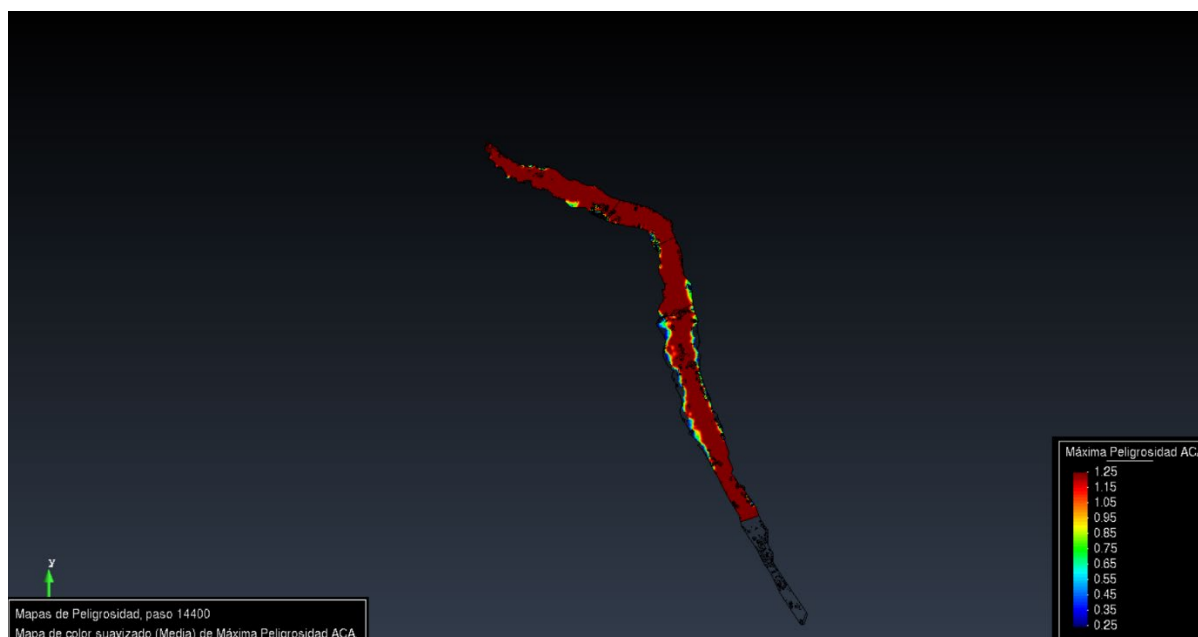


Figura 77. Peligrosidad máxima simulación con lluvia de retorno 5 años (2024).

Sobre peligrosidad se realizó el análisis según la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA), cuyo objetivo es determinar la peligrosidad del flujo del agua para las personas y bienes materiales de la siguiente tabla.

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

El modelo arrojó una peligrosidad entre moderada y alta en el interior del río dando un valor de 1.25, pero en las orillas empieza presentar una peligrosidad entre baja y moderada dando valores entre 0.25 y 0.95 lo que indica que las represas están reduciendo la peligrosidad, aunque sigue siendo deficiente.

5.2.7.2 Escenario 2 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 10 años

Se realizó un estudio del flujo de agua en el cauce colocando las represas en el río Huichichila utilizando un hidrograma de una lluvia con periodo de retorno de 10 años con un tiempo de duración de 4 h. Los datos que se estudiaron son: Calado máximo, Velocidad y la Peligrosidad máximas. Las represas propuestas por los compañeros del semestre pasado en la zona de intervención se diseñaron con una altura de 1.5 m y de 1 m respectivamente además de determinar las condiciones de nuestras compuertas. Se realizó un análisis mediante una simulación de nuestro modelo en el programa Iber donde arrojó los resultados que se presentan en las figuras siguientes.

Calado máximo.

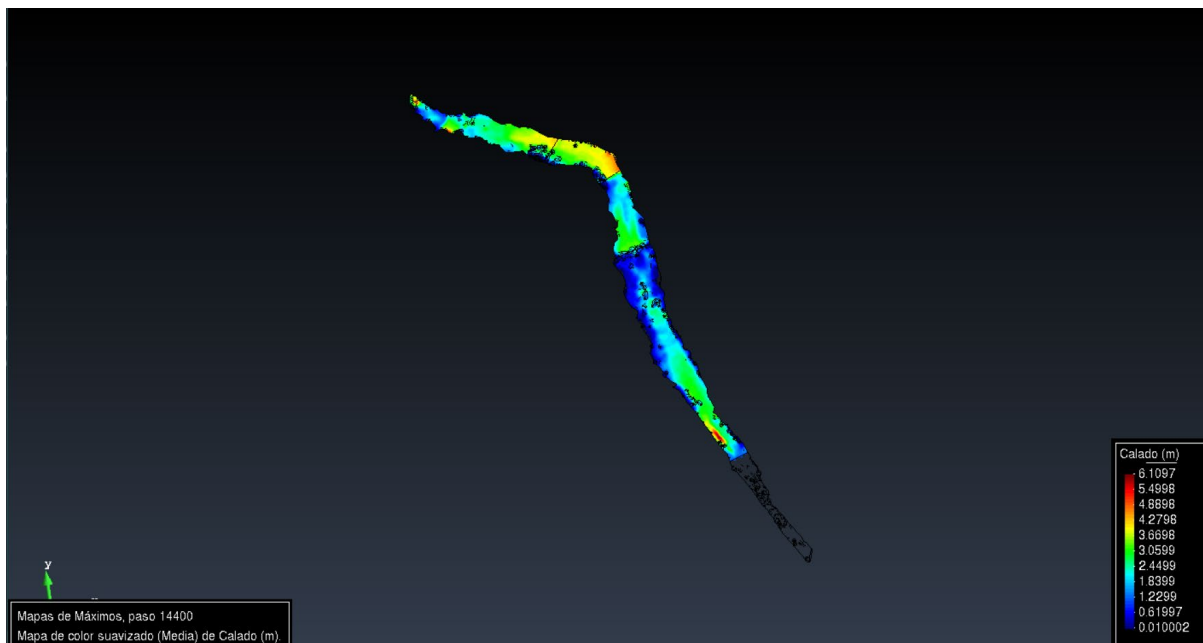


Figura 79. Calado máximo simulación con lluvia de retorno 10 años (2024).

El nivel máximo del agua es de 6.11 m ubicado entre las dos represas propuestas. En la zona entre las represas propuestas y las compuertas existentes hay un nivel del agua de 3.66 m y 1.84 m, lo que indica una gran diferencia de nivel de agua entre las represas propuestas y las ya existentes, aunque el calado incrementó con respecto al periodo de retorno anterior.

En el tramo que está tras las compuertas aguas abajo el análisis arrojó un nivel de agua más bajo con alturas de entre 2.45 m y 0.01 m, sin embargo cerca del camino incrementa otra vez a 4.27 m debido al incremento de metros desde las represas propuestas aguas arriba.

El aumento significativo se debe al hidrograma del periodo de retorno de 10 años ya que el caudal de este es mucho mayor que el periodo de retorno de 5 años.

Velocidad máxima.

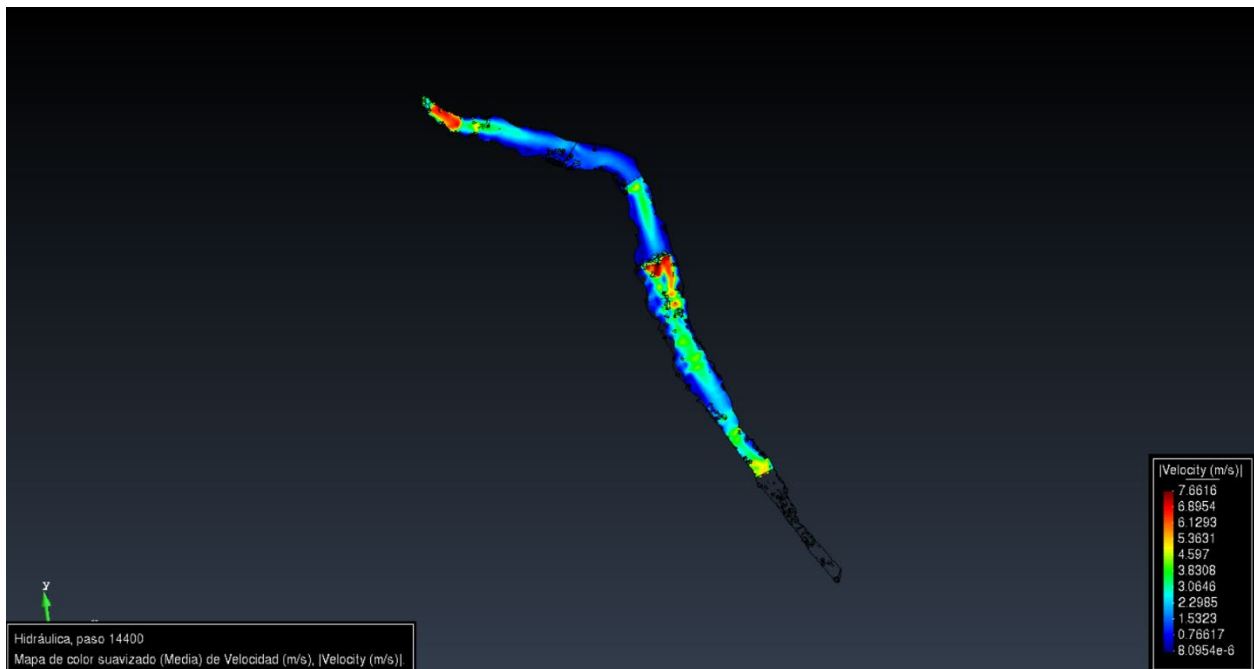


Figura 80. Velocidad máxima simulación con lluvia de retorno 10 años (2024).

La velocidad máxima de 7.66 m/s se presentó en la entrada de flujo de agua en nuestro modelo y después de las compuertas aguas abajo lo que indica que la presión del agua está aumentando en las compuertas que después el flujo toma velocidades entre 3.48 m/s y 2.29 al centro del afluente y en las orillas de 2.29 m/s a 0.00000809 m/s en las orillas y en el vado presenta velocidades de 5.36 m/s.

Peligrosidad máxima.

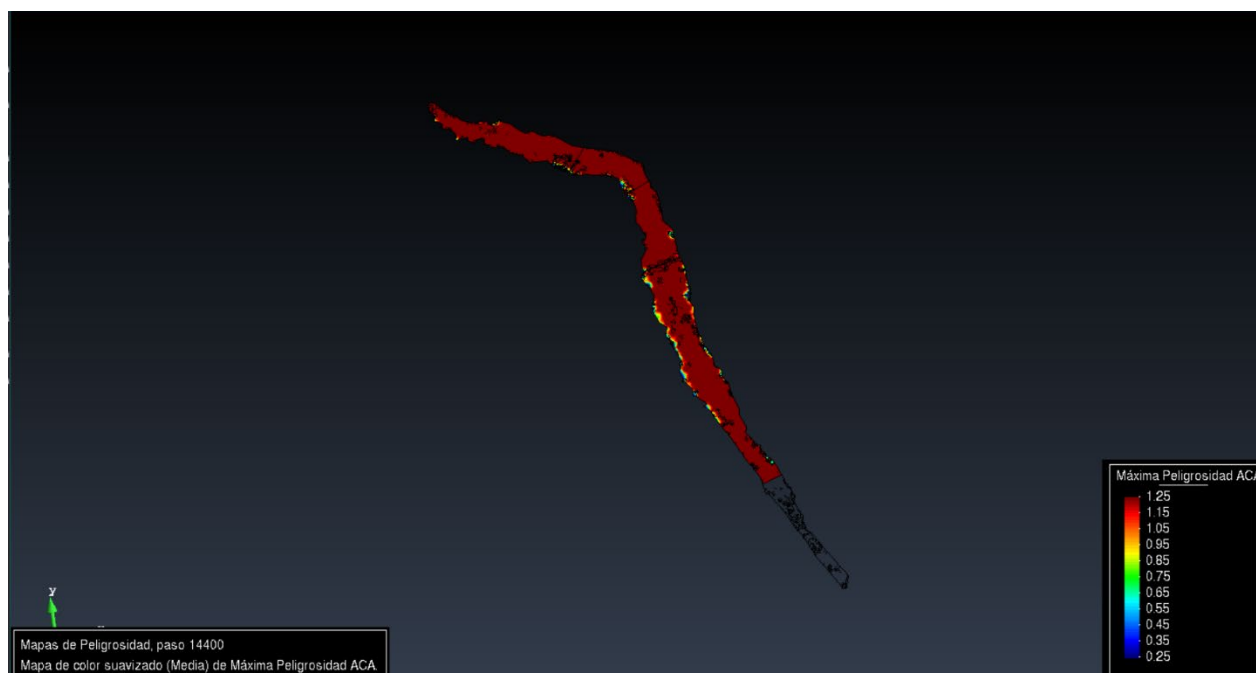


Figura 81. Peligrosidad máxima simulación con lluvia de retorno 10 años (2024).

Sobre peligrosidad se realizó el análisis según la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA), cuyo objetivo es determinar la peligrosidad del flujo del agua para las personas y bienes materiales de la siguiente tabla.

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

El modelo arrojó una peligrosidad entre moderada y alta en el interior del río dando un valor de 1.25, la peligrosidad en las márgenes se presenta con los valores entre 0.95 y 0.25 lo que la coloca en peligrosidad baja y moderada presentando una reducción en el área de esta peligrosidad baja o moderada en la ribera del río Huichichila.

5.2.7.3 Escenario 3 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 20 años.

Se realizó un estudio del flujo de agua en el cauce colocando las represas en el río Huichichila utilizando un hidrograma de una lluvia con periodo de retorno de 20 años con un tiempo de duración de 4 h. Los datos que se estudiaron son: Calado máximo, Velocidad y la Peligrosidad máximas. Las represas propuestas por los compañeros del semestre pasado en la zona de intervención se diseñaron con una altura de 1.5 m y de 1 m respectivamente además de determinar las condiciones de nuestras compuertas. Se realizó un análisis mediante una simulación de nuestro modelo en el programa Iber donde arrojó los resultados que se presentan en las figuras siguientes.

Calado máximo.

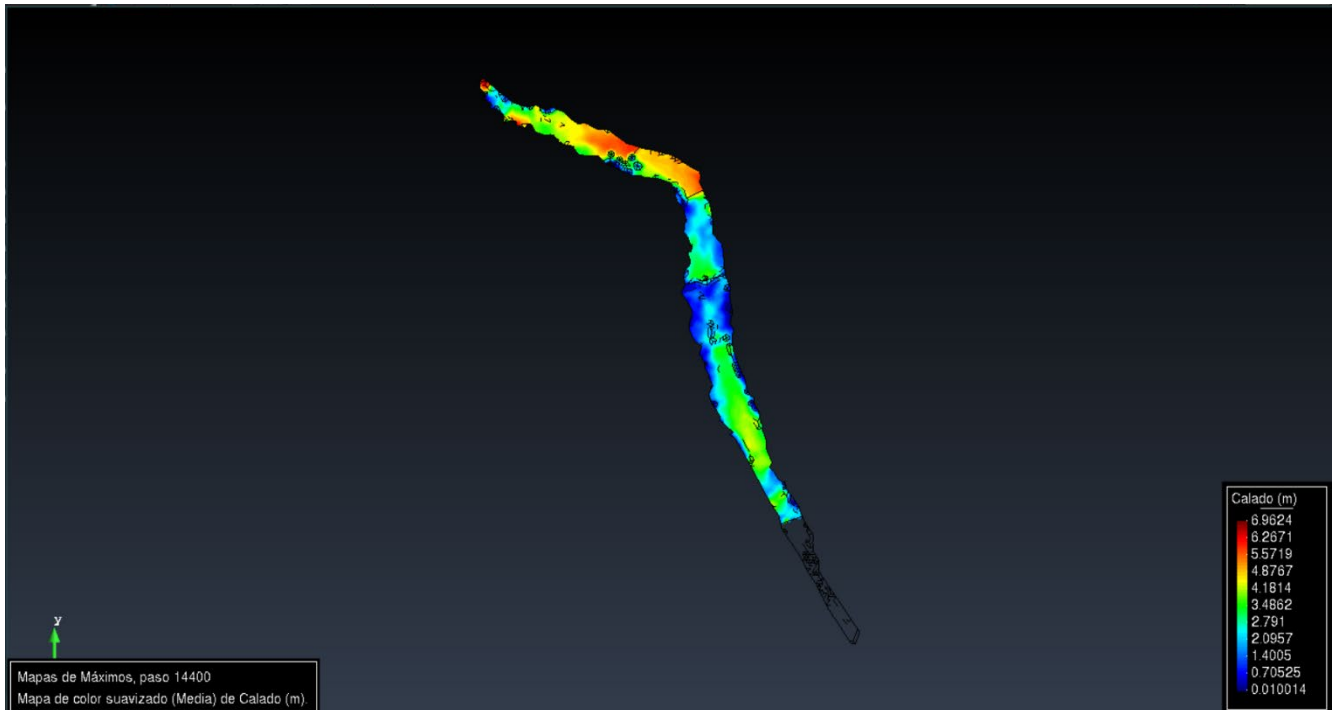


Figura 83. Calado máximo simulación con lluvia de retorno 20 años (2024).

El nivel máximo del agua es de 6.96 m ubicado entre las dos represas propuestas. En la zona entre las represas propuestas y las compuertas existentes hay un nivel del agua de 4.18 m y 2.10 m, lo que indica una gran diferencia de nivel de agua entre las represas propuestas y las existentes, aunque el calado incrementó respecto al periodo de retorno anterior.

En el tramo que se encuentra después de las compuertas aguas abajo el análisis arrojó un nivel de agua más bajo con alturas de entre 3.49 m y 0.01 m, sin embargo en una zona cerca del camino incrementa otra vez a 4.18 m, lo cual los datos utilizados con el periodo de retorno de 20 años arrojan que el calado se incrementó aguas abajo después de las compuertas y teniendo un calado de 2.10 m en el camino que cruza el río y que actúa como salida de agua.

Velocidad máxima.

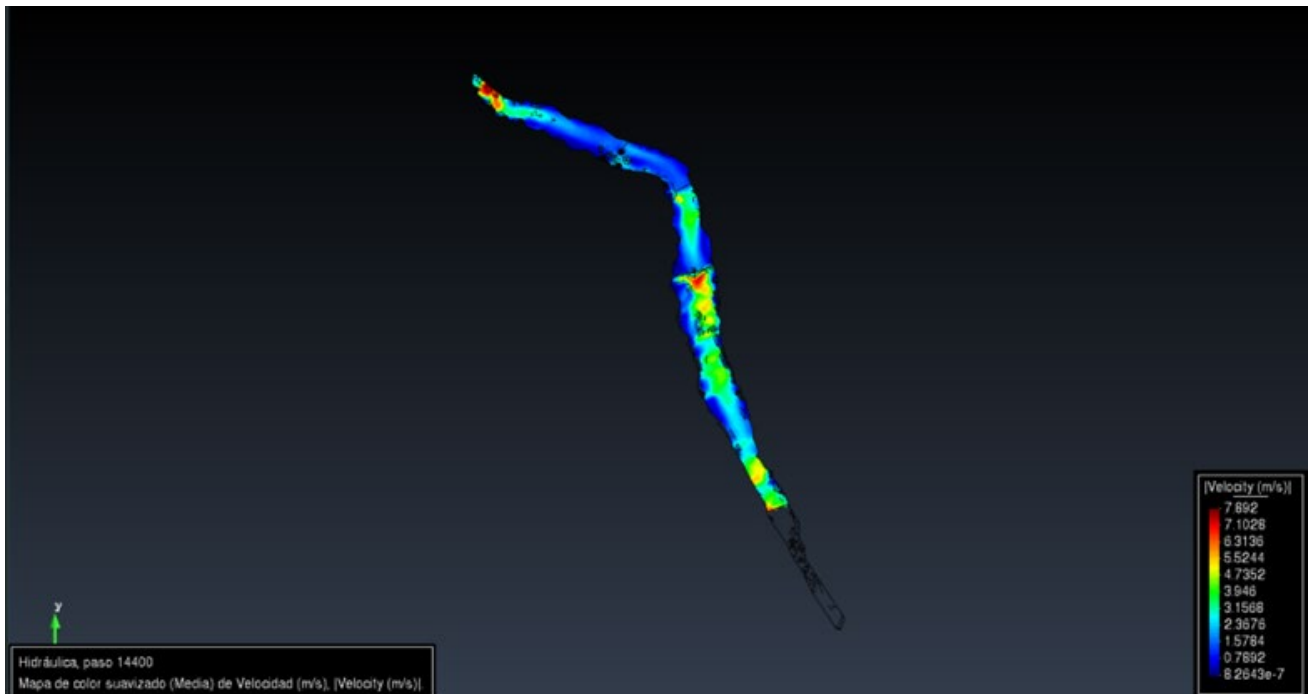


Figura 84. Velocidad máxima *simulación* con lluvia de retorno 20 años (2024).

La velocidad máxima se presenta en la entrada de nuestro modelo y, tras las compuertas aguas abajo, con un valor de 7,89 m/s, mientras que en las represas su velocidad oscila entre 2,36 m/s-0.769 m/s. En la zona entre la represa y las compuertas existentes, van de 3,94 m/s a 0,769 m/s. Por último, después de las compuertas aguas abajo, hay velocidades de 6,31 m/s a 1,57 m/s.

Peligrosidad máxima.

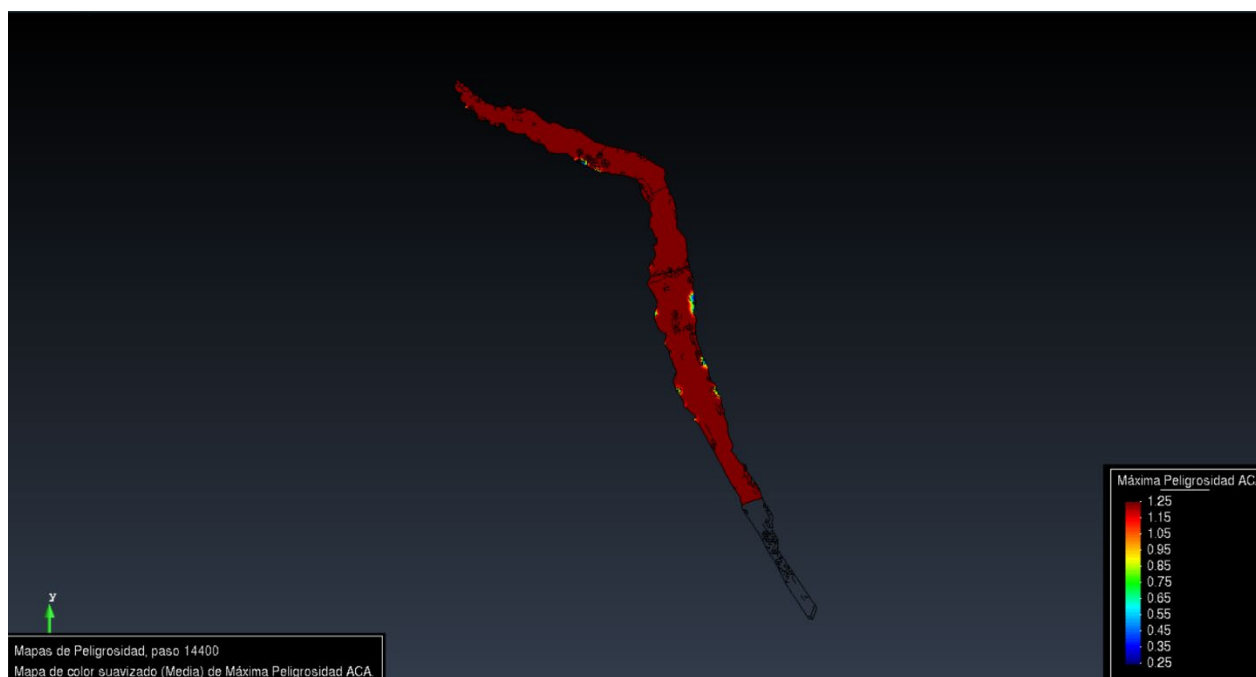


Figura 85. Peligrosidad máxima simulación con lluvia de retorno 20 años (2024).

Sobre peligrosidad se realizó el análisis según la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA), cuyo objetivo es determinar la peligrosidad del flujo del agua para las personas y bienes materiales a partir de la siguiente tabla.

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

El modelo arrojó una peligrosidad entre moderada y alta en el interior del río dando un valor de 1.25, la peligrosidad en la ribera se presenta con los valores entre 0.95 y 0.25 lo que la coloca una peligrosidad baja y moderada presentando una reducción en el área de esta peligrosidad baja o moderada en la ribera del río Huichichila a casi ser nula.

5.2.7.3 Escenario 4 Análisis del río Huichichila con lluvia con periodo de retorno de 50 años.

Se realizó un estudio del flujo de agua en el cauce colocando las represas en el río Huichichila utilizando un hidrograma de una lluvia con periodo de retorno de 50 años con un tiempo de duración de 4 h. Los datos que se estudiaron son: Calado máximo, Velocidad y la Peligrosidad máximas. Las represas propuestas por los compañeros del semestre pasado en la zona de intervención se diseñaron con una altura de 1.5 m y de 1 m respectivamente además de determinar las condiciones de nuestras compuertas. Se realizó un análisis mediante una simulación de nuestro modelo en el programa Iber donde arrojó los resultados que se presentan en las figuras siguientes.

Calado máximo.

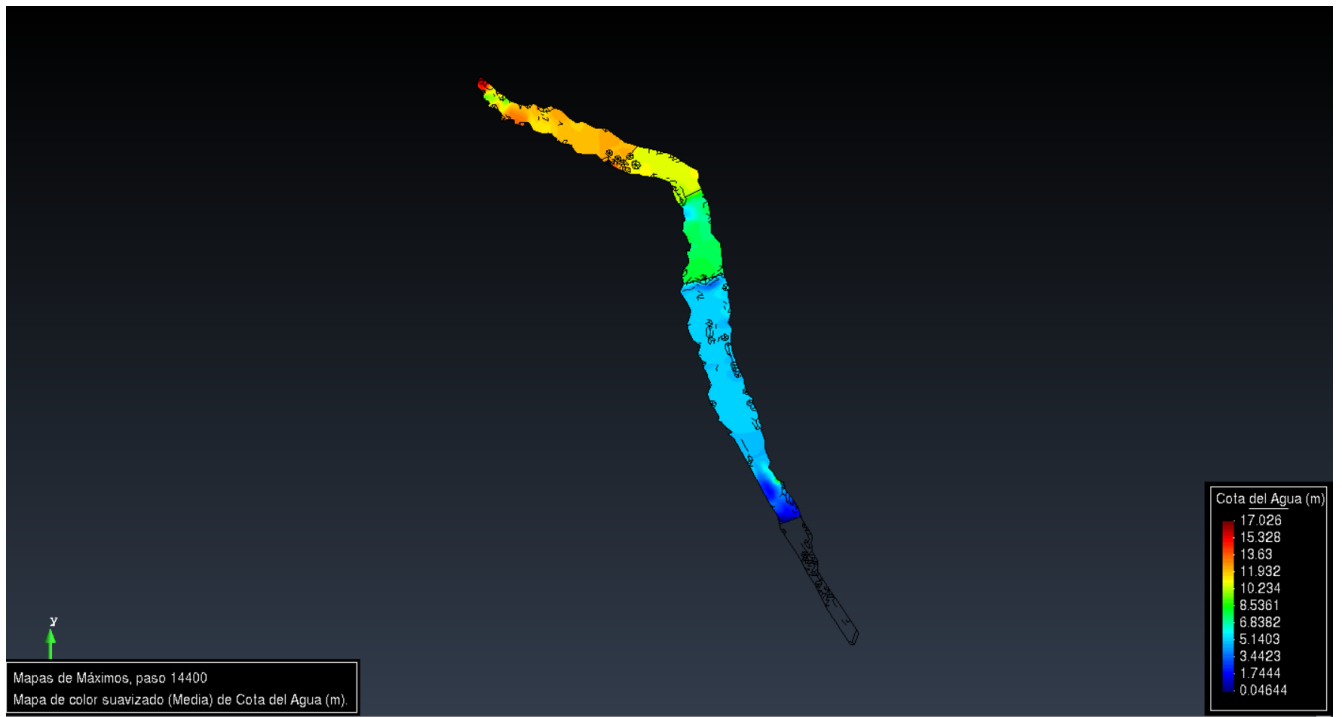


Figura 87. Calado máximo simulación con lluvia de retorno 50 años (2024).

Los resultados arrojados por nuestro modelo utilizando el periodo de retorno de una lluvia de 50 años muestra el incremento de calado máximo a unos 17 m de altura aguas arriba en la zona donde localizamos nuestras represas mientras que en las compuertas presenta una altura entre 8.54 m y 5.14 m, aguas abajo después de las compuertas existentes se tienen caudales de entre 5.14 m y 1.74 m

Velocidad máxima.

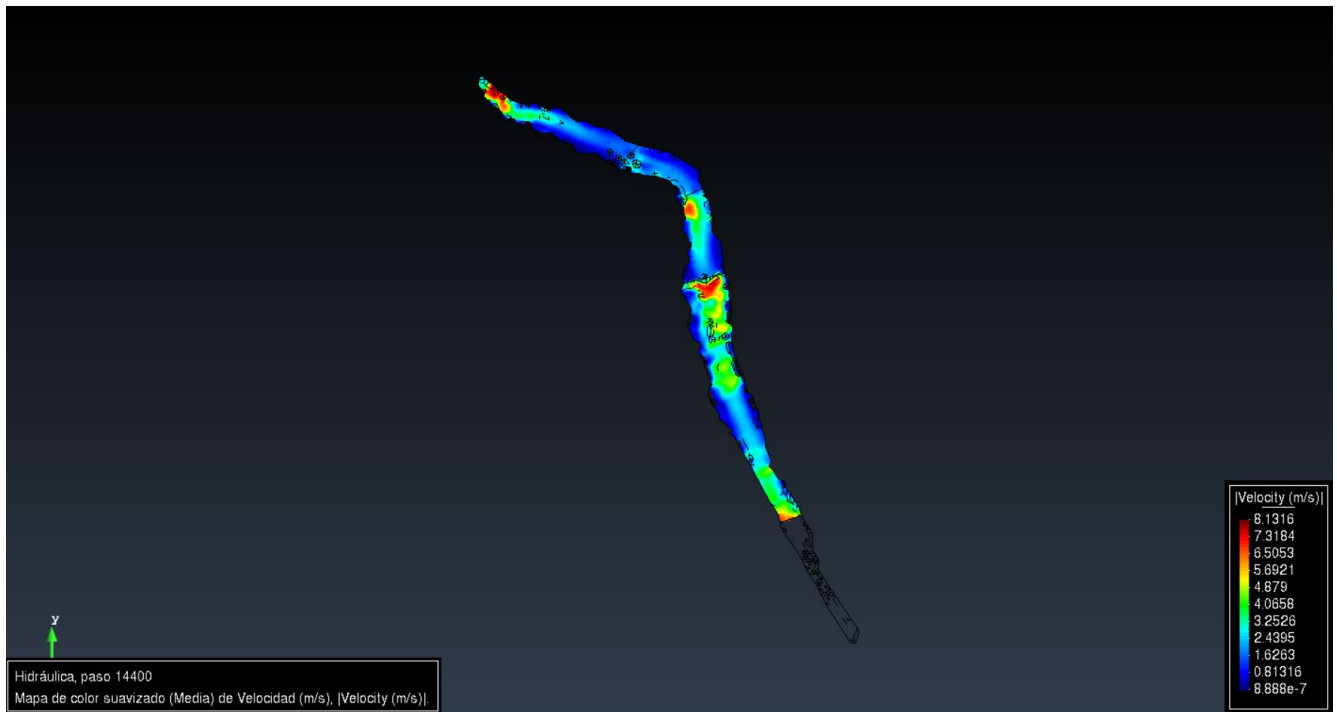


Figura 88. Velocidad máxima simulación con lluvia de retorno 50 años (2024).

La velocidad máxima se hizo en la entrada de flujo en el modelo, tras la segunda represa, tras las compuertas y en el vado con una velocidad de 8,13 m/s en la primera represa y en el área entre ambas represas el modelo arrojó una velocidad de 3,25 m/s a 0,813 m/s.

Entre la represa y la segunda compuerta arrojó velocidades entre 8.13 m/s a 1.62 m/s. Después de las compuertas existentes se encontraron velocidades que van desde los 5.60 m/s hasta los 0.813 m/s siendo los valores más bajos en las orillas mientras que el vado presentó en uno de sus bordes la velocidad máxima mencionada con anterioridad y también presentó velocidades que van desde los 5.60 m/s hasta los 4.07 m/s

Peligrosidad máxima.

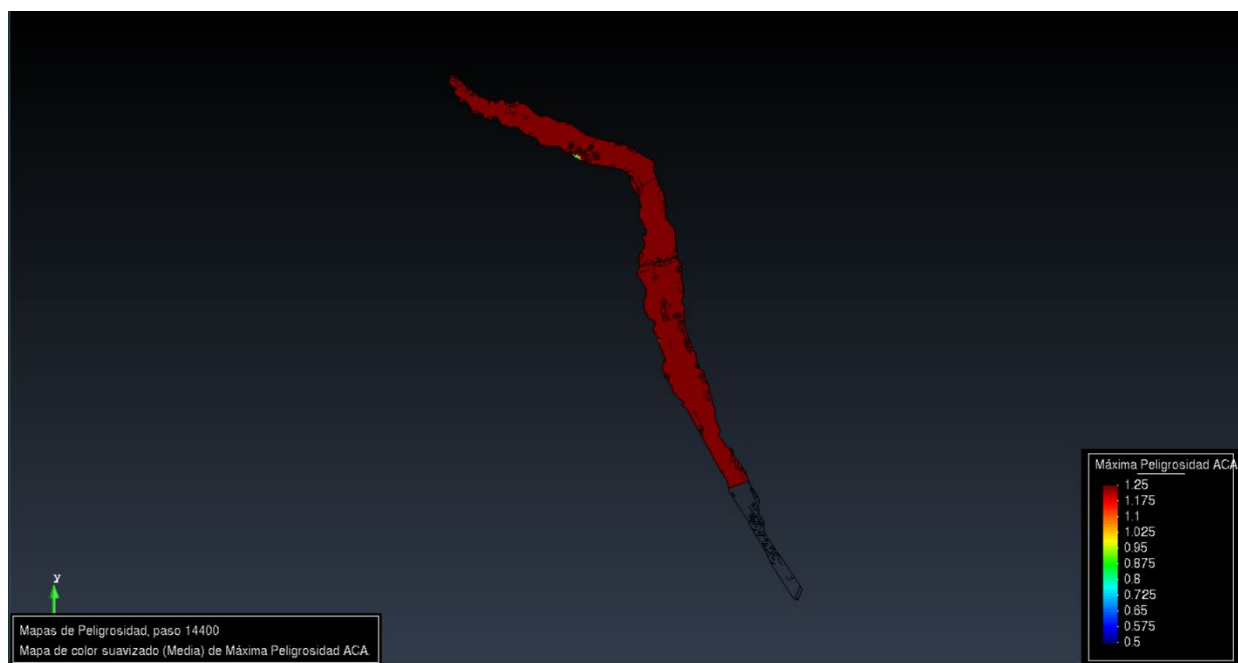


Figura 89. Peligrosidad máxima simulación con lluvia de retorno 50 años (2024).

Sobre peligrosidad se realizó el análisis según la metodología de la Agencia Catalana del Agua (ACA), cuyo objetivo es determinar la peligrosidad del flujo del agua para las personas y bienes materiales de la siguiente tabla.

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

El modelo arrojó una peligrosidad entre moderada y alta en el interior del río dando un valor de 1.25, la peligrosidad en las márgenes se presenta con los valores entre 0.95 y 0.25 lo que la coloca en peligrosidad baja y moderada se presenta en una pequeña sección de la orilla o margen del río Huichichila lo que implica que las lluvias de periodo de retorno de 50 años de la sección 8 de este documento, se nota que las lluvias tienen un calado máximo en la zona baja de la cuenca, donde el área de estudio coincide con el Río Ameca. En el 2015 se tiene registro de una tormenta de intensidad tal que generó el desalojamiento de más de doscientas personas, debido al desbordamiento de dicho río (Hernández, 2015). Es el último desbordamiento del que se tiene datos, pero este afirma que la inundación de la cuenca se lleva a cabo en la zona inferior cercana a los cuerpos de agua superficiales.

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.

Otra de las actividades realizadas para validar el modelo fue la validación en campo, en la que se presentaron los resultados a los habitantes del poblado de San Juan de Abajo buscando retroalimentación de su parte. A partir de la charla con los pobladores se pudo identificar que las zonas de inundación corresponden a las observadas de manera empírica.

Para validar con mayor rigor técnico es necesario instalar estaciones meteorológicas y de monitoreo en la zona de estudio para las que se pueda hacer una calibración constante del modelo y se generen datos cercanos al comportamiento hidrológico de la zona.

Futuras líneas de investigación:

Se ha completado la simulación Iber con las escalas actuales. Sin embargo, se ha identificado la necesidad de reorganizar algunas escalas para mejorar la precisión de los resultados. Además, se recomienda continuar explorando el río para obtener más datos que puedan usarse para refinar la simulación.

Detalles:

- **Reorganización de escalas:** Se ha observado que algunas escalas de la simulación Iber no son lo suficientemente precisas. Esto se debe a que las características del río varían significativamente en diferentes secciones. Se recomienda reorganizar las escalas para que se adapten mejor a la variabilidad del río.

- **Exploración fluvial:** Se ha recopilado una cantidad significativa de datos durante la simulación Iber. Se recomienda continuar explorando el río para obtener más datos que puedan usarse para refinar la simulación. Estos datos podrían incluir mediciones de la profundidad del agua, la velocidad del flujo y la sedimentación.

Se recomienda reorganizar algunas escalas en la simulación Iber y continuar con la exploración del río para mejorar la precisión de los resultados.

Próximos pasos:

- Se elaborará un plan detallado para la reorganización de las escalas en la simulación Iber.
- Se planificará y ejecutará una campaña de exploración fluvial adicional.
- Se actualizará la simulación Iber con los nuevos datos recopilados.

Recomendaciones:

- Se recomienda que un experto en hidráulica fluvial participe en la reorganización de las escalas en la simulación Iber.
- Se recomienda que se utilice un equipo de expertos para la exploración fluvial adicional.
- Se recomienda que se realice una validación exhaustiva de la simulación Iber actualizada.

Para identificar los datos críticos, se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. **Establecer objetivos:** Definir claramente los objetivos de la simulación y los aspectos del comportamiento del río que se desean analizar.
2. **Analizar los resultados:** Examinar los resultados de la simulación para identificar los parámetros que presentan cambios significativos a lo largo del tiempo.
3. **Identificar momentos críticos:** Determinar los momentos en que estos cambios significativos ocurren, por ejemplo, picos de inundación, erosión o sedimentación.
4. **Evaluar la importancia:** Evaluar la importancia de estos momentos críticos en relación con los objetivos de la simulación.

Ejemplo:

En una simulación Iber de inundaciones, un dato crítico podría ser el nivel del agua en un punto específico del río. Este dato podría ser crítico a las 2 horas de la simulación, cuando se alcanza el pico de inundación, y a las 3 horas, cuando el nivel del agua comienza a disminuir rápidamente.

Beneficios:

La identificación de datos críticos permite:

- **Enfocar el análisis:** Centrarse en los aspectos del comportamiento del río que son más relevantes para los objetivos de la simulación.
- **Tomar decisiones informadas:** Utilizar la información sobre los datos críticos para tomar decisiones más efectivas relacionadas con la gestión del río.
- **Comunicar resultados de manera efectiva:** Enfatizar los aspectos más importantes de la simulación al comunicar los resultados a las partes interesadas.

Recomendaciones:

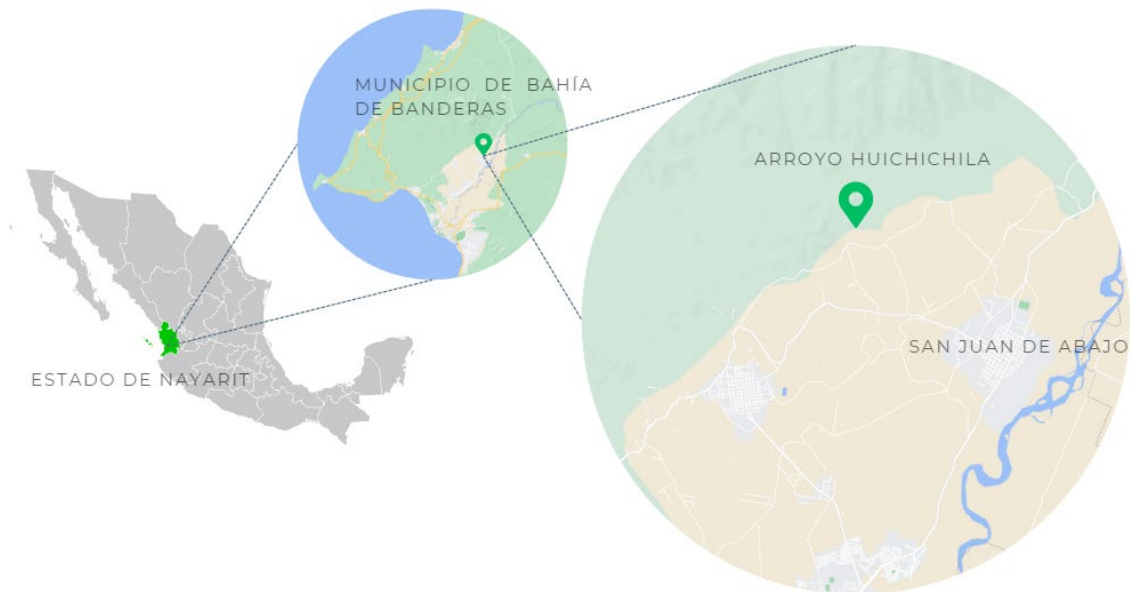
- **Visualizar los datos:** Utilizar gráficos y herramientas de visualización para identificar patrones y tendencias en los datos a lo largo del tiempo.
- **Calcular indicadores clave:** Desarrollar indicadores clave de rendimiento (KPIs) que capturen la importancia de los datos críticos.
- **Comunicar de manera clara y concisa:** Presentar los datos críticos de manera clara y concisa, utilizando un lenguaje que sea comprensible para las partes interesadas.

5.3 Propuestas arquitectónicas y constructivas en San Juan de Abajo

El arroyo Huichichila es un cuerpo de agua muy importante para las poblaciones aledañas, sin embargo, en tiempos de lluvia su caudal aumenta considerablemente lo que puede provocar problemas para estos. Con la intervención propuesta buscamos mitigar el riesgo de inundaciones con propuestas de albercas que disminuyan la velocidad del agua en tiempos de lluvia. Funcionando de la misma el uso de huertos, mejorar la calidad del agua para el consumo humano, recreación y uso público, mantenimiento y/o restauración ambiental de la zona y criadero de peces.



UBICACIÓN DEL ARROYO



El uso del suelo en este arroyo es de vital importancia para la comunidad existente, siendo uno de los principales ingresos gracias a su uso para la agricultura y el potencial uso para criadero de peces, lo que ayudaría a tener un derrame económico mejor para los locales. Actualmente cuentan con un problema de abastecimiento de agua, lo que genera un problema con el uso de esta para las actividades mencionadas. La falta de lluvia y/o el exceso de estas puede generar en este arroyo múltiples variables que perturben las actividades a realizar. Como este factor estará directamente ligado a la rugosidad del suelo, se debe tener en cuenta para generar un proyecto mimético en pro de las comunidades cercanas al arroyo.



Es fundamental determinar los objetivos a lograr en el proyecto del arroyo Huichichila, ya que gracias a estos podemos determinar el enfoque que llevara la propuesta arquitectónica.

Como ya se ha mencionado, se realizó un escaneo del arroyo con la finalidad de poder generar tanto distintas simulaciones del flujo del agua, como también una propuesta de intervención arquitectónica a lo largo del arroyo



Nuestra investigación nos dio como solución crear un sistema de represas para un mayor rendimiento del agua que fluye en el arroyo. Nos enfocamos en la parte superior del arroyo de manera que se integren de la mejor manera con la represa ya existente. Sumado a esta propuesta optamos por complementarlo con un parque lineal a los costados del arroyo.



El sistema estructural que se usara en estas represas puede variar dependiendo de la decisión final de los locales. Proponemos tener sacos biodegradables, se llenarían con sedimentos de

la zona, siendo arena, tierra, rocas, etc. En otra opción, optamos por estructurarlas con las mismas rocas de la zona, funcionarían como una barrera que retendría el agua y dejaría fluir el límite como se ve en la imagen anterior. Y, por último, tendríamos la intervención con mayor costo que se podría llevar a cabo con un sistema estructural completo.

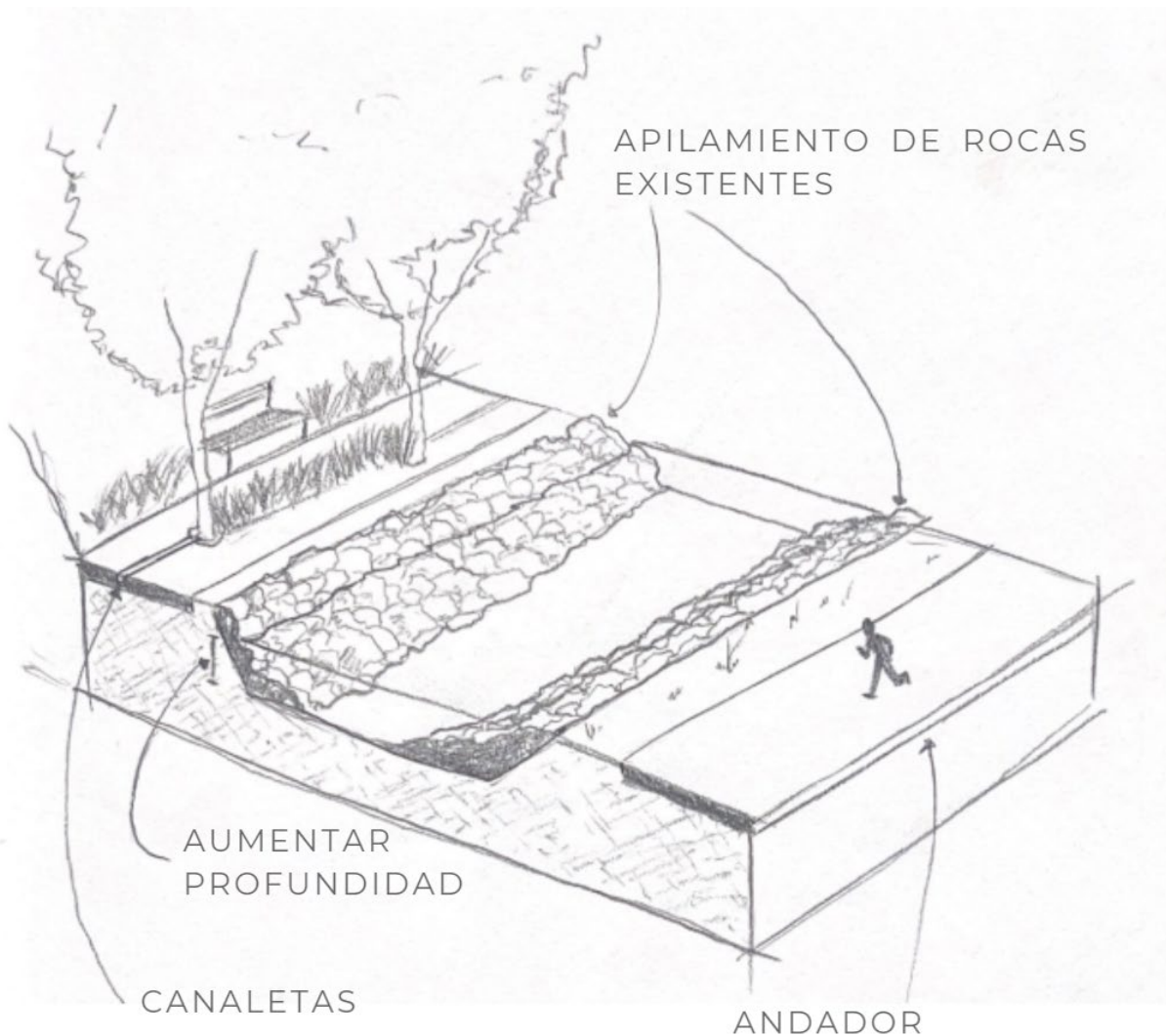


Juntando la información recolectada por los semestres pasados y la obtenida a lo largo del semestre, llegamos a esta conclusión. Ya que, los parques lineales a lo largo de los arroyos pueden proporcionar muchos beneficios tanto para las comunidades locales como para el medio ambiente. Aquí tienes algunos de ellos:

1. Espacios verdes y recreativos: este proyecto ofrece áreas verdes para que las personas disfruten del aire libre, realicen actividades recreativas como caminar, correr, andar en bicicleta o hacer picnics, lo que promueve un estilo de vida activo y saludable.
2. Conservación del hábitat: protege y preservará la biodiversidad local al proporcionar corredores naturales para la vida silvestre, así como hábitats para plantas nativas y animales.
3. Control de inundaciones: con la integración de este proyecto buscamos que por medio de represas y reestructurar la circulación del agua ayude a reducir el riesgo de inundaciones al absorber y retener el exceso de agua.
4. Mejora de la calidad del agua: Al filtrar el agua de escorrentía y reducir la cantidad de contaminantes que llega al arroyo.

5. Control de la erosión: puede estabilizar los bancos del arroyo y reducir la erosión del suelo, lo que ayuda a mantener la integridad de los cursos de agua y a prevenir la pérdida de tierra.
6. Beneficios sociales y comunitarios: esta propuesta proporciona áreas de encuentro y sociabilización para las comunidades locales, promoviendo la cohesión social y el sentido de pertenencia.

CORTE DE ISOMETRICO PROPUESTA INICIAL PARQUE LINEAL



Además, en este proyecto decidimos agregar una serie de propuestas que pueden ayudar a las comunidades en el tema económico. Estos programas como los huertos y albercas para criadero de peces ayudaran no solo a generar espacios recreativos sino también al aumento económico, por ende.



Los huertos ofrecen beneficios como el acceso a alimentos frescos y saludables, la educación y conciencia ambiental que trae consigo a los integrantes de la comunidad, controlando y mejorando el paisaje y el consumo. Potencializa la unión de la comunidad a través de una actividad que beneficia a todos.



CONCEPTO DEL PARQUE LINEAL PRIMER ESQUEMA



Las represas fueron diseñadas con el fin de regular el flujo del agua en el arroyo, estas se ven apoyadas con el uso de puentes de madera para generar un recorrido más acogedor

LOCALIZACIÓN DE REPRESAS

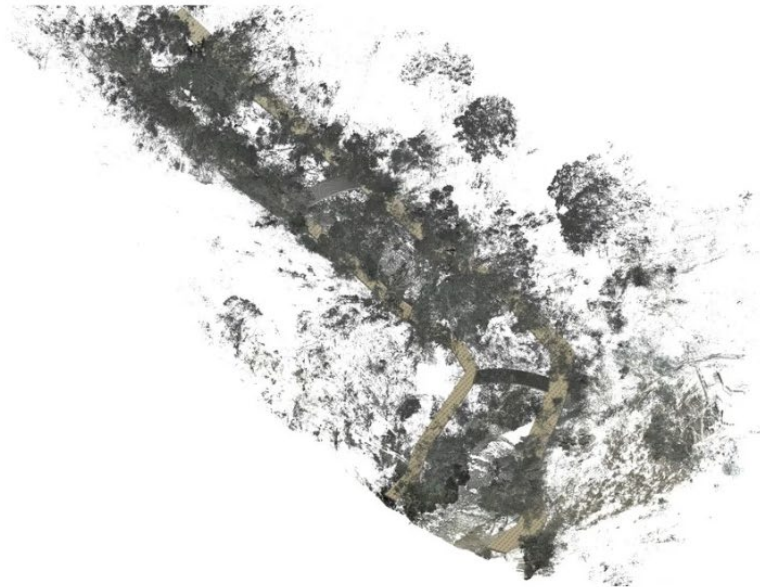


Para el andador se optó por un diseño lineal en ambos lados del arroyo. La pendiente de este andador apunta hacia el arroyo, a su vez, se ve apoyado con los mismos materiales del arroyo ya existentes, teniendo como principal enfoque el uso de las rocas.

Después de realizar un análisis del arroyo se determinaron 3 represas (una ya existente) como punto focal para la intervención a realizar.



DESARROLLO DE PROPUESTA ARQUITECTONICA.

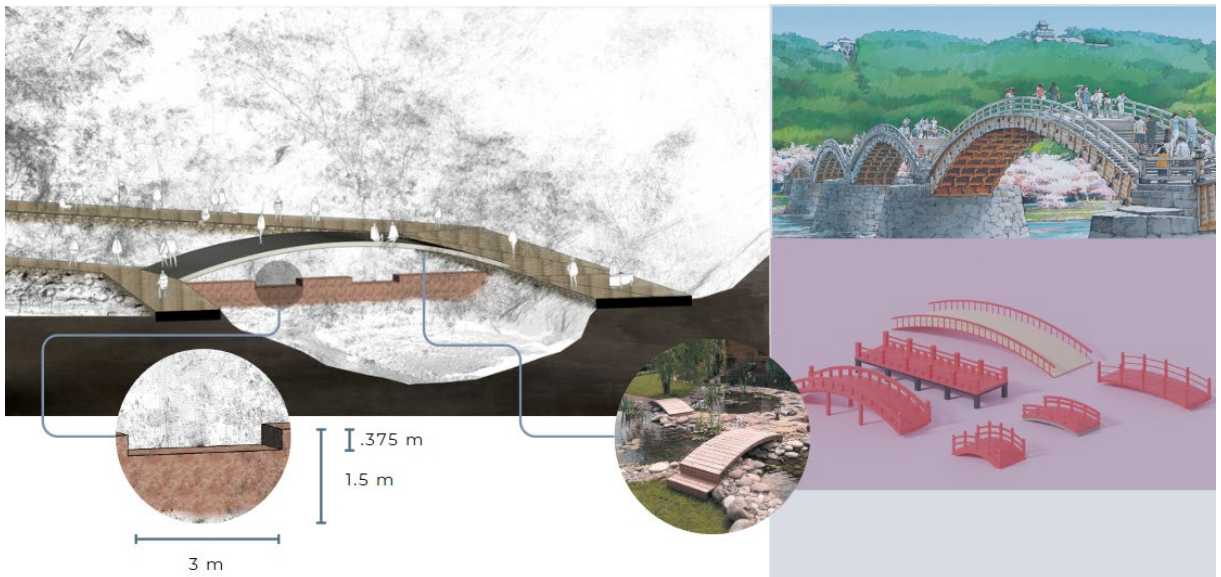


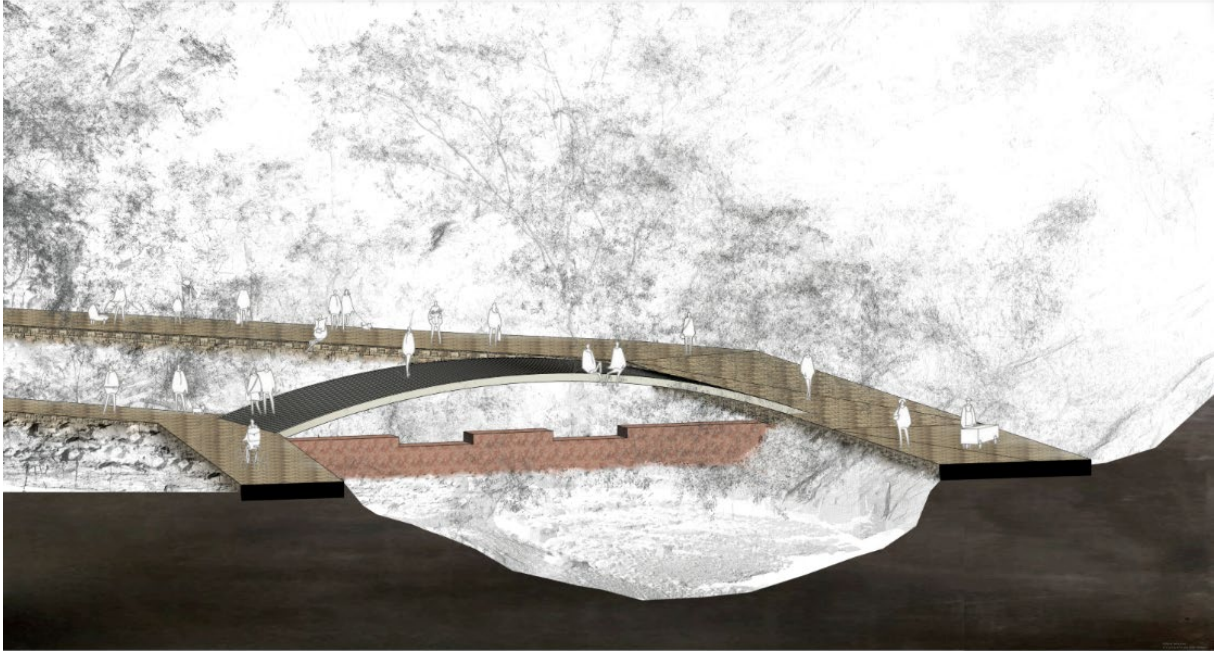
NUBE DE PUNTOS | PROPUESTA PARQUE LINEAL



El mobiliario urbano desempeña un papel crucial en la configuración y funcionalidad como apoyo en la comodidad, proporcionando áreas de descanso y dando tiempo para que las personas aprecien el espacio más a detalle.

Las jardineras tienen como finalidad apoyar en el aspecto estético del andador, sin embargo, también pueden ser usadas como áreas donde se pueda filtrar mejor el agua, siendo estas jardineras los puntos clave.



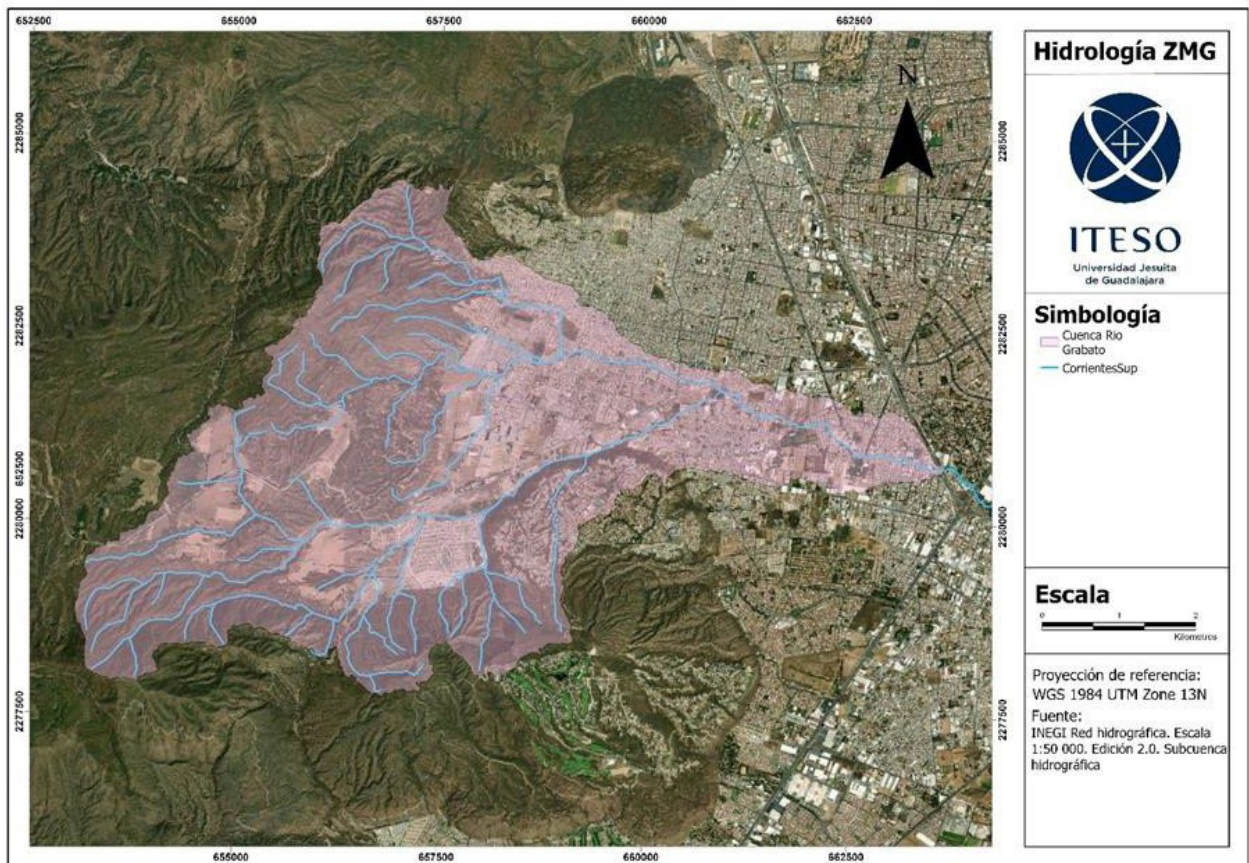


Con esta propuesta buscamos hacer un proyecto que se mimetice con el arroyo y pueda ser progresivo.

5.4 Zona poniente de Guadalajara

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.



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.

La recopilación de datos del Arroyo Seco se obtuvo en la realización de una profunda investigación de datos geográficos, para posteriormente hacer mapas con curvas de nivel en ArcGIS e Iber para comprender el comportamiento de la hidrología de las cuencas del cauce del Arroyo Seco. La información cuantitativa geográfica se obtuvo de INEGI, IIEG, etc. para entender los flujos de agua del río que bajan desde el cerro del Bosque de la Primavera hasta el Río Santiago, pero el área de estudio solamente abarca el Arroyo seco.

También, se realizaron visitas de campo en una parte del arroyo para analizar un poco del contexto de lo que es el canal actualmente para comprender mejor la realidad del canal, se visitaron algunos puntos, principalmente en los puentes. Se observó que hay deformaciones en el canal, como, por ejemplo, la urbanización creciente que no respeta el cauce, lo que genera que el canal se recorra dañando casas vecinas ya existentes generando inundaciones, hay demasiada contaminación de basura en los canales de agua generando malos olores y gases, ha habido colapsos de viviendas, ya que no respetan el sitio donde pasa el agua generando erosiones, etc. No hay tal información cuantitativa exacta de la hidrológica de este arroyo, pero cada año hay desbordamientos y destroces por la cantidad de agua que corre,

sobre todo, en temporadas de lluvia, generando que el agua no se capte ni gestione de la manera correcta, el resto del año el canal suele estar seco. La información se obtuvo en páginas web de periódicos como el Informador, las noticias.

La elección del modelo hidrológico se basó en la consideración de hietogramas, que presentaban periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación, según se detalla en el capítulo 7 del documento. Estas tormentas las generó meticulosamente el Mtro. Diego Rojas en su tesis de maestría (Rojas & González, 2015). Se seleccionaron los hietogramas con periodos de retorno de 2, 10 y 25 años porque reflejan las condiciones pluviales en la zona de interés. Estas tormentas se integraron en el modelo para realizar las simulaciones correspondientes, siendo un componente esencial para la evaluación hidrológica.

Se plantearon diversas ideas e intervenciones para mejorar nuestra cuenca, para restaurar y reducir las áreas de riesgo de inundación dentro del arroyo y en las zonas circundantes, incluyendo vialidades propensas a inundaciones. En el marco de estas propuestas, se creó una red hidrográfica para la subcuenca. Este sistema modela el drenaje de la cuenca hidrográfica, identificando las corrientes de agua, canales principales y la dirección del flujo de agua (INEGI, 2010).

Posteriormente, se emplearon herramientas de procesamiento geoespacial como "ArcGIS Pro" para organizar los cauces de la zona de estudio, como parte de la propuesta de intervención, se sugirió la construcción de represas en la parte superior del arroyo y distintas intervenciones a lo largo de la cuenca como arroyos infiltrantes, camellones infiltrantes, pozos de absorción, estaciones de autobús con pozos, parques lineales, entre otras. Estas represas cumplirían la función de reducir las velocidades del caudal dentro del arroyo y controlar el tirante de agua, permitiendo una dosificación más efectiva del cauce. La importación de datos de estas intervenciones al modelo en IBER facilitó el análisis de su

influencia en el modelo hidrodinámico superficial. Se compararon los hidrogramas de la corriente con y sin intervenciones, evaluando la velocidad máxima del agua, la máxima peligrosidad ACA y el calado del caudal retenido a lo largo de toda la cuenca.

Finalmente, tras completar la propuesta de selección de intervenciones, se le asignaron distintos puntos donde se realizarían estas intervenciones considerando todas las propuestas que teníamos y combinando las mismas para obtener un mejor desempeño de nuestro modelo. Este espacio ofrece la oportunidad de captar agua a mayor escala para mitigar las afectaciones actuales en la zona.

Mediante estas propuestas, se busca optimizar el uso de un extenso terreno para convertirlo en una considerable área de infiltración. Este reservorio se diseñó para gestionar eventos pluviales con un periodo de retorno de 2,10 y 25 años, para almacenar, dosificar e infiltrar volúmenes significativos de agua. La finalidad es prevenir que las áreas urbanas sigan sufriendo las consecuencias de lluvias intensas y desbordamientos del canal, originados por la incapacidad para gestionar elevados niveles de caudal. Estas intervenciones facilitarían la retención y reducción de la velocidad del agua, disminuyendo el caudal de escurrimiento, reteniendo sedimentos y reduciendo las áreas de riesgo, tal como se describe en el modelo de represas.

Durante el análisis de estas propuestas, se consideraron varios modelos en el programa Iber, un modelo matemático bidimensional con un módulo hidrodinámico para simular flujos en ríos, canales y cauces naturales. Se evaluaron 3 intervenciones diferentes con distintas intervenciones, centradas en la implementación de las varias propuestas en conjunto para mejorar la infiltración, pero algunas propuestas incluyeron intervenciones adicionales para mejorar su rendimiento. Estas mejoras comprendieron la incorporación de un pozo de infiltración, una compuerta y unos parques lineales y arroyo infiltrante que incluían áreas más profundas. En algunos casos, se exploró la combinación de todas estas intervenciones en un mismo modelo para lograr un funcionamiento y aprovechamiento óptimos.

Los escenarios de simulación se definieron según distintos eventos de lluvia caracterizados por diferentes periodos de retorno, según los hietogramas de la tesis de maestría del Mtro. Diego Rojas (Rojas & González, 2015). En concreto, se consideraron periodos de retorno de 2,10 y 25 años, para generar resultados que abarcaran una gama de situaciones. Las intervenciones llevadas a cabo durante estos escenarios incluyeron la simulación de la cuenca sin ninguna intervención de recarga artificial en puntos estratégicos. Después, se realizó una segunda simulación con intervenciones, con 43 m³/s infiltrados en la cuenca. Finalmente, se efectuó una tercera simulación con intervenciones, caracterizada por una infiltración de 100 m³/s en toda la cuenca. Lo cual podemos obtener 9 simulaciones con los diferentes escenarios.

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

IBER es una herramienta de modelación matemática bidimensional para la simulación del flujo del agua en lamina libre en 2 dimensiones de origen español, lo que quiere decir que utiliza el método de volúmenes finitos que permite mayor flexibilidad en la malla para resolver ecuaciones parciales y de esta manera nos ayuda a poder predecir los valores de las variables hidráulicas como lo es el calado, velocidad y caudal. Asimismo, esta herramienta está compuesta por un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos (Bladé et al., 2012).

El módulo hidrodinámico consiste en un conjunto de ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos; es decir la solución numérica de las ecuaciones de conservación de momento y de masa en un fluido. Por lo cual, permite entender qué variables controlan el movimiento del agua y cómo la misma se verá afectada ante diferentes modificaciones. Para construir y hacer uso de estos modelos hidrológicos de microcuencas urbanas se siguieron una serie de pasos para trabajar con una simulación numérica computacional en IBER, la cual se basó en:

- Manejo de datos en SIG (Sistemas de Información Geográfica)
- Preproceso
- Realización de intervenciones en el modelo

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

- Rugosidad del Suelo: Depende de las variaciones de uso de suelo asignado a esa área de la ciudad, si es área urbanizada, no urbanizada, protegida, vegetación, pavimento, arbustos, etc.
- Numero de Curva: Este es un parámetro hidrológico que permite cuantificar el potencial de escorrentía en una cuenca, a partir de la cobertura del suelo. Por lo tanto, cada tipo de suelo tienen diferente número de curva.
- Modelo Digital de Elevaciones: Este modelo representa una representación gráfica y matemática de la variación de altura del territorio respecto al nivel del mar y presenta visualmente las formas del relieve y los elementos presentes en el mismo como las áreas urbanizadas, casas, edificios, calles, etc.

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

Para poder realizar los archivos ASCII se obtuvo información vectorial por cada tipo de uso de suelo. Luego, se agregaron ambos valores en una tabla de atributos y se convirtieron a ráster, para después convertirlos a ASCII y ser importados a IBER. En el caso del MDE (Modelo Digital de Elevación) del límite de la cuenca, se utilizó un modelo digital de elevación del año 2017 con escala 1:10,000 y curvas a cada 5 m.

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

En las siguientes tablas se muestran los coeficientes de rugosidad de Manning y número de curva obtenidos según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2014), para determinar correctamente los parámetros necesarios para estimar el número de curva. De igual manera se analizaron las cartas edafológicas de la región para caracterizar la composición del suelo, así como también se utilizó Google Earth para estimar la condición hidrológica que se tenía en cada tipo de suelo dentro del área de captación.

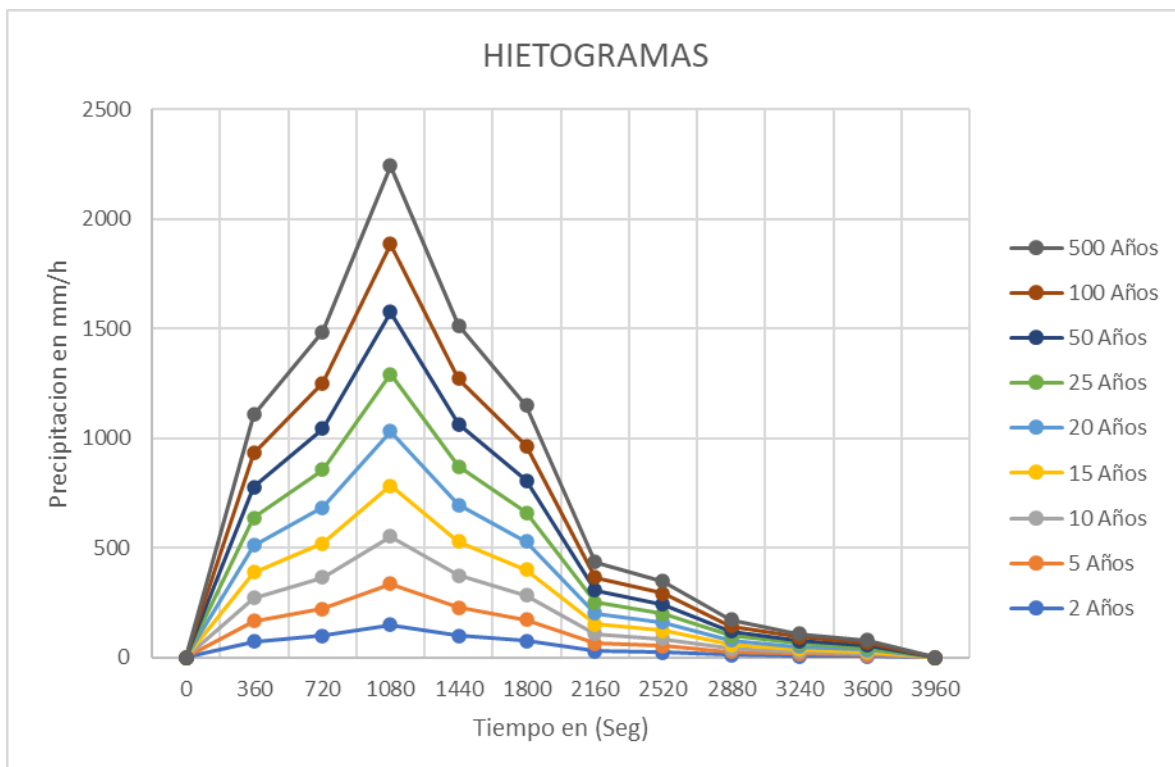
Uso de suelo Coeficiente de Manning	
Bosque	0.12
Arbustos	0.05
Arboles	0.12
Vegetación Urbana	0.032
Hormigón	0.018
Residencial	0.15

Uso de suelo Numero de curva	
Bosque	88
Arbustos	91
Arboles	91
Vegetación Urbana	90
Hormigón	97
Residencial	95

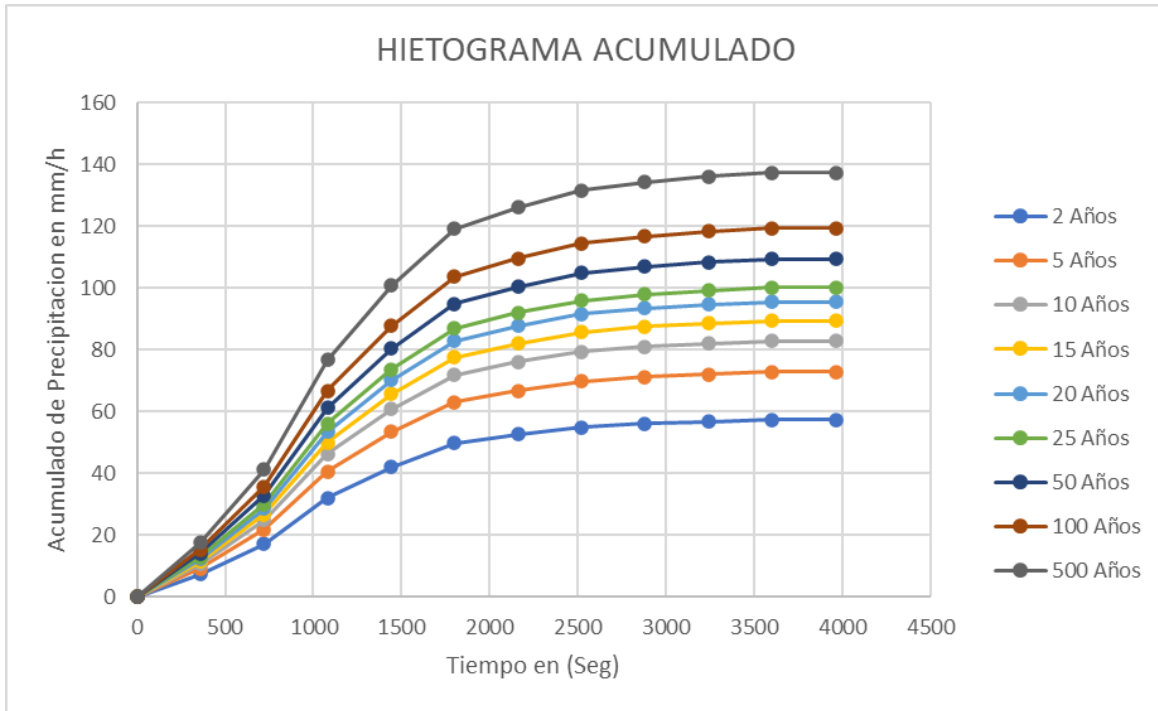
Lo que se realizó en primer lugar en IBER fue la importación los archivos shapefile de las manzanas, calles y la delimitación de la cuenca que se está estudiando, para posteriormente crear una malla la cual hará referencia a pequeñas porciones del terreno a las cuales se les asignaran las elevaciones formando puntos mediante triángulos, por lo cual en IBER se creó un nuevo archivo donde se importaron las elevaciones de la cuenca mediante el relieve; se utilizó una tolerancia de 20 metros para el área del bosque de la primavera en donde no es necesario tener una malla tan refinada ya que los datos tendrán menos variación porque es

el mismo tipo de terreno y la elevación no varía a grandes escalas, por otro lado dentro del área urbana se asignó una malla de 5 metros la cual tendría más definición para poder ver de manera más real la elevación de las áreas pavimentadas, calles, casas, fraccionamientos, plazas, etc. Después se asignaron las condiciones iniciales, en las cuales todas las áreas de captación se utilizó un valor de 0 m de profundidad de agua en toda la zona. Enseguida se agregaron las condiciones de contorno, es decir los lugares de salida de los escurrimientos. Las salidas asignadas en cada área fueron seleccionadas a partir del punto de menor elevación de cada microcuenca.

Se prosiguió por agregar y asignar a toda la zona un hietograma con tiempo de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25 y 50 años para cada simulación; los cuales se presentan en la siguiente figura. Dichas tormentas fueron generadas por el Mtro. Diego Rojas en su tesis de maestría (Rojas & González, 2015).



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



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

Posteriormente, se asignó un valor de rugosidad y número de curva a toda el área mediante los archivos que se habían generado anteriormente donde ya se habían obtenido estos datos para de esta manera finalmente pasar al proceso de simulación en donde se inició el tiempo de simulación en (0 segundos) y el tiempo máximo de simulación (14400 segundos), con un intervalo de tiempo de 300 segundos. Ya que fue la suma de la duración de la tormenta y el tiempo de concentración según cada área de captación; se corrió el cálculo del modelo, y se seleccionaron los siguientes resultados a visualizar: tirantes máximos, velocidades y peligrosidad máximas.

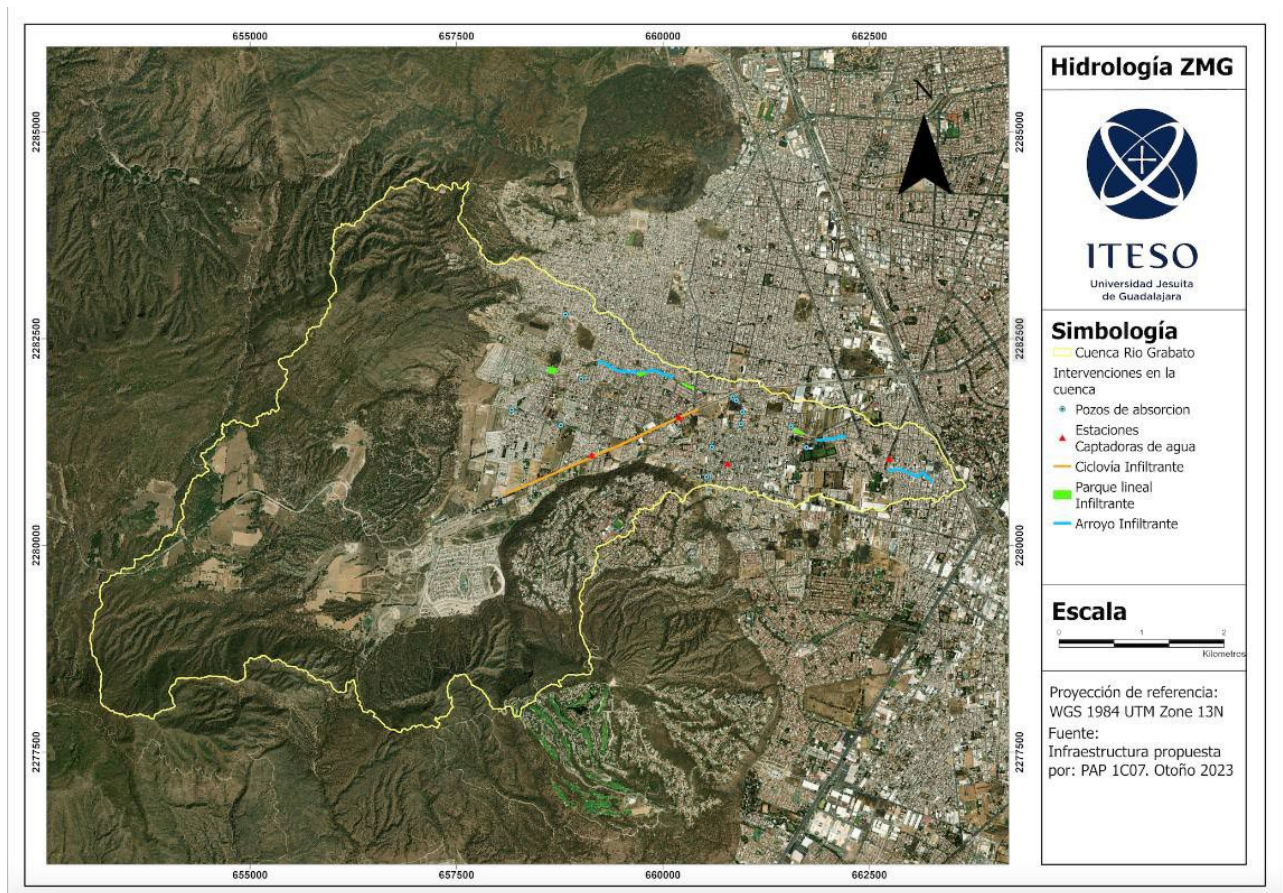
Además, los tiempos de concentración fueron calculados con ayuda de la página web SIATL del INEGI, que es un simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas en México. El tiempo de concentración es el de equilibrio para que el cuerpo de agua se establezca tras una precipitación, es decir, el tiempo 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

En la simulación, se exploraron tres escenarios distintos, cada uno con sus propias características. En el primer escenario, se modeló la cuenca utilizando tres eventos de lluvia con periodos de retorno de 2, 10 y 25 años, sin realizar ninguna modificación al modelo para mantener la condición hidrológica actual de la cuenca. En el segundo escenario, se replicaron las mismas lluvias, pero se introdujo una infiltración de 43 m³/s en puntos críticos de la cuenca. En el tercer escenario, se repitió la operación del segundo, pero con una infiltración de 100 m³/s, también distribuida en las zonas críticas de la cuenca. Este planteamiento permitió contar con un modelo que reflejara la condición actual, otro con una infiltración moderada y, finalmente, uno con una infiltración óptima para la cuenca.

Las intervenciones de infiltración implementadas en la cuenca se encuentran representadas de manera visual en el siguiente mapa;



El proyecto se basó en simulaciones geotécnicas realizadas con el software RocScience, el cual se fundamenta en el método de elementos finitos. Estas simulaciones se llevaron a cabo considerando cuatro tipos de suelo presentes en la Zona Metropolitana de Guadalajara: Jal, Jaltepe, Tepejal y Tepetate, los cuales representan la diversidad de granulometrías y permeabilidades de la región. Las simulaciones en RocScience nos dio como resultado la infiltración lateral y al fondo de los dos modelos de infiltración propuestos (infiltración a profundidad e infiltración en superficie).

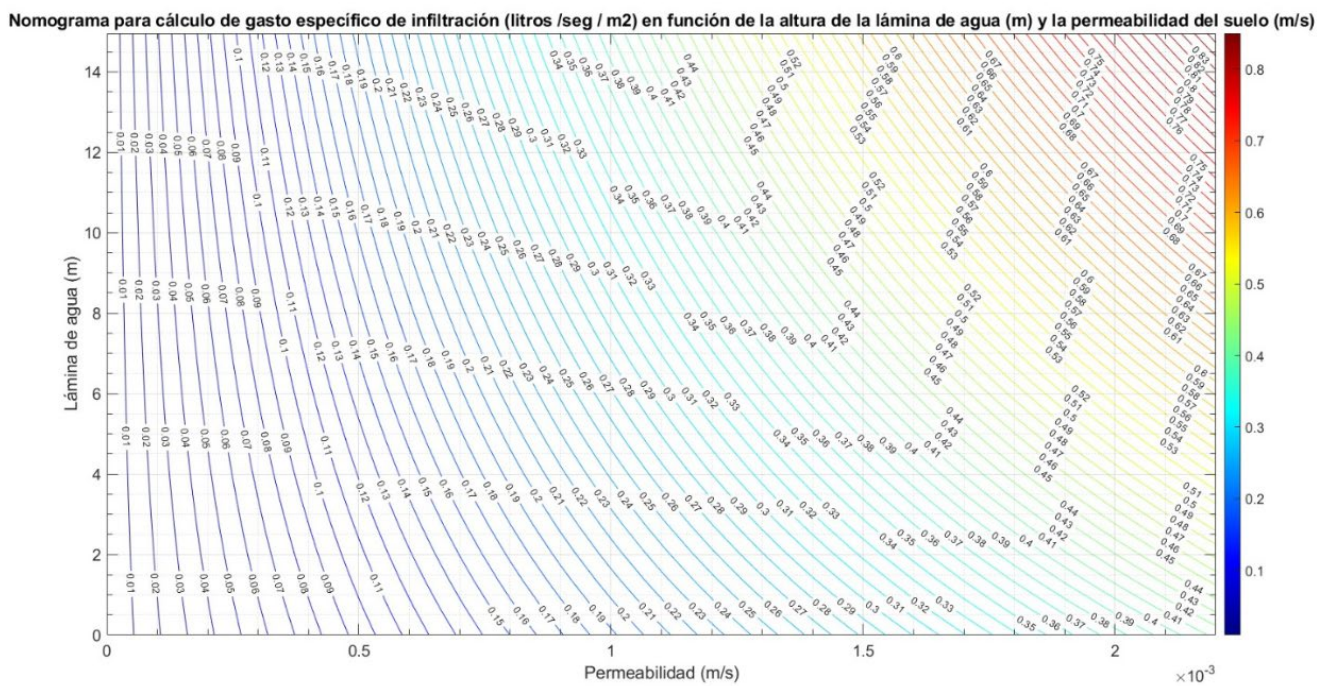
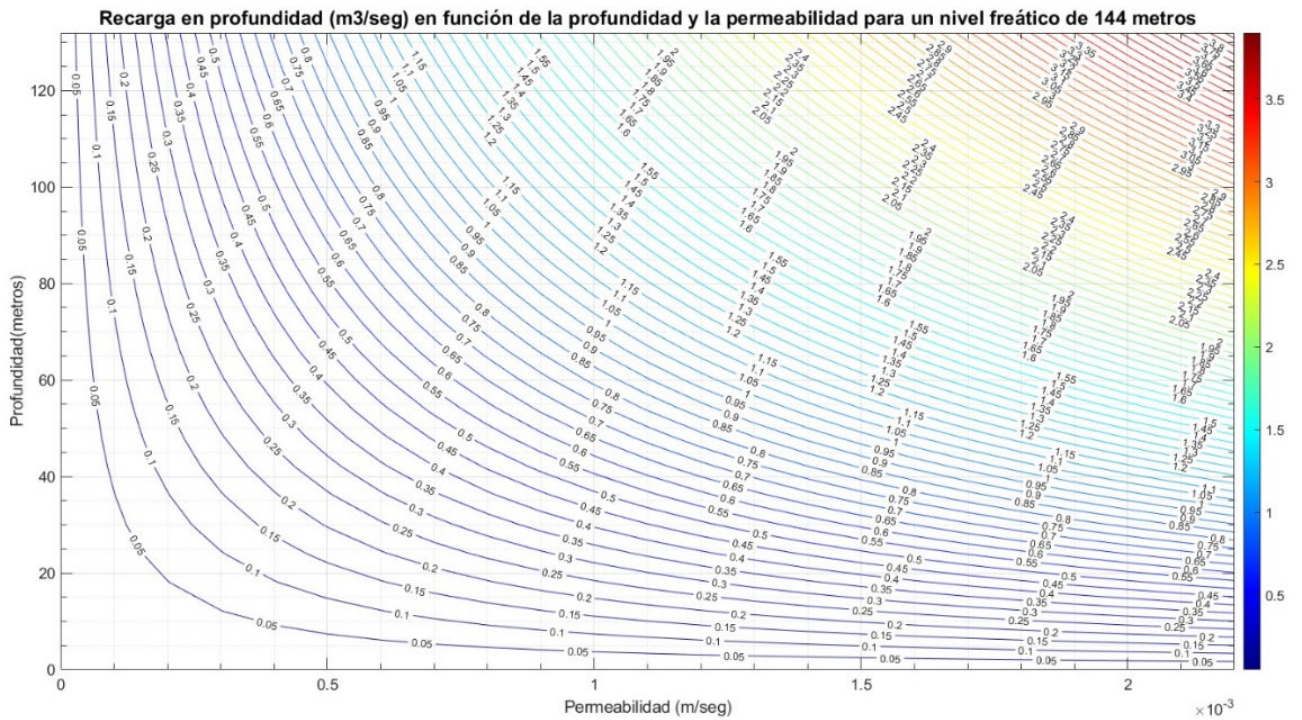
Pozos de Infiltracion	Altura	Infiltracion Total	Unidad
Jal (K = 0.0021 m/s)	10	0.0858	m ³ /s
	20	0.2105	m ³ /s
	50	0.8924	m ³ /s
	100	2.5782	m ³ /s
	130	3.3803	m ³ /s
Jaltepe (K = 0.0015 m/s)	10	0.061313	m ³ /s
	20	0.15035	m ³ /s
	50	0.637451	m ³ /s
	100	1.841602	m ³ /s
	130	2.414529	m ³ /s
TepeJal (K = 0.0008 m/s)	10	0.000327	m ³ /s
	20	0.080187	m ³ /s
	50	0.339971	m ³ /s
	100	0.982201	m ³ /s
	130	1.287742	m ³ /s
Tepetate (K = 0.00001 m/s)	10	0.0004088	m ³ /s
	20	0.0010023	m ³ /s
	50	0.0042497	m ³ /s
	100	0.0122394	m ³ /s
	130	0.0160965	m ³ /s

Vasos Reguladores	Altura	Infiltracion Total	Unidad
Jal (K = 0.0021 m/s)	1	2.0300	m ³ /s
	5	2.7696	m ³ /s
	10	3.4520	m ³ /s
	15	4.0575	m ³ /s
Jaltepe (K = 0.0015 m/s)	1	1.45367	m ³ /s
	5	2.051	m ³ /s
	10	2.4657	m ³ /s
	15	2.898	m ³ /s
TepeJal (K = 0.0008 m/s)	1	0.775281	m ³ /s
	5	1.055	m ³ /s
	10	1.3149	m ³ /s
	15	1.5456	m ³ /s
Tepetate (K = 0.00001 m/s)	1	0.009691	m ³ /s
	5	0.01319	m ³ /s
	10	0.016438	m ³ /s
	15	0.01932	m ³ /s

Los resultados de las simulaciones fueron sometidos a un análisis de regresión lineal mediante el software StataGraphics el cual nos arroja una ecuación lineal representando todos los resultados obtenidos en RocScience, la certeza en porcentaje de estos datos se puede checar con R2, lo que nos dio un 99.67% en infiltración a profundidad y un 99.93% en infiltración en superficie. Posteriormente, las fórmulas resultantes se graficaron utilizando MATLAB para construir nomogramas útiles en el diseño de infraestructuras de recarga en superficie y profundidad.

Estas simulaciones permitieron la creación de un modelo genérico aplicable a cualquier tipo de suelo con permeabilidad y profundidad específicas, lo que facilita la obtención de tasas de infiltración adecuadas. Creando una herramienta llamada nomograma sencilla de usar para poder proponer soluciones de infiltración profunda y superficial en cualquier parte de la ZMG.

En este caso se realizaron corridas en el software



5.4.7.2 Tecolote

Como parte del análisis de la zona poniente de Guadalajara, se optó por realizar una simulación utilizando la herramienta Iber. Este programa es fundamental para comprender el comportamiento hidrológico y la gestión del agua en la región. Sin embargo, para obtener resultados precisos, es necesario proporcionar ciertas entradas de información clave. Estas incluyen:

Número de curva: Este parámetro representa la capacidad de infiltración del suelo y es crucial para predecir la escorrentía superficial y el riesgo de inundaciones. Proporcionar una explicación detallada del número de curva utilizado ayudará a validar la precisión de la simulación y a comprender mejor cómo se comporta la cuenca frente a diferentes condiciones hidrológicas.

Rugosidad: La rugosidad de las superficies afecta significativamente la velocidad y el flujo del agua en la cuenca. Esta entrada de información se refiere a la descripción de la rugosidad de los canales, calles y otros elementos de la infraestructura urbana presentes en la zona. Proporcionar explicaciones claras y detalladas sobre las rugosidades utilizadas permitirá una mejor calibración del modelo y una mayor precisión en la simulación del flujo del agua.

Hietogramas: Los hietogramas son representaciones gráficas de la distribución temporal de la precipitación durante un evento de lluvia. Proporcionar una explicación detallada de los hietogramas utilizados es crucial para entender cómo se modelan y simulan los patrones de precipitación en la cuenca. Esto es fundamental para evaluar el impacto de las lluvias intensas en el comportamiento hidrológico de la zona y para diseñar medidas de mitigación adecuadas. En el caso de nuestra simulación tomamos como casos de estudio o referencia hietogramas con tiempo de retorno a 2, 25 y 50 años. Todo para presentar una simulación apegada a la realidad que nos arroje información útil para identificar los puntos más vulnerables y con más porcentaje de incidencia a las inundaciones, así se puede idear algún método de intervención para reducir estas problemáticas.

En la imagen 1.1 podemos observar una simulación el escenario donde se agregó una lluvia con tiempo de retorno a dos años (se representa la cota de agua), en este ejemplo podemos ver el comportamiento de la escorrentía de alguna a través del territorio y como se mueve debido a su topografía. La colorimetría del mapa nos muestra y nos da una idea del tamaño de coto de agua tenemos por sectores, esto fue de gran utilidad para poder determinar el lugar donde puede ser más eficiente y factible una intervención.



IMAGEN 1.1

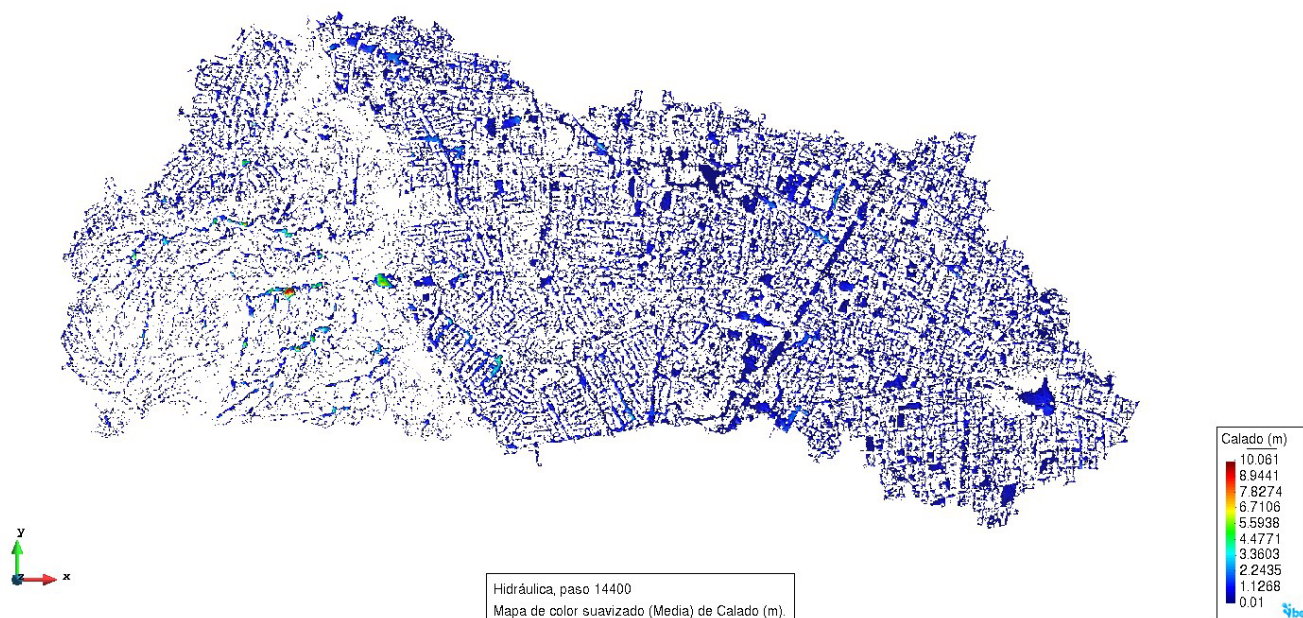
Para llegar a este mapa de cota de agua fue necesario alimentar el programa de iber con la información antes mencionada, es de vital importancia tomar en cuenta valores reales y cerrar los pixeles lo más pequeños posible para de esta manera poder generar una simulación bastante precisa. sabemos que es difícil generar dichas simulaciones con comportamientos exactamente reales ya que tenemos limitante de tiempo y de infraestructura en el país lo que no hace posible esta simulación ideal, sin embargo, es suficiente información para crear propuestas y presentar datos de alto impacto a entidades competentes que puedan materializar estas ideas.

Una de las propuestas más fuertes y que se simuló en la microcuenca del Tecolote fue la keyline (imagen 1.2) o línea clave, que consiste en el desarrollo de un tipo zanja que rodea las faldas del bosque la primavera con el objetivo de acumular y recargar el suelo, elegimos esa ubicación debido a que es un lugar estratégico donde mediante las anteriores simulaciones se pudo observar que justo en esa área tenemos un gran volumen de agua que baja a una gran velocidad, por esta razón.



Imagen 1.2

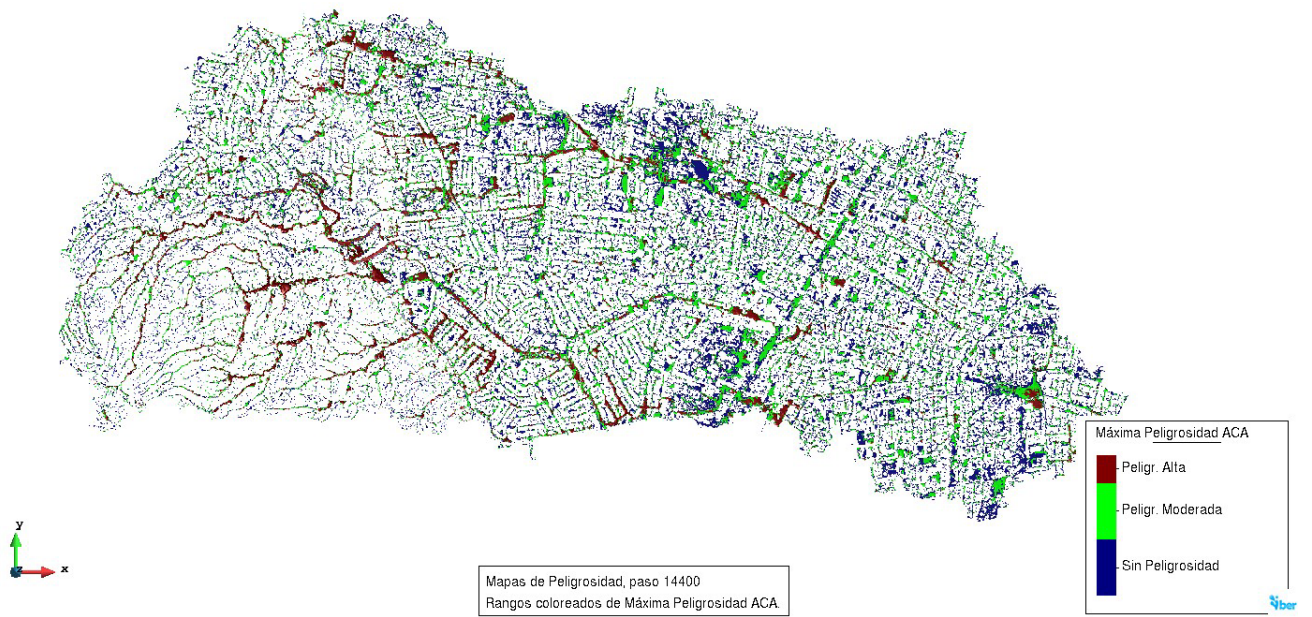
Los datos obtenidos tras implementar esta intervención en el escenario no fueron significativos, ya que el cambio en el caso de cota de agua fue menor al 5%, lo que no representa un cambio relevante o lo que buscamos.



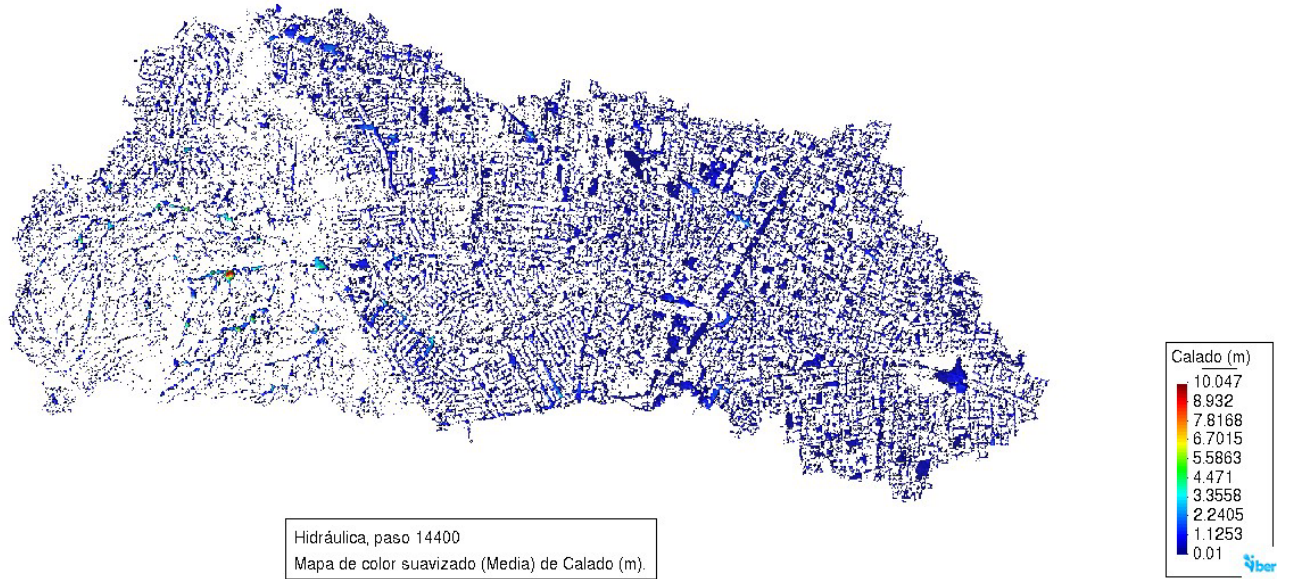
Calado TR25 – Imagen 1.3



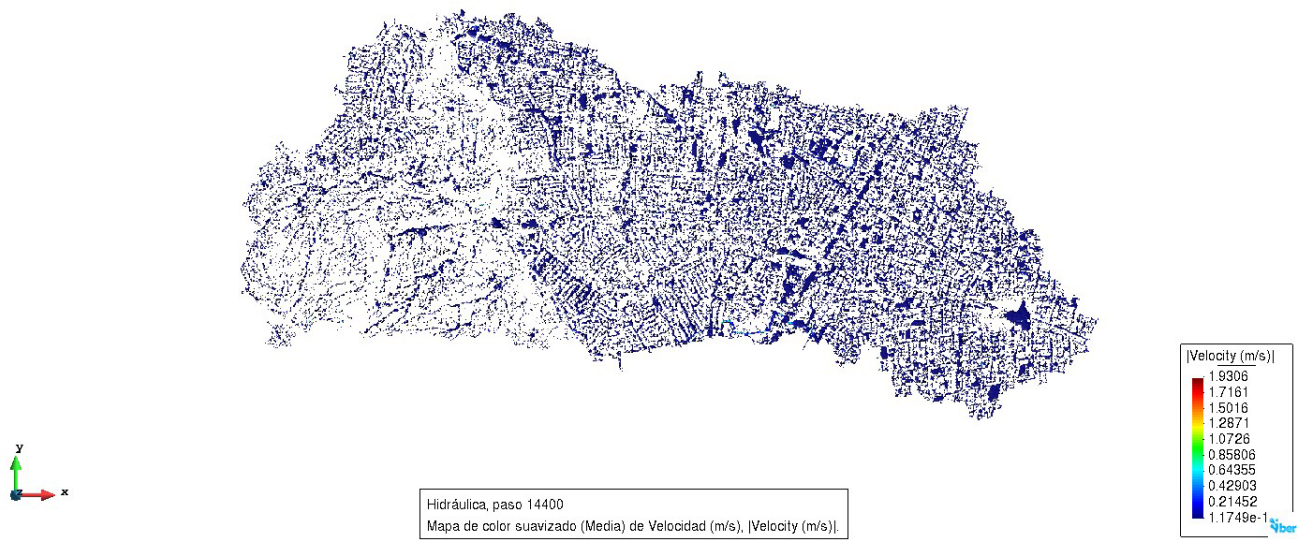
Velocidad TR25 – Imagen 1.4



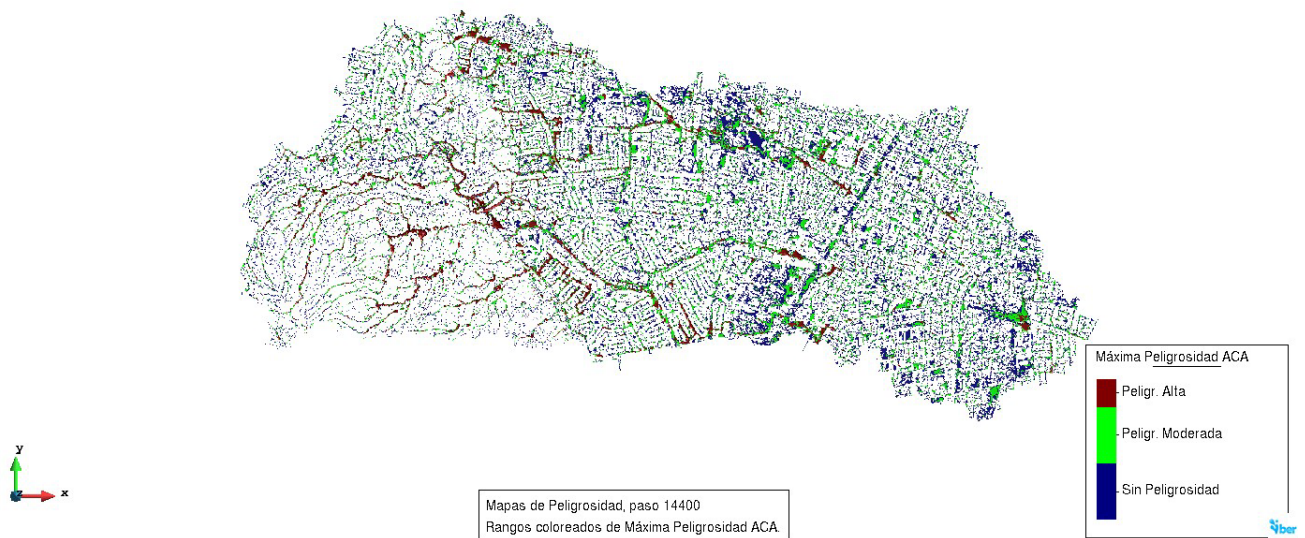
Mapa de Peligrosidad TR25 – Imagen 1.5



Calado TR25 con Keyline - Imagen 1.6



Velocidad TR25 con Keyline – Imagen 1.7



Mapa de Peligrosidad TR25 con Keyline – Imagen 1.8

En las imágenes superiores podemos observar el resultado de las simulaciones sin y con una Keyline de 0.7 m de profundidad, no se aprecia una diferencia a simple vista, es posible que haciendo un análisis más extenso podamos apreciar una acumulación del agua en la keyline pero una vez llena la simulación presente datos idénticos a la simulación sin Keyline.

Una forma de apreciar mejores resultados podría ser aumentar la cantidad de intervalos de simulación, ahora mismo se aprecian resultados cada 5 min, pero disminuyendo esa cantidad de tiempo quizá sea posible identificar la Keyline.

Otra variable que podría mejorar es la escala, en nuestra simulación se emplearon ortofotos con pixeles de 3 x 3 metros, sin embargo, se puede emplear herramientas como drones los cuales pueden tomar datos más precisos para la simulación.

5.4.7.3 Escenario 3

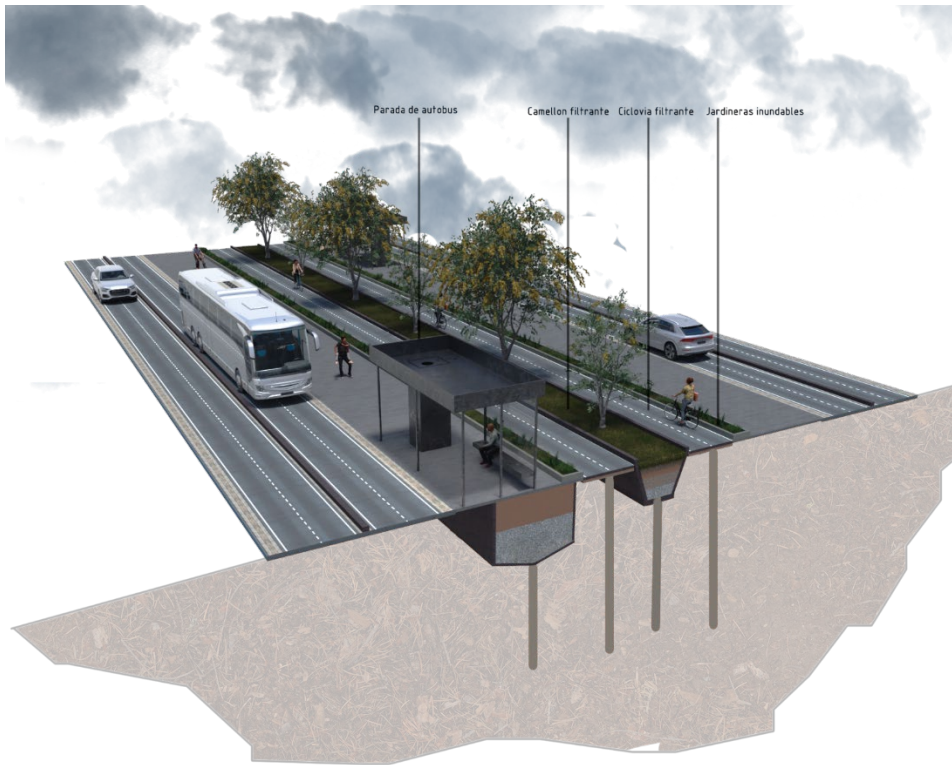
5.5. Propuestas para análisis de recarga artificial para la Zona Poniente de Guadalajara

Las propuestas se basaron en 2 tipos de recarga: en profundidad y en recarga superficial. Para abordar la problemática, se ha empleado el software RockScience, basado en el método de elementos finitos, para modelar la recarga superficial y profunda. Los resultados se integraron en modelos de regresión, y después se construyeron gráficas que son útiles para el diseño. Este enfoque ha permitido estudiar la infiltración del agua en suelos típicos de la ZMG y diferentes condiciones de recarga, para un nivel freático de 144 metros; que es el nivel de la zona poniente de la ciudad, donde hay escurrimientos superficiales con agua limpia.

5.6. Propuestas arquitectónicas para la Zona Poniente de Guadalajara

Las propuestas de intervención hidrológica presentadas anteriormente requieren integrarse en la infraestructura barrial. Desde el punto de vista urbanístico, podrían convertirse en espacios públicos que aporten a la educación ambiental de la población local. Más aún, como se vio que este tipo de infraestructuras podría contribuir a aprovechar mejor el agua de lluvia, podrían servir de ejemplos emblemáticos que podrían replicarse en diferentes escenarios de la ZMG. En esta sección, se buscará definir urbanísticamente las propuestas que fueron estudiadas desde el punto de vista hidrológico, particularmente las siguientes:

- Camellón infiltrante.
- Parque Lineal infiltrante.
- Ciclovía infiltrante.
- Parada de autobús infiltrante.



En el isométrico presentado en la figura 76, podemos observar de manera integrada las diferentes propuestas de intervención que se planean incorporar en el espacio urbano. Su emplazamiento no tiene que estar integrado como se presenta aquí, sino que puede adaptarse en lo particular a los retos hidrológicos de cada lugar.

Figura 76 Tres propuestas de intervención hidrológica integradas urbanísticamente.

Con un diseño adecuado y buena planeación de estos espacios, podemos generar áreas recreativas y dignas para el usuario, donde se consideren espacios seguros para caminar, descansar y apreciar el entorno. Unos de los puntos más importantes es que son espacios con doble función: proveer espacios públicos y favorecer la recarga de agua de lluvia. Esto lo convierte en Sistemas Urbanos de Drenaje Sustentable adecuados al contexto de la ZMG. Lo primordial es aprovechar los espacios en la ciudad, considerando las zonas donde se presenta el problema de las inundaciones en la zona poniente de Guadalajara, generando zonas de absorción que mitigan inundaciones y recarguen el acuífero.

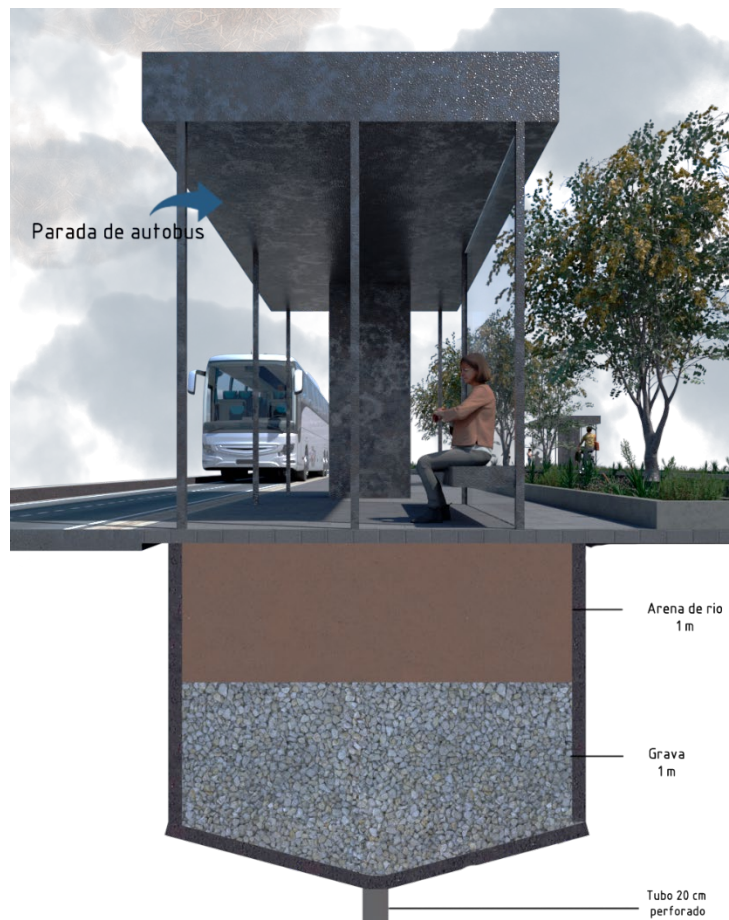


Figura 77. Detalle de una estación de autobús que favorece la infiltración pluvial.

En la figura 77 se muestra el detalle de una parada de autobús con captación pluvial en la parte de la azotea, dirigiendo el agua hacia un pozo de absorción bajo la parada de autobús que llega hasta el subsuelo a unos 3 metros de profundidad. En la parte de los diferentes sustratos en el subsuelo que tenemos en la intervención se consideraron dos bases, la primera es arena de río de esta se tiene considerada un 1 metro y grava ya sea de 2" o 4" igual un metro de esta base. El filtro de gravas y arenas filtra de sedimentos en suspensión el agua y eso permite que el pozo de absorción tenga un diámetro reducido. Se recomienda que el ademe esté cerrado en los primeros metros, para impedir la posible erosión de las infraestructuras de la ciudad.

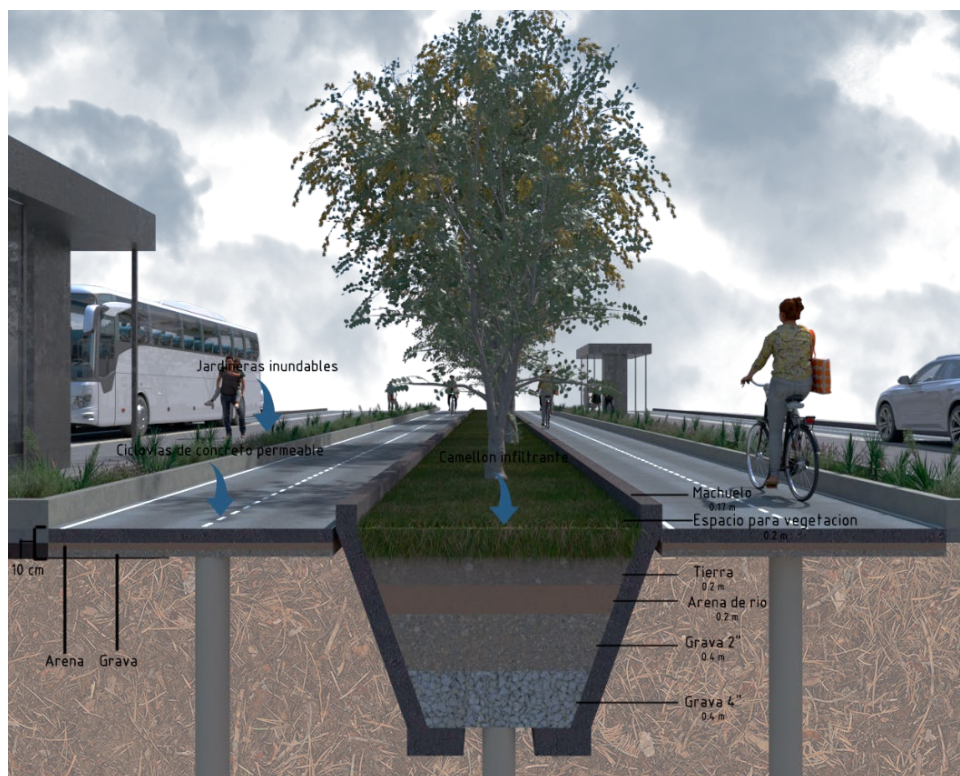


Figura 78. Detalle de jardinera, ciclovía y camellón filtrante.

La figura 78 muestra un alzado con corte en el que podemos observar tres de las otras propuestas que son las jardineras inundables, camellones infiltrantes y las ciclovías de concreto permeable. Las jardineras inundables retienen temporalmente el agua dentro de una estructura vegetada (jardinera), lo cual permite que las raíces de las plantas absorban la cantidad necesaria y crean un ambiente propicio para un pretratamiento del agua de lluvia que cae directamente o que las inunda durante lluvias intensas. El exceso se drena y recarga en la ciclovía filtrante, que también favorece la infiltración, al estar construida con pavimento permeable con un filtro de gravilla en su parte inferior y pozos verticales a cada cierta distancia. Estas ciclovías de concreto permeable funcionan de manera similar a las ciclovías tradicionales, pero con la ventaja de que al estar construidas con un tipo de pavimento permeable que está diseñado para reducir el escurrimiento superficial y el estancamiento de agua, esto ayuda a mitigar los problemas de inundación en la propia vía, permiten eliminar exceso de agua en las vías principales y favorecen la recarga de los acuíferos subterráneos por medio de pozos de absorción ubicados a lo largo de donde se tenga considerado implementar la intervención. Se recomienda evitar la infiltración en los primeros tres metros, para evitar posibles erosiones bajo las infraestructuras de la ciudad. Este tipo de estrategia son muy útiles en zonas inundables de la zona poniente, donde los escurrimientos llegan

desde la primavera y contienen pocos contaminantes. Puede ser una buena opción para espacios de jardines urbanos y pueden adaptarse también a jardines privados.

Los camellones infiltrantes son una técnica de mecanismos hidrológicos utilizados para la gestión sostenible del agua, donde su función principal es captar y almacenar agua de lluvia. Este mecanismo propuesto se conforma por 5 sustratos; el primero es la vegetación que tendríamos en el espacio, el segundo sería la tierra, el tercero la arena de río, el cuarto la grava de 2" y el quinto la grava de 4". Al igual que en la estación de autobuses filtrante, la mezcla de suelos elimina los sedimentos suspendidos en el agua y se recomienda evitar infiltrar en los primeros tres metros para evitar posibles erosiones. Este sistema favorece la conservación del suelo y la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Como se dijo antes, las propuestas presentadas son viables en la zona poniente de la ZMG. En esta región se encuentra el Arroyo "El Tecolote", cuyo comportamiento hidrológico se estudió antes. A continuación, se presentan algunas estrategias urbanísticas y arquitectónicas para implementarlas en toda esta región, tomando como ejemplo el Arroyo El Tecolote. En particular, se estudian los siguientes ejemplos:

- Represas
- Parque lineal
- Camellón
- Jardines filtrantes
- Biocanaletas
- Humedales
- Keyline

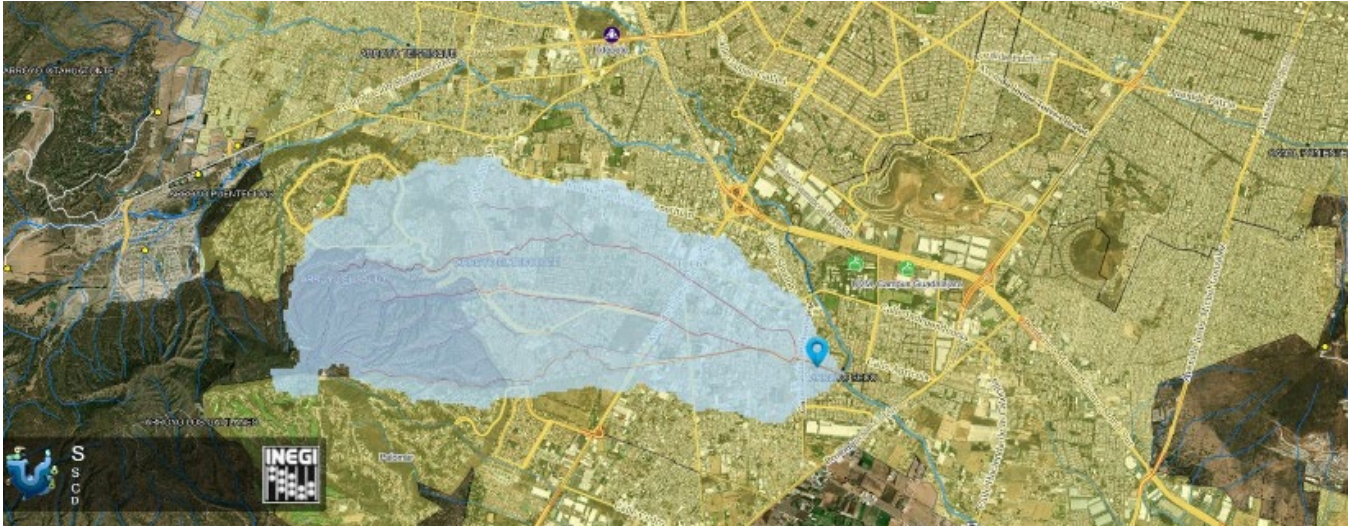


Figura 79. Cuenca del arroyo el Tecolote en el contexto de la ZMG.

La figura 79 muestra un mapa obtenido del simulador de flujos del SIATL. Como se observa y se analizó anteriormente, inunda la parte sur de Av. López Mateos y después lleva el agua hasta el arroyo seco y posteriormente se busca desalojar hasta el Río Santiago. Como es agua de buena calidad, que no ha pasado por la urbanización, puede ser infiltrada y aportar agua al acuífero. La figura 80 muestra un acercamiento del arroyo el Tecolote. Se puede observar en qué áreas de las del arroyo “El tecolote” podrían ser puntos claves para que las intervenciones sean viables y se logre un funcionamiento correcto dentro de la misma red del arroyo.

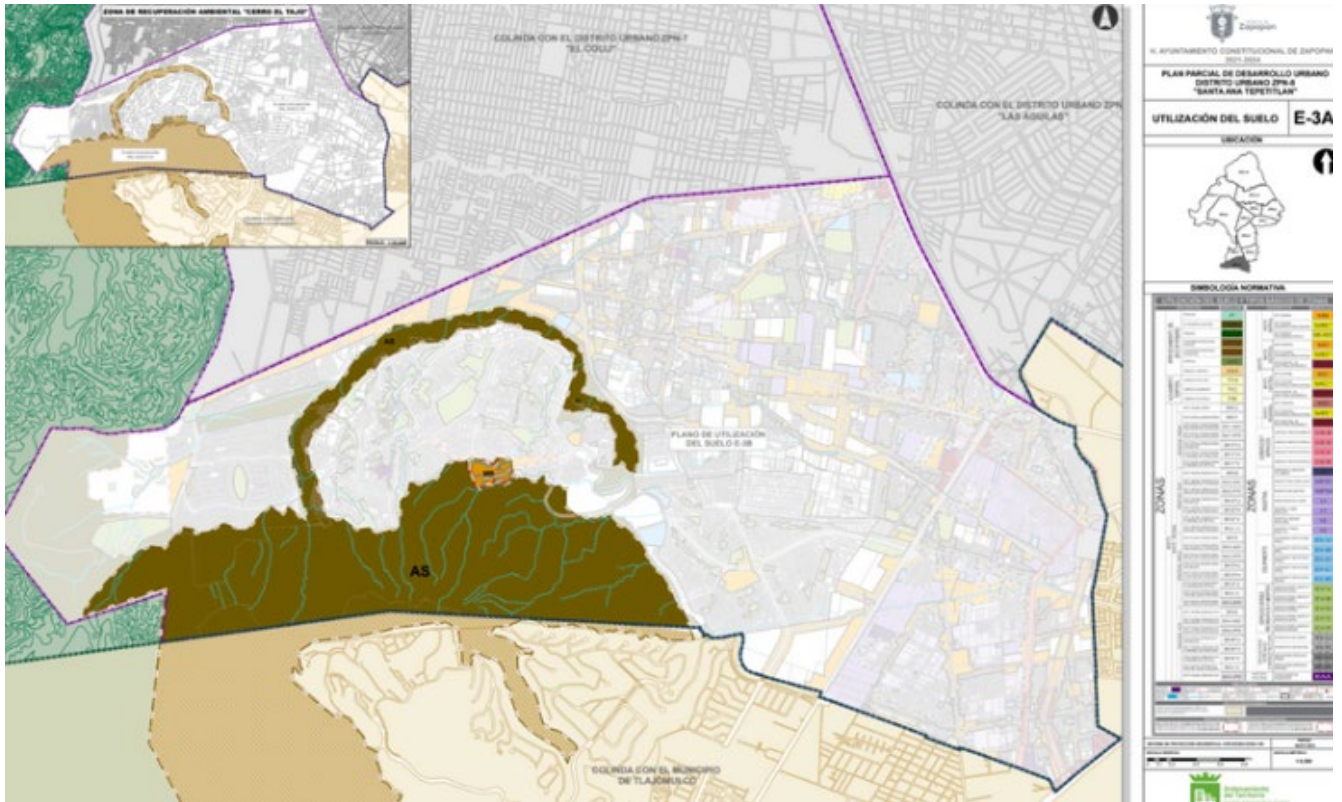


Figura 80. El arroyo El Tecolote se encuentra dentro del Plan Parcial de desarrollo urbano distrito urbano ZPN-08 “Santa Ana Tepatlán”

En cuanto al arroyo El Tecolote, en el plan parcial se habla sobre las diversas disposiciones sobre la preservación, manejo y regulación dentro del contexto del desarrollo urbano en esa zona. Esto nos ayuda a considerar y planear medidas para proteger el arroyo de la contaminación, la erosión, así como consideraciones sobre su impacto en el diseño y la planificación de la infraestructura urbana circundante. Es común que los planes de desarrollo urbano integren políticas y directrices para garantizar una gestión sostenible de los recursos naturales, incluidos los cuerpos de agua como arroyos y ríos, para promover un desarrollo equilibrado y respetuoso con el medio ambiente.

Ejemplos base:

- Jardines de lluvia



Figura 81 Ejemplos base de la elaboración de un jardín de lluvia.

En la figura 81 podemos observar cómo los jardines de lluvia son una forma sostenible de gestionar el agua de lluvia en áreas urbanas. Funcionan como depósitos naturales que recolectan, filtran y absorben el agua de lluvia, evitando la escorrentía superficial, ayudando a reducir la contaminación del agua. Esta estrategia es una forma efectiva y natural de gestionar el agua de lluvia, ayudando así a la recarga del subsuelo y reduciendo la contaminación del agua.

Posibles puntos para intervenir con jardines de lluvia:



Figura 82 Posible espacio para intervención de camellones infiltrantes y jardines de lluvia

En la Figura 82 podemos ver cómo el gráfico nos ayuda a visualizar espacios donde los jardines de lluvia podrían ser útiles y los camellones.

La creación de camellones peatonales junto con jardines de lluvia es una propuesta urbana viable y efectiva para evitar inundaciones, mejorar el paisaje urbano y crear ciudades más sostenibles y resilientes. Se trata de una solución natural, económica y adaptable a las necesidades de cada ciudad.

Keyline



Figura 83 Ejemplo de una intervención de Keyline en un rancho en Oaxaca llamado "Rancho San Ricardo"

En la figura 83 observamos un ejemplo del sistema Keyline actualmente elaborado en Oaxaca, en el "Rancho San Ricardo".

El sistema Keyline es una técnica de diseño y manejo de tierras desarrollado por el agricultor P.A Yeomans. Esta técnica se centra en la creación de patrones de filtración y retención de agua en la tierra para optimizar el uso del agua y mejorar la fertilidad del suelo.



Figura 84 Explicación de la distribución de la vegetación endémica de la zona en la intervención

En la figura 84 podemos observar en dónde se ha implementado el sistema de keyline en el bosque en diferentes partes del mundo. La flexibilidad y la adaptabilidad de los principios del keyline permiten su aplicación en una variedad de contextos y condiciones climáticas, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para la gestión sostenible de la tierra y los recursos naturales.



Figura 85 Ejemplos base de la posible intervención de keyline en el bosque de la primavera

Figura 85 con este tipo de gráficos podemos comprender mejor la idea que se tiene para la intervención en las faldas del bosque de la primavera. Lo que nos ayuda este tipo de diseño es a retener agua en el suelo, promoviendo así la infiltración y distribución uniforme de los nutrientes. Al igual al diseñar patrones de drenaje adecuados nos ayuda a prevenir la erosión del suelo, lo que es muy importante para

áreas inclinadas como los cerros. Mejorando la calidad del suelo y disponibilidad de agua, esto nos favorece en el crecimiento de variedad de plantas, beneficiando la flora como la fauna.

- **Lugar de intervención:**

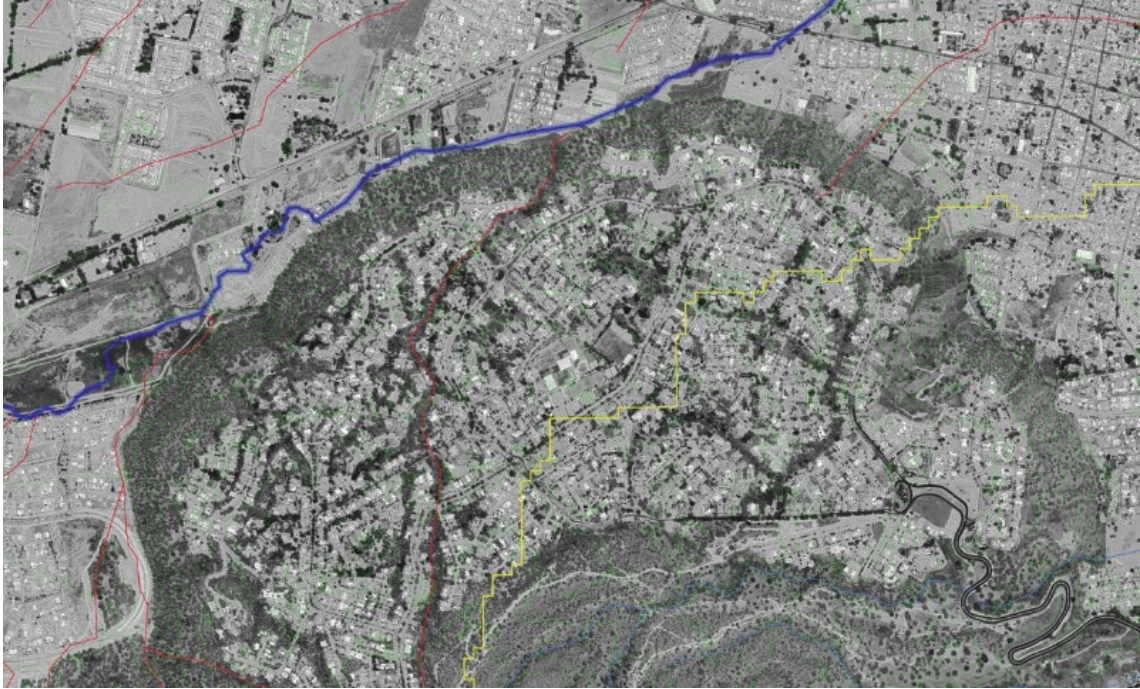


Figura 86 Mapa base de la zona de intervención donde se observa las curvas de nivel y los datos de las dos cuencas dentro de la zona de intervención

En la Figura 86 logramos visualizar la propuesta de implementar el sistema de Keyline en una zona protegida del Bosque de la Primavera es una estrategia sostenible que busca aprovechar de manera eficiente el recurso del agua, al mismo tiempo que se propone un diseño paisajístico que armonice con el entorno natural y respete la biodiversidad del ecosistema.

Es viable intervenir en esta parte del bosque ya que no tenemos vegetación que no impida hacer un camino si no que más bien nos podemos guiar con la vegetación actual para generar el camino. El bosque de primavera es un hito para muchas personas para hacer actividades recreativas en familia o solos, apreciar la naturaleza, senderismo y bicicleta de montaña son deportes practicados regularmente, una intervención de este tipo ayudaría social, ambiental y económico.

Como dificultad se podría considerar que es un área protegida pero la idea de la intervención es no afectar lo actual, si no que al contrario que en cuanto fauna y flora puedan coexistir con la intervención sin afectar su hábitat.

Las diferentes formas en que nos ayudaría este tipo de intervención:

Uso eficiente del agua: El sistema de Keyline se caracteriza por su capacidad para capturar, almacenar y distribuir el agua de manera eficiente. En una zona protegida como el Bosque de la Primavera, donde el agua es un recurso vital y su conservación es prioritaria, esta propuesta ayudaría a maximizar su uso sin comprometer la salud del ecosistema.

Mitigación del riesgo de sequías e inundaciones: El diseño del sistema de Keyline incluye la creación de pequeñas presas y canales para dirigir el flujo del agua de manera controlada. Esto no solo permite almacenar agua durante períodos de lluvia abundante, reduciendo el riesgo de inundaciones, sino que también garantiza un suministro constante durante las épocas de sequía, beneficiando tanto a la flora como a la fauna del bosque.

Al diseñar canales nos ayuda a reducir la escorrentía superficial, ayudando a prevenir la acumulación repentina de agua en áreas bajas, eso pudiendo provocar inundaciones. Un canal de lluvias torrenciales diseñado dentro del sistema de keyline puede ayudar a manejar el exceso de agua durante periodos de lluvia intensa. Este canal se diseñaría para capturar y dirigir el agua hacia áreas de almacenamiento o infiltración, que en este caso serían pozos de absorción ubicados en diferentes zonas en el área de intervención, al igual podrían ser terrazas, gaviones, vegetación adecuada o áreas del parque lineal, esto ayudando a maximizar la capacidad de retención y así reducir la velocidad del flujo de agua.

Restauración del paisaje: La implementación del sistema de Keyline puede ser integrada con proyectos de restauración paisajística que promuevan la diversidad vegetal y la regeneración de áreas degradadas. Se pueden crear zonas de vegetación ribereña alrededor de los cuerpos de agua, que no solo embellecerían el entorno, sino que también proporcionarían hábitats adicionales para la fauna local.

Educación ambiental y turismo sostenible: El diseño paisajístico asociado con la implementación de Keyline puede servir como una herramienta educativa para concientizar a la comunidad sobre la importancia de la conservación del agua y la biodiversidad. Además, la belleza escénica y la mejora del hábitat natural podrían atraer a turistas interesados en el ecoturismo, generando ingresos adicionales para la gestión y conservación del bosque.

Se recomienda que el sendero incluya infografías que describan la geología, la hidrología y los sistemas de recarga implementados. Al hacerlo temático, se vuelve más interesante para los visitantes, quienes pueden aprender sobre los aspectos clave del ecosistema local mientras disfrutan del entorno natural. Esta experiencia educativa enriquecedora no solo aumenta la apreciación por el medio ambiente, sino

que también fomenta una mayor participación en la conservación y el manejo sostenible de los recursos naturales.

Seguimiento y evaluación regular: Es fundamental establecer un programa de monitoreo ambiental para evaluar el impacto de la implementación del sistema de Keyline en el Bosque de la Primavera. Los tipos de monitoreo que nos podrían ayudar serían: Monitoreo de calidad del agua, monitoreo de los suelos, monitoreo de la vegetación, monitoreo de caudales y niveles de agua y monitoreo climático. Esto permitirá ajustar las estrategias según sea necesario para garantizar que se cumplan los objetivos de conservación y restauración del ecosistema.

La propuesta de implementar el sistema de Keyline en una zona protegida del Bosque de la Primavera ofrece una solución integral que combina la gestión sostenible del agua con prácticas de paisajismo que promueven la biodiversidad y la resiliencia del ecosistema.

- Posibles puntos para intervención:

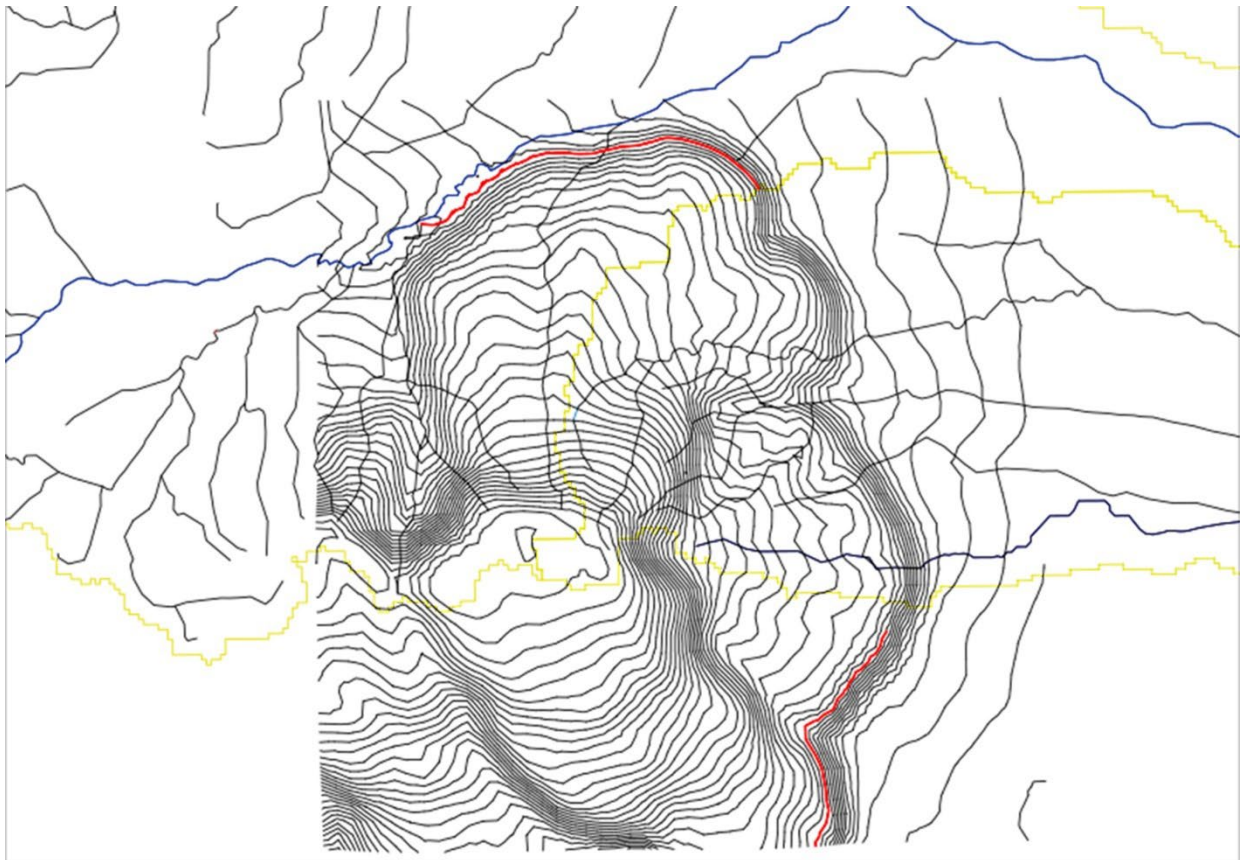


Figura 87 En rojo podemos observar las áreas que se eligieron para la intervención

En la figura 87 podemos observar las áreas en donde se proponen generar las intervenciones. Del lado izquierdo coincide con el Arroyo seco, que crece en tiempo de lluvias. Se puede generar una derivación para que la ciclovía del parque lineal que se está proponiendo en las faldas del bosque de la primavera se inunde con el arroyo (azul) "Cauce principal del Arroyo Seco) y luego, que se vaya hacia el lado derecho, baja por el arroyo (amarillo) "área de escurrimiento del Arroyo el tecolote" y toda esta agua de absorba en un pozo de infiltración en diferentes puntos del área a intervenir. Así podemos infiltrar una gran cantidad de agua: por el camino de la ciclovía y después al pozo de infiltración

Zonas de intervención

Área de escurrimiento

Cause principal

Curvas de nivel

- Punto 1

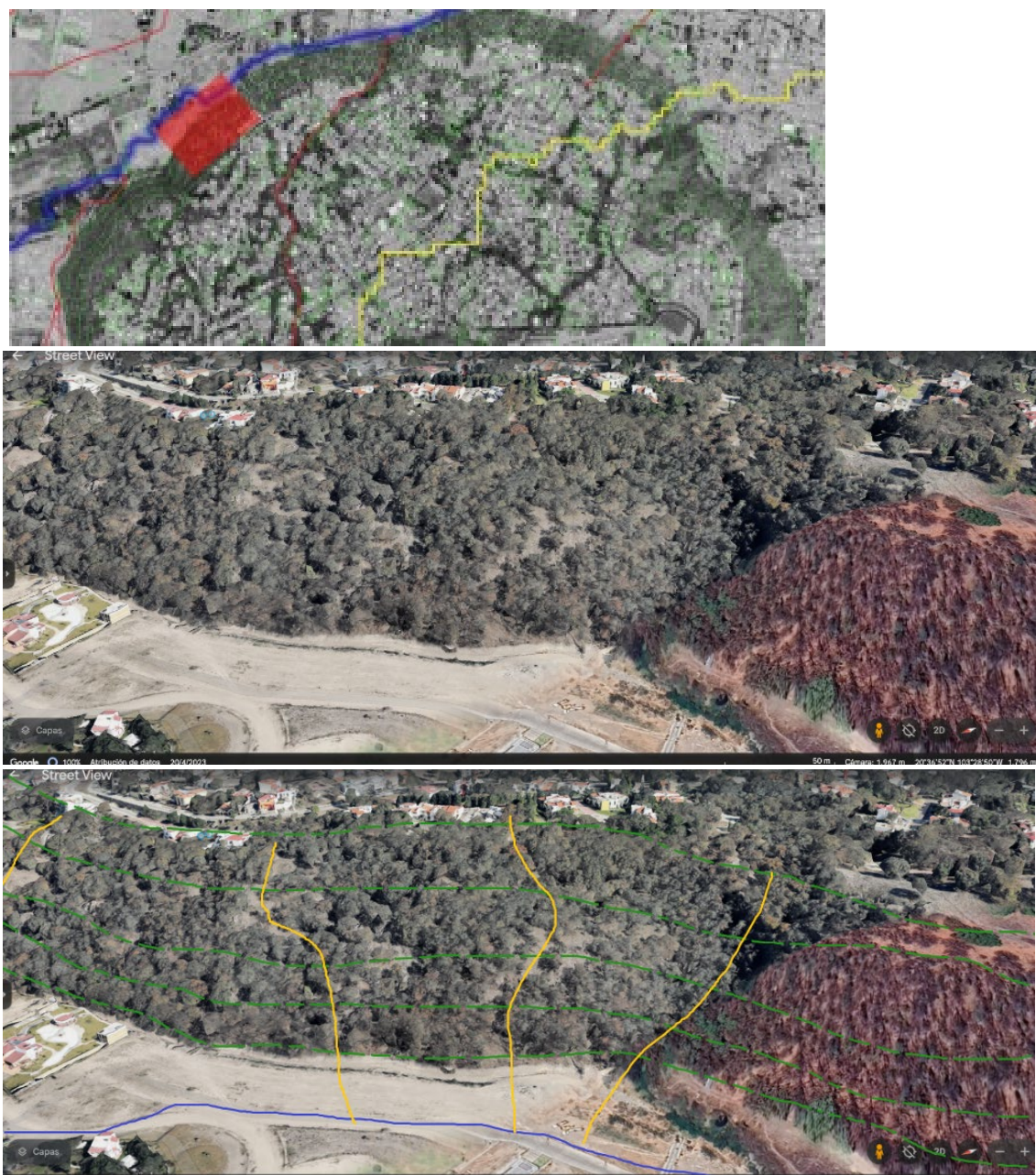


Figura 88 Vista área del punto 1 de intervención

Figura 88 es una vista conceptual del punto 1 en donde se busca observar cómo afectaría el terreno actual a la propuesta del parque lineal en las faldas del bosque de la primavera.

- Punto 2



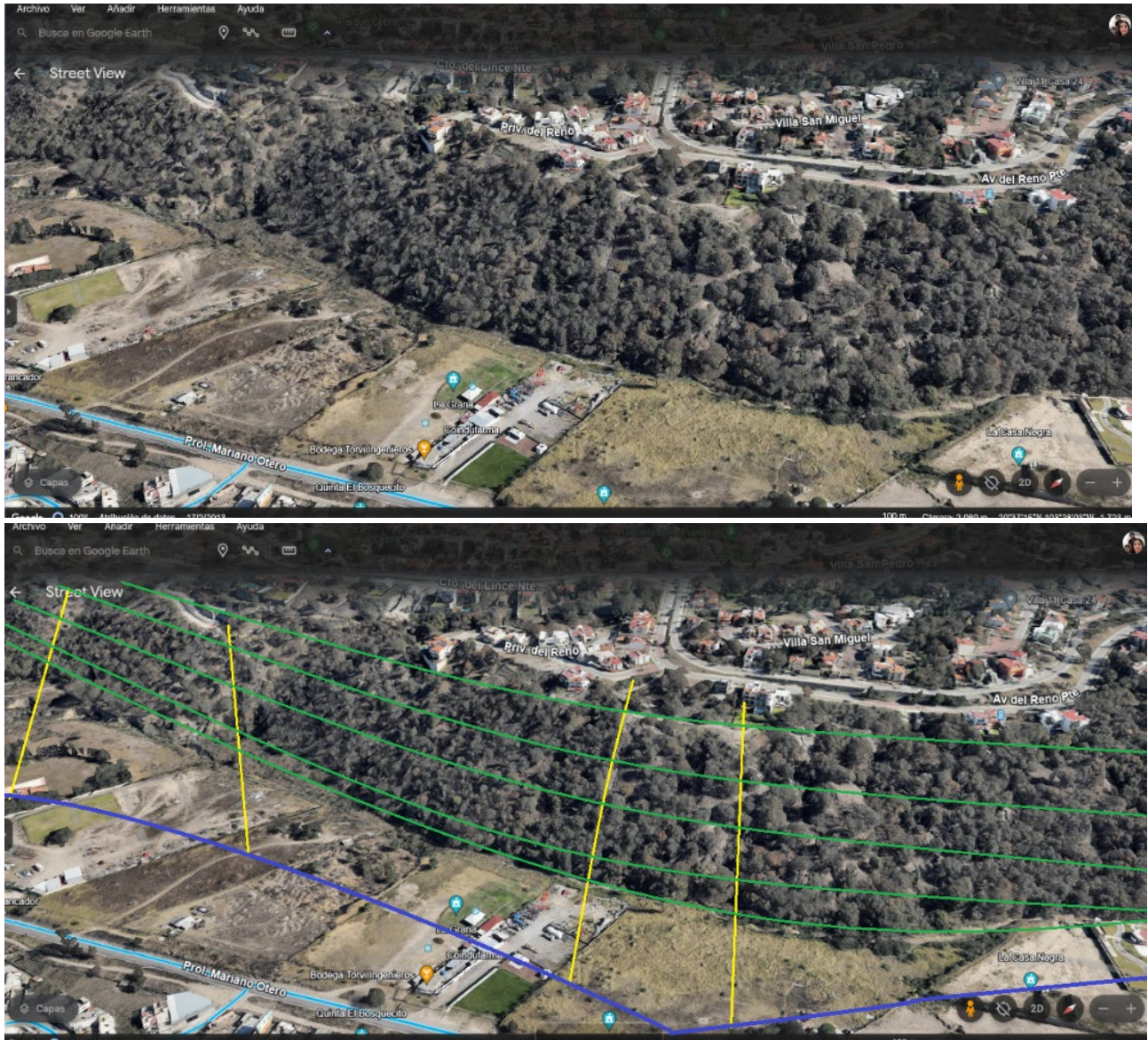


Figura 89 Vista área del punto 2 de intervención

Figura 89 es una vista conceptual del punto 2 en donde se busca observar cómo afectaría el terreno actual a la propuesta del parque lineal en las faldas del bosque de la primavera

- Punto 3

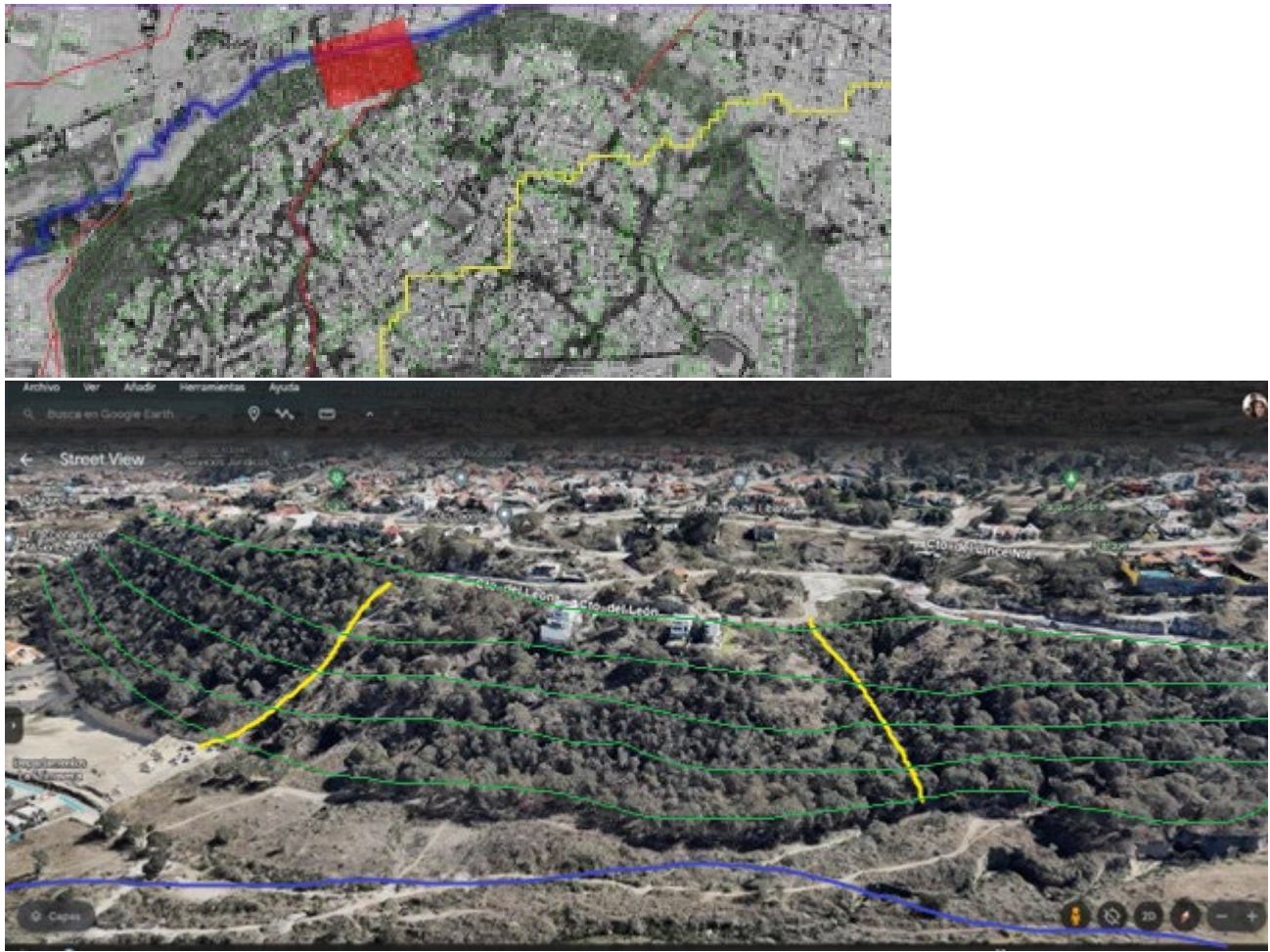


Figura 90 Vista área del punto 3 de intervención

Figura 90 es una vista conceptual del punto 3 en donde se busca observar cómo afectaría el terreno actual a la propuesta del parque lineal en las faldas del bosque de la primavera.

- Punto 4

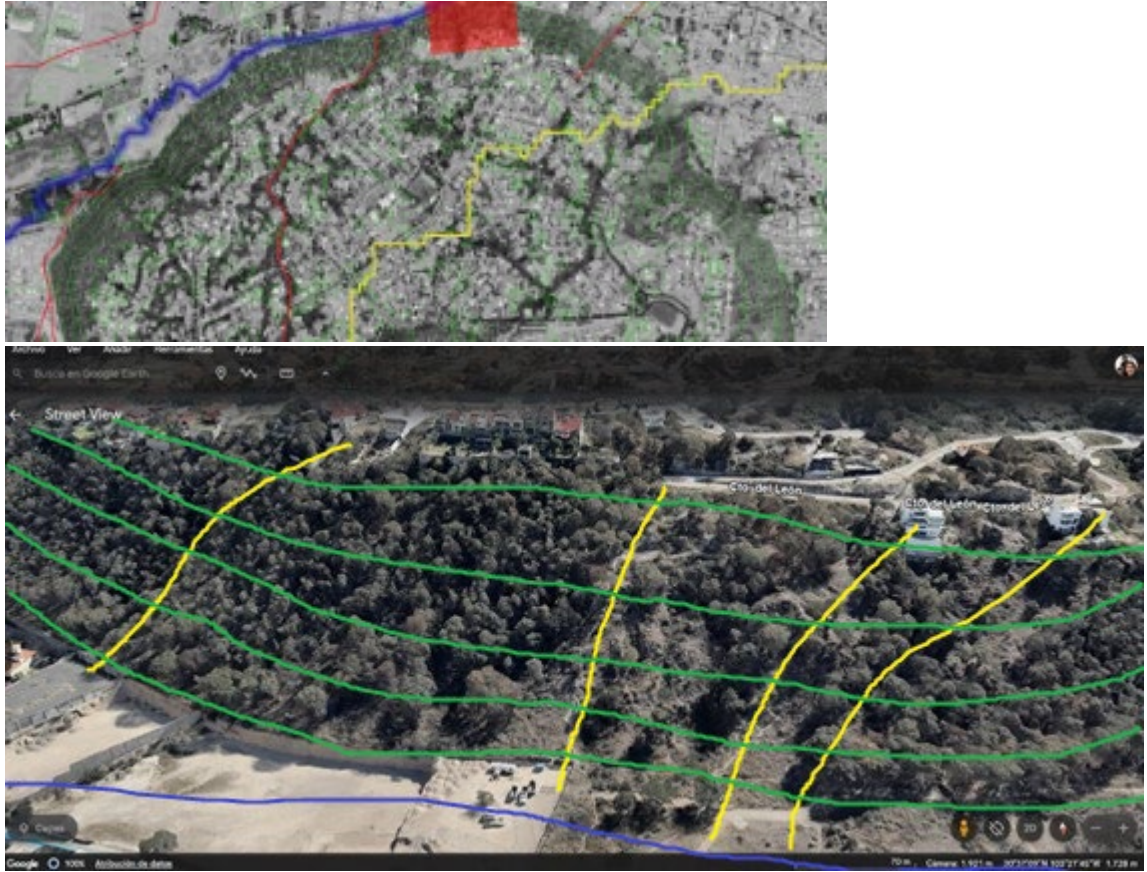


Figura 91 Vista área del punto 4 de intervención

Figura 91 es una vista conceptual del punto 4 en donde se busca observar cómo afectaría el terreno actual a la propuesta del parque lineal en las faldas del bosque de la primavera

- Punto 5

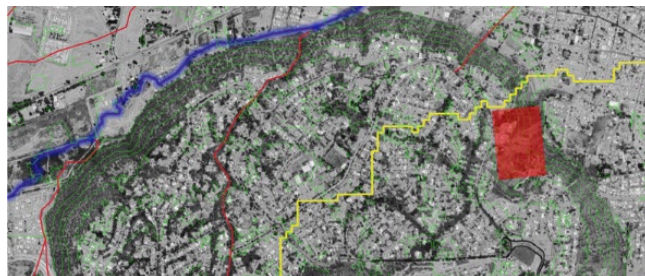




Figura 92
vista área
del punto 5
de

intervención

Figura 92 es una vista conceptual del punto 5 en donde se busca observar cómo afectaría el terreno actual a la propuesta del parque lineal en las faldas del bosque de la primavera en la cuenca donde se encuentra el “Arroyo el garabato”

- Renders



Figura 93 Render de la vista 1 de la intervención de Keyline

Figura 93 es la vista 1 del Gráfico de la propuesta del Keyline, intervenido por el parque lineal en donde la idea es promover espacios recreativos para las personas, en donde la naturaleza y las intervenciones puedan ir de la mano y no una sobre otra.



Figura 94 Render de la vista 2 de la intervención de Keyline

Figura 94 es la vista 2 del Gráfico de la propuesta del Keyline, intervenido por el parque lineal. Aquí se puede ver mejor el andador que se propone, donde se planea al igual incorporar el canal torrencial,

junto con una materialidad que nos ayude a filtrar el agua y evitar la erosión del bosque.



Figura 95 Render de la vista 3 de la intervención de Keyline Figura 95 es la vista 3 del Gráfico de la propuesta del Keyline, intervenido por el parque lineal. Aquí se puede ver mejor el andador que se propone desde una vista área.



Figura 96 Render de la vista 4 de la intervención de Keyline

Figura 96 es la Vista 4 del gráfico de la propuesta del Keyline, intervenido por el parque lineal. Aquí se puede ver mejor el andador que se propone desde una vista área.

Reflexiones PAP

José Manuel Almanza Vallarta

El proyecto desarrollado durante el semestre en San Juan de Abajo ha sido una valiosa experiencia que ha permitido a los estudiantes abordar diversos retos relacionados con la gestión del agua, el desarrollo urbano sostenible y la participación comunitaria. A partir de la investigación realizada por compañeros en semestres anteriores, se ha propuesto una estrategia integral que incluye la construcción de represas, el desarrollo de un parque lineal y la implementación de técnicas de infiltración del agua en el suelo.

Si bien los avances realizados son significativos, es importante reconocer que el proyecto aún se encuentra en una etapa temprana y que existen aspectos que requieren mayor análisis y consideración. Uno de los puntos críticos es la evaluación del impacto ambiental de las intervenciones propuestas. La construcción de represas, por ejemplo, puede tener consecuencias no deseadas para el ecosistema local, como la erosión del suelo, la alteración del flujo natural del agua y la pérdida de biodiversidad.

Es fundamental realizar estudios detallados que consideren estos factores y que propongan medidas de mitigación para minimizar los impactos negativos. Además, es necesario involucrar activamente a la comunidad en el proceso de toma de decisiones, asegurando que sus necesidades y preocupaciones sean tomadas en cuenta.

En este sentido, el proyecto ha sentado las bases para un diálogo constructivo entre la academia, la comunidad y las autoridades locales. Este diálogo debe continuar a lo largo del desarrollo del proyecto para garantizar que las soluciones propuestas sean viables, sostenibles y socialmente justas.

Luis Alberto Alvarez Ibarra

A lo largo de del desarrollo de este proyecto abordamos la problemática desde un punto ya estudiado por parte de los demás grupos de anteriores PAP's, esta nos habla de cómo las inundaciones en la zona metropolitana de Guadalajara afectan a la gente y como la falta de agua limpia nos está afectando en el modo que vivimos desde el punto de calidad de vida, estas problemáticas tienen como común denominador el agua, este recurso natural no renovable y que lamentablemente se está acabando (agua dulce).

Por estas problemáticas, nosotros generamos simulaciones para determinar los puntos críticos donde hay mayor porcentaje de incidencia de inundaciones y así poder interpretar los datos y ofrecer una intervención que pueda ayudar a mitigar esta problemática, por otra parte, también tenemos el problema de los escasos de agua limpia, por eso nuestro proyecto se enfocó en combatirlas a la vez de manera que una propuesta ayude a reducir estos eventos desafortunados. Nuestra propuesta simulada fue una Keyline o como su nombre lo dice una línea clave que nos permitirá detener el escurrimiento del agua que baja por el bosque la primavera, esta intervención quedó en una etapa inicial y no tuvimos tanta información como para presentar resultados, sin embargo, considero que es una excelente propuesta que debe de seguirse desarrollando.

Es importante destacar que, aunque no se obtuvieron los datos esperados en este lapso la información recabada y el programa listo para simular es un gran avance y se reduce mucho el tiempo para poder desarrollar estos proyectos de mejor manera en el escenario estudiado.

El trabajo desarrollado en este PAP me gustó mucho y aun que es exigente en cierto punto al momento de realizar las simulaciones vale totalmente la pena ya que el impacto que puede tener estas propuestas en el medio ambiente y la sociedad es inmenso y me fue muy satisfactorio ser parte del equipo y espero poder seguir desarrollando el proyecto en mi segundo PAP.

Yoshiro Susumu Azano Carrillo

Este proyecto es una muestra que cuando se combina, ingeniería ambiental, ingeniería civil e arquitectura se puede llegar a obtener propuestos y resultados tangentes. Este semestre en el PAP de Infraestructura para la Gestión Inteligente del Agua llevamos el trabajo del semestre pasado a otro nivel. La Zona Metropolitana de Guadalajara, encara una problemática masiva en cuanto a su manejo del agua, tan es así que su nivel piezométrico ha bajado a niveles de casi 150 metros de profundidad. Cuando hace 30 años, estaba a solo unos metros de profundidad. Esto muestra el mal uso que se ha tenido décadas pasadas hasta la fecha. Esto nos llevó a encontrar soluciones reales para poder combatir la problemática con el agua, donde propusimos el poder infiltrar agua a profundidad y en superficie para poder subir el nivel piezometrico (que tan profundo se encuentra el agua) de la ZMG. Durante el trabajo de este semestre logre aprender el uso de RocScience, StataGraphics y Matlab. En RocScience aprendí a modelar infiltraciones superficiales y profundas en estratos con distintas permeabilidades y ver cuanto pueden llegar a infiltrar lateralmente y al fondo de ellas. En StataGraphics aprendí a poder llevar mis resultados de RocScience implementados a StataGraphics para poder generarnos una ecuación lineal. En Matlab

pude llevar esa ecuación lineal a un nomograma que nos dice con certeza al usar el método empírico cuanto va a infiltrar en superficie o en profundidad según su permeabilidad, altura y área. En un recorrido del PAP a través de la ciudad, nos dimos cuenta la problemática en varios puntos de la ciudad, en donde logramos platicar con los habitantes de las diversas zonas y todos con un problema recurrente. Basura en los cauces que van hacia el río, desbordamiento de ellos, drenajes conectados a estos mismos cauces causantes de malos olores. Sin duda alguna un efecto de la mala planeación y expansión de la ciudad, encaminada por la falta de supervisión y acción del gobierno. Los resultados de nuestras propuestas como lo fue las estaciones de captación de agua con pozos a profundidad, los parques lineales y las ciclovías con concreto permeable y pozos a profundidad me motivan al saber que son propuestas que se pueden llevar a la realidad por parte del Gobierno del Estado.

Luis Ernesto Hernández Yerenas

Durante este semestre, mi objetivo principal fue llevar a cabo una simulación de una microcuenca. En este proceso, me enfrenté a la difícil tarea de modelar, donde la disponibilidad de información fue el mayor desafío. En muchos casos, la información, especialmente en temas ambientales, es escasa y recopilada durante períodos de tiempo limitados, lo que representa una limitación significativa. Además, las metodologías y fuentes disponibles a menudo son difíciles de contrastar con la realidad.

Un aspecto crucial sobre la información y los datos es que, a pesar de la tecnología de la información disponible en la actualidad, resulta complicado encontrar datos que cumplan con todas las condiciones necesarias para el modelo. Por ejemplo, experimenté dificultades con las elevaciones, ya que, en el modelo, los árboles se representaban como pequeños montículos que afectaban la elevación de las calles. Esto complicaba la simulación del flujo del agua, ya que, en realidad, los árboles en zonas urbanas tienen un impacto prácticamente insignificante en comparación con la escala con la que estábamos trabajando. Sin embargo, en el modelo,

esto provocaba inundaciones porque la representación del suelo no era precisa. Para solucionarlo, agregamos canales que representaran el flujo correcto a través de las vialidades.

Sofía Limón Ochoa

Este proyecto representa un ejemplo destacado de cómo la tecnología y la ingeniería pueden combinarse para abordar desafíos ambientales y de infraestructura de manera innovadora y efectiva. La utilización de simulaciones geotécnicas avanzadas, análisis estadísticos y herramientas de visualización como RockScience, StataGraphics y MATLAB, respectivamente, permitió no solo comprender mejor la composición y el comportamiento de los suelos en la Zona Metropolitana de Guadalajara, sino también diseñar soluciones específicas y eficientes para infraestructuras de recarga de agua.

Además, la capacidad de crear un modelo genérico adaptable a diferentes condiciones de suelo y profundidad muestra la versatilidad y la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos. Este proyecto destaca la importancia de la investigación interdisciplinaria y el uso inteligente de la tecnología para abordar problemas complejos, ofreciendo soluciones que pueden tener un impacto positivo y sostenible en el entorno urbano y la gestión de recursos hídricos.

Héctor Iván Moreno Contreras

Lo que se trató de conseguir en el PAP durante el semestre de primavera 2024 y que se logró hasta cierto punto fue el desarrollo de un modelo para evaluar la viabilidad de las propuestas establecidas por alumnos de semestres pasados lo cual se realizó una visita para recabar datos más exactos mediante el uso de un escáner, si bien se logró el objetivo de este semestre creo que aun el proyecto le quedan muchas cosas por hacerse, el proyecto es muy joven aunque siento que le falta considerar muchas cosas, un de ellas es el comportamiento del flujo del agua en temporada de huracanes, la viabilidad de las estructuras y su permanencia cuando se experimentan huracanes o sismos ya que al estar cerca de limite entre placas pueden presentar movimientos telúricos que pueden dañar las estructuras.

El objetivo de este proyecto es el de ayudar a los pobladores de San Juan de Abajo con el fin de proponer una zona turística que pueda potenciar la economía del lugar y mitigar los riesgos de inundaciones que pueden causar daños materiales o causar la pérdida de vidas. Entiendo que una de las premisas del ITESO es el fomentar el apoyo a la sociedad, el medio ambiente e involucrar a los alumnos en los problemas sociales que experimenta el país día con día, pero siento que no todos los problemas sociales derivados por desastres ecológicos tienen una solución que no genere otras repercusiones, por ejemplo el problema que presenta San Juan de Abajo y otras ciudades o comunidades del país con inundaciones y sequías es un problema que al buscar una solución puede que al ejecutarla provoque otro tipo de impactos al medio ambiente. Ejemplo de estas incertidumbres son estas represas que se propusieron puede que ayuden a que los pobladores no tengan riesgos durante la temporada de lluvias, pero al aumentar el calado del agua debido a una represa puede provocar que la zona intervenida quede inundada desbordando el agua a los márgenes del arroyo Huichichila, dañando el ecosistema, causando erosión en esa zona o provocar un cambio climático porque se utilizan métodos invasivos para garantizar la viabilidad de este proyecto.

Siento que como sociedad debemos preguntarnos si la mejor solución a estos problemas podría ser el control poblacional antes que pensar en alterar las condiciones naturales de la zona a intervenir, para que las soluciones que se realicen no sean resultados a corto plazo ya que las manchas urbanas crecen día con día y que los beneficios estén presentes a largo plazo para que las futuras generaciones puedan sostenerse.

Los recursos son finitos, tardan en regenerarse debido a la sobrepoblación que hay en casi todo el planeta y la falta de cuidado en nuestros procesos industriales están acelerando el cambio climático igual que el crecimiento poblacional.

Valeria Ordoñez de la Garza

Lo que se trabajó durante el semestre en el Proyecto de aplicación profesional nos hace pensar en cómo este tipo de propuestas de intervención para mejorar la infraestructura urbana y la infiltración del agua

en el suelo representan una oportunidad para mejorar la calidad de vida de los habitantes, promoviendo un desarrollo urbano más sostenible y fuerte. Estas intervenciones buscan mejorar la gestión del agua, favoreciendo la infiltración natural y así reducir el impacto de las inundaciones en la zona urbana. Al integrar elementos como camellones infiltrantes y jardineras inundables, se favorece la recarga de los acuíferos y se minimiza la escorrentía superficial, contribuyendo así a la preservación de recursos hídricos y la mitigación de inundaciones. La integración de ciclovías permeables fomenta el uso de medios de transporte alternativos y que nos ayudan a conectar de una manera eficiente la ciudad, promoviendo un estilo de vida más activo y saludable. Además, al permitir la permeabilidad del pavimento se reduce la acumulación de agua en las vías durante las lluvias, mejorando la seguridad vial.

Al incorporar el sistema keyline en las faldas del bosque de la primavera ayuda a contribuir con la conservación del suelo y la biodiversidad, así como la prevención de deslizamientos de tierra y erosión. Estas intervenciones para el correcto manejo del agua y del terreno nos ayuda a fortalecer a la zona frente a eventos climáticos extremos y proteger tanto la infraestructura urbana como los ecosistemas naturales.

Sobre todo, involucrar a la comunidad para conservar estos espacios donde se permite la infiltración en el suelo y se generen espacios de recreación para la población, donde se busca identificar necesidades, la planificación de las intervenciones y el seguimiento para su uso adecuado. La participación de los ciudadanos y la organización ayuda a enriquecer el diseño de las intervenciones y contribuir a su éxito a largo plazo.

Es fundamental abordar los desafíos y oportunidades específicas de cada intervención y garantizar una gestión integral y participativa que considere los aspectos técnicos y sociales y ambientales.

Roberto Alyanic Rodriguez Gonzalez

A lo largo del semestre seguimos complementando la investigación realizada por nuestros compañeros del semestre pasado en el área de estudio de San Juan de Abajo. Esto nos dio como objetivo buscar implementar una estrategia tanto arquitectónica como de ingeniería hidráulica para mejorar el uso del agua en el arroyo Huichichila.

Así, se realizó una visita al arroyo, donde realizamos el escaneo para plantear mejor la ubicación de las represas y el parque lineal que sería el proyecto en conjunto. Gracias a estas intervenciones se podrán poner en práctica distintos programas que ayudarán a la comunidad local. Esto nos deja como conclusión un resultado favorable para futuros proyectos en los que se tengan en cuenta los cuerpos de agua existentes.

A su vez, se dejaron los cimientos para que en futuros semestres se pueda pulir la propuesta junto a los ejidatarios.

Rogelio Adrian Gutierrez Castro

Es importante poder ver las necesidades que existen en un sistema y que nuevas funciones pueden alcanzar un sistema preestablecido. Me refiero a los procesos que pueden mejorarse dentro del monitoreo hidrométrico de la CONAGUA, este sistema puede amplificarse y mejorarse en subprocesos específicos para hacer más eficiente el mismo proceso y generar más información de los ríos de nuestro país. Que se puede traducir en mayor sustento estadístico para las investigaciones en torno a los Grandes y Pequeños ríos.

Dentro de la ingeniería industrial existe un dicho que describe a la industria y manufactura, “lo que puedes medir puedes controlar” Y en este sentido poder medir los Ríos pequeños nos otorgara información más precisa de la dinámica de estos y con ella poder diseñar más herramientas para una gestión con un enfoque hidrosocial, respetando el cauce y su zona Riparia, así como generar espacios para el bien de las comunidades aledañas al río.

Al inicio de la investigación me costó mucho trabajo poder ordenar mis ideas, debido a que estábamos buscando el objetivo, me sentía algo perdido ya que sentía que no avanzaba hacia una meta en específico sin embargo, con el paso de las semanas y con más contexto del marco teórico que tomamos como base, pude ir desarrollando ideas más puntuales al respecto del monitoreo (Mejora del proceso), el ciclo hidrosocial, morfología de los causes, la información como recurso, el contexto de los ríos pequeños en México. Existió un parteaguas en mi aprendizaje, cuando mi profesor me compartió un pequeño artículo de cómo desarrollar una investigación aunado a un diagrama que me apoyo a realizar, esto le dio mucho sentido de encontrar un objetivo específico.

En el sentido de mi RPAP aún me siento disperso por los requerimientos del mismo documento, ya que tengo mucha información que no logro ubicar en un lugar adecuado dentro del documento, pero el documento se ha ido tomando forma y siento que es más conciso, ya que busco que sea un documento claro con mucho sentido, ya que es fácil perderse entre los conceptos si no estás familiarizado con los mismos, en este sentido, me falta establecer una narrativa clara y que no agobie a los lectores. Sigo en busca de encontrarla.

A diferencia del RPAP en mi presentación me sentí muy cómodo con el producto final debido que fue muy clara con la problemática existente, así como la explicación de la mejora del proceso de monitoreo que busca contribuir para desarrollar una herramienta de fácil acceso a las personas que más necesitan que exista una gestión adecuada del cauce.

Referencias

Referencias Marco Teórico

- Abellán, A. (2016). *Áreas de biorretención*. Obtenido de SuD Sostenible: <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/areas-de-biorretencion/>
- Agrawal, A., Pandey, R. S., & Sharma, B. (2010). Water Pollution with Special Reference to Pesticide Contamination in India. *Journal of Water Resource and Protection*, 2, 432-448. doi:10.4236/jwarp.2010.25050
- Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (febrero de 2000). *World Water in 2025*. Obtenido de University of Kassel: <http://www.env-edu.gr/Documents/World%20Water%20in%202025.pdf>
- Arquitectura y empresa. (2021). *Techos Verdes*. Obtenido de Arquitectura y Empresa: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/techos-verdes>
- Artmann, M. (2014). *Assessment of Soil Sealing Management Responses, Strategies, and Targets Toward Ecologically Sustainable Urban Land Use Management*. Obtenido de SpringerLink: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-014-0511-1>
- Auge, M. (2006). *Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva*. Buenos Aires, Argentina: Edición del Autor. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/15908/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Auge, M. (2007). *Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Departamento de Ciencias Geológicas*. Obtenido de AGUA FUENTE DE VIDA: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Agua-fuente-de-vida.pdf>

- Ayuntamiento de Zapopan. (2020). *Ayuntamiento de Zapopan*. Obtenido de Estudio hidrológico detallado del municipio de Zapopan: <https://servicios.zapopan.gob.mx:8000/wwwportal/publicfiles/2020-07/Gaceta%20Vol.%20XXVII%20No.%2040%20TIII.pdf>
- Biswas, A. K. (June de 2006). Water Management for Major Urban Centers. *International Journal of Water Resource Development*, 22(2), 183-197.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez Cendón, E., . . . Coll , A. (19 de Noviembre de 2012). *Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos*. Obtenido de ELSEVIER España: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,Compostela\)%2C%20del%20Instituto%20Flumen%20\(](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213131512000454#:~:text=Iber%20es%20un%20modelo%20matem%C3%A1tico,Compostela)%2C%20del%20Instituto%20Flumen%20()
- Bourguet, L. (1971). INVENTAIRE INTERNATIONAL DES AMENAGEMENTSD'ALIMENTATION ARTIFICIELLE / DEPOUILLEMENTET SYNTHESE DES REPONSES. International Association of Scientific Hydrology. .
- Campos, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (3rd ed.). San Luis Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Castillo, J., & Carrasco, A. (2019). *Efecto del agua de mezclado proveniente del subsuelo (nivel freático) y mar en la resistencia a la compresión del concreto*. . Obtenido de Universidad Nacional del Trujillo: <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/12355/Castillo%20D%c3%adaz%2c%20Jhordan%20Martin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballester, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia*, 255-260.
- CEA. (2011). *GUADALAJARA*. Obtenido de Comisión Estatal del Agua de Jalisco: <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/municipios/guadalajara>
- Centro Virtual de Información del Agua. (2017). *Visión General del Agua en México*. Obtenido de AGUA.ORG.MX: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/#:~:text=Anualmente%20M%C3%A9xico%20recibe%20aproximadamente%201,natural%20y%20recarga%20los%20acu%C3%ADferos.>
- Chahar, B., Graillot, D., & Gaur, S. (2012). Storm-Water Management through Infiltration Trenches. *Irrigation and Drainage Engineering*, 274-281.

- Chávez, V. (2021). *Incendios en La Primavera dejan riesgos de inundaciones y lodazales*. Obtenido de El Occidental: <https://www.eloccidental.com.mx/local/noticias-incendios-en-el-bosque-de-la-primavera-dejan-riesgos-de-inundaciones-y-lodazales-6609132.html>
- Clausen, M. E. (2005). *A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment*. *Water Air Soil Pollut*. Obtenido de A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water Air Soil Pollut*: <https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>
- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. (2007). *Manual Técnico del Sistema Hidráulico de Alcantarillado Sanitario y Pluvial*. Guadalajara, Jalisco, México.
- Comisión Estatal del Agua. (2012). *Programa Especial 21. Administración y Uso del Agua*. Jalisco.
- CONAGUA. (2015). *PMPMS para Usuarios Urbanos de Agua Potable y Saneamiento*. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. SEMARNAT.
- CONAGUA. (22 de August de 2019). *Sistema de Información Hidrológica (SIH)*. Obtenido de <https://sih.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA. (2020). *Acuíferos Jalisco*. Obtenido de Disponibilidad Aguas Subterráneas Jalisco: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/jalisco/jalisco.html>
- CONAGUA. (1 de Marzo de 2021). *Calidad del agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- CONAGUA. (March de 2021). *Calidad del Agua en México*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>
- Conesa, C., & García, R. (2011). Factores e índices de peligrosidad de las aguas de avenida en cruces de carreteras con ramblas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 195-218.
- Craig, J. R., Vaughan, D. J., & Skinner, B. J. (2007). *Recursos de la Tierra*. Madrid: Pearson prentice hall.
- Custodio, E. (1996). *HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. TOMO I*. España: Editorial Omega.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea*. d. Omega.
- D'Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en Cuerpos Hidrológicos Superficiales*. México: ITESO.
- D'Urquiza, A. (2020). *Modelación Matemática de la Calidad del Agua en cuerpos Hidrológicos Superficiales*. México: ITESO.

- Dávila, R. A., & de León, H. (2011). Importancia de la hidrogeología urbana; ciencia clave para el desarrollo urbano sostenible. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 463-477.
- De la Cruz, U., & Gleason, J. (2018). *Beneficios económicos de implementar un sistema de captación de agua de lluvia en la Universidad de Guadalajara en la Universidad de Guadalajara*. Obtenido de Vivienda Y Comunidades Sustentables, (4), 11–20: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i4.63>
- del Puerto, J. A., & Valdés, Y. M. (2021). Peligros ambientales y antrópicos sobre las aguas de la Comuna de Ondjiva, Angola. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(3), 14-28.
- Díaz, R. E., Bravo, L. C., Alatorre, L. C., & Sánchez, E. (2013). Presión antropogénica sobre el agua subterránea en México: una aproximación geográfica. *Investigaciones Geográficas*, 82, págs. 93-103.
- Dietz, M. E., & Clausen, J. C. (2005). A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 167, 123–138. doi:<https://doi.org/10.1007/s11270-005-8266-8>
- ECOL. (1997). *NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación.
- El Informador. (2019). *El SIAPA repara 10 hundimientos al día*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/EI-SIAPA-repara-10-hundimientos-al-dia--l201906060001.html>
- El Informador. (10 de marzo de 2021). *Sin fecha de solución, Gobierno responde a quejas por falta de agua en Guadalajara*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/jalisco/Sin-fecha-clara-responden-a-quejas-por-la-falta-de-agua-20210310-0021.html>
- Espín, P., García, J., & Castillo, L. (13 de Junio de 2016). Obtenido de Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia: https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/BN2.pdf
- Feingold, D., Koop, S., & van Leeuwen, K. (2018). The City Blueprint Approach: Urban Water Management and Governance in Cities in the U.S. *Environmental Management Springer*, 9-23.

- Félix, C. P. (2005). *Riesgo Causado por Inundaciones Pluviales en la Zona de Plaza del Sol*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Fernández, Á. E., García, M., & Villarroya, F. (2005). Inventario de Experiencias de Recarga Artificial de Acuíferos en el Mundo. *Tecnología y Desarrollo, III*.
- Fernández, A., & Du Mortier, M. (s.f). *Centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua, Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica: https://www.psa.es/es/projects/solarsafewater/documents/libro/01_Capitulo_01.pdf
- Fletcher, T., Shuster, W., Hunt, W., Richard, A., Butler, D., Arthur, S., . . . Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal, 12:7,, 12(7), 525-542*. doi:DOI:10.1080/1573062X.2014.916314
- Garzón, A. G. (2020). *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).
- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción+ limpia, 7(2), 52-73*.
- GisGeography. (2022). *Sentinel 2 Bands and Combinations*. Obtenido de Sentinel 2 Bands and Combinations - GIS Geography
- Gleason, J. (2011). *Hacia una gestión sustentable del agua en la zona conurbada de Guadalajara*. Obtenido de Revista mexicana de ciencias agrícolas, 2(spe1), 113-126: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000700009&lng=es&tlng=es.

- Global Water Partnertship. (2013). *GWP in Action 2013 Annual Report*. Obtenido de GWP in Action 2013 Annual Report: https://issuu.com/gwp-publ/docs/gwp_in_action_2013_annual_report
- Gobierno de Zapopan. (2020). *DIRECCIÓN DE OBRAS PÚBLICAS E INFRAESTRUCTURA*. Obtenido de Gobierno de Zapopan: https://www.zapopan.gob.mx/wp-content/uploads/2020/08/INVITACIONES_011-20_Censurado.pdf
- Gómez Ugalde, S. G., Mora-Flores, J. S., García Salazar, J. A., & Valdivia, A. R. (2012). Demanda de agua para uso residencial y comercial. *Scielo*, 337-342.
- Gómez, E. (5 de septiembre de 2021). *Desbordamiento de arroyo "El Seco" deja 52 casas dañadas en Zapopan*. Obtenido de El Informador: <https://www.informador.mx/jalisco/Lluvias-en-Zapopan-Desbordamiento-de-arroyo-El-Seco-deja-52-casas-danadas-20210905-0096.html>
- González de Vallejo, L. F. (2002). *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson Educación.
- González, J. A. (1974). El sistema de colectores de la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Trabajos presentados para el Gobierno del Estado de Jalisco. Departamento Obras públicas*, 34.
- González, P. (2017). *Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna*. Obtenido de Newsletter (camara.cl)
- Gorostegui, M. A. (julio de 2021). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos*. Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, canales y puertos : <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22166/TFG%20Maria%20Antonia%20Arnaiz%20Gorostegui.pdf?sequence=1>
- GreenForestMéxico. (2018). *Green Forest México*. Obtenido de Geocostales : <https://www.greenforestmexico.com/geocostales>
- Grigg, N. S. (2011). Water Governance: From Ideals to Effective Strategies. *Water International*, 36(7), 799-811. doi:<https://doi.org/10.1080/02508060.2011.617671>
- Henríquez, C., & Azócar, G. (2006). *Revista de geografía Norte Grande*, (36), 61-74. Obtenido de Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles, VIII Región del Biobío, Chile.: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200004>

- Hernández-Antonio, A., Mahlknecht, J., Tamez-Meléndez, C., Ramos-Leal, J., Ramírez-Orozco, A., Parra, R., . . . Eastoe, C. J. (2015). Groundwater flow processes and mixing in active volcanic systems: the case of Guadalajara (Mexico). *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3937–3950. doi:10.5194/hess-19-3937-2015
- Hidrología Sostenible. (s.f.). *Sustainable Urban Drainage Systems – SUDS*. Obtenido de Hidrología Sostenible Web Site: <http://www.hidrologiasostenible.com/sustainable-urban-drainage-systems-suds/>
- IGRAC. (2021). *MAR Portal*. Obtenido de <https://ggis.un-igrac.org/view/marportal>
- INECC. (2014). *Ánalysis de la Relación entre Precipitación Máxima Anual, el Cambio de Uso de Suelo y la Respuesta Hidrológica en Cuencas Costeras del Pacífico Tropical Mexicano*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- INEGI. (agosto de 2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica*. Obtenido de Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica : http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/PDF/Doc.pdf
- INEGI. (2020). *Área Metropolitana de Guadalajara*. Obtenido de <https://www.jalisco.gob.mx/es/jalisco/guadalajara>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua . (2019). *gob.mx*. Obtenido de Aguas Subterráneas: <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>
- Jaafar, H. H., Ahmad, F. A., & El Beyrouthy, N. (2019). *GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design*. (S. Data, Ed.) Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0155-x>
- Jennings, A. A., Adeel, A. A., Hopkins, A., Litofsky, A. L., & Wellstead, S. W. (2013). Rain Barrel–Urban Garden Stormwater Management Performance. *Journal of Environmental Engineering*, 139(5), 757-765. doi:10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000663
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban Pluvial Flooding and Stormwater Management: A Contemporary Review of China's Challenges and "Sponge Cities" Strategy. *Environmental Science and Policy*, págs. 132-143.
- Kerkez, B., Gruden, C., Lewis, M., Montestruque, L., Quigley, M., Wong, B., . . . Pak, C. (2016). Smarter Stormwater Systems. *Environmental Science & Technology*.
- Kuroiwa, J. M. (2002). *Daños a Infraestructuras por Erosión de Cauces y Riberas*. Departamento Académico de Hidráulica e Hidrología. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

- KWR. (2020). *City Blueprint*. Obtenido de Water Research Institute: <https://www.kwrwater.nl/en/tools-producten/city-blueprint/>
- Lagos, R. H. (2002). *Línea base de la calidad del agua subterránea en el valle del Yeguaré, Honduras*. ZAMORANO. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2270/1/IAD-2002-T024.PDF>
- Lekshmi Prasad, S., & Mophin, K. (2017). Water Quality Assessment of Ashtamudi Lake Using Nsfwqi. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 7, 130-135.
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A., & Turak, E. (2015). Evaluation of MODIS Spectral Indices for Monitoring Hydrological Dynamics of a Small Seasonally-Flooded Wetland in Southern Spain. *Wetlands Springer*, 851-864.
- López, M. (2015). *Riesgo en el piedemonte del gran Mendoza por avance urbano. Argentina*. Obtenido de *tiempo Y Espacio*, (21), 47-57: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/TYE/article/view/1739>
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales Pesados Totales y As en el Agua para Riego de Puebla y Veracruz. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 39-48.
- Marcia, S. (2010). *La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia-escasez*. Obtenido de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44525270/La_escasez_de_Agua_en_el_mundo-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1650868461&Signature=TSFkK3HPCxjQ3W-i5c9Fi100qhF~eF9uknr40YEUbnMuNOAACimxnGfIS5TNcuqhZGtC5IkGmV2bbEMIdM TbTIRglxriPwX~NAFdiLCAHmwPp-Fv~IFBsC4P6mGMY
- María Paula, C. C., & Jorge, M. X. (2012). *Manual de Agua Subterránea*. Montevideo, Uruguay: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Obtenido de https://aquabook.irrigacion.gov.ar/files/upload/contenidos/10_2/Manual-de-agua-subterranea-Uruguay.pdf
- Maryland Department of the Environment. (2009). Chapter 5 Environmental Site Design. Maryland: Maryland Department of the Environment.

- Melendez, I. d. (06 de 09 de 2021). *Vecinos resienten los embates del Arroyo Seco... por tercera ocasión*. Obtenido de udegvtv.com/noticias: <https://udgtv.com/noticias/vecinos-resienten-embates-del-arroyo-seco-tercera-ocasion/>
- Miao, S., Chen, F., Li, Q., Fan, & S. (2011). *Impacts of Urban Processes and Urbanization on Summer Precipitation: A Case Study of Heavy Rainfall in Beijing on 1 August 2006*. Obtenido de American Meteorological Society: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/50/4/2010jamc2513.1.xml>
- Mijangos, M. A., González, R., Bravo, L. A., Alba, M., & Evans, B. M. (2015). ESTUDIO DE FUENTES DE CONTAMINACIÓN PUNTUAL Y DIFUSA EN LAS SUBCUENCAS DEL LAGO DE TUXPAN Y RÍO TOMATAL, IGUALA, GRO., MÉXICO. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ*.
- Milenio. (17 de Diciembre de 2017). *Hundimiento del Valle de México es crítico: especialistas*. Obtenido de Milenio: <https://www.milenio.com/estados/hundimiento-del-valle-de-mexico-es-critico-especialistas>
- Molano, L. I. (2016). SISTEMAS DE CONTROL DE ESCORRENTÍA DE AGUAS LLUVIAS: TECHOS VERDES VS. TANQUES DOMICILIARIOS DE ALMACENAMIENTO PARA EL CONTROL DE LA ESCORRENTÍA PLUVIAL EN CIUDADES. Bogotá, Colombia.
- Momparlet, S. P. (2008). *Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza*. Obtenido de Sistemas Urbanos de Drenaje sostenible (SuDS) Expo Zaragoza: <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/33S8-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>
- Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mahlkecht, J., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Rockwater Interactions and Pollution Processes in the Volcanic Aquifer System of Guadalajara, Mexico, Using Inverse Geochemical Modeling. *Applied Geochemistry*, 68, 79-94. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.008>
- Narváez, E. J. (2021). *Manual metodológico de monitoreo para la evaluación de la calidad del agua utilizando el Índice de calidad del agua (ICA) en los jagüeyes del municipio de sabanas de san ángel (magdalena)*. Magdalena: Universidad de Magdalena. Obtenido de <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/jspui/handle/123456789/5903>
- NASA. (2020). MODIS. Obtenido de <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

- New York State Department of Health. (2017). *Coliform Bacteria in Drinking Water Supplies*. Obtenido de New York State: https://www.health.ny.gov/environmental/water/drinking/coliform_bacteria.htm
- Nistor, M. M., Rahardjo, H., Satyanaga, A., Hao, K. Z., Xiaosheng, Q., & Sham, A. W. (March de 2020). Investigation of groundwater table distribution using borehole piezometer data interpolation: Case study of Singapore. *Engineering Geology*, 271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105590>
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., & Doshi, H. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, functions and services. *BioScience*, 823-833.
- OCDE. (2018). *Marco de Indicadores de Gobernanza del Agua de la OCDE*. París.
- Ogazon, V. C. (25 de 07 de 2021). *Se desborda arroyo en Zapopan y causa daños en siete colonias*. Obtenido de udgtv.com/noticias: <https://udgtv.com/noticias/se-desborda-en-arroyo-zapopan-causa-danos-siete-colonias/#:~:text=Una%20fuerte%20tormenta%20en%20los,Zapopan%20de%20Respu%20esta%20a%20Emergencias%E2%80%9D>
- Ojeda, C. G. (2016). RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS (Managed Aquifer Recharge). La Serena, Chile.
- Oki, T., Entekhabi, D., & Ives, T. (2020). *Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Meguro, Tokyo, Japan*. Obtenido de The Global Water Cycle: https://www.researchgate.net/profile/T-Harrold/publication/260072736_The_global_water_cycle/links/5f1798f4299bf1720d58d0eb/The-global-water-cycle.pdf
- ONU. (2012). *Guía ciudadana para la participación incluyente en la gestión del agua*. Ciudad de México.
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas* (5 ed.).
- Orozco, M. (15 de July de 2020). Fuerte Lluvia Deja Inundaciones en Plaza del Sol en Guadalajara. *Debate*. Obtenido de <https://www.debate.com.mx/guadalajara/Reportan-inundacion-por-lluvias-en-Plaza-del-Sol-en-Guadalajara-20200715-0251.html>
- Palacios, D. (2017). *Universidad de Guadalajara*. Obtenido de ZMG sobrepasa demanda de agua : <https://www.udg.mx/es/noticia/zmg-sobrepasa-demanda-de-agua#:~:text=De%20acuerdo%20con%20datos%20de,y%20aguas%20de%20la%20su%20perficie>.

- Palansooriya, K. N., Yang, Y., Tsang, Y. F., Sarkar, B., Hou, D., Cao, X., . . . Ok, Y. S. (2019). Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-63. doi:<https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629803>
- Palma, A., Mendoza, A., Cruickshank, C., Villarreal, F., Salas, M., & Val, R. (2014). *Inventario de la Recarga Artificial en México*. Puerto Vallarta: XXIII Congreso Nacional de Hidráulica.
- Paus, K., & Braskerud, B. (2014). Suggestions for Designing and Constructing Bioretention Cells for a Nordic Climate. *Water Management and Research*, 139-150.
- Peña, C., & Lara, J. (20 de Noviembre de 2012). Obtenido de Tratamiento de aguas de escorrentía mediante humedales artificiales: Estado del arte: <https://www.redalyc.org/pdf/911/91126903003.pdf>
- Perevochtchikova, M. (2009). La Situación Actual del Sistema de Monitoreo Ambiental en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, págs. 513-547.
- Piguave-Reyes, J. M., Castellano-González, M. J., Macías-Avia, A. M., Vite-Solórzano, F. A., Ponce-Pibaque, M. D., & Ávila-Ávila, J. A. (2019). Calidad microbiológica del agua subterránea como riesgo epidemiológico en la producción de enfermedad diarreica infantil. Revisión Sistemática. *Kasmera*, 47(2), 153-173. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.3556409>
- Porse, E. C. (2013). Stormwater Governance and Future Cities. *Water*, 5(1), 29-52. doi:10.3390/w5010029
- Press, F., & Siever, R. (2001). UNDERSTANDING EARTH. FREEMAN AND COMPANY.
- Rascón, L., & Jiménez, A. (2001). *Investigaciones geográficas*, (45), 24-38. Obtenido de Alteración del ciclo hidrológico en la parte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. : http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112001000200003&lng=es&tlng=es.
- Reguillo, R. (1998). *Alteridades*, 8(15), 35-44. Obtenido de Semantizarás el territorio: los vecinos de Analco y las explosiones de 1992 en Guadalajara: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74745550004>

- Rizo, L. D. (2017). *Consideraciones sobre la Calidad del Agua del Río Santiago (México) y Cartografía de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos de su Cuenca, para una Adecuada Gestión y Planificación Hidrológica*. Málaga: Universidad de Málaga.
- Rodríguez, J., Rodríguez, J., Ballester, F., & Castro, D. (2005). *Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)*. Obtenido de *Interciencia*, 30(5),255-260.: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33910403>
- Rojas, D., & González, M. (2015). *Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México*. Obtenido de SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200006&script=sci_arttext&tlng=pt
- Román, J. M. (2015). *Telemetría de Estación Meteorológica*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Rus Copernicus. (2017). *Burned Area Mapping with Sentinel-2 using snap*. Obtenido de [HAZA02_BurnedArea_Portugal_Tutorial.pdf](#) (rus-copernicus.eu)
- Sachs, J. D. (2015). *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press.
- Salas, C., Coy, D., Acuña, K., Páez, L., & Upegui, E. (2019). *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). Obtenido de Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá: [https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20\(2019-I\)/151561629006/](https://revistas.javeriana.edu.co/files-articulos/AyD/23-44%20(2019-I)/151561629006/)
- Sánchez San Román, J. (s.f.). *Conceptos fundamentales de hidrogeología*. Obtenido de Universidad Salamanca: <http://hidrologia.usal.es>
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2006). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, 42(11), 3830-3836. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>
- Science for Environment Policy. (2012). *Soil Sealing*. European Commission, Directorate-General Environment . Bristol: University of the West of England.
- SEMARNAT. (2014). *6.2.1 Calidad del agua*. Obtenido de El Medio Ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html
- Serieys, N. (2004). *Impacto de recarga artificial sobre la calidad del agua en acuíferos sensibles de la Sabana de Bogota*. Obtenido de Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10445/u251247.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- SGM. (2020). *¿Qué hacemos?* Obtenido de Servicio Geológico Mexicano:
<https://www.gob.mx/sgm/que-hacemos>
- SIAPA. (2014). *RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES*. Obtenido de SIAPA:
https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5._infiltracion_pluvial.pdf
- SIAPA. (2021). *Funciones Públicas*. Obtenido de SIAPA:
https://www.siapa.gob.mx/funciones_publicas
- Silicani, M. R. (2015). *Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo*. Facultad de Agronomía. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- SINA. (2019). *Acerca del SINA*. Obtenido de Sistema Nacional de Información del Agua:
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/>
- Soto, J. F. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XI(2), 167-177.
- Suárez, C. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011*. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- Susdrain. (s.f.). Obtenido de Sustainable Drainage: <https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/background/sustainable-drainage.html>
- Susdrain. (2021). *Component: Infiltration trenches*. Obtenido de https://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/infiltration/infiltration_trench.html
- Susdrain/CIRIA. (2014). *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention*. Obtenido de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention: <https://www.duratex.co.uk/company-blog/industry-news/sustainable-urban-drainage-systems-suds-in-flood-prevention>
- Tálamo, A., Bermudez, R., Garibaldi, L., & Chavez, A. (2016). *Erosión y escorrentía en respuesta a lluvias simuladas e incendios en bosques secos de montaña*. *Ciencia del suelo*. Obtenido de SciELO:
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100010&lng=es&tlng=es.

- Taller botánico. (2020). *¿Qué es y cómo funciona un pozo de absorción?* Obtenido de Taller botánico: <https://www.eltallerbioclimatico.com/blog/post/85530/qu-es-y-c-mo-funciona-un-pozo-de-absorci-n>
- Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2000). *Ciencias de la Tierra* (Sexta ed.). Madrid: Prentice Hall.
- Tarbuck, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*. Pearson Education.
- Tinoco, J. (2019). *NIVELES DE CLORO RESIDUAL LIBRE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN UNA INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR EN LA CIUDAD DE CALI EN EL AÑO 2019*. Cali: UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI. Obtenido de <https://repository.usc.edu.co/bitstream/handle/20.500.12421/3262/NIVELES%20DE%20CLORO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tobias, S. (2013). *Federal Institute of Forest*. Obtenido de Preserving Ecosystem Services in Urban Regions: Challenges for Planning and Best Practice Examples from Switzerland: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3664025/#:~:text=Spatial%20planning%20can%20contribute%20to,compensating%20for%20new%20soil%20sealing>
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano. Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8, págs. 79-94.
- Tráfico ZMG. (2016). *Problema de cada temporal; El negocio de los baches*. Obtenido de Tráfico ZMG: <https://traficozmg.com/2016/07/problema-temporal-negocio-los-baches/>
- UNAM. (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. Ciudad de México: Comisión Nacional de los Derechos Humanos.
- Ungaro, F., Calzolari, C., Pistocchi, A., & Malucelli, F. (2014). *Hydrol Hydromech*. Obtenido de Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydrogeological approach.: <https://sciencedirect.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 udegtv.com/noticias: <https://udgtv.com/noticias/construye-zapopan-sistema-vasos-reguladores-zonas-puerta-hierro-perisur-evitar-inundaciones/>
- Vélez, J., & Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales*. . Obtenido de Scielo Org: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006
- Vijayaraghavan, K. (2016, May). A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Villegas, H. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (Guías para los asistentes)*. Obtenido de Microsoft Word - memoria-curso-jul-2008Editado (sgc.gov.co)
- Vörösmarty, C., & Sahagian, D. (2000). *BioScience*, Volume 50, Issue 9. Obtenido de Anthropogenic Disturbance of the Terrestrial Water Cycle: <https://academic.oup.com/bioscience/article/50/9/753/269247?login=false>
- Weigand, P. C. (2012). La Caldera de Coli y su vecina Guadalajara. *Relaciones*, 291-318.

- Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *CIRIA*. Obtenido de The SuDS Manual: <http://www.scotsnet.org.uk/documents/nrdg/ciria-report-c753-the-suds-manual-v6.pdf>
- Xingyu, Y., Fei, Y., & Wenxi, F. (2022). *Estimating the critical shear stress for incipient particle motion of a cohesive soil slope*. Obtenido de <https://www.nature.com/articles/s41598-022-13307-w>
- Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, I. (2009). Evaluación de la contaminación por escorrentía urbana: sedimentos depositados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación, 29*.
- Zafra, C. A., Temprano, J., & Tejero, J. I. (2007). Contaminación por escorrentía superficial urbana: metales pesados acumulados sobre la superficie de una vía. *Ingeniería e Investigación, 27*.
- Zamudio Zavala, P., Mayoral Ruiz, P., & Gómez Mora, I. (2019). *MODELO DE PROFUNDIDAD A LA ROCA BASAL DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA (ZMG)*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., Monterrey.
- Zamudio, P., Vargas, D., & Ochoa, G. (2016). *Correlaciones entre propiedades mecánicas y propiedades físicas en Guadalajara*.
- Zaporozec, A. (1981). Ground-Water pollution and its sources. *GeoJournal, 5*, 457-471. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02484718>

Referencias Marco Contextual

- Andreo, B., Vías, J., Durán, J. J., Jiménez, P., López-Geta, J. A., & Carrasco, F. (2008). Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: Application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal, 16*, 911-925. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0274-5>
- Cerdà, A. (1997). Influencia de la litología en los procesos de erosión en badlands. Los casos de Anna (Valencia) y Petrer (Alicante). *Pirineos, 149-150(0)*, 3-20. <https://doi.org/10.3989/pirineos.1997.v149-150.124>
- FIRCO. (s. f.). Fideicomiso de Riesgo Compartido | Gobierno | gob.mx. Recuperado 28 de septiembre de 2023, de <https://www.gob.mx/firco>
- Geografía INEGI. (2005). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Geografía INEGI. (2014). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Geografía INEGI. (2016). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Geografía INEGI. (2021). Espacio y datos de México. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- INEGI. (2013, diciembre). SIATL v4 | Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Planet. (2023). Planet Monitoring—Satellite Imagery and Monitoring. Planet. <https://www.planet.com/products/monitoring/>

- Pourrut, P. (Ed.). (1995). Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- SIGEA. (2023). Mapa de ordenamiento. <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjA uMA Report-
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial- infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf
- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques- de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n

Referencias Metodología

- CONAGUA. (2023). *Estaciones meteorológicas* [KML]. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>
- Davis Instruments. (2023). *WeatherLink Air Quality & Temperature Map*. <https://www.weatherlink.com/map>
- Geografía INEGI. (2005). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Geografía INEGI. (2014). *Espacio y datos de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>
- Gracia, A., Godé, L., Crego, E., Arrabal, M., Guirado, V., García, G., Lobera, C., González, S., & Martínez, E. (2010). *Riesgos y cuantificación de daños por inundación*.
- PNT (2023). *Plataforma Nacional de Transparencia*. Recuperado el 14 de noviembre del 2023, de <https://consultapublicamx.plataformadetransparencia.org.mx/vut-web/faces/view/consultaPublica.xhtml#inicio>.
- Hernández, R. (2015). *Desalojan a más de 200 personas por desbordamiento del río Ameca*. Recuperado el 14 de noviembre de 2023, de <https://www.cronicajalisco.com/notas/2015/39518.html>.
- SIGEA. (2023). *Sistema de Información Geográfica para la Evaluación del Impacto Ambiental*. Recuperado el 06 de noviembre de 2023, de <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.

- Vélez, J., & Botero, A. (2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. Obtenido de Scielo
Org:http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006
- Rojas, D., & González, M. (2015). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. Obtenido de SciELO: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382015000200006&script=sci_arttext&tlng=pt
- Susdrain/CIRIA. (2014). Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention. Obtenido de Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) in Flood Prevention: <https://www.duratex.co.uk/company-blog/industry-news/sustainable-urban-drainage-systems-suds-in-flood-prevention>
- Suárez, C. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Guadalajara 2011. Guadalajara: Universidad de Guadalajara.
- SIAPA (Servicios de Agua Potable y Alcantarillado). (2014). RITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES. Obtenido de SIAPA:
- https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5_infiltracion_pluvial.pdf
- SEMARNAT. (2014). 6.2.1 Calidad del agua. Obtenido de El Medio Ambiente en México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.htm
- Science for Environment Policy. (2012). Soil Sealing. European Commission, Directorate-General Environment. Bristol: University of the West of England.

Referencias Resultados

- Metcalf & Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Tsuchihashi, R. (2013). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- von Sperling, M. (2016). Stabilization Ponds: Biological Wastewater Treatment. IWA Publishing.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). Wastewater Treatment and Reuse. McGraw-Hill Education.

- Middlebrooks, E. J., & Crites, R. W. (2000). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. McGraw-Hill Education.
- Crites, R. W., Tchobanoglous, G., & Ovidio, J. A. (1998). Natural Wastewater Treatment Systems. CRC Press.
- <https://patents.google.com/patent/CN211571235U/en?q=CN+211571235+U>
- [https://patents.google.com/patent/CN110627313A/en?q=\(Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city\)&oq=Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city](https://patents.google.com/patent/CN110627313A/en?q=(Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city)&oq=Novel+rainwater+filtration+system+suitable+for+sponge+city)
- [https://patents.google.com/patent/KR102018462B1/en?q=\(rain+water+trench\)&oq=rain+water+trench](https://patents.google.com/patent/KR102018462B1/en?q=(rain+water+trench)&oq=rain+water+trench)
- [https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN102031768B/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well)
- [https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well](https://patents.google.com/patent/CN212835459U/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well)
- [https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=\(rain+water+trench+well\)&oq=rain+water+trench+well&page=1](https://patents.google.com/patent/CN202969202U/en?q=(rain+water+trench+well)&oq=rain+water+trench+well&page=1)
- <https://patents.google.com/patent/KR20090090987A/en?q=KR2009-0090987A>)
- <https://chat.openai.com/c/2711ba0f-264c-460b-961e-c31adb302990>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/red-de-distribuci%C3%B3n-comunitaria>
- <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-saneamiento/uso-yo-disposicion-final/pozo-de-absorci%C3%B3n>
- <https://umamexico.com/red-de-parques-sobre-el-rio-tizates/>
- <https://www.mandua.com.py/un-parque-lineal-para-dar-una-cara-distinta-al-entorno-del-arroyo-lambare-in469>
- *Nido de lluvia, una nueva forma de abastecimiento de agua en Jalisco | Gobierno del Estado de Jalisco.* (s. f.). <https://www.jalisco.gob.mx/es/gobierno/comunicados/nido-de-lluvia-una-nueva-forma-de-abastecimiento-de-agua-en-jalisco>
- Lapointe, M., Rochman, C. M., & Tufenkji, N. (2022). Sustainable strategies to treat urban runoff needed. *Nature sustainability*, 5(5), 366-369. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00853-4>

- Jones, J. E., Bisbee, G. D., & Stewart, H. T. (2002.). Innovative Stormwater Treatment Technologies: Best Management Practices Manual. *University of New Hampshire*. <https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1314&context=prep>

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

- <https://patents.google.com/patent/CN111877461A/en?oq=CN111877461A>
- Meléndez, V. (2023, 31 agosto). Baja presa Calderón nivel pese a lluvias. *Mural*. Recuperado 2 de octubre de 2021, de <https://www.mural.com.mx/baja-presa-calderon-nivel-pese-a-lluvias/ar2666957>
- SIAPA. (2021). *¿Qué está pasando con el agua en el AMG?* Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://www.siapa.gob.mx/suministro>
- IIEG. (2021). *Zapopan, Diagnóstico Municipal*. Recuperado 2 de octubre de 2023, de <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2021/10/Zapopan-1.pdf>
- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de Atemajac (1401), Estado de Jalisco. Recuperado 6 de octubre de 2023, de https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1401.pdf
- 34474270 Rain Water Harvesting and Conservation. (s. f.). Scribd. <https://es.scribd.com/doc/128890095/34474270-Rain-Water-Harvesting-and-Conservation>
- Perrozzi, A. (2022). Parques inundables: el rol del espacio público en la gestión del agua. *Transecto*. <https://transecto.com/2020/05/parques-inundables/>
- Pozos y zanjas de infiltración. (2016, 24 agosto). *SuD Sostenible*. <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/pozos-y-zanjas-de-infiltracion/>
- CityAdapt. (2023, 21 agosto). Pozos de absorción - CityAdapt. https://cityadapt.com/sbn_cityadapt/pozos-de-absorcion/
- Sistemas de captación de agua pluvial y filtración a base de zeolitas – zeolitas. (s. f.). <https://zeolitas.mx/sistemas-captacion-pluvial/>
- Foley, J., Defries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S., Chapin III, F. S., Coe, M., Daily, G., Gibbs, H., Helkowski, J., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C., Monfreda, C., Patz, J., Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science (New York, N.Y.)*, 309, 570-574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

- López, H. E. F., Orozco, C. de la M., Corral, J. A. R., & Durán, Á. A. C. (2013). Efecto De La Cobertura De Suelo De Tres Cultivos Sobre La Erosión Hídrica. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(1), 19-25.
- PERCOT. (s. f.). *Pozo de absorción*. Recuperado 8 de octubre de 2023, de <https://www.percot.com.mx/>
- 何畏洪祖勇王林棋. (2021, julio 20). *CN111733847B - A hydrophobic water guide device for foundation ditch construction—Google Patents*. [https://patents.google.com/patent/CN111733847B/en?q=\(infiltration+trenches+with+gravel+filters\)&oq=infiltration+trenches+with+gravel+filters](https://patents.google.com/patent/CN111733847B/en?q=(infiltration+trenches+with+gravel+filters)&oq=infiltration+trenches+with+gravel+filters)
- Pourrut, P. (Ed.). (1995). *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos*. Colegio de Geógrafos del Ecuador: Corporación Editora Nacional.
- SIGEA. (2023). *Mapa de ordenamiento*. <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>.
- Camarillo, R., Valdés, F., Alonso, J. (2012). *Desarrollo de un sistema hidrodinámico para sistemas de análisis en flujo miniaturizados*. *Revista mexicana de ingeniería química*. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382012000200009.
- Celdrán, D. (2022). *Acuicultura Simbiótica como Nuevo Paradigma Productivo: Reduciendo Impactos y Aumentando Beneficios*. *Avances en Nutrición Acuícola*. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/353>.
- Crespo, C. (2022). *¿Qué impacto tienen las cremas solares en los ecosistemas?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/que-impacto-tienen-las-cremas-solares-en-los-ecosistemas>.
- Dirección General de Obras y Conservación. (s.f.). *Concretos ciclópeos*. Dirección de Planeación y Evaluación de Obras. https://www.obras.unam.mx/pagina/docs/normatividad/construc/espe_gral/estructu/ob_pre/obp_pc01.html#:~:text=El%20concreto%20cicl%C3%B3peo%20se%20elaborar%C3%A1,revolvedora%2C%20o%20suministrado%20de%20planta.
- Holcim. (2013). *Informe de Desarrollo Sostenible 2013*. <https://www.holcim.com.co/sites/colombia/files/images/IDS2013-11.pdf>.

- MACCAFERRI. (2023). *Gaviones*.
<https://www.maccaferri.com/mx/productos/gaviones-3/>.
- OAS. (s.f.). *Capítulo 8. Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones*. <https://www.oas.org/DSD/publications/Unit/oea65s/ch13.htm>.
- Reel Resilience Network. (2023). *Impactos ambientales y beneficios*. The Nature Conservancy. <https://reefresilience.org/es/management-strategies/aquaculture/environmental-impacts-and-benefits/>.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022). *La acuicultura o acuicultura es el conjunto de actividades, técnicas y conocimientos de crianza de especies acuáticas vegetales y animales*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-en-mexico#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20ha%20alcanzado%20niveles,osti%C3%B3n%2C%20camar%C3%B3n%20y%20langostino>.
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- *Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf*
- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n
- <https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>
- [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia l..pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia%20l..pdf)

- <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf>
- https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf
- https://publicacionesonuhabitat.org/onuhabitatmexico/cpi/extendidos/GDL_web.pdf
- https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf?_gl=1*11qhxop*_ga*MTgwMTUwNDQ3LjE2OTY1NTAwMTg.*_ga_TK9BQL5X7Z*MTY5NzA0NzQxMS4zLjEuMTY5NzA0NzQxOS4wLjAuMA
- https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/programa-sectorial-infraestructura-y-obra-publica_1.pdf
- Gaceta Vol. XXVII No. 40 TIII.pdf

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/>

- <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/estanques-de-retencion/>
- https://akvopedia.org/wiki/Estanques_de_infiltraci%C3%B3n
<https://www.artificialrecharge.co.za/strategydocument/ARStrategySectB.pdf>
- [https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia I..pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SIAPA%202014.%20Criterios%20y%20lineamientos%20t%C3%A9cnicos%20para%20%20Infiltraci%C3%B3n%20pluvia%20I..pdf)
- <http://polux.unipiloto.edu.co:8080/00000992.pdf>
https://www.sdgfund.org/sites/default/files/case_study_-_mexico_agua_-_es.pdf

Anexo 1

Monitoreo de Ríos Pequeños

Establecer un nuevo marco practico para el Monitoreo sistemas fluviales o como lo mencionamos nosotros ríos pequeños, con un enfoque hidrosocial, este concepto enmarca el agua y la sociedad como un ente común que vive interrelacionado en todos los aspectos de la vida del ser humano.

Desde ese enfoque se busca visibilizar la importancia del vital líquido en los sistemas fluviales y su interrelación con los pobladores aledaños que habitan cerca de ríos pequeños o incluso dentro de su zona Riparia. Estos pobladores son los actores principales dentro de nuestra propuesta de Mejora en el Monitoreo de Ríos y la metodología Medir – Delimitar - Gestionar que nosotros proponemos. Esta establece tres pilares de acción:

1. Puntos de **monitoreo** de estos ríos pequeños, que son parte de la propuesta de mejora al monitoreo de Ríos que existe en la CONAGUA.
2. Establecimiento de la **delimitación** de la Zona Federal de los cauces (A partir del NAMO, si mide más de 5 m. de ancho, su zona y Federal será de 10 m. A cada margen del río y si es menor a 5 m. será de 5 m. cada margen) esta delimitación incluirá parte de su zona Riparia.
3. Gestión integral. El cauce, calidad del agua y parte de su zona Riparia por parte de los pobladores aledaños. Para buscar generar un espacio de mayor benefició común como parques lineales, parques, bosques urbanos.

Estos pilares se apegan al marco legal definido por la Comisión Nacional del Agua en su Ley de Aguas Nacionales, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales y Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.

1. Ciclo participativo del Proyecto de Aplicación Profesional

El PAP es una experiencia de aprendizaje y de contribución social integrada por estudiantes, profesores, actores sociales y responsables de las organizaciones, que de manera colaborativa construyen sus conocimientos para dar respuestas a problemáticas de un contexto específico y en un tiempo delimitado. Por tanto, la experiencia PAP supone un proceso en lógica de proyecto, así como de un estilo de trabajo participativo y recíproco entre los involucrados.

Fases:

1. Definición del problema: monitoreo de ríos, calidad de la información, mejora de estos procesos.
2. Revisión de literatura para elaborar un marco teórico y de referencia: ciclo hidrosocial y ciclo socionatural del agua, mecanismos de acceso, marco legal para la gestión del agua, conflictos relacionados con el agua.
3. Proceso de generación y acceso a la información sobre ríos.
4. Lectura y contextualización del ciclo hidrosocial.
5. Geomorfología de los ríos.
6. Retos para el monitoreo de ríos CONAGUA.
7. Alternativas para mejorar el monitoreo de ríos y el proceso de gestión de la información (con enfoque en mejoramiento de procesos y delegar atribuciones a nivel local)

1.1 Entendimiento del ámbito y del contexto

Actualmente existe en México un sistema de monitoreo climático y fluvial; el cual depende de algunas instituciones del Gobierno Federal. Es importante comprender la relación entre ambos monitoreos, ya que la dinámica fluvial es dependiente del clima de la región, dado que bajo ciertas condiciones climáticas el río se comportaría de diferentes maneras, por ejemplo, en sentido de sus estados, perenne o intermitente.

Esta información se utiliza para realizar estudios que a su vez nos llevan a conclusiones muy puntuales, por ejemplo.

*Los últimos cuatro años fueron los cuatro más cálidos de la historia
(OMM, 2023)*

Para llegar a estas conclusiones la OMM utiliza información oficial generada por los países integrantes de dicha organización, en el caso de México la encargada de recopilar esta información climatológica y a su vez hidrológica es la Comisión Nacional del Agua, en sus áreas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos, conocida como la GASIR (Manual de integración, estructura orgánica y funcionamiento de la CONAGUA, 2015)

A pesar de que el SMN y la GASIR pertenecen a la misma CONAGUA, cada una instala y opera distintas redes de monitoreo climático. En el caso del SMN, este cuenta con una red de 76 observatorios meteorológico, cuyas funciones son las observaciones, transmisión en tiempo real de la información de las condiciones atmosféricas y pronóstico del tiempo (SMN, 2024). Sin embargo, esta red no monitorea ningún cuerpo de agua. El monitoreo de cuerpos de agua (caudal, calidad y volumen almacenado) se realiza a través de la Red de Estaciones hidrométricas de la GASIR que se encarga de recolectar la información de hídrica desde quienes la generan que son denominados aforadores, estos son empleados federales encargados de la medición del río (Nivel y Gasto) a su vez ellos generan un reporte en un Formato Establecido que a su vez hacen llegar a el Área Técnica de Dirección Local o del Organismo de Cuenca, instancia encargada de recopilar y capturar dicha información en el SIH (Sistema de Información Hidrológica) para que sea publicada en la página oficial de la CONAGUA.

1. Dirección Local Aguascalientes
2. Dirección Local Baja California Sur
3. Dirección Local Campeche
4. Dirección Local Chihuahua

5. Dirección Local Coahuila
6. Dirección Local Colima
7. Dirección Local Durango
8. Dirección Local Estado de México
9. Dirección Local Guanajuato
10. Dirección Local Guerrero
11. Dirección Local Hidalgo
12. Dirección Local Michoacán
13. Dirección Local Nayarit
14. Dirección Local Puebla
15. Dirección Local Querétaro
16. Dirección Local Quintana Roo
17. Dirección Local San Luis Potosí
18. Dirección Local Tabasco
19. Dirección Local Tlaxcala

Además de las direcciones locales, los *Organismos de Cuenca* son los encargados de recopilar la información hidrológica de los estados donde están establecidos. En el Mapa 1 se muestran los límites de los trece organismos de cuenca en los que se divide el país.

ⁱⁱⁱ Mapa de zonas Hidrológico Administrativo de México.

- I. Península de Baja California (Mexicali, Baja California).
- II. Noroeste (Hermosillo, Sonora).
- III. Pacífico Norte (Culiacán, Sinaloa).
- IV. Balsas (Cuernavaca, Morelos).
- V. Pacífico Sur (Oaxaca, Oaxaca).
- VI. Río Bravo (Monterrey, Nuevo León).
- VII. Cuencas Centrales del Norte (Torreón, Coahuila).

- VIII. Lerma Santiago Pacífico (Guadalajara, Jalisco).
- IX. Golfo Norte (Ciudad Victoria, Tamaulipas).
- X. Golfo Centro (Jalapa, Veracruz).
- XI. Frontera Sur (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas).
- XII. Península de Yucatán (Mérida, Yucatán).
- XIII. Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (México, Distrito Federal).

Dentro de las tareas establecidas a la GASIR definidas en el *Manual de Integración, estructura orgánica y funcionamiento de la Comisión Nacional del Agua* (CONAGUA,2015) que están ligadas estrechamente con el monitoreo de cuerpos de agua.

Formular y proponer los lineamientos, sistemas y procedimientos para la realización de trabajos en las estaciones de medición de aguas superficiales del país que tengan como objetivo la suspensión temporal o definitiva, el cambio de sitio, la obtención y registro de datos hidrológicos, así como para la elaboración de proyectos de construcción de obras de infraestructura hídrica que se efectúen con recursos de la Federación, con su aval o garantía.

Formular y proponer la normatividad para regular la operación y actualización de sistemas de información hidrológica y de bancos de datos, a tiempo real e histórico, conjuntamente con los organismos de cuenca y direcciones locales, a fin de contribuir con el Sistema Nacional de Información, de Cantidad, Usos y Conservación del Agua Superficial, para contribuir al diagnóstico y evaluación del cambio climático.

Dirigir y coordinar las acciones para la emisión de pronósticos de avenidas para prevenir inundaciones, así como dictámenes de obras de protección y control de planicies de inundación, para informar a la unidad administrativa correspondiente la construcción de las mismas.

Coordinar la planeación y desarrollo de los procesos para instalar, directamente o a través de terceros, redes de medición de aguas superficiales, mantenerlas, operarlas y modernizarlas, así como para la realización de obras civiles e instalaciones convencionales o telemáticas.(Manual de integración, estructura orgánica y funcionamiento de la CONAGUA, 2015: páginas 69 y 70) .

Las estaciones hidrométricas monitoreadas por GASIR atienden la necesidad de conocer el río y sus características físicas a través del tiempo, en sus aspectos como agua potable, riego, generación de energía, navegación, emergencias, conocimiento del régimen hidráulico, etcétera. Las estaciones de aforo se instalan en los sitios en que se desean practicar observaciones, para conocer el régimen de una corriente, basado en el gasto o volumen que pasa por una sección transversal de la misma, en una unidad de tiempo punto y aparte los métodos de aforo son variados de acuerdo con las necesidades y características, pudiendo ser: método volumétrico, vertedores y orificios, y método de sección y velocidad. Dentro de ellos, el que generalmente se emplea en el servicio hidrométrico es el último, aplicado en las estaciones en que la velocidad se determina ya sea con molinete o por sección y pendiente hidráulica, la información que se obtiene como producto de este monitoreo se le denomina hidrometría (Acosta Godínez, 1990).

La hidrometría es fundamental para diseñar y sustentar técnicamente las grandes obras hidráulicas, que se realizaron durante la última mitad del siglo pasado hasta hoy en día. La información hidrométrica no solo se utilizó para validar técnicamente las obras hidráulicas que ya están construidas, también se utiliza para estudiar la dinámica de los ríos, cálculo de las disponibilidades de aguas superficiales (ríos, lagos y presas) y aguas subterráneas (Acuíferos), existe la norma 011 de la CONAGUA.

La presente Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas

nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento. (NOM_011_CNA_2000, 2002)

1.2 Caracterización de la organización o comunidad

Este PAP se desarrolla dentro de un contexto donde la necesidad de utilizar eficientemente el recurso del agua es una necesidad a nivel Nacional.

Lo básico para poder hacer un uso eficiente de algún recurso es cuantificar cuanto existe de él, cuanto generamos, almacenamos, distribuimos, etcétera. En este sentido debemos saber con cuánta agua contamos, por lo tanto, es necesaria una gran calidad en la veracidad de la información que se genera a partir de un aforo de un Río.

Por ello es fundamental diseñar y proponer una mejora en el proceso de monitoreo de ríos, para generar un cambio favorable dentro de la gestión del agua.

Históricamente existe un sesgo en el monitoreo de los Ríos en México, solo se monitorean los Ríos más caudalosos del país, con un alto impacto en fines económicos o que yacen en zonas de alta influencia socioeconómica.

Los Ríos más caudalosos son abundantes al sur de nuestro territorio, sin embargo, los Ríos con menor gasto e incluso intermitentes podemos encontrarlos en la región del Bajío, Occidente y Norte de nuestro país.

Esto desde el comienzo del proyecto de monitoreo de Ríos en México en las ya extintas Secretaría de Recursos hidráulicos, continuando en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y ahora en la Comisión Nacional del Agua podemos percibir una decadencia en la calidad de la información.

Desde este enfoque se busca desarrollar e implementar nuevos procesos y mejorar los actuales para establecer una metodología de monitoreo con una proyección para la adecuada gestión Hidrológica y Social de los Ríos Pequeños. **En sentido de la Conservación Geomorfológica del Cauce, la Calidad del Agua, la Zona Riparia y la Convivencia directa con el Río.**

Actualmente existen Ríos y cuencas que siguen su proceso geomorfológico natural, aún no han sido intervenidos por el humano, esto es una muestra de lo vasto y extenso que es nuestro país, por ello esta metodología no busca que se implemente en todos los denominados Ríos pequeños de nuestro país, sino donde sea necesario. Esto con base en las necesidades de las comunidades o pobladores aledañas.

Actualmente solo en la costa de Jalisco y Nayarit existen más de 50 poblaciones que conviven día a día con un Río Pequeño, dadas las necesidades de estas pequeñas poblaciones que están inmersas en el ciclo hidrosocial a comparación de una zona con mayor explotación demográfica, este contexto nos da oportunidad de atender las necesidades de un monitoreo con un sentido y enfoque desde las necesidades de las comunidades aledañas a los Ríos pequeños.

Es fundamental tratar de acotar y definir el tipo de pequeños Ríos que se pretenden monitorear, las características hidrológicas y morfológicas de estos cauces son muy diferentes a los grandes cauces de este país, Comenzando por el estado del río ya que comúnmente se identifican por dos estados posibles de la corriente del cauce:

Perenne, el cauce lleva agua por una larga temporalidad independientemente de que no sea el temporal de lluvias en la región. E Intermitente, cambia en función de la

temporalidad de las lluvias por lo que en estiaje llega a secarse y en lluvias corre agua por su cauce.

Por lo que los Ríos pequeños no son exclusivos de un estado u otro, estos existen en ambas posibilidades de la hidrología del cauce, a su vez es importante tener muy presente la geomorfología de los cauces ya que podríamos encontrarnos con eventos extraordinarios como los canales episódicos, la evidencia sugiere que al ser más variable el régimen de flujo de la corriente, mayor será el porcentaje de la carga total de sedimentos que probablemente sea transportada por flujos poco frecuentes. Como lo señalo Wolman y Miller (1960, p. 60)

Explicar brevemente la diversidad de climas y régimen de ríos que hay en México. Luego decir que en la región centro occidente de México se proponen tres categorías de ríos para analizar y más adelante proponer alternativas para su gestión.... Toda esta argumentación debe estar sustentada en literatura y documentos oficiales de Conagua

Ríos con descarga al mar. (Sierra-Costa)

Este caso ejemplifica como puede desarrollarse el fenómeno de los sedimentos en este tipo de Ríos como Lo De Marcos, ya que en estos Ríos sus regímenes de flujo de corriente son muy variables sobre todo ante ciertas eventualidades como lo son los ciclones.

Se advierte de que, en climas más secos, son las inundaciones más grandes y menos frecuentes las que dan forma al canal. (Kondolf-Bizzi, 2019).

Este tipo de Ríos Pequeños aluviales cercanos a la costa del pacifico son propensos a grandes exposiciones de energía dada la temporalidad ciclónica, estas condiciones pueden llegar a darse de 1.5 a 4 veces al año (SMN, 2022), a consecuencia de las grandes precipitaciones (investigar registros de grandes lluvias durante los eventos ciclónicos más significativos en la región) que generan estos fenómenos (Ciclones), estos se desarrollan en zonas ideales (Pendientes mayores al promedio) para la aparición de grandes Gastos en los Ríos que fomentan un gran arrastre de sedimentos y una modificación geomorfológica del cauce.

Ríos Urbanos

Actualmente dentro de la AMG solo existen dos estaciones hidrométricas operando, estación del Río Atemajac que hoy en día a causa de las modificaciones que ha tenido el cauce, es en parte un gran canal de agua pluvial y el río San Juan de Dios, este último se encuentra entubado por lo que solo se afora el agua superficial de una pequeña escorrentía.

Comúnmente los Ríos Pequeños al interior de estas grandes urbes fueron utilizados como descargas para aguas residuales y en consecuencia fueron entubadas como lo fue el Río San Juan de Dios, por otra parte, algunos otros de estos ríos se modificó completamente su geomorfología para terminar diseñados como canales para agua pluvial como lo es el Canal Atemajac.

Sin embargo existen varios casos de ríos urbanos que aún se encuentran entre las grandes zonas demográficas como lo es esta Ciudad, en consecuencia estos ríos urbanos se encuentran expuestos a las necesidades de cada zona de la ciudad, un ejemplo muy interesante es el afluente al arroyo seco, que denominaremos **Arroyo Frio** que nace en las laderas de Baganvilias al Este de Bosque de la Primavera dentro del Municipio Conurbado de Zapopan y continua por el Municipio Tlaquepaque hasta el Arroyo Seco con una extensión de 5.5 a 6 km en su cauce principal.

Así como el Afluente Arroyo el Tecolote un poco más al norte, estos experimentan transiciones en los ciclos hidrosociales de cada tramo distinto del cauce, comenzando en las laderas de Baganvilias y terminando en el delta con el Arroyo Seco.

En la dinámica aguas abajo en el cauce podemos encontrar varias descargas de aguas residuales que parece ser no están regularizadas, tiraderos clandestinos de escombros y basura.

1.3 Identificación de la(s) problemática(s)

El sistema de monitoreo de Ríos que existe actualmente fue desarrollado desde los tiempos de la Secretaria de Recursos Hidráulicos en 1946, es un sistema que solo toma en cuenta los grandes Ríos que existen en el País.

Metodología Actual de Monitoreo

Aforo en corrientes de Conagua.

El aforo en Ríos debe entenderse como el conjunto de acciones realizadas para conocer la cantidad de agua que escurre en una corriente, particularmente en este caso, la corriente de agua en los Ríos. Dicho lo anterior, se establece según la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y la ley que de ella emana “*Ley de Aguas Nacionales*” que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la institución federal que tiene como misión “preservar las aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes para su administración sustentable y garantizar la seguridad hídrica con la responsabilidad de los órdenes de gobierno y la sociedad en general” (www.gob.mx/conagua). Para ello se divide en varias Subdirecciones y en un gran número de gerencias. Para este caso, la gerencia más importante es la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR); es una dependencia de la Subdirección General Técnica y bajo su encargo se realizan muchos de los aforos de Ríos en México.

La importancia del aforo en Ríos para la GASIR es muy alta, dado que la información que se obtiene es fundamental para el manejo seguro y eficiente del agua. Entre otras, las siguientes son los beneficios del aforo:

- A) Pronóstico hidrológico.
- B) Manejo de vertedores ante avenidas.
- C) Determinación de la disponibilidad de aguas superficiales.

En cuanto al pronóstico hidrológico Pérez y Rubio (2012) indican que: “El pronóstico de caudales es usado para alertar a la población en áreas amenazadas por las probables inundaciones, además de alertar al personal encargado de la operación de estructuras de

control de avenidas, como es la operación de vertedores controlados por compuertas en presas. El pronóstico hidrológico también es utilizado en la operación de sistemas de irrigación, sistemas de abastecimiento de agua potable, plantas hidroeléctricas, etc.”. Los modelos de pronóstico requieren de datos de aforo y nivel del agua en Ríos. Aquí se muestra la utilidad de los gastos y caudales.

Según Bautista et al (2012), es importante conocer la disponibilidad de agua en regiones diversas que pueden ir desde la disponibilidad media total de un país hasta la disponibilidad de una subregión como una o varias cuencas hidrológicas. La importancia de su conocimiento redunda en “llevar a cabo acciones para una mejor administración del agua superficial”.

Mencionar la temporalidad del manual.

Manual de Aforo (SARH, CONAGUA, IMTA, 1992)

Se implica en diferentes tipos de métodos para aforar los caudales frecuentemente en corrientes naturales, como los Ríos que transportan el agua a las presas, canales de derivación o tramos de Ríos que conducen el agua. Estos cauces naturales o artificiales operan grandes gastos y tienen anchos que requieren de puentes o sistemas de cable-canastilla, para realizar los trabajos de aforo.

1. Métodos de Área y Velocidad.

Consiste en determinar el área en una sección transversal de la corriente por medio de sondeos y la velocidad de esta, por cualquiera de los métodos descritos a continuación.

1.1 Velocidad media del agua de una corriente

Esta magnitud depende de diferentes variables hidráulicas y de la forma en la que se desempeña el fenómeno. La velocidad máxima se presenta entre el 5% y el 25% de la profundidad del agua en el canal y el porcentaje aumenta con incrementos en la profundidad del canal. (Brater & King, 1976)

2.1 Área de la sección transversal de una corriente

Para determinar el gasto en una sección se requiere conocer el área hidráulica de la corriente la cual en caso de canales está bien definida. El área puede determinarse

utilizando sondas rígidas o flexibles, para determinar finalmente el área y mediante flotación calcular el gasto con la velocidad superficial de la corriente.

3.1 Aforo con Molinete

Constan en dos partes las hélices de aspas o copas que el movimiento del agua gira y un mecanismo permite contar el número de vueltas que esta da en un periodo determinado, con cada molinete se incluye una tabla de relación velocidad-número de revoluciones dada una ecuación única de cada molinete. Este tipo de aforo consiste en dividir una sección transversal para hacer una cantidad de aforos determinados según el ancho del cauce, con ello se calcula el gasto para esa sección y en conjunto mediante una suma promedio se calcula el gasto total.

En la región de estudio que se encuentra dentro del Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico se implementa el método de áreas y velocidades en el cual se calcula multiplicando el área en una sección transversal de una corriente por la velocidad que tiene la corriente aforada, por lo tanto, es la aplicación de la fórmula del Gasto (Q).

$$Q=AV$$

Donde:

Q: Gasto; V: Velocidad y A: Área de la sección

Para el uso de este método y ecuación es importante resaltar que se refiere a un área hidráulica y a una velocidad media, así mismo la velocidad de un flujo volumétrico no es constante, este cambia según la forma donde está contenida, sin embargo, al centro geométrico del flujo desde visto desde un corte transversal es donde se encuentra la velocidad máxima ya que las partículas de agua solamente rozan con otras

La velocidad media en una vertical, dentro de un error máximo del 3% y un error medio de 1%, se presenta a 0.6 de la profundidad. (King, 1993)

Estos procedimientos están diseñados para los aforos en los grandes Ríos, canales para el riego o suministro de agua potable, actualmente son los procedimientos vigentes en las 61 estaciones hidrométricas que están operativas en esta entidad

No.	Estación	Cuerpo	MUNICIPIO	CORRIENTE	COORDENADAS
1	Ajojucar	Río	Teocaltiche	Río Verde	21.5703 -102.4372
2	Ajojucar Canal	Canal	Teocaltiche	Canal Principal	21.5704 -102.4362
3	Atemajac	Canal	Zapopan	Canal Atemajac	20.7246 -103.3376
4	Atequiza II	Canal	Chapala	Canal Atequiza	20.3991 -103.0957
5	Bocas	Río	Mezquitic	Río Mezquitic-Río Chico	22.4062 -103.7247
6	Bolaños	Río	Bolaños	Río Bolaños	21.8315 -103.7832
7	Calerita	Río	Teocaltiche	Río Teocaltiche	21.4363 -102.5787
8	Chapala (Escala)	Laguna	Chapala	Lago de Chapala	20.2904 -103.2017
9	Cihuatlán	Canal	Cihuatlán	Canal Principal Margen derecha	19.2418 -104.5531
10	Cihuatlán	Canal	Cihuatlán	Canal Principal Margen Izquierda	19.2487 -104.5367
11	Cihuatlán II	Río	Cihuatlán	Río Marabasco	19.2372 -104.5549
12	Corona	Río	Chapala	Santiago	20.4002 -103.0945
13	Corrinchis II	Río	Mascota	Río Mascota	20.5021 -104.772
14	Presa Corrinchis	Presa	Mascota	Río Mascota	20.4799 -104.7801
15	Cuarenta II	Río	Lagos de Moreno	Río Lagos	21.4964 -101.7438
16	Presa El Cuarenta	Presa	Lagos de Moreno	Río Lagos	21.4962 -101.7359

17	Cuixtla	Río	San Cristóbal de la Barranca	Río Los Palitos	21.0522 -103.4324
18	El Carmesí	Arroyo	Casimiro Castillo	Río El Carmesí	19.6126 -104.5235
19	El Chiflón	Río	Casimiro Castillo	Río Purificación	19.6279 -104.5553
20	El Corcovado	Río	Autlán de Navarro	Río Ayutla	19.8507 -104.2837
21	El Cuale	Río	Puerto Vallarta	Cuale	20.5936 -105.2182
22	El Mezquite	Canal	Degollado	Canal Principal Margen derecha	20.3579 -102.2108
23	El Pinito	Río	Huejuquilla el Alto	Río Hujuquilla	22.6094 -103.9429
24	El Rodeo	Río	Atenguillo	Río Atenguillo	20.2523 -104.5903
25	El Rosario	Río	Tuxcacuesco	Río Tuxcacuesco	19.6486 -103.9835
26	El Salitre	Río	San Martin Hidalgo	Río El Salitre	20.5239 -103.8697
27	El Zapote	Canal	Totatiche	Río Tlaltenango	22.0653 -103.3991
28	El Zapote Ayotlán	Canal	Ayotlán	Canal Margen derecha	20.3428 -102.2588
29	Higuera Blanca II	Río	Tomatlán	Río San Nicolas	19.6524 -105.1827
30	Huascato Río	Río	Degollado	Río Huascato	20.4805 -102.2544
31	Huascato Canal Margen Izq.	Canal	Degollado	Canal Margen Izquierda (Salidas Presa La Pólvara)	20.488 -102.2331

32	Huascato Canal Margen Der	Canal	degollado	Canal Margen derecha (Salidas Presa La Pólvara)	20.4891 -102.2337
33	Km 0+010 Presa La Sauceda Marg. Der.	Canal	Lagos de Moreno	Canal Principal Margen derecha (Salidas Presa La Sauceda)	21.3596 -101.8361
34	Km 0+117.7 Presa La Sauceda Marg. Izq.	Canal	Lagos de Moreno	Canal Principal Margen Izquierda (Salidas Presa La Sauceda)	21.3596 -101.8366
35	Km 0+340 Presa La Sauceda Canal Principal	Canal	Lagos de Moreno	Canal Principal (Salidas Presa El Cuarenta)	21.4955 -101.7384
36	Km. 0 +490 Presa Corrinchis Canal Principal.	Canal	Mascota	Canal Principal Margen Izq. (Salidas Presa Corrinchis)	20.502 -104.7717
37	La Boquilla	Río	San Cristóbal de la Barranca	Río Juchipila	21.0508 -103.4038
38	La Cuña	Río	Yahualica de González Gallo	Río Verde	21.0057 -102.8227
39	La Desembocad a	Río	Puerto Vallarta	Río Mascota	20.7241 -105.1438

40	La Experiencia	Canal	Guadalajara	Río San Juan de Dios	20.7234 -103.3351
41	La Gloria	Río	Colotlán	Río Colotlán	22.0668 -103.3981
42	La Saucedá	Río	Lagos de Moreno	Río La Saucedá	21.3531 -101.852
43	La Vega Canal Marg. Izq.	Canal	Teuchitlán	Canal Principal Margen Izquierda	20.5813 -103.8526
44	La Vega Canal Marg. Der.	Canal	Teuchitlán	Canal Principal Margen derecha	20.5825 -103.8546
45	Presa La Vega	Río	Teuchitlán	Río Ameca	20.5961 -103.8454
46	La Vega II	Río	Teuchitlán	Río Ameca	20.5949 -103.8469
47	Lagos	Río	Lagos de Moreno	Río Lagos	21.3627 -101.9219
48	Los Granjenos	Río	Quitupán	Río Quitupán	19.9253 -102.8706
49	Maltaraña	Río	Jamay	Río Lerma	20.2288 -102.6549
50	Piedra Barrenada (Escala)	Laguna	Chapala	Lago de Chapala	20.2863 -103.3223
51	Pte. Ferrocarril	Río	Teuchitlán	Río Ahualulco- Río El Cocoliso	20.5914 -103.8596
52	Puente Ameca	Río	Ameca	Río Ameca	20.5434 -104.0464
53	San Cristóbal II	Río	San Cristóbal de la Barranca	Río Santiago	21.0373 -103.4243
54	San Gaspar	Río	Jalostotitlán	San Juan de Los Lagos	21.2822 -102.498

55	San Gregorio	Río	Gómez Farías	Río Cobianes - Río Los Chinos	19.8728 -103.337
56	Tenzompa	Río	Huejuquilla el Alto	Río Tenzompa	22.3776 -103.9248
57	Yurécuaro	Canal	Yurécuaro	Canal Margen Izquierda	20.338 -102.2449
58	Yurécuaro II Canal Marg. Izq. 2	Canal	Yurécuaro	Canal Margen Izquierda Numero 2	20.3325 -102.2547
59	Yurécuaro II	Río	Yurécuaro	Río Lerma	20.3432 -102.277
60	Zapotlanejo	Canal	Juanacatlán	Canal Zapotlanejo	20.4014 -103.0884
61	Zula	Río	Ocotlán	Río Zula	20.3952 -102.7294

En estas estaciones se genera información hidrométrica y climatológica que consiste en las medición y registro de una escala limnimetrica referenciada sobre el nivel medio del mar, condiciones climatológicas del área y aforos diarios a las 08:00 horas, estos aforos constan de cuatro segmentos para el monitoreo.

Sondeos:

- Puntos de sondeo.
- Profundidades en el punto.

Molinete

- Profundidad de la observación
- Revoluciones del molinete (Con este dato se calcula el gasto de la sección)
- Tiempos de la medición

Velocidad

- Cálculo de velocidades (Se calcula con la tabla de velocidades del molinete)
- Coeficiente

Sección

- Anchura de la sección

- Profundidad media
- Área de la sección
- Gasto Parcial

Finalmente, esta información es registrada en el Sistema de Información Hidrológica (SIH) de la CONAGUA a nivel Nacional.

Monitor de Sequia

Hoy más que nunca es necesario el correcto funcionamiento de las redes hidroclimatológicas en nuestro territorio, uno de los diversos productos que se pueden generar a partir de esta información es el Monitor de Sequias de la CONAGUA. A partir del año 2014 este monitor pudo implementarse a nivel nacional (SMN,2024)¹⁵. Un dato impactante es que al 15 de abril del 2024 de que el 80% de nuestro territorio se encuentre dentro de un estado de Sequia (CONAGUA, 2024).

Monitoreo en Pequeños Ríos

A nivel nacional se podría suponer que en Ríos Pequeños no existe un monitoreo oficial por parte de la CONAGUA. Por ejemplo, en los casos de Nayarit por parte de la Subdirección Técnica de la Dirección Local de Nayarit y en Jalisco por parte del Área de Hidrometría, Meteorología y Climatología de la Dirección Técnica en el Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacifico, ambas instancias son las encargadas por decreto Presidencial de monitorear los Ríos de la Región. Apegándonos estrictamente a la ley, en la Ley Aguas Nacionales reformada por última vez el 8 de mayo del 2023, donde se menciona en el Artículo Tercero Numeral XLVII la definición técnica-legal de un río:

XLVII. ...En los orígenes de cualquier corriente, se considera como cauce propiamente definido, el escurrimiento que se concentre hacia una depresión topográfica y forme una cárcava o canal, como resultado de la acción del agua fluyendo sobre el terreno.

La magnitud de la cárcava o cauce incipiente deberá ser de cuando menos de 2.0 metros de ancho por 0.75 metros de profundidad;

XLVIII. "Río": Corriente de agua natural, perenne o intermitente, que desemboca a otras corrientes, o a un embalse natural o artificial, o al mar;

(LEY DE AGUAS NACIONALES, 2023)

Bajo esta definición, oficialmente no existe un dato oficial, ni hay investigaciones o estimaciones que hayan determinado cuántos ríos hay en el territorio nacional. Tomando en cuenta que los estados de Jalisco y Nayarit tienen una superficie de 80,222 y 27,857 km² respectivamente y considerando que solamente hay 72 estaciones hidrométricas (Tabla 2, Anexar estaciones de Nayarit) se podría suponer que hoy en día se monitorea menos del 10% los ríos en estos dos estados (Mapa 1) Jalisco. En este sentido, existe un gran vacío de información elemental para determinar la situación actual de los ríos, sus aforos, gastos, niveles que está dentro de la norma (Anexar norma) que son la base para el cálculo de la disponibilidad de agua superficial.

1.4 Enfoque del problema

Es fundamental entender que es necesario saberse dentro de un marco legal y regulatorio que es muy sumamente rígido en este tipo de nuevas intervenciones en viejos procesos que se quedan muy cortos a las actuales necesidades del país como recursos, territorio y población. Por ello es necesario tener en cuenta el marco legal actual en nuestro país y desarrollar nuevos procesos con base en ellos. Por lo cual anexamos los siguientes extractos de La constitución y la Ley de Aguas Nacionales.

“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y

tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada.”

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Art. 27. 24 de enero de 2024 (México).

(Ley de Aguas Nacionales; Artículo 7 Inciso III, IV, V)

ARTÍCULO 7. Se declara de utilidad pública:

III. La instalación de los dispositivos necesarios para la medición de la cantidad y calidad de las aguas

nacionales y en general para la medición del ciclo hidrológico;

IV. El restablecimiento del equilibrio hidrológico de las aguas nacionales, superficiales o del subsuelo,

incluidas las limitaciones de extracción en zonas reglamentadas, las vedas, las reservas y el cambio en el uso del agua para destinarlo al uso doméstico y al público urbano; la recarga artificial de acuíferos, así como la disposición de agua al suelo y subsuelo, acorde con la normatividad vigente;

V. El restablecimiento del equilibrio de los ecosistemas vitales vinculados con el agua;

(Ley de Aguas Nacionales; Artículo 7 BIS Inciso II, III, IV)

ARTÍCULO 7 BIS. Se declara de interés público:

II. La descentralización y mejoramiento de la gestión de los recursos hídricos por cuenca hidrológica, a través de Organismos de Cuenca de índole gubernamental y de Consejos de Cuenca de composición mixta, con participación de los tres órdenes de gobierno, de

los usuarios del agua y de las organizaciones de la sociedad en la toma de decisiones y asunción de compromisos;

III. La descentralización y mejoramiento de la gestión de los recursos hídricos con la participación de los estados, del Distrito Federal y de los municipios;

IV. El mejoramiento permanente del conocimiento sobre la ocurrencia del agua en el ciclo hidrológico, en su explotación, uso o aprovechamiento y en su conservación en el territorio nacional, y en los conceptos y parámetros fundamentales para alcanzar la gestión integrada de los recursos hídricos, así como la realización periódica de inventarios de usos y usuarios, cuerpos de agua, infraestructura hidráulica y equipamiento diverso necesario para la gestión integrada de los recursos hídricos;

La actual regulación indica que es fundamental buscar y desarrollar nuevos procesos que permitan el monitoreo de estos cuerpos de agua para identificar su ciclo hidrológico y por ende procurar el restablecimiento del equilibrio de los ecosistemas vitales vinculados con el agua.

CrowdWater

Una alternativa para el monitoreo de los Ríos Pequeños con la cual hemos experimentado es la aplicación desarrollada por la Universidad de Zurich, CrowdWater la cual consiste en una plataforma en la cual se registra el nivel de un río al registrar en la plataforma una escala limnimétrica, Las escalas limnimétricas de forman parte del equipo básico de cualquier estación hidrométrica, su función es el monitoreo de un cuerpo de agua, en este se puede visualizar el nivel de agua sin embargo no se registra. Se puede elegir entre escalas limnimétricas rectas o inclinadas en función de si se montan en vertical o en un talud.

REFERENCIAS

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](https://datos.gob.mx/busca/dataset/derechos-por-explotacion-uso-o-aprovechamiento-de-aguas-nacionales-segun-zonas-de-disponibilidad)

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>

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.

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.

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.>

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>

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 socationature commoning and translocal struggles for water justice. *Journal of Peasant Studies*, 50(3), 1125–1156. <https://doi.org/10.1080/03066150.2022.2120810>

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>

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

CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS.

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

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>

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>

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>

LEY DE AGUAS NACIONALES (2023).

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>

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

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>

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.

(2002).

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

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

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>

Programa Nacional Hídrico 2020-2024 Resumen Comisión Nacional del Agua. (s/f).
Reforma, Ú. (s/f). REGLAMENTO INTERIOR DE LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA.