



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Ximena López Martínez

Asesor:

Dr. Clemente Rodríguez Cuevas

Co- asesor:

Dr. Franklin Manuel Torres Bejarano

Sinodales:

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán

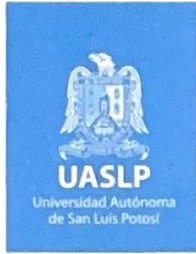
Dr. Hermann Rocha Escalante

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2023



“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



20 de julio de 2023

**ING. XIMENA LÓPEZ MARTÍNEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Clemente Rodríguez Cuevas y Franklin Manuel Torres Bejarano**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 20 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Introducción.

1. Antecedentes y descripción del área de estudio.
2. Estudio Hidrológico de la cuenca de la presa de San José.
3. Obtención de la topo-batimetría en el vaso y zona de estudio.
4. Sistemas Urbanos de drenaje sostenible.
5. Modelación hidrodinámica del río Santiago, tramo paseo de la Presa de San José.

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T O


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo.
*etn.

“UASLP, más de un siglo educando con autonomía”

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi director de tesis el Dr. Clemente Rodríguez, quien con sus conocimientos, apoyo y paciencia me guió incondicionalmente, a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

A mi co- asesor el Dr. Franklin Torres, por darme la oportunidad de trabajar con el, por su asesoría, conocimientos brindados y por enseñarme a ver al mundo desde otra perspectiva.

A mis asesores, el Dr. Rodolfo Cisneros y el Dr. Hermann Rocha por brindarme los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación de mi tesis. También por su tiempo y disposición para la preparación del proyecto.

Este logro se lo debo a mi madre, por que a pesar de mis tropiezos siempre ha estado para sanar mis heridas y hacerme caminar de nuevo, a mi padre quien me hizo darme cuenta de que nada en esta vida tiene validez sino lo haces con amor y a mi hermano, quien ha sido la principal fuente de inspiración para seguir con mis estudios, y crecer personalmente.

A mis amigos incondicionales, Daniela Uresti y Pedro García por estar presente en los momentos más difíciles y siempre darme sus consejos. También a mis compañeros de posgrado, en especial a Juan Félix por su amistad y sus conocimientos compartidos en cada momento.

A Hugo Sánchez, por su apoyo, motivación, paciencia y amor.

Finalmente estoy profundamente agradecida con Dios y con la vida, por darme esta oportunidad de superarme cada día más.

Este trabajo también es de todos ustedes.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
HIPÓTESIS	13
1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCION DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
1.1 SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)	14
1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	14
1.2.1 MACRO LOCALIZACIÓN.....	14
1.2.2 MICRO LOCALIZACIÓN	16
1.3 PRESA DE SAN JOSÉ	18
1.3.1 CRONOLOGÍA.....	18
1.3.2 DATOS TÉCNICOS DE LA PRESA DE “SAN JOSÉ”	22
1.3.3 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO.....	23
1.4 GEOLOGÍA	25
1.5 CARACTERÍSTICAS Y TIPO DE SUELO	26
1.6 CLIMA	27
1.7 HIDROLOGÍA SUPERFICIAL	28
1.7.1 REGIÓN HIDROLÓGICA 37, EL SALADO (RH 37)	29
1.7.2 AGUA SUPERFICIAL	30
1.8 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA	31
1.8.1 AGUA SUBTERRÁNEA	31
1.9 FLORA	32
1.10 FAUNA	33
1.11 RELIEVE	34
1.12 CONDICIONES ACTUALES DE LA PRESA DE SAN JOSÉ	35
1.12.1 CALIDAD EN EL AGUA SUPERFICIAL.....	37
2 ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DE LA PRESA DE SAN JOSÉ	48
2.1 INTRODUCCIÓN	48
2.1.1 CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA	48
2.1.2 CICLO HIDROLÓGICO URBANO	49
2.2 DEFINICIÓN DE CUENCA	50
2.2.1 GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA	51
2.2.2 PARTEAGUAS DE LA CUENCA	51
2.2.3 ÁREA DE LA CUENCA.....	53
2.2.4 PERÍMETRO DE LA CUENCA	54
2.2.5 FORMA DE LA CUENCA	54
2.2.6 CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.....	55
2.2.7 LOCALIZACIÓN DEL CAUCE PRINCIPAL	55
2.2.8 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	56
2.2.9 PERFIL DEL CAUCE PRINCIPAL.....	57

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.2.10 ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA DE ESCURRIMIENTO (CN).....	58
2.3 CLIMATOLOGÍA	60
2.4 PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA.....	61
2.4.1 MÉTODO DE CURVAS ISOYETAS	61
2.4.2 MÉTODO DE LOS POLIGONOS DE THIESSEN.....	62
2.4.3 ESTACIÓN BASE	64
2.4.4 FACTOR DE TRANSPORTE.....	64
2.4.5 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA	65
2.4.6 PRECIPITACIÓN MÁXIMA 24 HORAS EN LA CUENCA.....	66
2.4.7 DISTRIBUCIÓN LOG-PEARSON III	68
2.4.8 DISTRIBUCIÓN GAMMA INCOMPLETA	69
2.4.9 DISTRIBUCIÓN GUMBEL SIMPLE.....	70
2.4.10 ELECCIÓN DE LA MEJOR DISTRIBUCIÓN.....	72
2.5 CURVAS I – D – TR.....	73
2.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	76
2.6.1 FÓRMULA DE KIRPICH.....	77
2.6.2 FÓRMULA DEL SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS)	77
2.6.3 MÉTODO DE CHOW	78
2.7 CURVAS P – D – TR.....	78
2.8 GASTO- ESCURRIMIENTO.....	80
2.8.1 LLUVIA EN EXCESO (PE)	81
2.8.2 COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.....	82
2.8.3 INTENSIDAD	82
2.8.4 MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO TRIANGULAR (HUT)	82
2.8.5 MÉTODO RACIONAL	85
2.8.6 MÉTODO DE VEN TE CHOW.....	86
2.8.7 COMPARACIÓN DE GASTOS	88
2.9 BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL	89
2.9.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	90
2.9.2 ESCORRENTÍA	93
2.9.3 INFILTRACIÓN	93
<u>3. OBTENCIÓN DE LA TOPO-BATIMETRÍA EN EL VASO Y ZONA DE ESTUDIO</u>	<u>96</u>
3.1 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	96
3.1.1 TIPOS DE LEVANTAMIENTOS.....	96
3.1.2 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL RELIEVE DEL TERRENO	97
3.2 SISTEMAS DE REFERENCIA Y PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA.....	97
3.3 FOTOGRAMETRÍA.....	99
3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA	99
3.3.2 FOTOGRAMETRÍA AÉREA	101
3.3.3 VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT)	102
3.3.4 SOFTWARE DE PLANEACIÓN.....	104
3.4 GEORREFERENCIACIÓN	106
3.4.1 PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE (PCT).....	107
3.4.2 SISTEMAS SATELITALES DE NAVEGACIÓN GLOBAL (GNSS)	107
3.4.3 RECEPTORES GNSS	108
3.5 LEVANTAMIENTO DE LOS PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE	108
3.5.1 EQUIPO TRIMBLE R8S.....	108

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.5.2 DESCARGA DE DATOS DE LA RED GEODÉSICA NACIONAL ACTIVA DEL INEGI	111
EN BASE A ESTO SE INGRESA A LA PÁGINA WEB DE LA RED GEODÉSICA NACIONAL ACTIVA DE INEGI: HTTPS://WWW.INEGI.ORG.MX/APP/GEO2/RGNA/	112
3.5.3 POST – PROCESAMIENTO DE LOS PCT	112
3.5.4 POST – PROCESAMIENTO DE FOTOGRAMETRÍA.....	117
3.6 BATIMETRÍA.....	124
3.6.2 CAMPAÑA DE MEDICIÓN	130
3.6.3 INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA EN CAMPAÑA DE MEDICIÓN	134
<u>4. SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE</u>	<u>139</u>
4.1 INTRODUCCIÓN	139
4.2 AGENDA 2030 PARA UN DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU).....	140
4.3 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	141
4.3.1 SITUACIÓN EN COLOMBIA.....	145
4.4 ANTECEDENTES NACIONALES	148
4.5 FUNCIONAMIENTO DE LOS SUDS.....	150
4.5 TIPOS DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE APLICABLES AL ESTUDIO	151
4.5.1 SISTEMAS DE TECHOS VERDES O CUBIERTAS VEGETADAS	151
4.5.2 DRENES FILTRANTES	153
4.5.3 PAVIMENTOS PERMEABLES	154
4.5.4 PARQUES LINEALES O INUNDABLES	155
4.5.5 ESTANQUE DE DETENCIÓN	157
4.6 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE	158
4.6.1 ELECCIÓN DEL SUDS PARA LA ZONA DE ESTUDIO	163
4.7 DISEÑO DEL PARQUE LINEAL	163
4.7.1 TOPOGRAFÍA	164
4.7.2 DISEÑO ARQUITECTÓNICO.....	165
4.7.3 DISEÑO PLUVIAL.....	167
4.8.4 RENDERS.....	170
<u>5. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL RÍO SANTIAGO, TRAMO PASEO DE LA PRESA DE SAN JOSÉ</u>	<u>173</u>
5.1 MODELOS NUMÉRICOS.....	173
5.1.1 CLASIFICACIÓN DE MODELOS	173
5.1.2 ECUACIONES PARA MODELOS NUMÉRICOS	178
5.2 HEC- RAS	182
5.2.2 PROCESO PARA LA MODELACIÓN EN HEC-RAS.....	182
5.2.3 ESCENARIOS PROPUESTOS.....	188
5.3 EFDC EXPLORER	192
5.3.2 PROCESOS PARA MODELAR EN EFDC EXPLORER 8.4.....	193
5.3.5 ESCENARIOS PROPUESTOS.....	197
<u>CONCLUSIONES</u>	<u>205</u>

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

REFERENCIAS208

ANEXOS213

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Estado de San Luis Potosí en la República Mexicana. (México Real,2023.)	15
Figura 1. 2. Estados que colindan con San Luis Potosí.	16
Figura 1. 3. Municipios de San Luis Potosí. (INEGI, 2018).	17
Figura 1. 4. Delimitación del parque urbano de la presa de San José.	18
Figura 1. 5. Figura 1-Representa la forma del río, Figura 2-Planta general de la presa, Figura 3-Elevación de la presa, Figura 4-Corte longitudinal de la presa y Figura 5-Perspectiva geométrica.	19
Figura 1. 6. Colapso de la presa.	20
Figura 1. 7. Área Natural Protegida” Paseo de la Presa.	21
Figura 1. 8. Parque Urbano.	21
Figura 1. 9. Vertedor en la margen derecha.	23
Figura 1. 10. Vertedor en la margen izquierda.	24
Figura 1. 11. Geología en la zona de estudio. (INEGI, 2021).	25
Figura 1. 12. Tipos de suelo en la zona de estudio. (INEGI, 2021).	26
Figura 1. 13. Temperaturas y precipitaciones en la zona de estudio. (INEGI, 2021).	28
Figura 1. 14. Regiones Hidrológicas del estado de San Luis Potosí.	29
Figura 1. 15. Cuerpos de agua presentes en el estado de San Luis Potosí.	30
Figura 1. 16. Arroyo “Río Santiago”.	31
Figura 1. 17. Pozos de extracción de agua cerca de la zona de estudio.	32
Figura 1. 18. Tipo de vegetación en la zona de estudio. (INEGI,2021).	33
Figura 1. 19. Especies dominantes en San Luis Potosí.	34
Figura 1. 20. Relieve del estado de San Luis Potosí.	35
Figura 1. 21. Presencia de lirio en el vaso de la presa de San José.	36
Figura 1. 22. Multiparámetro HANNA HI-98194.	43
Figura 1. 23. Ubicación de los puntos de muestreo. (INEGI, 2023).	45
Figura 2. 1. Ciclo hidrológico del agua. (Aparicio Mijares, 1989).	49
Figura 2. 2. Esquema del ciclo hidrológico urbano (Marsalek et al., 2014).	50
Figura 2. 3. Tipos de cuencas. Ilustración 266	51
Figura 2. 4. Cuenca de San José.	52
Figura 2. 5. Parteaguas de la cuenca de la Presa de San José.	53
Figura 2. 6. Formas de la cuenca.	54
Figura 2. 7. Orden de corrientes.	56
Figura 2. 8. Perfil del cauce principal.	57
Figura 2. 9. Ubicación de las estaciones climatológicas (CONAGUA).	60
Figura 2. 10. Curvas Isoyetas.	62
Figura 2. 11. Método de Poligonos de Thiessen.	63
Figura 2. 12. Gráfica de comparativa de precipitaciones en la estación base y la cuenca. (CLICOM).	65
Figura 2. 13. Gráfico de Log Pearson III.	69
Figura 2. 14. Gráfico de Gamma Incompleta.	70
Figura 2. 15. Gráfico de Gumbel Simple.	71
Figura 2. 16. Curvas de intensidad, duración y período de retorno.	76
Figura 2. 17. Curvas de precipitación, duración y período de retorno.	80
Figura 2. 18. Componentes geométricos del HUT. (Campos-Aranda, 2010).	83
Figura 2. 19. Hipótesis fundamental de la fórmula racional.	85
Figura 2. 20. Factor de reducción del pico Z, con base en la relación t/tr (SCT).	87
Figura 2. 21. Hidrograma de Crecientes.	89
Figura 2. 22. Esquema del Balance Hídrico. (Ordoñez, 2011).	90
Figura 2. 23. Balance Hídrico de la zona de estudio.	95
Figura 3. 1. Sistema de referencia terrestre. (Silvio De Freitas ,2020).	98
Figura 3. 2. Restituidor analógico (Quirós Rosado, 2014).	100

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San

José, San Luis Potosí”

<i>Figura 3. 3. Restituidor analógico con sistemas computacionales (Quirós Rosado, 2014).</i>	101
<i>Figura 3. 4. VANT Phantom 4 Pro con control.</i>	102
<i>Figura 3. 5. Interfaz de DroneDeploy para un plan de vuelo de la zona de estudio.</i>	105
<i>Figura 3. 6. Checklist e inicio del vuelo en la app.</i>	106
<i>Figura 3. 7. Interfaz de los ocho vuelos planificados.</i>	106
<i>Figura 3. 8. Equipo TRIMBLE.</i>	109
<i>Figura 3. 9. TRIMBLE TSC3.</i>	109
<i>Figura 3. 10. Interfaz del software TBC.</i>	113
<i>Figura 3. 11. Configuración del sistema de coordenadas del proyecto.</i>	114
<i>Figura 3. 12. Pestaña para importar los datos del levantamiento.</i>	114
<i>Figura 3. 13. Ventana para verificación de PCT.</i>	115
<i>Figura 3. 14. Vista del plano de los PCT y la estación base.</i>	116
<i>Figura 3. 15. Ventana de procesar líneas base.</i>	117
<i>Figura 3. 16. Importar las fotos.</i>	118
<i>Figura 3. 17. Fotos y puntos de control agregados.</i>	119
<i>Figura 3. 18. Ventana de orientar fotos.</i>	120
<i>Figura 3. 19. Ventana de selección de sistema de coordenadas.</i>	120
<i>Figura 3. 20. Ventana de crear nube de puntos densa.</i>	121
<i>Figura 3. 21. Clasificación de nube de puntos.</i>	122
<i>Figura 3. 22. Crear malla.</i>	123
<i>Figura 3. 23. Modelo digital de elevaciones.</i>	123
<i>Figura 3. 24. Relación del efecto Doppler-velocidad.</i>	125
<i>Figura 3. 25. Equipo RiverRay ADCP y GPS.</i>	127
<i>Figura 3. 26. Equipo FURUNO. (Elvia, 2013).</i>	129
<i>Figura 3. 27. Antena FURUNO. (Elvia, 2013).</i>	129
<i>Figura 3. 28. Equipo inversor de corriente.</i>	130
<i>Figura 3. 29. Apoyo de protección civil. (Elvia, 2013).</i>	131
<i>Figura 3. 30. Aguas arriba de la Presa de San José. (Elvia, 2013).</i>	131
<i>Figura 3. 31. ADCP instalado en el hydroboard. (Elvia, 2013).</i>	132
<i>Figura 3. 32. Transecto 000. (Elvia, 2013).</i>	133
<i>Figura 3. 33. Transecto 001. (Elvia, 2013).</i>	133
<i>Figura 3. 34. Transecto 002. (Elvia, 2013).</i>	134
<i>Figura 3. 35. Transecto 003. (Elvia, 2013).</i>	134
<i>Figura 3. 36. Interfaz de WinRiverII.</i>	135
<i>Figura 3. 37. Ventana de selección de archivo.</i>	135
<i>Figura 3. 38. Visualización de los transectos guardados en el archivo.</i>	136
<i>Figura 3. 39. Encender el modo Classic ASCII Output.</i>	136
<i>Figura 3. 40. Reprocesar transecto.</i>	137
<i>Figura 3. 41. Corrida de transecto.</i>	137
<i>Figura 3. 42. Cuatro transectos que conforman la batimetría del vaso de la Presa de San José.</i>	138
<i>Figura 4. 1. Ejemplos de infraestructura denominada SUDS.</i>	140
<i>Figura 4. 2. Objetivos de desarrollo sostenible. (ONU).</i>	141
<i>Figura 4. 3. Can Cortada (Barcelona). (Roberto Soto F.).</i>	142
<i>Figura 4. 4. Bon Pastor (Barcelona). (Roberto Soto F.).</i>	143
<i>Figura 4. 5. Calle Nou Barris (Barcelona). (Roberto Soto F.).</i>	143
<i>Figura 4. 6. SUDS en Santander. (Andrés-Valeri at el.-2016).</i>	144
<i>Figura 4. 7. Ejemplo de infraestructura verde de New Jersey, EEUU. (Kandyce Perry).</i>	144
<i>Figura 4. 8. SUDS en Benaguasli (Valencia). (GreenBlueManagement).</i>	145
<i>Figura 4. 9. Ronda del Río Sinú.</i>	146
<i>Figura 4. 10. Proceso constructivo del Ecoparque etapa 1.</i>	147
<i>Figura 4. 11. Condiciones actuales de la vía del tren.</i>	148
<i>Figura 4. 12. Recuperación de cauce en Jalisco, México.</i>	148
<i>Figura 4. 13. Elementos para la instalación de un SCALL en CDMX.</i>	149

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San

José, San Luis Potosí”

<i>Figura 4. 14. Cauce del Río Chiquito, vista hacia aguas abajo. (SOCIAL,C., 2016).</i>	149
<i>Figura 4. 15. Uni techo en la Facultad de Ingeniería. (Facultad de Ingeniería, 2018).</i>	150
<i>Figura 4. 16. Ejemplo de un techo verde. (Pau Segui).</i>	152
<i>Figura 4. 17. Ejemplo de un dren filtrante. (SuD Sostenible, 2017).</i>	153
<i>Figura 4. 18. Ejemplo de las capas de un pavimento permeable.</i>	155
<i>Figura 4. 19. Áreas recreativas de un parque lineal.</i>	156
<i>Figura 4. 20. Ejemplo de parque lineal.</i>	157
<i>Figura 4. 21. Ejemplo de un estanque de detención. (Ana Abellán, 2022).</i>	157
<i>Figura 4. 22. Plano Topográfico de la Etapa 1.</i>	164
<i>Figura 4. 23. Plano Topográfico de la Etapa 2.</i>	165
<i>Figura 4. 24. Plano de diseño arquitectónico de la Etapa 1.</i>	166
<i>Figura 4. 25. Plano de diseño arquitectónico de la Etapa 2.</i>	167
<i>Figura 4. 26. Plano de diseño pluvial de la Etapa</i>	168
<i>Figura 4. 27. Plano de diseño pluvial de la Etapa 2.</i>	169
<i>Figura 4. 28. Plano de especificaciones del alcantarillado para áreas verdes.</i>	169
<i>Figura 4. 29. Vista 3D del alcantarillado para áreas verdes.</i>	170
<i>Figura 4. 30. Localización de la Etapa 1 en el camino de la presa de San José.</i>	171
<i>Figura 4. 31. Etapa 1.</i>	171
<i>Figura 4. 32. Área de comida en la Etapa 1.</i>	172
<i>Figura 4. 33. Parte de la cancha deportiva, área verde y área de comida de la Etapa 2.</i>	172
<i>Figura 5. 1. Ejemplo de un modelo numérico. (GeoQuantics).</i>	173
<i>Figura 5. 2. Esquema de un modelo hidráulico unidimensional (X).</i>	174
<i>Figura 5. 3. Esquema de un modelo hidráulico bidimensional (X, Y).</i>	175
<i>Figura 5. 4. Esquema de un modelo hidráulico tridimensional (X, Y, Z).</i>	176
<i>Figura 5. 5. Interfaz de Hec-Ras.</i>	182
<i>Figura 5. 6. Crear nuevo proyecto y guardar como.</i>	183
<i>Figura 5. 7. Crear un nuevo terreno.</i>	183
<i>Figura 5. 8. Establecer proyección.</i>	184
<i>Figura 5. 9. Terreno creado, ventana de geometría.</i>	184
<i>Figura 5. 10. Perímetro y malla creada.</i>	185
<i>Figura 5. 11. Región detallada/refinada.</i>	185
<i>Figura 5. 12. Trazado de condiciones de frontera.</i>	186
<i>Figura 5. 13. Cargar la geometría realizada.</i>	187
<i>Figura 5. 14. Calibración del modelo Hec-Ras.</i>	188
<i>Figura 5. 15. Máxima altura de agua en un día para un período de retorno de 10 años.</i>	189
<i>Figura 5. 16. Velocidades en un día para un período de retorno de 10 años.</i>	189
<i>Figura 5. 17. Máxima altura de agua en un día para un período de retorno de 50 años.</i>	190
<i>Figura 5. 18. Máxima altura de agua en dos días para un período de retorno de 50 años. Ilustración</i>	191
<i>Figura 5. 19. Velocidades en un día para un período de retorno de 50 años.</i>	192
<i>Figura 5. 20. Interfaz del EFDC Explorer.</i>	193
<i>Figura 5. 21. Añadir la topo-batimetría.</i>	194
<i>Figura 5. 22. Proyección de la zona de estudio.</i>	195
<i>Figura 5. 23. Condiciones de frontera.</i>	195
<i>Figura 5. 24. Pestaña de Timing.</i>	196
<i>Figura 5. 25. Pestaña de Hydrodynamics.</i>	197
<i>Figura 5. 26. Escenarios para los períodos de retorno de 2, 5 y 10 años.</i>	198
<i>Figura 5. 27. Visualización para un período de retorno de 2 años.</i>	199
<i>Figura 5. 28. Visualización para un período de retorno de 5 años.</i>	200
<i>Figura 5. 29. Visualización para un período de retorno de 10 años.</i>	200
<i>Figura 5. 30. Hidrogramas para los diferentes escenarios.</i>	201
<i>Figura 5. 31. Precipitación para un Tr de 50 años en 2D.</i>	203
<i>Figura 5. 32. Visualización 3D para una precipitación con un Tr de 50 años en las primeras horas.</i>	203
<i>Figura 5. 33. Visualización 3D para una precipitación con un Tr de 50 años en 24hrs.</i>	204

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Datos técnicos de la presa de San José. _____	22
Tabla 1. 2 Gastos de los vertederos de la presa de San José. _____	24
Tabla 1. 3. Conductividad del agua _____	40
Tabla 2. 1. Clasificación de las cuencas por su tamaño (Campos-Aranda, 1992). _____	54
Tabla 2. 2. Características geomorfológicas del cauce principal. _____	57
Tabla 2. 3. Grupos hidrológicos del suelo (SCS). _____	58
Tabla 2. 4. Estimación del número CN por grupo de suelo. _____	59
Tabla 2. 5. Precipitaciones medias de las estaciones cercanas a la zona de estudio. _____	61
Tabla 2. 6. Comparativa de precipitaciones máximas anuales en la estación base y la cuenca. _____	65
Tabla 2. 7. Comparativa de precipitaciones máximas de 24 horas en la estación base y la cuenca. _____	66
Tabla 2. 8. Obtención de K de acuerdo al coeficiente de oblicuidad. _____	68
Tabla 2. 9. Obtención de u de acuerdo con el parámetro de forma a. _____	70
Tabla 2. 10. Errores calculados de cada método para la cuenca en estudio. _____	72
Tabla 2. 11. Lluvias probables para la cuenca en estudio. _____	72
Tabla 2. 12. Precipitaciones convertidas a 24 horas. _____	74
Tabla 2. 13. Cociente entre la lluvia de 1h y la de 24 h. _____	74
Tabla 2. 14. Valores de intensidad de la lluvia para 60 minutos. _____	75
Tabla 2. 15. Valores obtenidos aplicando el método de Cheng. _____	75
Tabla 2. 16. Tiempo de concentración según Kirpich. _____	77
Tabla 2. 17. Tiempo de concentración según SCS. _____	78
Tabla 2. 18. Tiempo de concentración según Chow. _____	78
Tabla 2. 19. Valores del coeficiente de Kuishiling. _____	79
Tabla 2. 20. Valores de la precipitación en exceso para la cuenca en estudio. _____	81
Tabla 2. 21. Cálculo de C e I para la cuenca en estudio. _____	82
Tabla 2. 22. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (HUT). _____	84
Tabla 2. 23. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (Método Racional). _____	86
Tabla 2. 24. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (Método Ven Te Chow). _____	88
Tabla 2. 25. Comparación de Gastos. _____	88
Tabla 3. 1. Características técnicas del Phantom 4 Pro. _____	103
Tabla 3. 2. Horario para estaciones de la zona centro. _____	111
Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas de RiverRay. _____	127
Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas de equipo GPS. _____	129
Tabla 5. 1. Volumen del área bajo la curva. _____	202

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano mal planificado es uno de los aspectos que imprime mayor presión al ambiente a nivel mundial, debido a la expansión de la mancha urbana de las ciudades de una manera descontrolada, creando una impermeabilización del suelo en áreas que anteriormente eran cubiertas de vegetación y suelo natural, alterando los diferentes ecosistemas. *(INEGI, 2021)*.

El desarrollo o crecimiento urbano se debe al crecimiento poblacional y a la migración de zonas rurales a urbanas. Según la ONU (Organización de las Naciones Unidas), en 1950 se estimaba una población mundial de 2.600 millones de personas, en 2011 se estimaba de 7.000 millones de personas. *(ONU, 2011)*.

Obteniendo como consecuencia cambios en el ciclo hidrológico, sobre todo reduciendo la infiltración del agua que ocasiona el aumento del volumen y en los gastos, obligando a las poblaciones a la construcción de obras civiles que protejan a los habitantes y a sus bienes de daños por inundaciones. Dado que el comportamiento del ciclo hidrológico en una cuenca urbanizada se ve alterado, se han propuesto a nivel mundial diversas alternativas denominadas SUDS (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible) ya que estos se determinan como el futuro de nuestro recurso hídrico.

Este fenómeno se ve reflejado en diferentes países, incluido México, específicamente en el estado de San Luis Potosí cuya tasa de crecimiento en los últimos 10 años fue del 18%. *(INEGI, 2021)*. Conforme a su crecimiento urbano, en San Luis Potosí se han presentado inundaciones que han afectado directa o indirectamente a la población.

Por lo anterior, es que se deben de buscar implementar, diferentes alternativas para tratar de disminuir las inundaciones dentro de la ciudad, de una manera agradable para el medio ambiente.

Una de las alternativas que se sugiere dentro de este estudio es analizar los antecedentes y las condiciones actuales de la zona de estudio, implementando un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible y de esta manera generar un modelo hidrodinámico que permita representar las características y el comportamiento de las relaciones del sistema a partir de capacidades analíticas predictivas correspondientes del cuerpo de agua en la gestión de los considerables cambios que se han tenido a lo largo de los años.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Objetivo general

Diseñar un SUDS (Sistema Urbano de Drenaje Sostenible) que permita mejorar las condiciones actuales del paseo de la presa de San José.

Objetivos específicos

- Determinar las condiciones hidrológicas e hidráulicas actuales del vaso y de la presa de San José.
- Conocer el uso, tipo de suelo y topografía actual del Paseo de la Presa.
- Identificar y proponer los SUDS que mejor se adapten a la zona de estudio.
- Generar un modelo hidrodinámico del Río Santiago, dentro de la zona de estudio.

Hipótesis

Mediante la implementación de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible se podrá aprovechar cierta cantidad de agua que vierte la presa de San José, así como un mejoramiento paisajista, ambiental y social.

1. ANTECEDENTES Y DESCRIPCION DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son elementos superficiales, permeables, preferiblemente vegetados, integrantes de la estructura urbana-hidrológica-paisajística y previos al sistema de saneamiento. Están destinados a filtrar, retener, transportar, acumular, reutilizar e infiltrar al terreno el agua de lluvia, de forma que no degraden e incluso restauren la calidad del agua que gestionan. (*Forbes, 2017*).

La implementación de un SUDS permite crear ciudades más respetuosas con el ciclo natural del agua al restaurar la situación previa a su proceso urbanizador, reduciendo su impermeabilización, creando espacios vegetados y ciudades con un mayor grado de naturación, biodiversidad y más permeables al agua de lluvia. (*Joya, 2015*).

Considerar el agua de lluvia como un recurso natural valorizable, que se capta y se gestiona permite preservar y/o restaurar su calidad, permitiendo así usos posteriores tales como el riego, llenado de inodoros, recarga del nivel freático, y su vertido al cauce nuevamente.

1.2 Localización del área de estudio

1.2.1 Macro Localización

El Estado Libre y Soberano de San Luis Potosí es una de las 32 entidades federativas de la República Mexicana. (Figura 1.1).

Se encuentra en la parte centro-oriental del país. Representa el 3.12% del territorio nacional y su capital es la ciudad de San Luis Potosí.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1.1. Estado de San Luis Potosí en la República Mexicana. (México Real,2023.)

Las coordenadas geográficas extremas del estado de San Luis Potosí son: al norte $24^{\circ} 29'$, al sur $21^{\circ} 10'$ de latitud norte; al este $98^{\circ} 20'$ y al oeste $102^{\circ} 18'$ de longitud oeste. Colinda al norte con Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas; al este con Tamaulipas y Veracruz-Llave; al sur con Hidalgo, Querétaro de Arteaga y Guanajuato; al oeste con Zacatecas (INEGI, 2018). (Figura 1.2).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

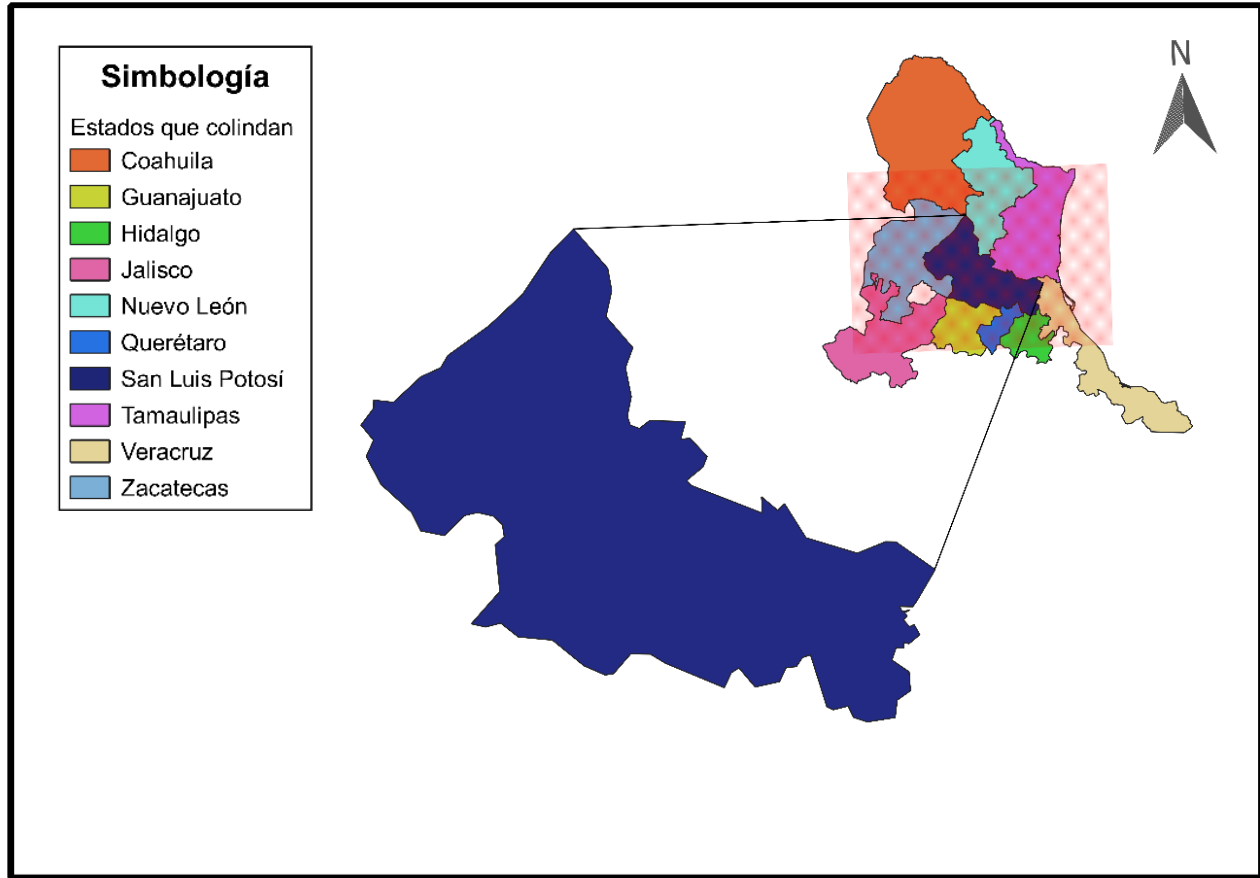


Figura 1.2. Estados que colindan con San Luis Potosí.

1.2.2 Micro Localización

El estado de San Luis Potosí se encuentra dividido en 58 municipios, incluyendo la capital. (Figura 1.3).

La capital de San Luis Potosí se encuentra localizado en la zona centro del estado, la cabecera municipal tiene las siguientes coordenadas: 100° 58' de longitud oeste y 22° 09' de latitud norte, con una altura de 1860 metros sobre el nivel del mar (msnm). Sus límites son: al norte Moctezuma y Villa de Arista; al este VillaHidalgo, Soledad de Graciano Sánchez, Cerro de San Pedro y Zaragoza; al sur Villa de Reyes; al oeste Villa de Arriaga, Mexquitic de Carmona y Ahualulco. (INEGI, 2018).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

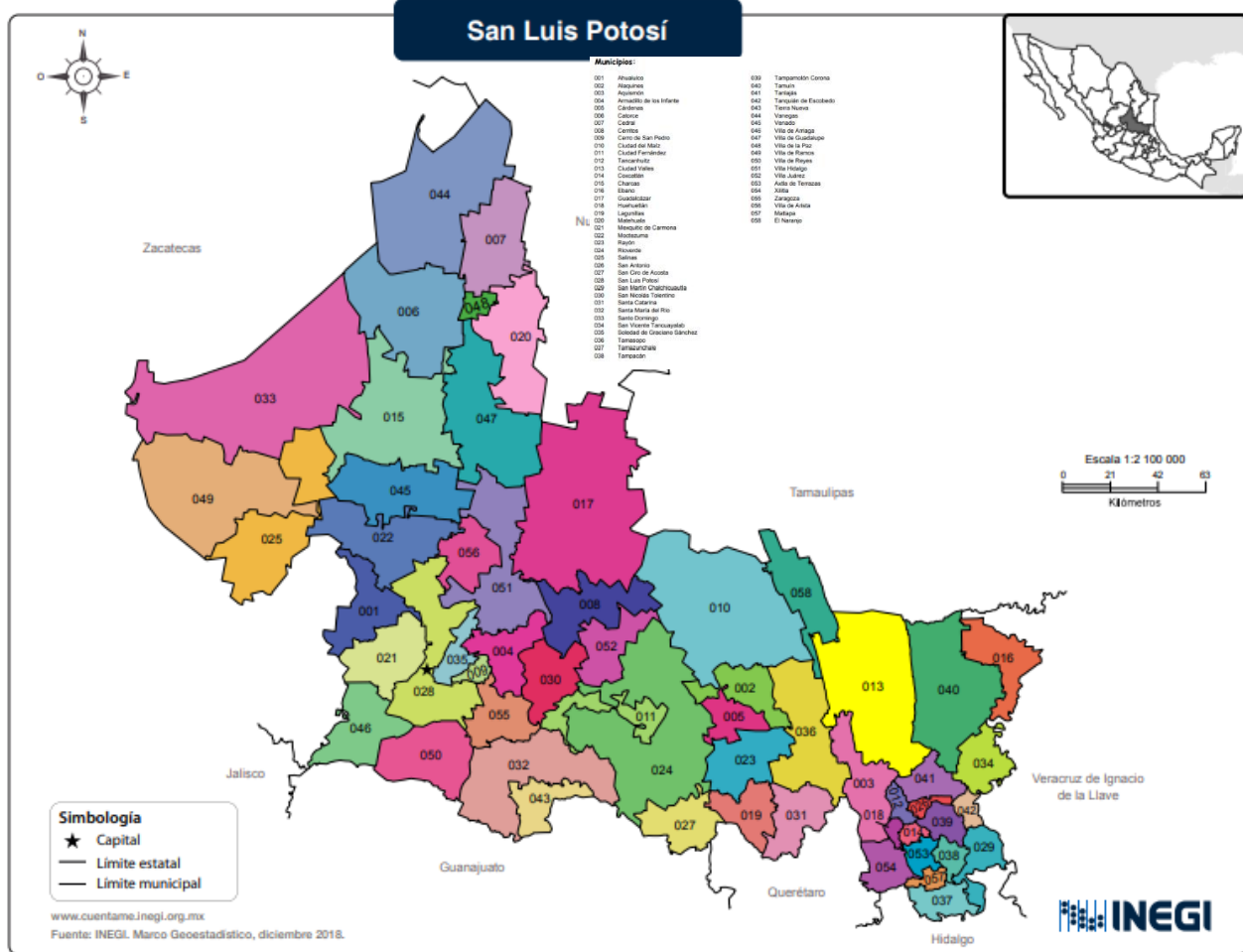


Figura 1.3. Municipios de San Luis Potosí. (INEGI, 2018).

La superficie total del municipio es de 1,472.10 km² lo cual representa el 2.3% del territorio estatal.

El parque urbano de la Presa de San José se localiza aguas abajo de la cortina de la Presa de San José, a 7.145 km al poniente de capital de San Luis Potosí. (Figura 1.4)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Parque Urbano "Paseo de la Presa de San José" en San Luis Potosí

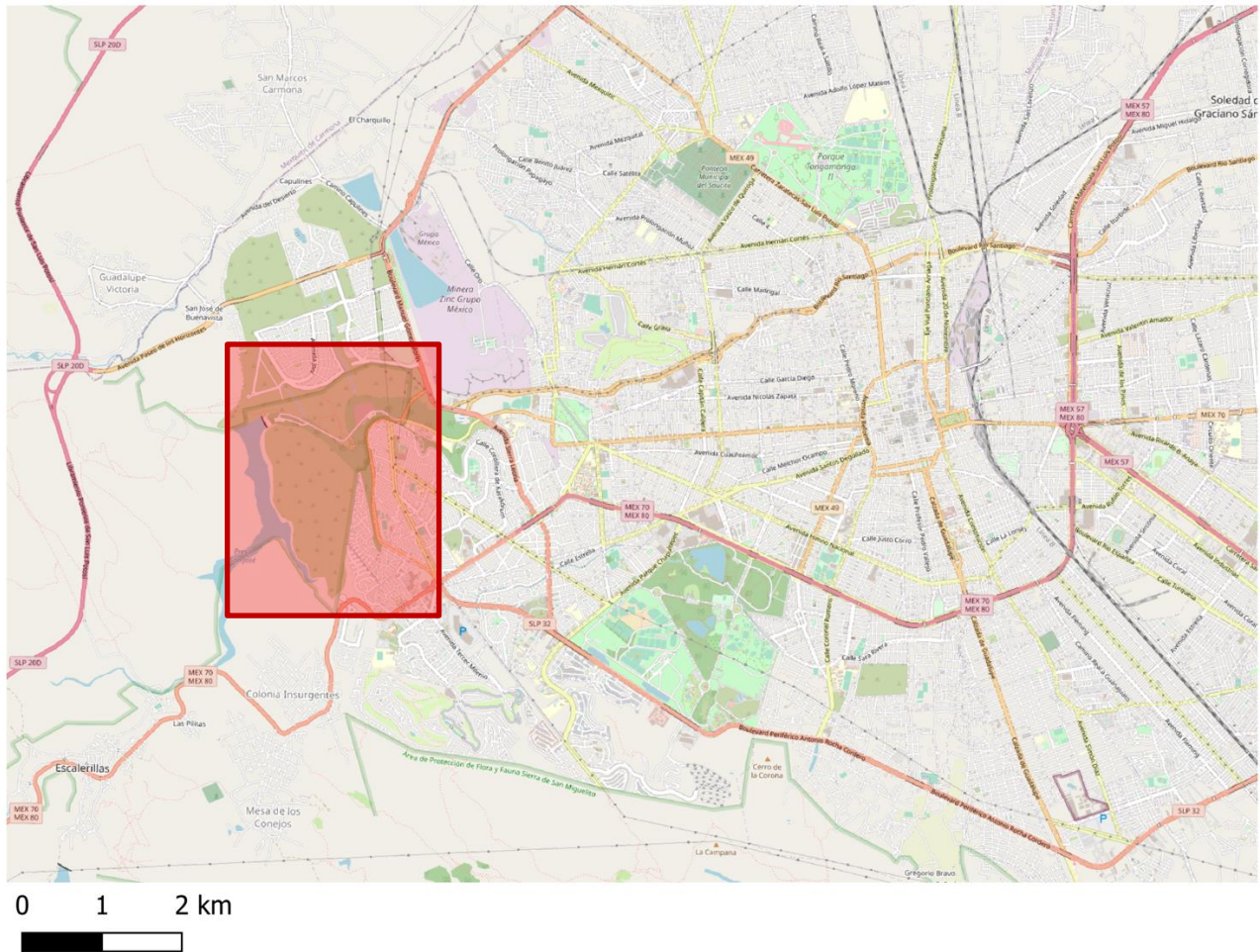


Figura 1. 4. Delimitación del parque urbano de la presa de San José.

1.3 Presa de San José

El principal objetivo por el que fue construida la presa de San José es, el de control de avenidas y abastecimiento para uso público urbano. Esta presa es considerada como parte del patrimonio del estado de San Luis Potosí.

1.3.1 Cronología

De una manera cronológica se presentan los acontecimientos más importantes de la presa de San José. (Blanco, 2014).

1872.- Se realizó el mapa topográfico de la Cañada de Escalerillas por el ingeniero Antonio Espinosa y Cervantes. (Blanco, 2014).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1840.- Se realizó un plano para formar una presa en el rancho de San José, San Luis Potosí (Blanco, 2014). (Figura 1.5)

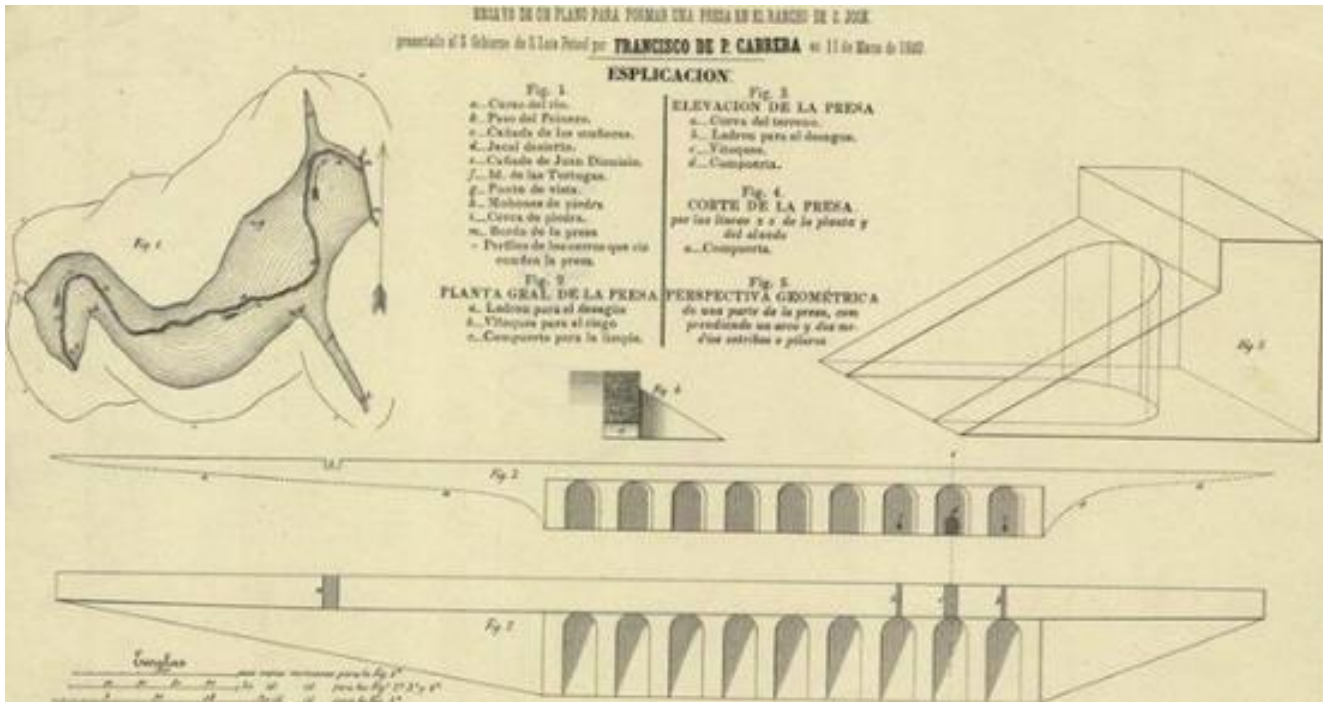


Figura 1. 5. Figura 1-Representa la forma del río, Figura 2-Planta general de la presa, Figura 3-Elevación de la presa, Figura 4-Corte longitudinal de la presa y Figura 5-Perspectiva geométrica.

1894.- En marzo de dicho año en medio de una alharaquenta algarabía formada por trabajadores y cientos de personas, se inició el trabajo para abrir las cepas en viva roca y así comenzar la construcción de la cortina de la presa de San José. Bajo la dirección de los ingenieros Guillermo Reitter y Luis Barragán. (Blanco, 2014).

1903.- Es inaugurada la presa el día 15 de septiembre, por el gobernador del estado, el ingeniero Blas Escontría y Bustamante. (Blanco, 2014).

1933.- Uno de los muros de la cortina colapsó a causa de la gran tormenta y los fuertes vientos presentados, dejando escapar una cantidad aproximada de 6 millones de barriles de agua (Figura 1.6). Donde demasiadas personas perdieron la vida y su patrimonio. (Blanco, 2014).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1. 6. Colapso de la presa.

1992.- El licenciado Ernesto Castellanos Velarde elabora el documento nombrado como “Cultura, recreación y deporte San Luis 400 Camino a la presa de San José” que se presenta al presidente municipal ingeniero Mario Leal Campos. Inicio del Patronato Pro-Regeneración del camino a la presa de San José. (*Blanco, 2014*).

1996.- Es declarada “**Área Natural Protegida**” bajo la modalidad de Parque Urbano, denominado “**Paseo de la Presa**”. Con un área aproximada de 334 hectáreas, por medio de las siguientes autoridades: Gobernador del Estado el licenciado Horacio Sánchez Unzueta; C. Secretario General de Gobierno el licenciado Fernando Silva Nieto; C. Secretario de Obras Públicas Antonio Esper Bujaidar y el Coordinador General de Ecología y Gestión Ambiental el Dr. Pedro Medellín Milán. (*Blanco, 2014*).

1998.- Se le da entrada con boleta serie “V” y número 32984, en el Registro Público a la propiedad “Área Natural Protegida” bajo la modalidad de Parque Urbano, denominado “**Paseo de la Presa**” con la inscripción número 112 a fojas 263 del tomo 2 de Desarrollo Urbano (*Blanco, 2014*).Figura 1.7 y Figura 1.8)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1. 7. Área Natural Protegida” Paseo de la Presa.



Figura 1. 8. Parque Urbano.

2000.- Nace el Sistema de Áreas Naturales Protegidas del Estado de San Luis Potosí y se crea el Consejo Estatal del mismo. Donde el Gobernador del Estado el Lic. Fernando Silva Nieto expide el decreto que indica como un Área Natural Protegida de competencia estatal al Parque Urbano “Paseo de la Presa”. (Blanco, 2014).

2006.- Se realizó una rehabilitación de la presa de San José. (Blanco, 2014).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1.3.2 Datos técnicos de la presa de “San José”

Consiste en una cortina tipo gravedad de mampostería con un eje semicircular, formando un arco vertical que constituye solidez en la estructura. La mampostería usada en su construcción está unida con un mortero de cal hidráulica y revestida en ambos parámetros con sillería de cantera. (CONAGUA, 2013).

La longitud de la corona es de 171.85 metros, con una altura de 32 metros y un ancho de 5.70 metros. El talud aguas arriba en dirección vertical y el de aguas abajo arqueado por contrafuertes de la misma forma. (CONAGUA, 2013).

Por parte de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) se obtuvo una tabla con los datos técnicos más relevantes de la presa de San José. (Tabla 1.1).

Tabla 1. 1 Datos técnicos de la presa de San José.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Subdirección General de Administración de Agua Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos Subgerencia de Seguridad de Presas Censo de Presas	
Generalidades	
Nombre: Presa de San José	Municipio: San Luis Potosí
Org. Responsable: Municipio de San Luis Potosí	Tipo de obra: Pública
Localización: 7.145 km al oriente de capital de San Luis Potosí	Material: Mampostería
Coordenadas Geográficas: Lat. 22°09'00" Long. 101°03'15"	
Propósito: Agua potable y control de avenidas	
Corriente: Río Santiago	Construcción
Departamento Constructor: Gobierno del Estado	Inicia: 1896
Org. de Control: CAN- Ayuntamiento	Termina: 1903
Vía de Acceso: Carretera	
Num. de Diques: Cero	
Datos de cortina	
Altura total: 32.00 metros	Taludes de Arco Parabólico
Altura al lecho: 32.00 metros	Aguas arriba: 0.1:1
Longitud de la cortina: 171.85 metros	Aguas abajo:
Ancho de la corona: 5.70 metros	
Niveles (m.s.n.m.)	
Corona:	Obra de toma
N.A.M.E.: 1957.73	Tipo: Tubería a presión
N.A.M.O.: 1953.78	Gasto Normal: 250 litros por segundo
Cresta:	Gasto Máximo: 22 metros cúbicos por segundo
N.A.MIN.: 1937	Cuenca
	Area: 265 km ²
Vertedor	Vaso de la presa
Tipo: Cresta libre (2) Recto en planta	Capacidad de azolves: Un millón de metros cúbicos
Longitud de la cresta: 22.99 metros de los dos	Capacidad Util: Siete millones de metros cúbicos
Carga Máxima: 265 metros	Capacidad de control: Cuatro millones de metros cúbicos
Capacidad de desfogue: 120 m ³ /seg	Superalmacenamiento: Un millón de metros cúbicos
Nº de compuertas: Cero	Capacidad total: Nueve millones de metros cúbicos

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

La dirección local de San Luis Potosí realizó en el año 2006 un contrato de obra pública como la rehabilitación de la ladera izquierda del canal de conducción del vertedor de excedencias, ya que se encontraba erosionado en la zona de desplante y a punto de colapsar el muro de conducción izquierdo. A demás de la zona de descarga de dicho canal hasta la entrega al cauce, se incluyó dentro de los trabajos de rehabilitación el cambio de dos de las válvulas de servicio de las obras de toma superiores, la canalización del arroyo que provocó la erosión del vertedor y un muro de mampostería para control de derrumbes en la margen izquierda del vertedor dentro de la zona del empotramiento de la cortina. (CONAGUA, 2013).

Los siguientes subcapítulos servirán para conocer las generalidades del área de estudio determinado anteriormente como Parque Urbano, para poder implementar un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible de la manera óptima posible.

1.3.3 Funcionamiento Hidráulico

Cuenta con cuatro cajas de válvulas con compuertas de mecanismo manual tipo tubería a presión, con dos válvulas de 18” de diámetro en cada una (de servicio y de emergencia), se encuentran situadas a diferentes niveles de elevación (dos tomas altas y dos bajas), se tiene acceso por las escalinatas protegidas con barandal de tubo, dos de ellas. Generalmente se opera la compuerta superior a la margen derecha que alimenta al canal de construcción con una capacidad de 300 litros por segundo, el cual transporta el agua hasta la planta de tratamiento de Los Filtros, extrayendo un gasto de 100 a 250 litros por segundo, dependiendo del volumen que se tenga almacenado en la presa. (CONAGUA, 2013).

La obra de excedencia consiste en dos vertedores laterales de cresta libre con cimacio, el que se ubica en la margen derecha es recto de 7.37 metros de longitud de la cresta y el de margen izquierda es recto de 15.62 metros de longitud de la cresta. (Figura 1.9 y Figura 1.10)



Figura 1.9. Vertedor en la margen derecha.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

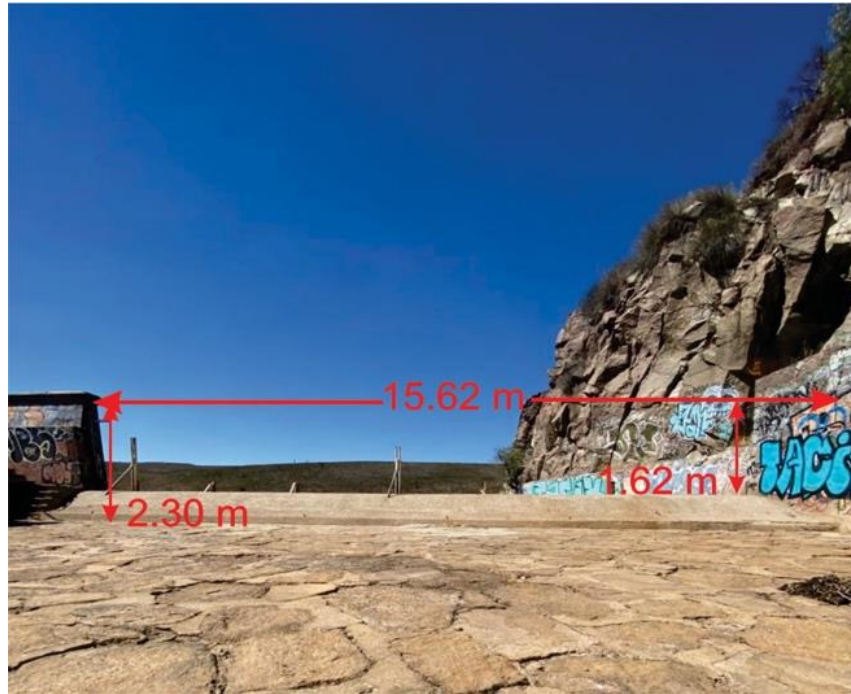


Figura 1.10. Vertedor en la margen izquierda.

Con las dimensiones obtenidas se procede a realizar el calculo de los gastos que estos vertedores permiten. Se pueden observar en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Gastos de los vertedores de la presa de San José.

Vertedero izquierdo		Vertedero derecho	
Ancho:	7.37 m	Ancho:	15.62 m
Altura:	1.80 m	Altura:	2.30 m
Altura libre:	1.03 m	Altura libre:	1.62 m
$Q = C * L * h^{3/2}$		$Q = C * L * h^{3/2}$	
C=	2.00 m	C=	2.00 m
L=	7.37 m	L=	15.62 m
h=	1.03 m	h=	1.62 m
h ^{3/2} =	1.045335831	h ^{3/2} =	2.06192337
Q= 15.40825015 metros cubicos		Q= 64.4144862 metros cubicos	
Qtotal=79.8227 metros cubicos			

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1.4 Geología

La capital potosina y sus alrededores está dentro de un marco estructural clásico de evolución de una fosa volcano-tectónica, la cual, a medida que se iba formando, se rellenó de material piroclástico, deslices de talud y material sedimentario continental. Durante el Oligoceno se presentaron fallamientos que propiciaron la salida de un volumen importante de material piroclástico en un lapso relativamente corto, lo que sugiere la existencia regional de cámaras magmáticas someras. (INEGI, 2021).

La geología en la zona de estudio se conforma por roca ígnea de tipo extrusivo de edad Terciaria (Ts). (Figura 1.11)

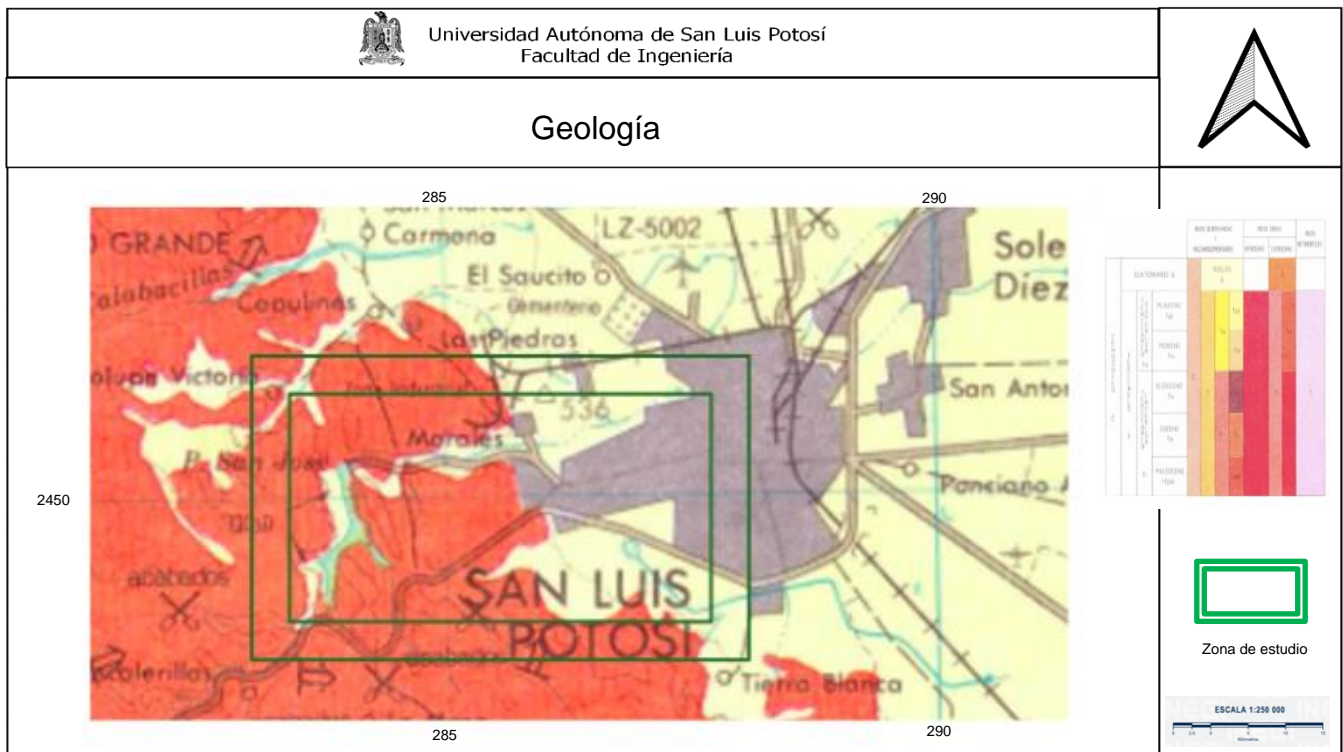


Figura 1. 11. Geología en la zona de estudio. (INEGI, 2021).

Las rocas ígneas son también conocidas como rocas magmáticas y son todas aquellas que se forman por solidificación de un material rocoso, caliente y móvil denominado magma, este proceso es llamado cristalización ya que resulta del enfriamiento de los minerales y del entrelazamiento de todas sus partículas. (INEGI, 2021).

En específico en la zona de estudio este tipo de rocas son formadas por una acumulación y consolidación de lava, la cual se refiere al magma que se enfría en la superficie al ser expulsado por algún volcán. Si el enfriamiento se produce, al menos una parte, en la superficie o a escasa profundidad, la roca resultante se denomina volcánica o extrusiva. Estas a su vez se subdividen en familias a partir de diferentes texturas, asociaciones minerales y modo de ocurrencia. (INEGI, 2021).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1.5 Características y tipo de suelo

La región sur y oeste del municipio está ocupada por plegamientos cerriles como la sierra de San Miguelito, configurada por zonas volcánicas. Los suelos aluviales ausentes de roca circundan la capital del estado, todo el centro y el sureste del territorio, extendiéndose hacia el norte. Al oriente se encuentran reolitas sedimentarias del tipo conglomerado macizo montañoso de la Sierra de Álvarez.

Su uso potencial es pecuario, pero también se explota en la actividad agrícola. (INEGI, 2021).

Dentro de la zona de estudio se cuenta con suelos de tipo Litosol y Regosol, en menor y mayor cantidad respectivamente. (Figura 1.12)

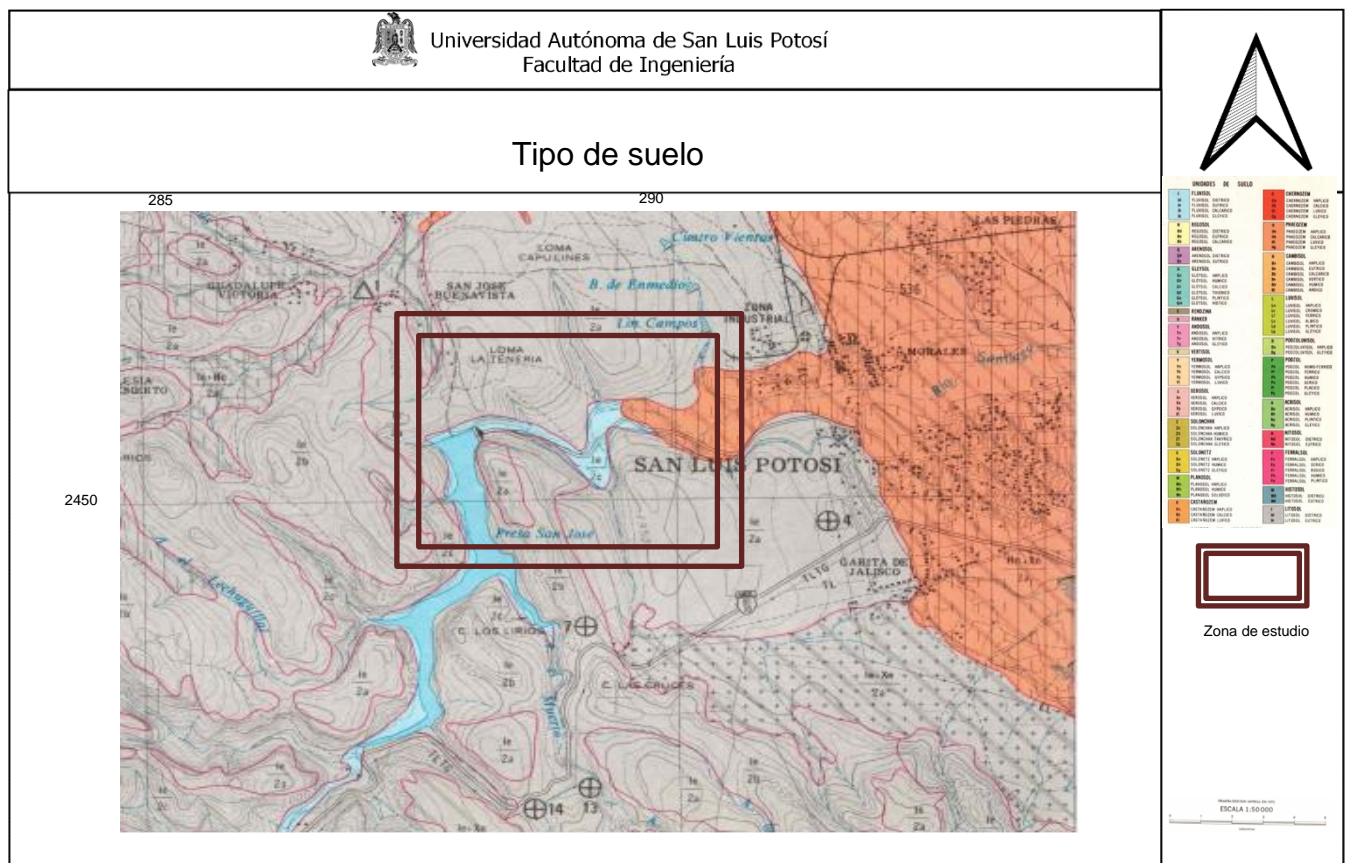


Figura 1.12. Tipos de suelo en la zona de estudio. (INEGI, 2021).

Los Litosoles, que se conocen en otras clasificaciones como Leptosoles y Redzinas, son suelos muy delgados, pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Estos suelos se encuentran en todos los tipos climáticos (secos, templados, húmedos) y son particularmente comunes en las zonas montañosas y planicies calizas superficiales. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difíciles de trabajar. Aunado a ello, el calcio que contienen puede inmovilizar los nutrientes minerales, por lo que su uso agrícola es limitado sino se utilizan técnicas apropiadas, es preferible mantenerlos con su vegetación original. Cuentan con una capa superficial rica en materia orgánica, pero también pueden presentar problemas de manejo

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

agrícola por la escasa retención de humedad debido a lo somero del suelo y alta cantidad de afloramientos rocosos. (INEGI, 2021).

Por otro lado, los Regosoles en general son suelos muy jóvenes que se desarrollan sobre material no consolidado, de colores claros y pobres en materia orgánica. Se encuentran en todos los climas, con excepción de zonas de permafrost, y en todas las elevaciones, son particularmente comunes en las regiones áridas, semiáridas y montañosas. Muchas veces se asocian con los Leptosoles y con afloramientos de roca o tepetate. (INEGI, 2021).

Los Regosoles de zonas áridas tienen escasa vocación agrícola, aunque su uso depende de su profundidad, pedregosidad y fertilidad, por lo que sus rendimientos son variables (FAO,2001). Existen dos variantes que son los Regosoles eútricos y calcáricos que se caracterizan por tener una capa ócrica, que cuando se retira la vegetación, se vuelve dura y costrosa lo que impide la penetración del agua hacia el subsuelo y dificulta el establecimiento de las plantas. Esta combinación (escasa cubierta vegetal y baja infiltración de agua al suelo) favorece la escorrentía superficial y con ello, la erosión.

1.6 Clima

La distribución climática del municipio se caracteriza por su parte sur, seco templado; en el norte, seco semi cálido, al centro, muy seco templado. (INEGI, 2021).

Su precipitación media anual es de 372.9 mm. La temperatura media anual es de 16.8°C, con una máxima absoluta de 35°C y una mínima absoluta de 7°C, la temperatura cálida comprende de marzo a octubre y el período de temperatura fría de noviembre a febrero. (INEGI, 2021).

Dentro de la zona de estudio se tiene una distribución climática de tipo semiseco templado. Con una precipitación total anual de aproximadamente 350 mm y una temperatura dentro de los rangos de 16.1°C a 17.6°C. (Figura 1.13)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

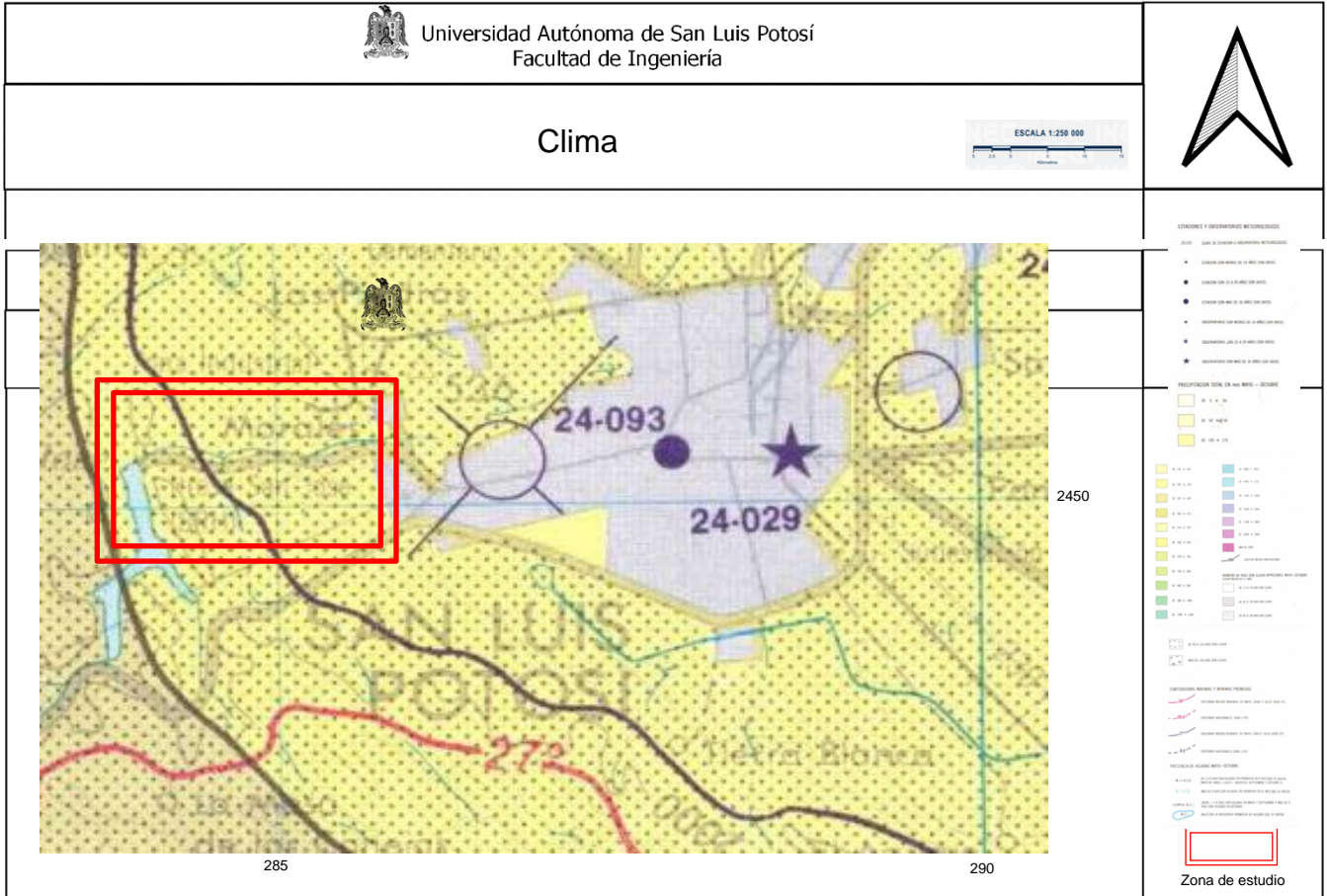


Figura 1.13. Temperaturas y precipitaciones en la zona de estudio. (INEGI, 2021).

1.7 Hidrología Superficial

El estado de San Luis Potosí se encuentra surcado por múltiples ríos y corrientes de agua que definen tres regiones hidrológicas y sus denominaciones son derivadas de los principales ríos que las componen. El Salado, Pánuco y Lerma-Santiago (INEGI, 2021). (Figura 1.14)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

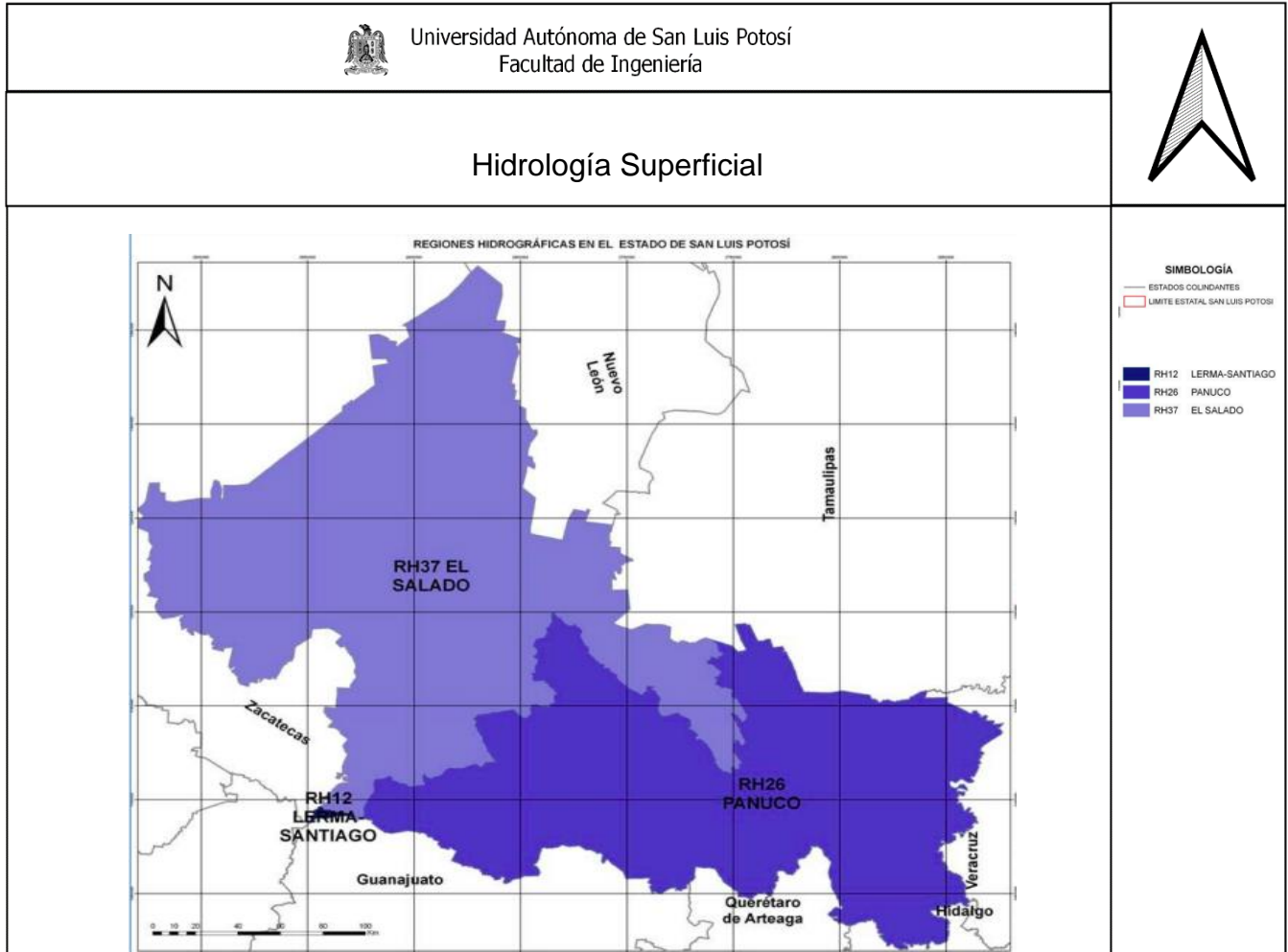


Figura 1.14. Regiones Hidrológicas del estado de San Luis Potosí.

1.7.1 Región Hidrológica 37, El Salado (RH 37)

Por su extensión corresponde a una de las vertientes interiores más importantes del país, se ubica en la altiplanicie septentrional, en toda la porción noroccidental del estado; su extensión dentro del territorio potosino corresponde al 54.2% de la superficie total. Como podemos observar en la Figura 1.14.

En el estado se encuentran parte de seis cuencas que corresponden a esta región, tales como la Cuenca (B) Matehuala, Cuenca (C) Sierra de Rodríguez, Cuenca (E) Fresnillo-Yesca, Cuenca (F) San Pablo, Cuenca (H) Sierra Madre y Cuenca (G) Presa San José. (INEGI, 2021).

La Cuenca (G) Presa de San José se encuentra en la región centro-occidente de la entidad y cubre 17.95% de su extensión. En esta cuenca destacan algunas sierras por la gran cantidad de corrientes superficiales de carácter intermitente. (INEGI, 2021).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1.7.2 Agua superficial

Los principales cuerpos de agua presentes en el estado son: presa el Peaje, presa el Potosino, presa de San José, Cañada del Lobo, Estanque de Sedimentación y entre otros. (Figura 1.15)

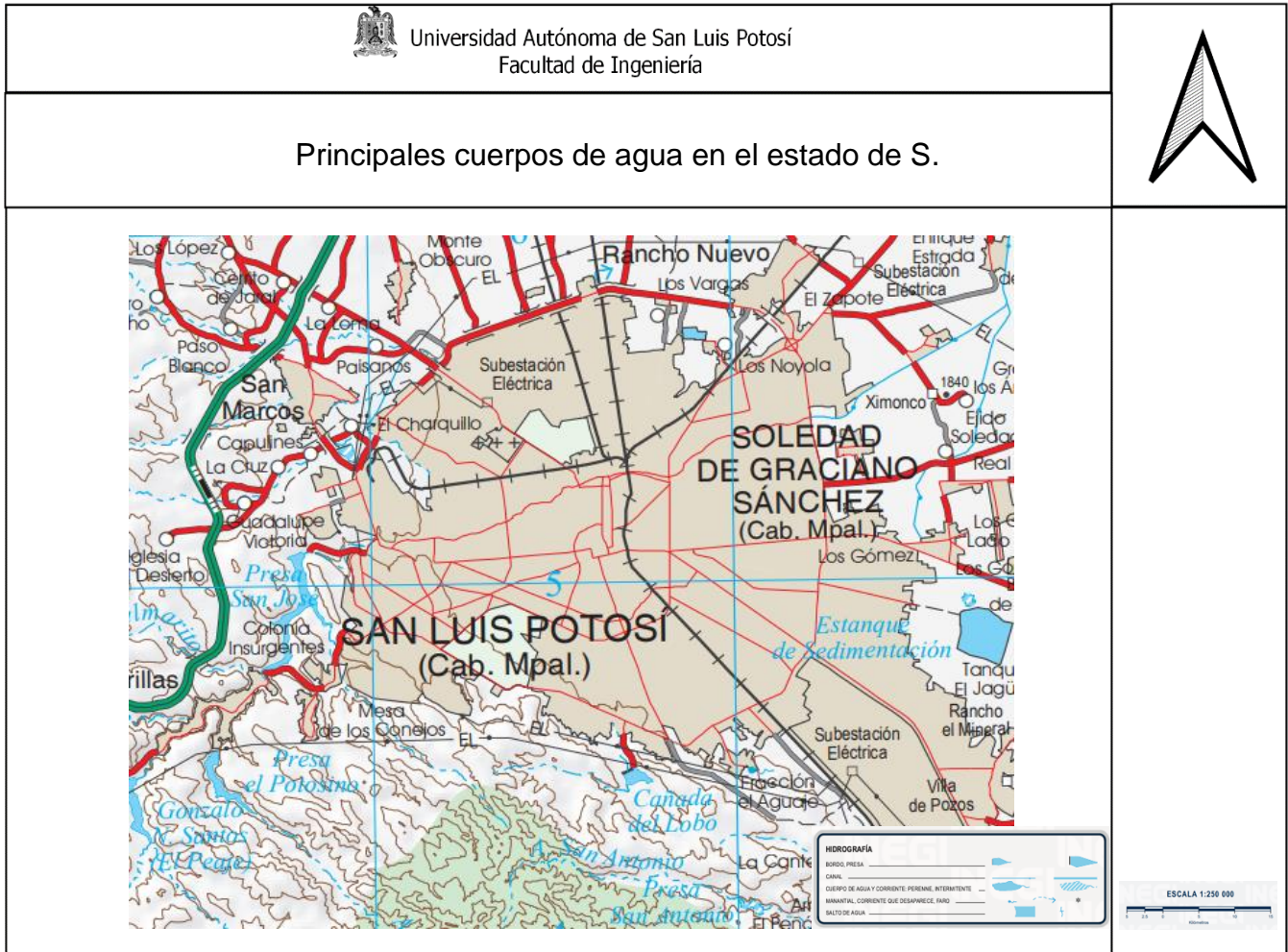


Figura 1.15. Cuerpos de agua presentes en el estado de San Luis Potosí.

La presa Gonzalo N. Santos (El Peaje), la presa del potosino y la presa de San José, ayudan a manejar los escurrimientos dentro de la cuenca en estudio. Donde la última en mención es la encargada de controlar a los mismos.

Fue conocida en el siglo XIX como cuenca del río Santiago para posteriormente ser llamada cuenca de la presa de San José. Y actualmente es considerada una de las más importantes de la zona metropolitana del estado potosino. (CONAGUA, 2018).

Así mismo se denomina como “Río Santiago” al arroyo que finalmente conduce el escurrimiento de esta presa. (Figura 1.16).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1. 16. Arroyo “Río Santiago”.

1.8 Hidrología Subterránea

1.8.1 Agua subterránea

En cuanto a las aguas subterráneas la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) tiene delimitados 19 acuíferos en la entidad, de los cuales 10 están sobreexplotados. Se puede determinar que el estado presenta un balance hídrico positivo, es decir, que la recarga supera a la extracción, con una disponibilidad de 79 millones de metros cúbicos. (CONAGUA, 2018).

En cuanto al acuífero del Valle de San Luis Potosí, se encuentra sobreexplotado a una proporción de 2 a 1, ya que de los 150 millones de metros cúbicos de agua que se extraen anualmente para su agrícola, industrial y público, solamente se recargan 75 millones de metros cúbicos. Además, el nivel del agua del acuífero profundo desciende de entre 3 a 4 metros al año, mientras que las perforaciones de nuevos pozos se construyen a una profundidad de 700

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

metros, con altos costos de inversión, mantenimiento y operación, principalmente de energía eléctrica. (CONAGUA, 2018).

El 75.8% de la población, se abastece de agua gracias al sistema de abasto subterráneo por 129 pozos que producen 2,917.5 litros de agua por segundo (CONAGUA, 2018). (Figura 1.17)

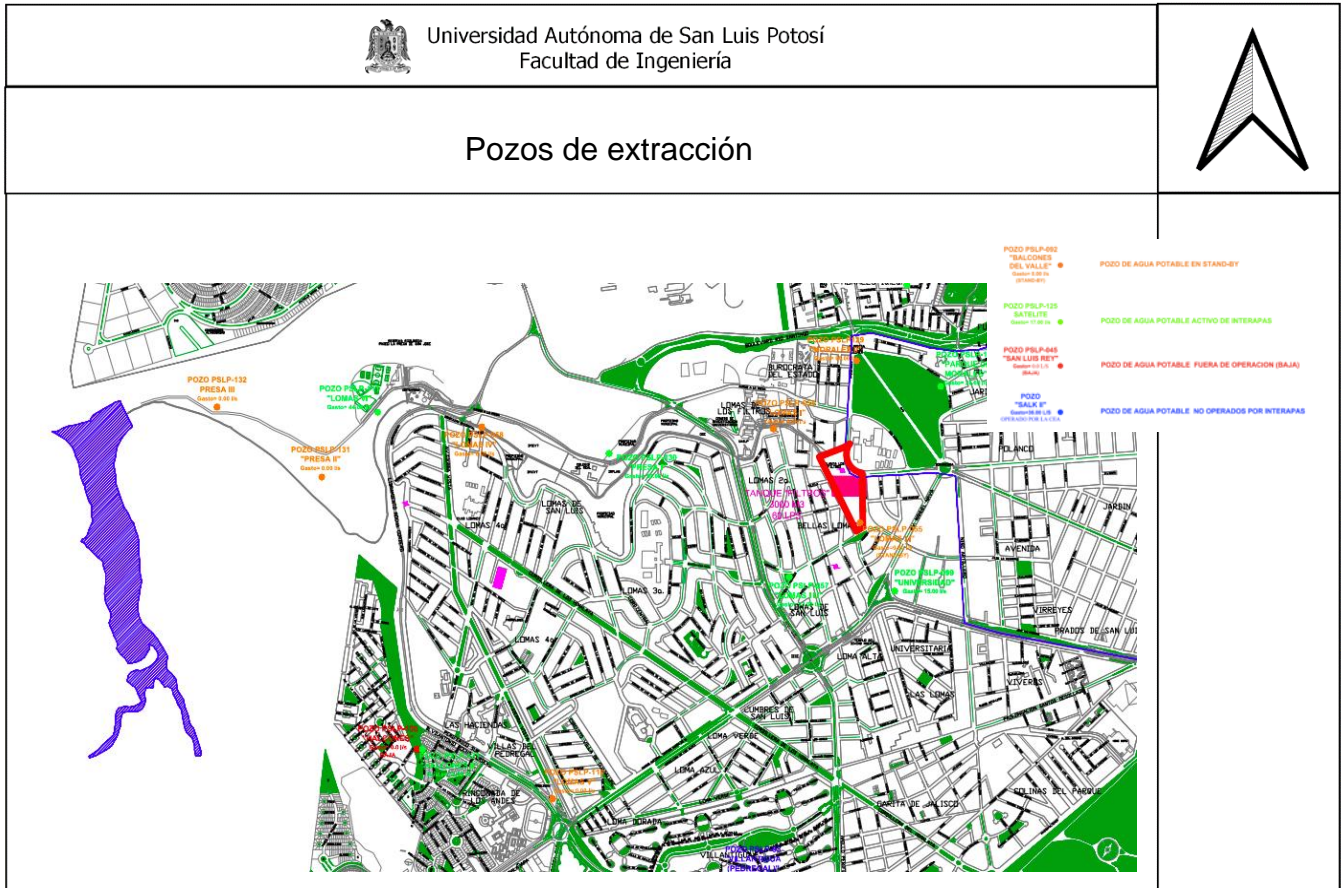


Figura 1.17. Pozos de extracción de agua cerca de la zona de estudio.

1.9 Flora

La vegetación dentro de la zona de estudio se define por ser pastizal y bosque. (INEGI, 2021). (Figura 1.18)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

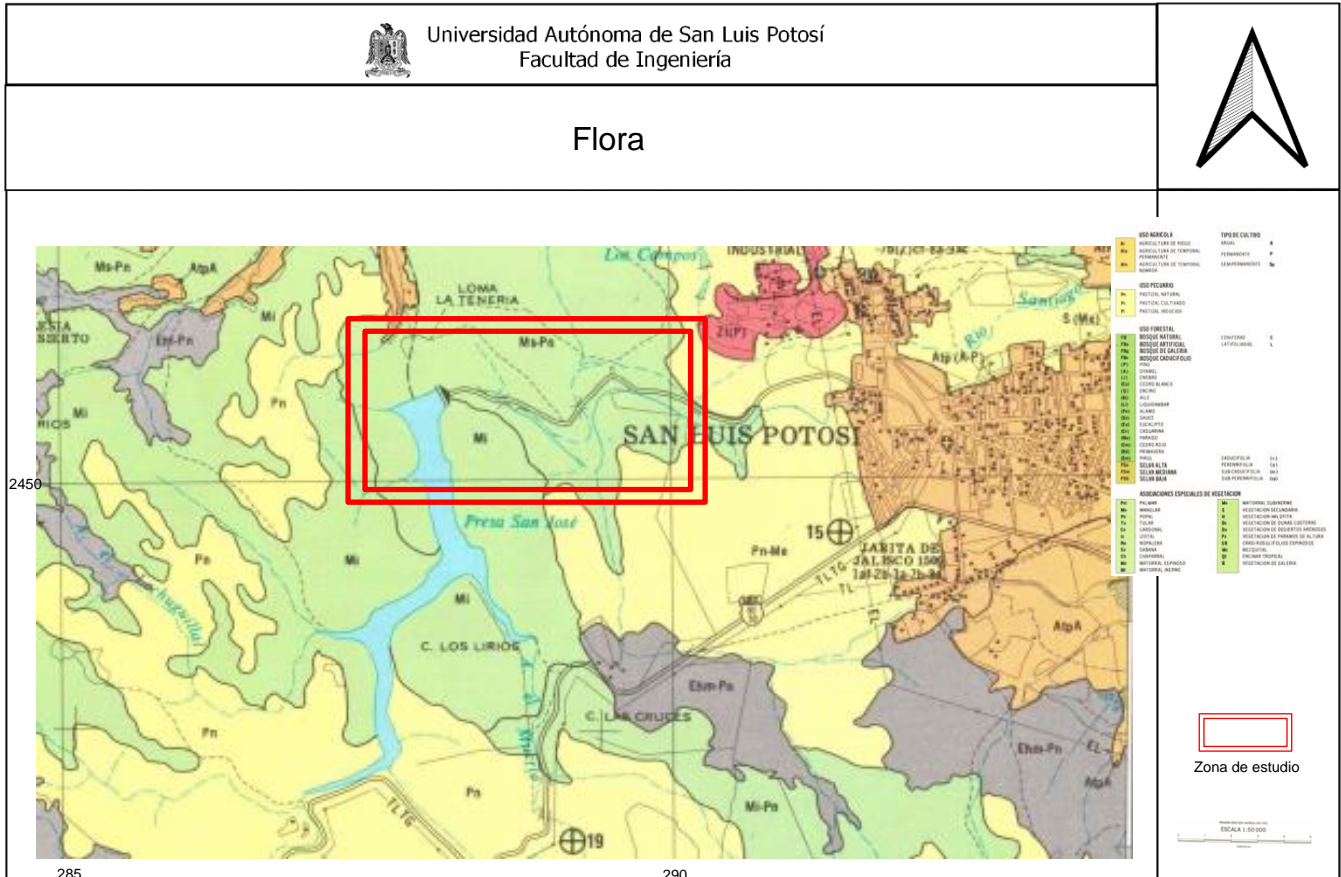


Figura 1.18. Tipo de vegetación en la zona de estudio. (INEGI,2021).

Un pastizal o conocido también como herbazales son ecosistemas naturales o de origen antrópico dominados por hierbas que sirven de pasto, es decir que son alimento para los herbívoros. Tienen una estructura simple, con un estrato herbáceo de pocos centímetros hasta los 5 metros de altura, cubriendo el suelo. Algunos tipos de pastizales incluyen arbustos y árboles dispersos. (INEGI, 2021).

Un bosque es un ecosistema donde la vegetación predominante la constituyen árboles y arbustos. Son moduladores de flujos hidrológicos y conservadores del suelo, constituyendo uno de los aspectos más relevantes de la biosfera del globo terráqueo. A veces contienen muchas especies de árboles dentro de una pequeña área o relativamente pocas especies en áreas grandes. (INEGI, 2021).

1.10 Fauna

La fauna se caracteriza por las especies dominantes como: conejo, liebre, codorniz y rata de campo. (INEGI, 2021). (Figura 1.19).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1.19. Especies dominantes en San Luis Potosí.

Se cuenta con el “Camino de la Presa de San José” y el “Ejido San Juan de Guapalupe”, decretadas como áreas naturales protegidas en el año de 1996 como Parques Urbanos. (Protegida, 1996).

1.11 Relieve

La superficie estatal forma parte de las provincias: Llanura Costera del Golfo Norte, La Mesa del Centro y La Sierra Madre Oriental. (Figura 1.20)

Tiene varias altitudes, también tiene planicies y montañas en forma de escalón: el más bajo en la zona de la huasteca; el segundo la línea montañosa que forman las sierras del Rosal, Taponá, Venado o Moctezuma, Ahualulco y San Luis o San Miguelito; el siguiente peldaño lo forma una planicie entre las sierras de San Miguelito al oeste y la de Álvarez al este y en el extremo norte, el desierto de El Salado. (INEGI, 2021).

Al noreste de la ciudad de San Luis Potosí está ubicado un conjunto de sierras formadas por rocas sedimentarias y continentales.

La mayor elevación es Cerro Grande con una altitud de 3 180 metros sobre el nivel del mar (msnm), Sierra de Catorce con 3 110 msnm y la Sierra Coronado con 2 810 msnm. Casi la totalidad de área restante está integrada por bajadas que tienen altitudes aproximadas a 2 000 metros. (INEGI, 2021).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

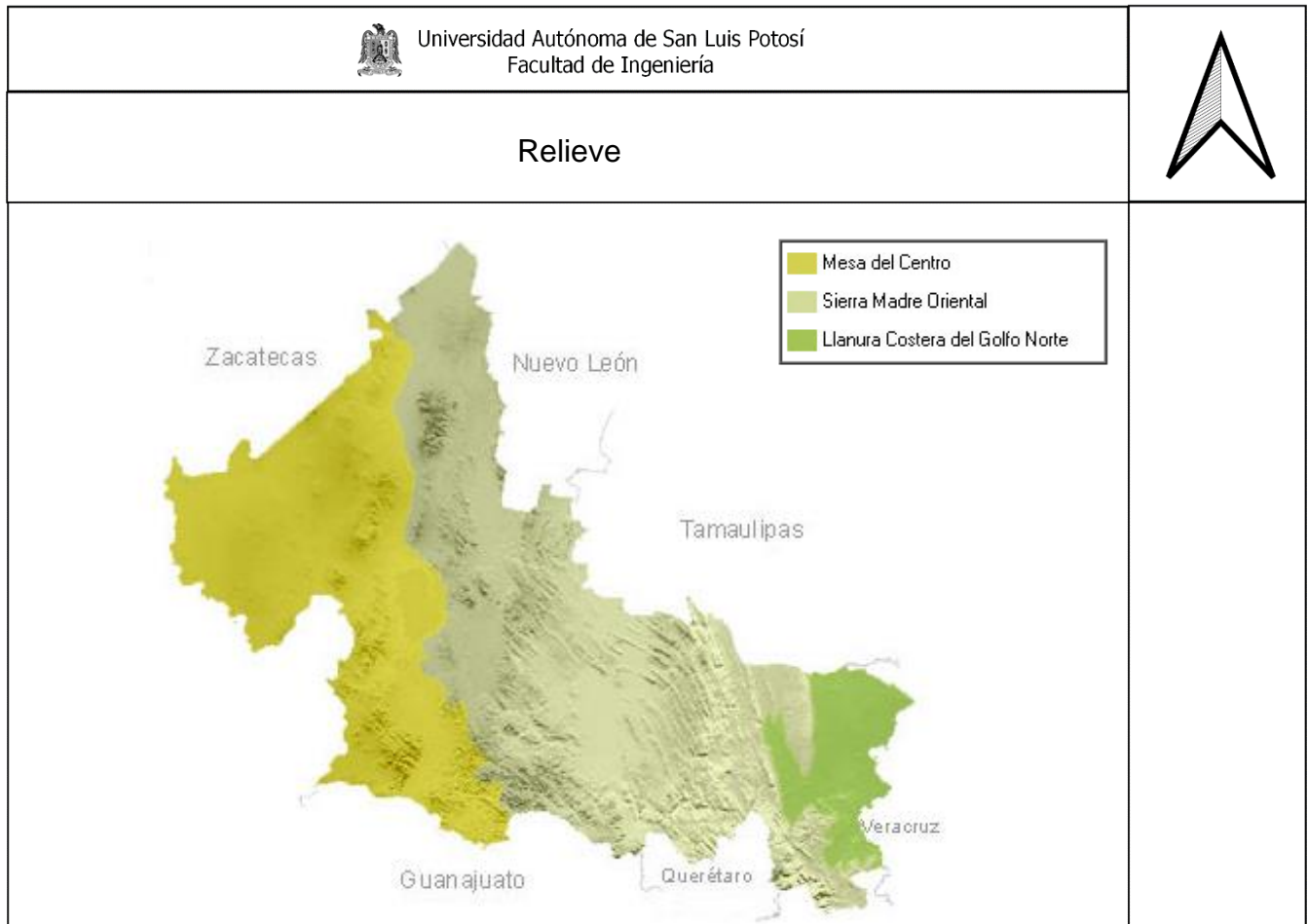


Figura 1. 20. Relieve del estado de San Luis Potosí.

Las elevaciones topograficas dentro de la zona de estudio varian entre los 1900 y 2010 msnm.

1.12 Condiciones actuales de la presa de San José

A lo largo de los años la presa de San José se ha ido azolvando dado que no le han realizado ningun mantenimiento, reduciendo de esta manera su capacidad de almacenamiento a 5.22 millones de m³. Aunado a esto se tiene que la presa del Peaje no se encuentra en un funcionamiento óptimo, ya que sufrió una rotura tiempo atrás y se encuentra aún en rehabilitación. (Interapas, 2023).

Por otro lado, los habitantes de la localidad de Escalerillas no cuentan con una red de drenaje efectiva y por cuestiones económicas no les resulta factible el uso de fosas sépticas dado su mantenimiento, por lo tanto, estos tiran sus aguas residuales y desechos al cauce que

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

desemboca en el vaso de la presa de San José, generando un acumulación de materia orgánica dentro del agua que mantiene al lirio acuático en esta zona.

Desde finales de 2017 hasta la actualidad, el *Eichhornia crassipes* conocida como lirio acuático, ha cubierto la mayor parte de la superficie del vaso de la presa San José. (Avalos, 2022). (Figura 1.21).



Figura 1. 21. Presencia de lirio en el vaso de la presa de San José.

Una de las consecuencias que el oxígeno disuelto disminuye de 4.6 mg/L (espejo del agua) a 3.6 mg/L en la cobertura de lirio. Los valores de fósforo (0.1 mg/L) y nitrógeno (1.8 mg/L) total, clasifican a la presa como un ambiente acuático con problemas de eutrofización. La calidad del agua del embalse entre aceptable y contaminada según la escala de CONAGUA, con valores de DQO en un rango de 37.8-41.8 mg/L. El aporte de nutrientes y materia orgánica se atribuyen a la descarga de aguas residuales de viviendas que carecen de un sistema de drenaje municipal en las localidades de Mesa de Conejos, Escalerillas y Pozuelos ubicadas dentro de la microcuenca de la presa San José. No se encontró una relación directa con el resto de los parámetros fisicoquímicos (pH, SDT y turbiedad) y la presencia de lirio acuático. Los componentes químicos estuvieron por debajo o dentro de los límites permisibles para agua

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

potable en México excepto la turbiedad, nitrógeno amoniacal y Fe que pueden representar un posible riesgo sanitario. (Avalos, 2022).

1.12.1 Calidad en el agua superficial

La calidad del agua no es un criterio completamente objetivo, pero está socialmente definido y depende del uso que se le piense dar al líquido (WRI, 2000) por lo que cada uso requiere un determinado estándar de calidad. Por esta razón, para evaluar la calidad del agua se debe ubicar en el contexto del uso probable que tendrá.

Las estimaciones cuantitativas de la disponibilidad del agua no reflejan por completo el problema de las necesidades de este recurso, ya que la calidad del agua en la mayor parte del mundo está lejos de ser la adecuada. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), una quinta parte de la población mundial no tiene acceso a agua libre de contaminantes (FNUAP, 2001), situación que se acentúa en áreas rurales donde no existe la posibilidad de que el agua tenga un tratamiento previo que mejore su calidad y posibilite su uso general.

La calidad del agua está afectada por diversos factores como los usos del suelo, la producción industrial y agrícola, el tratamiento que se le da antes de ser vertida nuevamente a los cuerpos de agua, y la cantidad misma de agua de los ríos y lagos, ya que de ésta depende su capacidad de purificación.

A nivel mundial en los países en desarrollo se da tratamiento a menos del 10% del agua, situación no muy diferente a la de México, donde los porcentajes están cerca del 20%, ya sea agua utilizada en servicios urbanos o industriales. Esto significa que la inmensa mayoría del líquido se vierte a ríos, lagos o mares sin ningún tratamiento previo, ocasionando la contaminación de éstos y, en consecuencia, la reducción de agua disponible.

Con el fin de evaluar la calidad o grado de contaminación del agua se han desarrollado diversos índices de calidad tanto generales como de uso específico. En México se emplea el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), que agrupa de manera ponderada algunos parámetros del deterioro de la calidad del líquido (León, 1991). El índice toma valores en una escala de 0 a 100%, donde mientras mayor sea el valor mejor es la calidad. El ICA se calcula a partir de una ponderación de 18 parámetros físicoquímicos, entre los que se encuentran el oxígeno disuelto, coliformes, fosfatos, pH, sólidos suspendidos, etc.

Por lo tanto, en el presente estudio se analizaron algunos de los parámetros considerados por el ICA.

pH

El pH es el Potencial de Hidrógeno. Es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución. Con el pH determinamos la concentración de hidrogeniones en una disolución. Un hidrogenión es un ion positivo de Hidrógeno, es un “cachito con carga positiva” del Hidrógeno. (Hannacolombia, 2023).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

La fórmula matemática para calcular el pH es el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de los iones hidrógeno. $\text{pH} = -\log[\text{aH}^+]$ Es decir, será más ácido cuanto más actividad de “cachitos con cargas positivas” de Hidrógeno exista en la disolución. Cuando haya menos actividad la muestra, será alcalina. (*Hannacolombia, 2023*).

El pH normalmente lo medimos en una escala de 1 a 14. El uno sería el valor más ácido. El 14 el valor más alcalino. Y el 7 el valor neutro. (*Hannacolombia, 2023*).

El pH es la más común de todas las mediciones durante los procesos industriales, asimismo desempeña un papel importante en el procesamiento de alimentos, agricultura, acuicultura, entre otras industrias. Las razones por las que es importante usar un medidor de pH destacan las siguientes:

- Para producir productos con propiedades coherentes y bien definidas.
- Para producir productos de manera eficiente a un costo óptimo.
- Evitar problemas de salud en los consumidores.
- Cumplir con los requisitos reglamentarios.

Potencial de oxidación y reducción (ORP)

El ORP es una medida electrónica, en milivoltios (mV), de la capacidad de una sustancia química para oxidar o reducir otra sustancia química. Tanto la oxidación como la reducción son procesos químicos que implican la transferencia de electrones entre moléculas (ganar o perder un electrón). Por lo tanto, el ORP mide el potencial de cuando ocurren estas reacciones en el medio. Aplicado a nuestra industria, entre mayor sea el valor del ORP, mejor será el rendimiento del cloro. (*Technologies, 2023*).

El ORP se usa ampliamente porque es práctico, generalmente preciso y nos permite monitorear electrónicamente lo que está sucediendo en el agua. Si bien no mide la cantidad de cloro, el ORP es una lectura en tiempo real que define la efectividad del cloro. La mayoría de los técnicos de mantenimiento están de acuerdo en que la desinfección es lo que realmente importa, desde una perspectiva sanitaria; La cantidad de cloro no es necesariamente tan importante como su eficacia. Idealmente, es mejor tener una pequeña cantidad de cloro siempre y cuando tenga muy buen rendimiento, para lograr más con menos. (*Technologies, 2023*).

El ORP se mide con un sensor el cual tiene dos sondas sumergidas en una muestra de agua fluyente. El sensor mide la diferencia eléctrica entre las dos sondas. Una sonda suele ser de platino u oro y la otra es de plata. (*Technologies, 2023*).

Oxígeno disuelto (OD)

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno gaseoso que está disuelto en el agua. El oxígeno libre es fundamental para la vida de los peces, plantas, algas, y otros organismos; por eso, desde siempre, se ha considerado como un indicador de la capacidad de un río para mantener la vida acuática. La concentración de este elemento es resultado del oxígeno que

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

entra en el sistema y el que se consume por los organismos vivos. La entrada de oxígeno puede estar provocada por muchas fuentes, pero la principal es el oxígeno absorbido de la atmósfera. (COBCM, 2023).

Este oxígeno se disuelve con facilidad hasta que el agua se satura. Una vez disuelto, se difunde lentamente y su distribución depende del movimiento del agua. Este proceso es natural y continuo, de modo que continuamente existe intercambio de oxígeno entre el agua y el aire. La dirección y velocidad depende del contacto entre ambos. Un agua turbulenta, un torrente de montaña o un lago con oleaje tendrá mayor absorción ya que la superficie del agua está expuesta al aire. (COBCM, 2023).

Las aguas estancadas retienen y absorben menos oxígeno. Las plantas también juegan un papel fundamental, ya que durante el día captan dióxido de carbono convirtiéndolo en oxígeno. Se calcula la cantidad de oxígeno disuelto en “ppm”. Esta unidad significa partes por millón y equivale a miligramos por litro (mg/L). (COBCM, 2023).

Si tenemos una concentración:

- Igual que 5 o 6 ppm hay oxígeno suficiente para la mayor parte de las especies.
- Menor de 3 ppm, es dañino para el ecosistema. A partir de este punto hacia abajo el ecosistema experimenta hipoxia.
- Menor de 2 ppm, es fatal para la mayor parte de las especies. El ecosistema sufre anoxia.

El oxígeno es responsable de dos fenómenos indispensables, la respiración de los seres vivos, y la descomposición de la materia orgánica cuando muere. Esta descomposición se realiza a través del oxígeno en sí mismo, gracias a su capacidad oxidante y mediante bacterias y hongos que necesitan oxígeno para consumir y degradar los desechos de los seres vivos. (COBCM, 2023).

Conductividad

Los sólidos se encuentran en la naturaleza en forma disueltos. Las sales disueltas en agua se descomponen en iones cargados positivamente y negativamente. La conductividad se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. Los iones más positivos son sodio (Na⁺), calcio (Ca⁺²), potasio (K⁺) y magnesio (Mg⁺²). Los iones más negativos son cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄⁻²), carbonato, bicarbonato. Los nitratos y fosfatos no contribuyen de forma apreciable a la conductividad, aunque son muy importantes biológicamente. (Waterboards, 2013).

La conductividad varía en función de la fuente de agua: agua subterránea, agua de escorrentía de la agricultura, aguas residuales municipales y precipitación. Por lo tanto, la conductividad puede ser un indicador de filtración en agua subterránea o de fugas de aguas residuales. (Waterboards, 2013).

La conductividad se mide con una sonda electrónica que aplica un voltaje entre dos electrodos. La disminución del voltaje se usa para medir la resistencia del agua que se traduce a conductividad. La conductividad es el valor inverso de la resistencia y se mide como la cantidad

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

de conductancia en una distancia determinada. Las unidades son mhos/cm o Siemen. (*Waterboards, 2013*). (Tabla 1.3).

Factores que afectan la conductividad:

- La tierra y las rocas descargan iones en las aguas que fluyen a través y por encima de ellas. La geología de una cierta zona determina la cantidad y el tipo de iones.
- El agua dulce que se pierde por evaporación aumenta la conductividad.
- Cuando la temperatura aumenta, la conductividad aumenta también.

Tabla 1. 3. Conductividad del agua

Conductividad de agua	
Tipo de agua	Conductividad (mhos/cm)
Agua destilada	0.5 - 3.0
Nieve derretida	2 - 42
Agua potable de U.S	30 - 1500
Agua de suministro de riego	< 750

Sólidos disueltos totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales (SDT, o TDS por sus siglas en inglés) son el residuo que queda después de evaporar una muestra de agua previamente filtrada a través de un elemento de fibra de vidrio con abertura de 1.5 micras. El agua se evapora y el residuo se lleva hasta 180°C. El resultado se reporta en mg/L. (*Carbotecnia, 2022*).

Los SDT incluyen las sales, los minerales, los metales y cualquier otro compuesto orgánico o inorgánico que se encuentra disuelto en el agua, o que haya pasado a través del filtro con abertura de 1.5 micras. (*Carbotecnia, 2022*).

Los TDS o SDT en el agua proceden de aguas subterráneas, aguas superficiales, aguas residuales humanas e industriales, efluentes urbanos y agrícola. Las sales del ambiente que arrastra la lluvia o deshielo también pueden contribuir al aumento de SDT de los suministros de agua. Las concentraciones de TDS o SDT procedentes de fuentes naturales varían de 30 mg/litro a 6000 mg/litro, dependiendo de la solubilidad de los minerales en la zona geológica. (*Carbotecnia, 2022*).

No hay datos recientes sobre los efectos a la salud relacionado a la ingesta de TDS en el agua potable.

Un agua que no contiene iones disueltos es dieléctrica (aislante eléctrico). Los iones le dan conductividad. La conductividad de un agua es proporcional al contenido de iones en ella. Por lo tanto, se puede estimar la concentración de sólidos ionizados totales disueltos en un agua

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

mediante un medidor de conductividad o conductivímetro. Si la mayoría de las sales disueltas en un agua ionizan, la medición del conductivímetro dará una buena estimación de los SDT. (*Carbotecnia, 2022*).

Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de agua. Se mide en una escala lineal de grados Centígrados o grados Fahrenheit. (*Waterboards, 2013*).

Es uno de los parámetros más importantes de la calidad de agua. La temperatura afecta la química del agua y las funciones de los organismos acuáticos. (*Waterboards, 2013*).

La temperatura influye en:

- La cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua.
- La velocidad de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas.
- La velocidad metabólica de los organismos.
- La sensibilidad de organismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades.
- Epocas de reproducción, migración y estivación de organismos acuáticos.

Los objetivos de la calidad del agua para ecosistemas de agua dulce protegen a los peces de agua fría o a los peces de agua templada. En general, el objetivo de la calidad de agua no permite que la temperatura del agua donde se encuentran esos peces sufra un incremento de más de 5 grados Fahrenheit del valor de la temperatura recipiente natural del agua. Sin embargo, los objetivos de la calidad de agua varían de región a región. (*Waterboards, 2013*).

Factores que afectan la temperatura:

Factores naturales:

- Energía solar: cambios estacionales y diarios, sombra, temperatura del aire.
- Flujo.
- Profundidad del agua.
- Afluencia de agua subterránea: generalmente más fría que la corriente.
- Afluencia de agua de superficie en la corriente que está a una temperatura diferente a la corriente.

Factores humanos:

- Eliminación de vegetación ripariana.
- Erosión de la tierra acelerada, aumento de la turbidez y absorción de calor.
- Aumento de escorrentía de aguas pluviales.
- Alteraciones de la corriente morfológica (profundidad de posas), substrato, flujo.
- Descargas de agua fría provenientes de plantas eléctricas.

Los parámetros ya mencionados fueron obtenidos mediante una campaña de medición en el presente año.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1.12.1.1 Campaña de medición

Un procedimiento adecuado de control de calidad de agua permite obtener datos ambientales de un nivel aceptable de calidad, cuantificar y controlar las fuentes de error que se pueden presentar en el muestreo.

Es necesario una preparación y una planificación del muestreo y los documentos asociados que impliquen el lugar, referencias, registro de datos recolectados y cualquier dato que pueda ayudar posteriormente a la resolución de alguna duda.

Cada que se realicen mediciones in situ, se deben registrar los datos de acuerdo a lo establecido en el documento acordado. Un mes previo al inicio de la campaña de muestreo, se debe calibrar y verificar el estado de la sonda, con el objetivo de detectar oportunamente fallas o errores críticos, que puedan significar el mantenimiento o reparación del equipo.

Un día antes del inicio del muestreo se debe calibrar el instrumental por parámetro único, es decir, no se debe realizar en modo de calibración rápida, para asegurar una correcta lectura de los datos y disminuir errores en las mediciones. También es importante que una vez calibrado el equipo debe de estar cubierta la sonda por protección de la misma.

Medidor multiparamétrico para agua HANNA HI-98194

El HI98194 (Figura 1.22) es un medidor multiparamétrico portátil, que registra hasta 12 parámetros diferentes claves en la calidad del agua. Su sonda multi-sensor permite medir parámetros como pH, ORP, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura. La sonda multiparamétrica transmite las lecturas digitalmente al medidor, donde se pueden mostrar y registrar los puntos de datos. Este medidor de calidad del agua es completo y fácil de configurar.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 1. 22. Multiparámetro HANNA HI-98194.

Características generales del equipo:

Pantalla LCD gráfica iluminada – El HI98194 cuenta con una pantalla LCD iluminada con ayuda en pantalla y la capacidad de mostrar hasta doce parámetros simultáneamente. La pantalla gráfica permite el uso de botones virtuales para proporcionar una interfaz de usuario intuitiva.

Protección a prueba de agua – El equipo multiparamétrico está protegido por una carcasa impermeable IP67 y puede soportar la inmersión en agua a una profundidad de 1 m durante un máximo de 30 minutos. La sonda cuenta con una clasificación IP68 para inmersión continua en agua.

Sonda digital de rápida conexión – La sonda HI7698194 cuenta con un conector DIN de rápida conexión que se une de manera impermeable con el medidor.

Sensores reemplazables en el campo, identificados por color – El reemplazo de los sensores es rápido y fácil con conectores de tipo roscado reemplazables en campo que están identificados por colores para un fácil reconocimiento del puerto del sensor.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Reconocimiento automático del sensor – La sonda y el medidor reconocen automáticamente los sensores que están conectados. Cualquier puerto no utilizado en la sonda no tendrá el parámetro visualizado o configurable.

Compensación automática de la temperatura – El sensor de temperatura integrado permite la compensación automática por temperatura del pH, conductividad y mediciones de oxígeno disuelto.

Compensación automática de la presión barométrica – El medidor incorpora un barómetro con unidades seleccionables por el usuario para la compensación por presión del oxígeno disuelto.

Calibración estándar o rápida – La calibración rápida proporciona una calibración rápida y sencilla para pH, conductividad y oxígeno disuelto. Las opciones estándar de calibración de pH están disponibles para calibrar hasta en tres puntos a partir de una selección de cinco soluciones estándar y una solución personalizada. La calibración de conductividad se realiza en un sólo punto de seis selecciones estándar o un estándar personalizado. La calibración de oxígeno disuelto se realiza en hasta dos puntos estándar o un punto personalizado.

Información GLP – El HI98194 incluye la función GLP que permite a los usuarios ver los datos de calibración con sólo tocar un botón. Los datos de calibración incluyen la fecha, el tiempo, los estándares utilizados para la calibración y las características de la pendiente.

Registro de datos – El HI98194 permite a los usuarios almacenar hasta 45,000 muestras continuas o de registro bajo demanda con intervalos de registro de un segundo a tres horas.

Teclado intuitivo – El teclado de goma tiene botones dedicados para encendido, iluminación, flechas arriba/abajo, ayuda y caracteres alfanuméricos. El medidor también incluye dos botones funcionales que permiten al usuario navegar a través de la configuración de cada parámetro, la configuración del medidor y el registro de datos. La interfaz es intuitiva para el nivel de experiencia de cualquier usuario.

Botón dedicado de ayuda – La ayuda contextual siempre está disponible a través del botón de “AYUDA”. Los mensajes y las instrucciones claras del tutorial están disponibles en pantalla para guiar rápidamente a los usuarios a través de la configuración y calibración. La información de ayuda mostrada es relativa al ajuste/opción que se está viendo.

Conectividad con la PC – Los datos registrados pueden transferirse a una PC compatible con Windows con el cable micro USB HI920015 incluido y el software HI9298194.

Larga duración de la batería – La pantalla del medidor de calidad del agua tiene un indicador de icono de la batería para mostrar la energía restante. El medidor utiliza cuatro baterías de 1.5V AA que proporcionan hasta 360 horas de duración de la batería.

Estuche de transporte resistente – El medidor HI98194, la sonda y todos los accesorios se suministran en una maleta robusta diseñada para proporcionar años de uso. El compartimiento

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

interior de la funda de transporte está termoformado para sujetar y proteger con seguridad todos los componentes.

Una vez en la zona de muestreo, se introduce la sonda de manera que quede totalmente cubierta por la escorrentía o el cuerpo de agua a analizar, el agua no debe estar estancada así que debes buscar un punto en donde esta tenga, aunque sea poca velocidad pero que el flujo sea continuo.

Se tomaron 4 puntos de muestreo bajo diferentes consideraciones que se podran observar en las siguientes bitácoras, al igual que los resultados de los parámetros medidos y sus observaciones. (Figura 1.23).

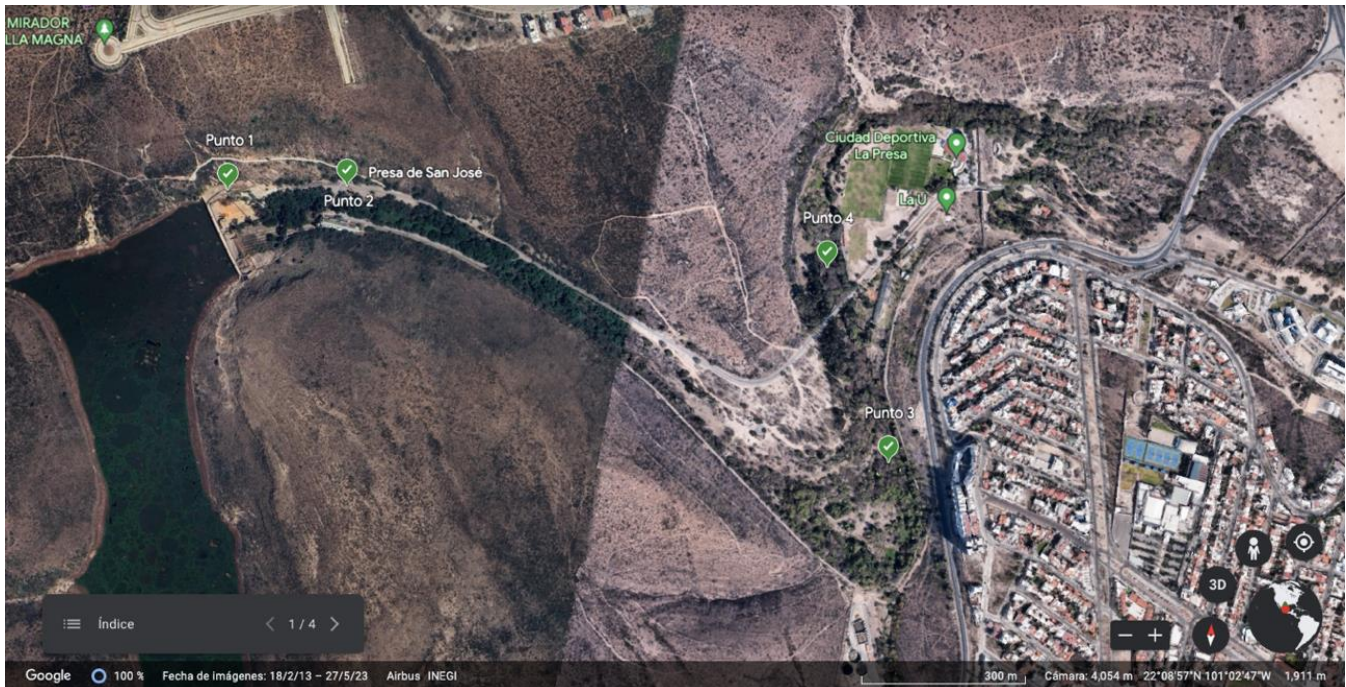


Figura 1. 23. Ubicación de los puntos de muestreo. (INEGI, 2023).

A continuación, se tienen las bitácoras realizadas en cada uno de los puntos de muestreo.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Punto 1			
<i>Coordenadas</i>	Latitud: 22.151	Longitud: -101.053	Altitud: 1,915.62
<i>Características</i>	En el paseo de la presa de San José se pueden observar diferentes descargas canalizadas de agua, esta fue una de ellas.		
Parametros medidos			
<i>Ph</i>	6.03		
<i>ORP</i>	<i>Medido</i> -131.6	<i>Ajustado</i> 108.4	mV
<i>OD</i>	3.40%	0.047	mg/L
<i>Conductividad</i>	224		μS/cm
<i>SDT</i>	112		mg/L
<i>Temperatura</i>	17.6		°C

Punto 2			
<i>Coordenadas</i>	Latitud: 22.151	Longitud: -101.051	Altitud: 1,912.80
<i>Características</i>	Aguas abajo de la presa de San José la mayor parte del agua sigue su cauce naturalmente por el río Santiago.		
Parametros medidos			
<i>Ph</i>	6.89		
<i>ORP</i>	<i>Medido</i> 7	<i>Ajustado</i> 247	mV
<i>OD</i>	11.80%	0.88	mg/L
<i>Conductividad</i>	273		μS/cm
<i>SDT</i>	137		mg/L
<i>Temperatura</i>	19.32		°C

Punto 3			
<i>Coordenadas</i>	Latitud: 22.147	Longitud: -101.042	Altitud: 1,911.34
<i>Características</i>	A lo largo del cauce natural del río, se tienen la acumulación de otros pequeños arroyos. En este punto se agrega el arroyo Lomas.		
Parametros medidos			
<i>Ph</i>	7.03		
<i>ORP</i>	<i>Medido</i> 2.6	<i>Ajustado</i> 242.6	mV
<i>OD</i>	11.80%	0.96	mg/L
<i>Conductividad</i>	726		μS/cm
<i>SDT</i>	363		mg/L
<i>Temperatura</i>	18.76		°C

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Punto 4			
<i>Coordenadas</i>	Latitud: 22.150	Longitud: -101.043	Altitud: 1,903.51
<i>Características</i>	A lo largo del cauce natural del río, se tienen la acumulación de otros pequeños arroyos. En este punto se agrega el arroyo y las descargas de Villa Magna.		
Parametros medidos			
<i>Ph</i>	7.01		
<i>ORP</i>	<i>Medido</i>	<i>Ajustado</i>	
	-104.9	135.1	mV
<i>OD</i>	15.90%	0.91	mg/L
<i>Conductividad</i>		745	µS/cm
<i>SDT</i>		373	mg/L
<i>Temperatura</i>		19.72	°C

El ORP indica la cantidad de oxígeno disuelto del agua, es decir que, con los valores negativos arrojados en campo, se confirma que el río está contaminado.

2 Estudio hidrológico de la cuenca de la presa de San José

2.1 Introducción

La palabra hidrología proviene del griego “hidros” que significa agua y “logos” que es tratado o ciencia, por lo que la hidrología se define como la ciencia del agua, algunos autores la describen como: “Hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”. (*Chow, Maidment, & Mays, 1988*).

Tiene como objetivo estimar cuantitativamente los eventos ocasionados por los diferentes procesos del ciclo hidrológico del agua y con ello poder prevenir desastres, generar estrategias dentro del desarrollo urbano y proteger los ecosistemas.

Se pueden determinar diferentes tipos de ciclos hidrológicos dadas las circunstancias del entorno.

2.1.1 Ciclo hidrológico del agua

El ciclo hidrológico del agua está determinado por patrones de clima, geología y vegetación de la zona, topografía, y ahora por las actividades humanas que invaden gradualmente al medio ambiente del agua, alterando el equilibrio dinámico del ciclo e iniciando nuevos procesos y eventos. (*Aparicio Mijares, 1989*).

Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin. El agua cae en la tierra en forma de precipitación, al contacto con la superficie terrestre, una parte de esta se evapora, otra es interceptada por plantas y construcciones, fluye por la superficie formando corrientes de agua o se infiltra. El agua estancada o interceptada, una parte se infiltra más profundamente y la otra fluye en el subsuelo o se vuelve a evaporar. (*Aparicio Mijares, 1989*).

La precipitación que llega a corrientes, una parte igual se infiltra, y otra llega a océanos u otros grandes cuerpos de agua. Del agua infiltrada, una parte es absorbida por las plantas y posteriormente transpirada casi en su totalidad hacia la atmósfera, la parte del agua infiltrada que fluye bajo la superficie de la tierra puede llegar a otros cuerpos de agua también, como los ya mencionados o hacia zonas más profundas del suelo como percolación para ser almacenada como agua subterránea y después quizás aflorar en manantiales, ríos o el mar. El agua que se evapora se eleva y se transporta por la atmósfera en forma de nubes hasta que se condensa y cae hacia la tierra en forma de precipitación, repitiéndose el ciclo. (*Aparicio Mijares, 1989*). (Figura 2.1)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

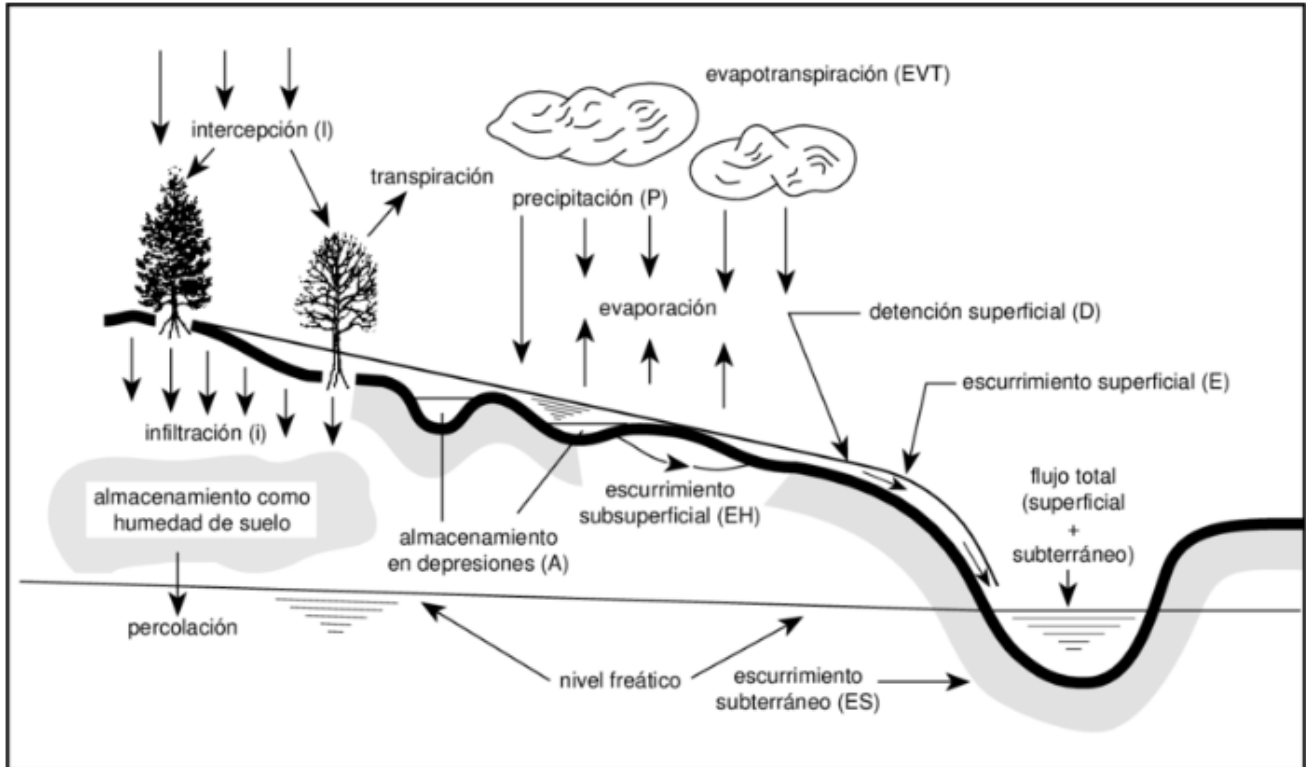


Figura 2.1. Ciclo hidrológico del agua. (Aparicio Mijares, 1989).

Al momento de ser alterados por el hombre y su desarrollo, los diferentes patrones ya mencionados anteriormente, se considera ya un ciclo hidrológico urbano.

2.1.2 Ciclo hidrológico urbano

El concepto de ciclo hidrológico urbano permite tratar conjuntamente conceptos de clima, hidrología, tipo de suelo, uso de suelo, ingeniería y ecología de las áreas urbanas, su estudio debe conducir a una verificación posterior de los enfoques modernos del manejo de las aguas urbanas, incluyendo el desarrollo sustentable y de bajo impacto. (Quintero-espínosa, 2006).

En la Figura 2.2 se puede observar mediante un esquema el ciclo hidrológico urbano.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

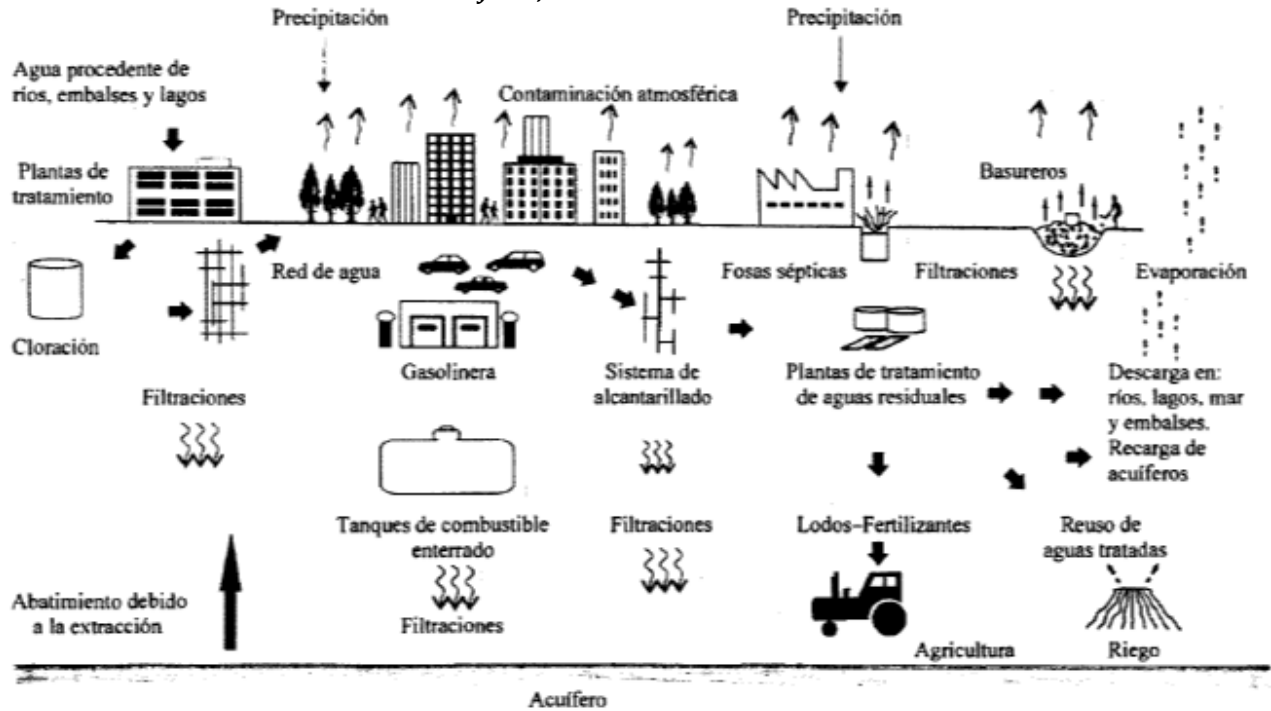


Figura 2. 2. Esquema del ciclo hidrológico urbano (Marsalek et al., 2014).

La precipitación, como lluvia, granizo o nieve en el ciclo hidrológico urbano, está sujeta a pérdidas naturales como lo pueden ser la interceptación y almacenamiento por construcciones realizadas por el hombre, y evapotranspiración, su ciclo es similar al ciclo natural, pero contribuyendo mayor medida en el escurrimiento superficial y en menor a la infiltración al subsuelo por el cambio a una superficie menos impermeable.

2.2 Definición de cuenca

Una cuenca hidrográfica es la totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces, tales que todo el escurrimiento originado en tal área es descargado a través de una única salida. (Campos-Aranda, 1984).

Existen dos tipos fundamentales de cuencas, las cuales son: endorreicas y exorreicas. (Figura 2.3)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

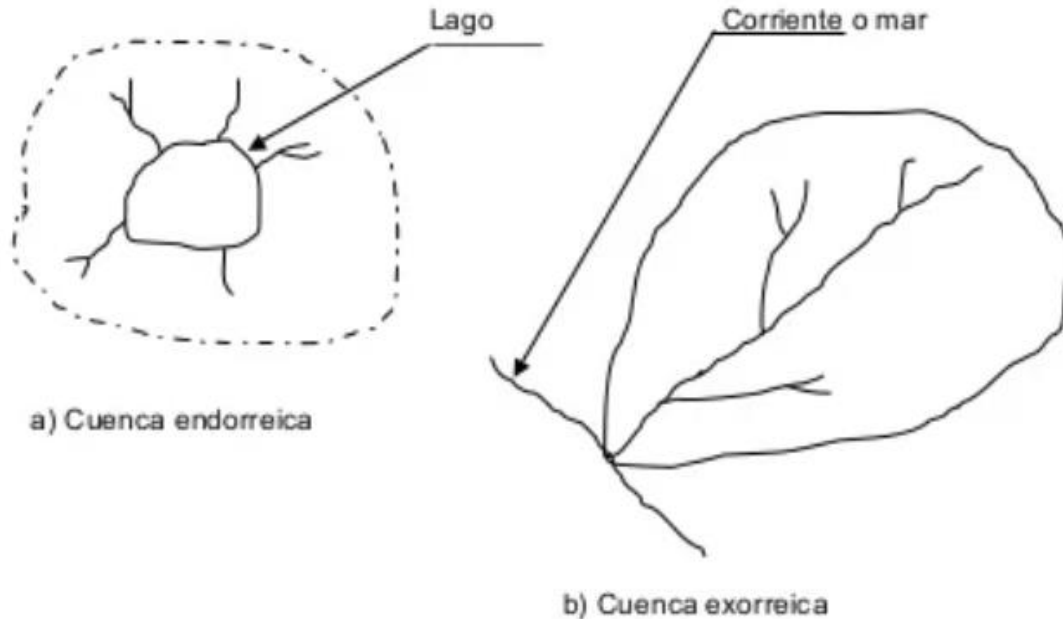


Figura 2.3. Tipos de cuencas. Ilustración 16

La cuenca hidrográfica funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos. Esta transferencia se realiza con pérdidas y es una función bastante compleja de numerosos factores, entre los que predominan el clima y la configuración del terreno, en el cual se desarrollan los fenómenos hidrológicos: los índices y magnitudes físicas de la cuenca que expresan en términos simples los valores medios de ciertas características del terreno juegan un papel muy importante y son condicionantes de su régimen hidrológico. (Campos-Aranda, 1984).

En este caso siendo una cuenca invadida por la mancha urbana, es delimitada por las características geomorfológicas y la configuración de la infraestructura y las calles.

2.2.1 Geomorfología de la cuenca

La geomorfología estudia y cuantifica determinados rasgos propios de la superficie terrestre. Las características geomorfológicas que se estudian en este estudio son: área, perímetro, caracterización de la cuenca, pendiente y perfil del cauce principal, curva hipsométrica, elevaciones y coeficiente de escurrimiento.

2.2.2 Parteaguas de la cuenca

El parteaguas es una línea imaginaria que limita el contorno de una cuenca, la separa de las adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, hacia el cauce o sistema de cauce, o escurrimientos que fluyen hacia la salida o boquilla de la cuenca. (Campos-Aranda, 1984).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para detectar esa línea primero se deben conocer todos los escurrimientos de agua superficial que existen cerca o alrededor de la zona de estudio. Una vez detectados los escurrimientos se traza el parteaguas de la cuenca.

La cuenca en estudio se conoce como cuenca de San José, que desemboca al Río Santiago, es decir, en un brazo del cauce. En la Figura 2.4 se muestra la cuenca de San José proporcionada por la herramienta de SIATL del INEGI.

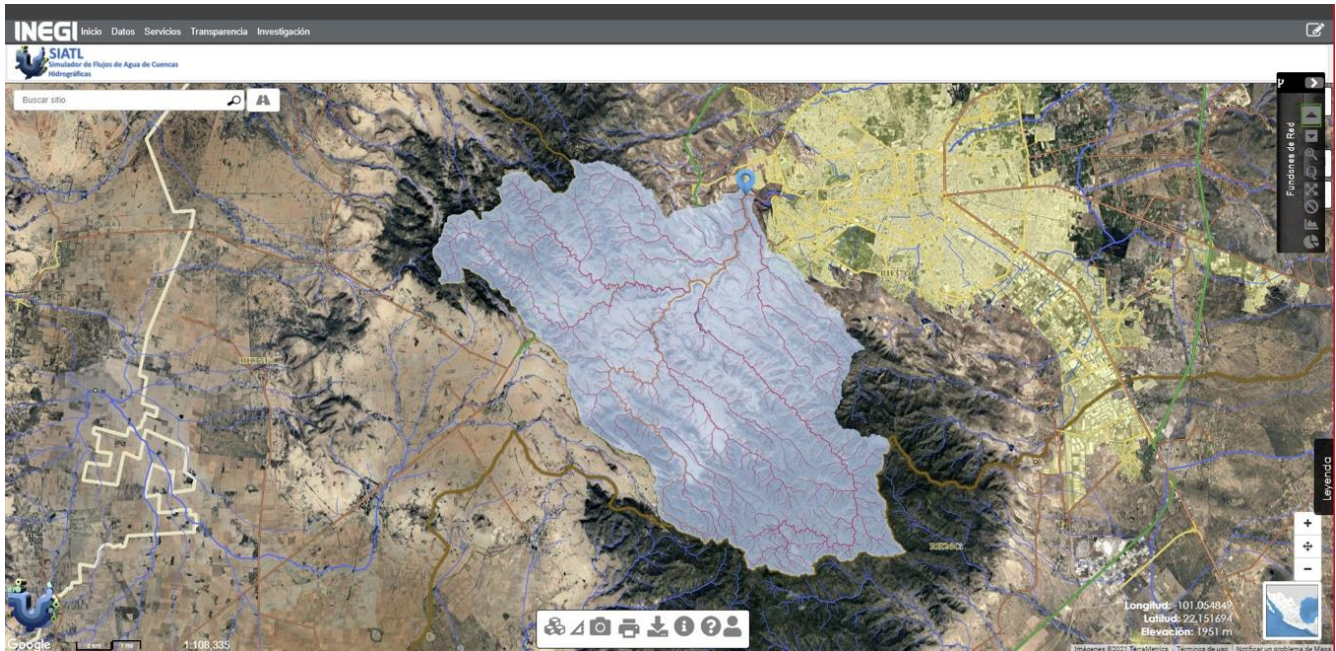


Figura 2. 4. Cuenca de San José.

En ocasiones dicha imagen puede presentar errores por la aproximación de píxeles con la que cuenta, por la que se recomienda reactivar el parteaguas con las curvas de nivel proporcionadas por INEGI. En la Figura 2.5 se muestra el parteaguas con dichas correcciones.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

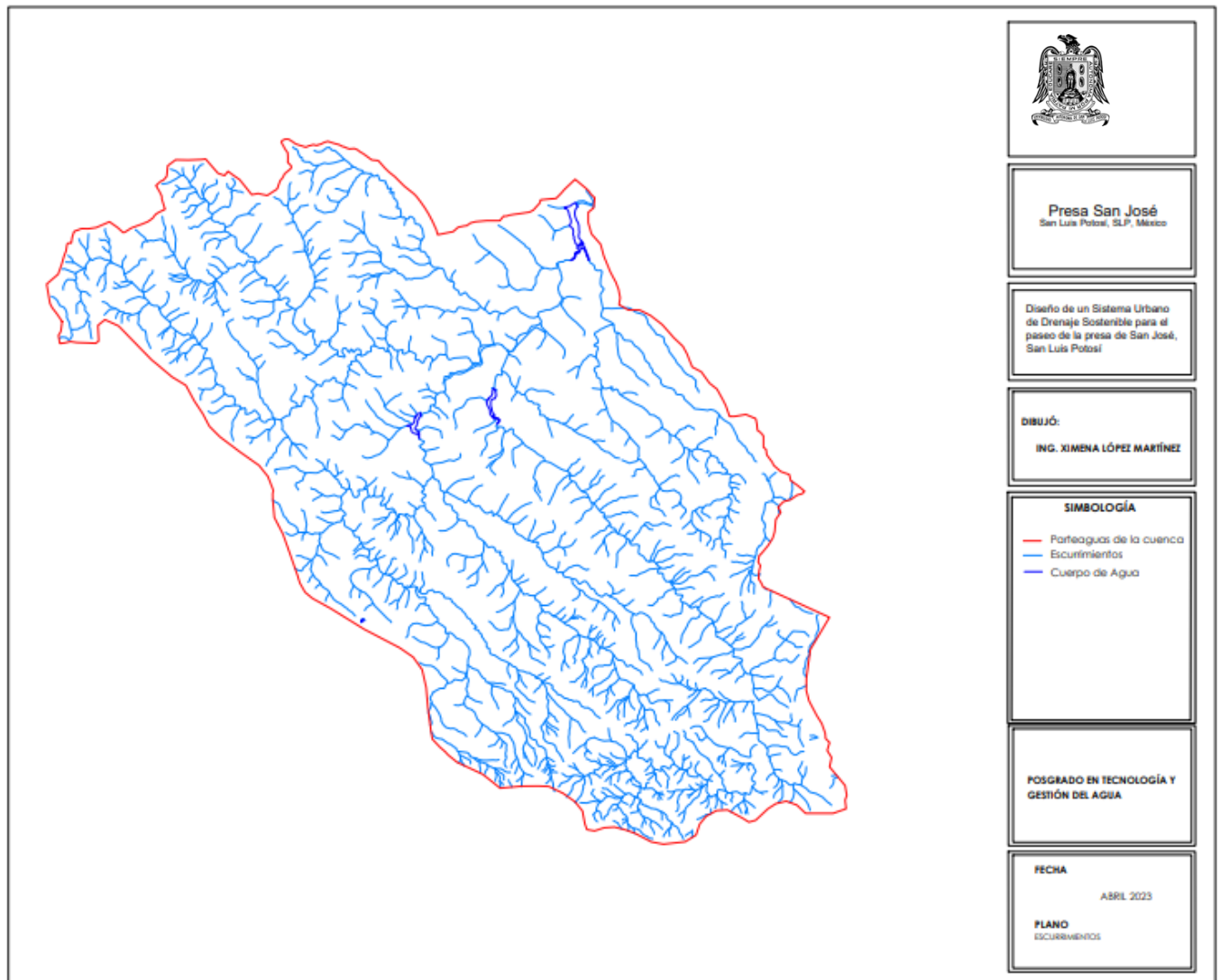


Figura 2. 5. Parteaguas de la cuenca de la Presa de San José.

2.2.3 Área de la cuenca

La superficie observada de la proyección horizontal de la cuenca se le conoce como área y nos permite clasificarla de acuerdo con su tamaño.

La cuenca en estudio cuenta con un área de 265.194 km² (26.519 ha) De acuerdo con el autor Campos y con fines prácticos se presenta la siguiente tabla.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 2. 1. Clasificación de las cuencas por su tamaño (Campos-Aranda, 1992).

Área de la cuenca	Clasificación
< 25 km ²	Muy pequeña
25 a 250 km ²	Pequeña
250 a 500 km ²	Intermedia Pequeña
500 a 2,500 km ²	Intermedia Grande
2,500 a 5,000 km ²	Grande
> 5000 km ²	Muy Grande

Dado que la cuenca en estudio tiene una superficie mayor a los 250 km² y menor a 500 km² la clasificación propuesta por Campos, dicta que se trata de una “Cuenca Intermedia Pequeña”.

2.2.4 Perímetro de la cuenca

De la misma manera, el perímetro es la longitud del parteaguas. y un perímetro de 89 kilómetros.

2.2.5 Forma de la cuenca

La forma de la cuenca afecta las características de la descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo. En general, los escurrimientos de una cuenca con la forma casi circular serán diferentes a los de otra que es estrecha y alargada, de la misma área, como se muestra en la Figura 2.6.

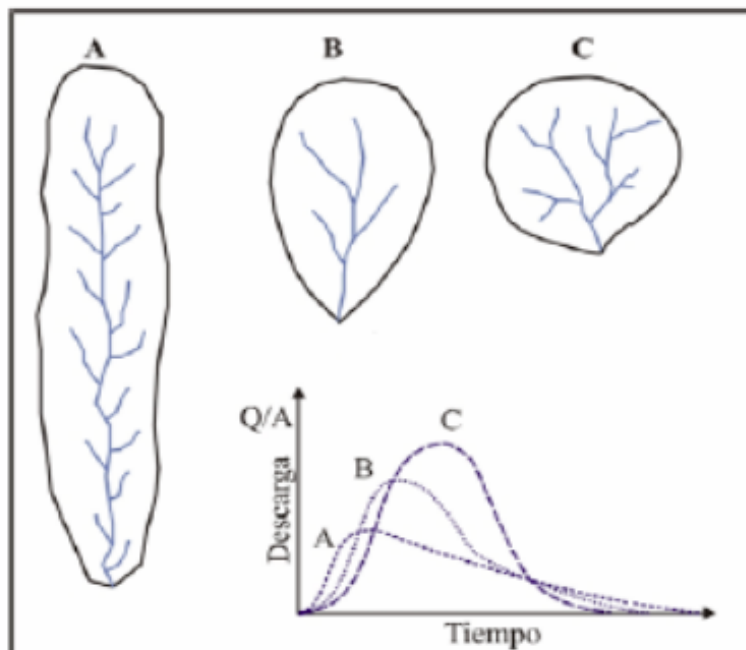


Figura 2. 6. Formas de la cuenca.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

En el caso de estudio se tiene una forma de tipo C, indicando que el agua llegara a su punto de descarga, o también determinada boquilla.

2.2.6 Caracterización de la cuenca

Para la caracterización es necesario conocer algunos parámetros, tales como:

Coefficiente de compacidad. - H. Gravelius definió el llamado coeficiente de compacidad (C_c) como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia (P_c) de un círculo con área igual al tamaño (A) de la cuenca en km^2 .

$$C_c = \frac{P}{P_c} = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$C_c = 0.282 * \frac{89.00}{\sqrt{265.194}}$$

$$C_c = 1.5412$$

Relación de elongación. - S. A. Schumm propuso la denominada relación de elongación (Re) definida como el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo que tiene igual área (A) que la cuenca y la longitud (L_c) de la misma. La longitud L_c se define como la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria, paralela al cauce principal, por lo tanto:

$$Re = \frac{D}{L_c} = 1.1284 * \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

$$Re = 1.1284 * \frac{\sqrt{265.194}}{39.429}$$

$$Re = 0.4660$$

El coeficiente anterior esta correlacionado con el relieve de la cuenca.

2.2.7 Localización del cauce principal

Para localizar el cauce o colector principal de una cuenca, primero se debe de conocer el orden de corrientes que tiene la cuenca.

El orden de corrientes es el grado de ramificación de la red de drenaje. Será de Orden 1 cuando la corriente no tenga ninguna ramificación. Será de Orden 2 cuando la corriente se integre por

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

la unión de dos corrientes de orden uno. Será de Orden 3 cuando la corriente este integrada por la unión de dos corrientes de orden 2, y así sucesivamente.

El colector principal se localizará a partir de la boquilla siguiendo siempre la corriente de más alto orden y cuando la corriente se divida en dos de igual orden se seguirá por la rama que tenga mayor área de cuenca.

La cuenca en estudio tiene un Orden 6. (Figura 2.7).

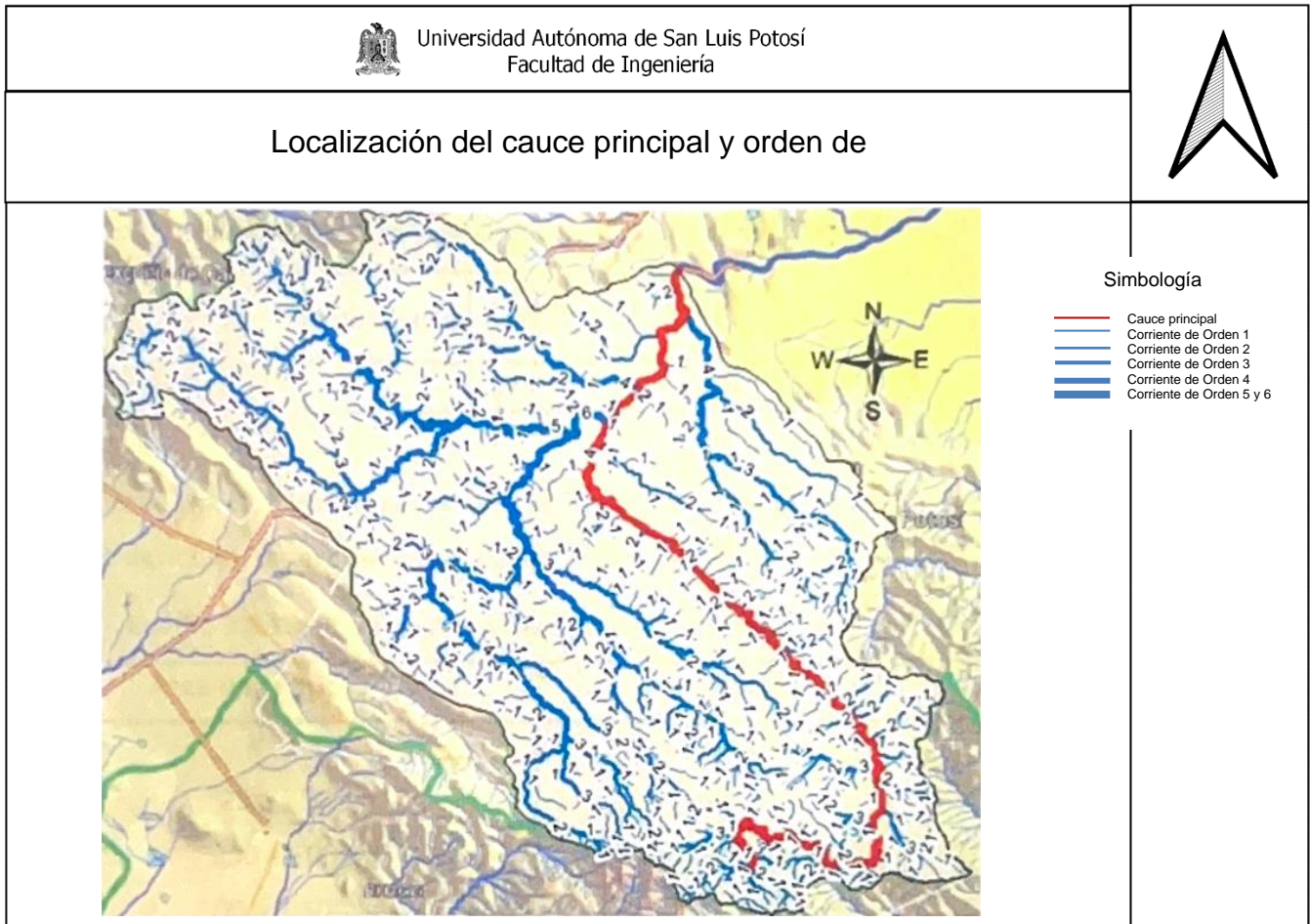


Figura 2. 7. Orden de corrientes.

2.2.8 Pendiente del cauce principal

Es substancial determinar para el cauce principal de la cuenca, su longitud (L_c), su desnivel (H) y su pendiente (S_c). Para el cálculo de la pendiente del cauce principal se utiliza el método simplificado, teniendo así:

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

$$Sc = \frac{H}{Lc}$$

En la siguiente tabla se muestra la longitud, el desnivel y la pendiente obtenida del cauce principal para la cuenca en estudio.

Tabla 2. 2. Características geomorfológicas del cauce principal.

Características del cauce principal	Valor
Longitud (m)	39428.88
Cota Mayor (msnm)	2700
Cota Menor (msnm)	1910
Desnivel (m)	790
Pendiente (m/m)	0.020036

2.2.9 Perfil del cauce principal

Una vez conocida la pendiente del cauce principal, es también importante conocer su perfil topográfico. El perfil topográfico de un cauce se obtiene llevando a una gráfica los valores de sus recorridos horizontales (abscisas) contra sus cambios de elevaciones respectivas (ordenadas). (Figura 2.8)

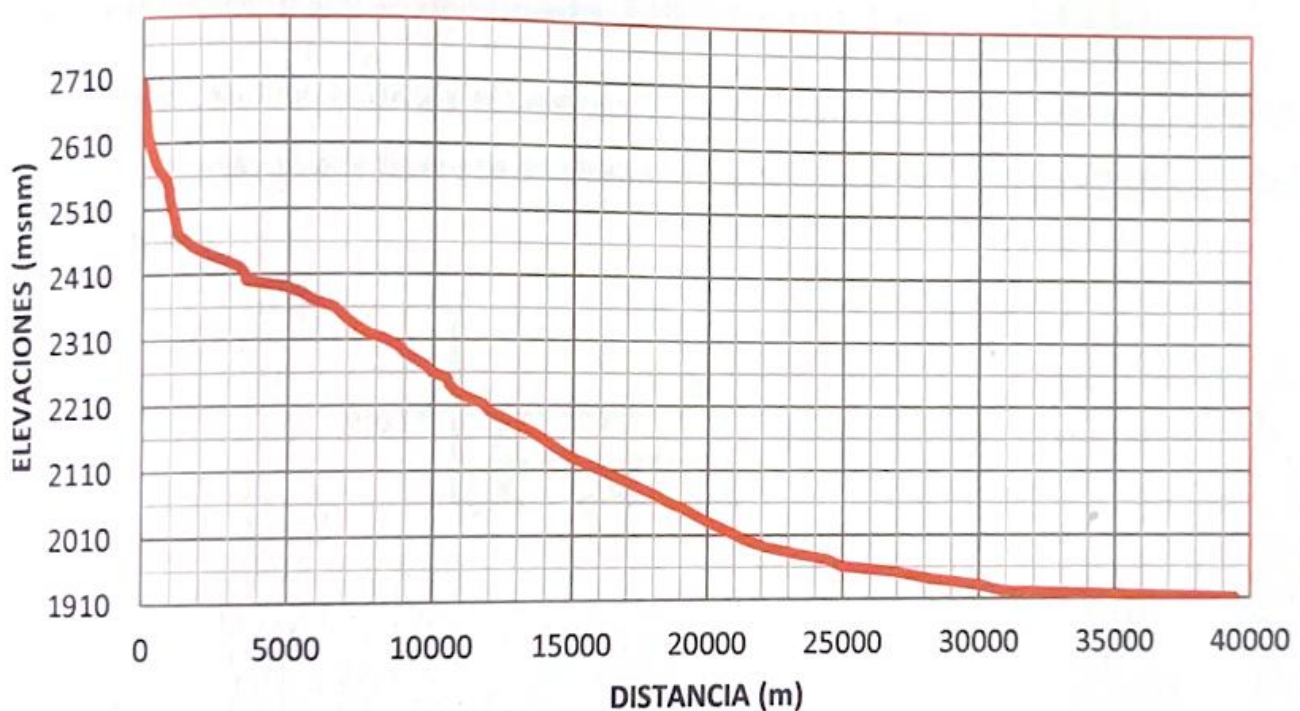


Figura 2. 8. Perfil del cauce principal.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para más detalles de los datos utilizados para la gráfica de la Figura 2.8, se pueden observar en el Anexo 2.1.

2.2.10 Estimación del número de curva de escurrimiento (CN)

El número de curva (CN) es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de los EEUU. Toma en cuenta las condiciones de humedad antecedente (AMC) del suelo (seco, normal y húmedo) determinada a partir de la precipitación total en los cinco días previos. Se representa mediante un número adimensional, en curvas estandarizadas, las que varían entre 0 y 100; donde un área con CN = 0 no tiene escurrimiento, es decir toda el agua se infiltra, y otra con CN=100 es decir es completamente impermeable y toda la precipitación genera escurrimiento.

Los números de curvas se aplican para suelo de acuerdo con su potencial de escurrimiento. Tipo A bajo potencial de escurrimiento; Tipo B Moderadamente bajo potencial de escurrimiento; Tipo C Moderadamente alto potencial de escurrimiento y Tipo D Alto potencial de escurrimiento.

En la Tabla 2.3, proporcionado por la *Soil Conservation Service* (SCS), se muestra la clasificación del tipo de suelo de acuerdo con sus propiedades de infiltración.

Tabla 2. 3. Grupos hidrológicos del suelo (SCS).

Grupo Hidrológico del Suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de infiltración > 76 mm/h	Arenosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Correlacionando la información mostrada en la Tabla 2.4 con la proporcionada en el capítulo anterior del presente estudio, donde se indica que la cuenca en estudio cuenta con un tipo de suelo (Phaeozem), se concluye que el tipo de suelo que tiene la cuenca según los grupos de suelo de la SCS es de Tipo C.

Por lo tanto, para calcular el número de curva de escurrimiento CN de la cuenca en estudio se determina primero el número CN por grupo de suelo para cada cobertura utilizando los valores de la siguiente tabla.

Tabla 2. 4. Estimación del número CN por grupo de suelo.

Uso de suelo	Grupo de Suelo Tipo C
	CN
Área impermeable (zonas pavimentadas)	98
Áreas urbanas en desarrollo (terrenos nivelados sin vegetación)	91
Áreas con pastizal natural en condición hidrológica buena	74

Posteriormente se pondera por extensión de uso del terreno o suelo apoyándose con los datos mostrados en la Tabla 2.4, los resultados se muestran a continuación.

Uso de suelo	Extensión (km ²)	CN	Producto
Área impermeable (zonas pavimentadas)	28	98	2744
Áreas urbanas en desarrollo (terrenos nivelados sin vegetación)	59	91	5369
Áreas con pastizal natural en condición hidrológica pobre	178	74	13172
	265		21285

El valor de CN de la cuenca se obtiene dividiendo la suma de la columna de producto entre el área total de la cuenca.

$$CN = \frac{21285}{265.19} = 80.2632 \approx \mathbf{80}$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.3 Climatología

La climatología se basa principalmente en conocer la cantidad de agua que se ha precipitado y predecir la cantidad de agua que se precipitará debido a fenómenos climatológicos atmosféricos, principalmente lluvias. (INEGI, 2021).

Para ello, primero es necesario detectar todas las estaciones climatológicas que se encuentran cerca de la zona de estudio, después obtener de cada una de las estaciones, los datos históricos de la altura de la lámina de agua que han registrado.

En México existen dos organismos o instituciones que se encargan de recopilar y procesar toda la información climatológica de todas las estaciones con las que México cuenta, estas son: la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE).

La CONAGUA por medio de su sitio web Normales Climatológicas y el CICESE por medio de su software CLICOM, permiten descargar de manera gratuita toda la información histórica de las lluvias que cada estación registra, además de que también proporciona gráficas y datos estadísticos.

En la Figura 2.9 se observan las ubicaciones geográficas, de las estaciones climatológicas cercanas a la cuenca en estudio.



Figura 2. 9. Ubicación de las estaciones climatológicas (CONAGUA).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.4 Precipitación media de la cuenca

Para conocer la precipitación media de la cuenca, primero se debe de conocer la precipitación promedio anual de cada una de las estaciones cercanas a la zona de estudio, para ello se utilizó la información proporcionada por el software CLICOM. Tabla 2.5.

Tabla 2. 5. Precipitaciones medias de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

No. de Estación	Nombre	Ubicación	Precipitación media (mm)
24042	Mexquitic, SLP	San Luis Potosí	565.308
24069	San Luis Potosí (DGE)	San Luis Potosí	381.9
24111	San Luis Potosí (SMN)	San Luis Potosí	362.723
24024	El peaje, SLP	San Luis Potosí	408.638
24101	Villa de Reyes, SLP	San Luis Potosí	320.104

Existen dos métodos para calcular la precipitación media de la cuenca, los cuales son: Método de curvas isoyetas y Método de polígonos de Thiessen.

2.4.1 Método de curvas Isoyetas

El método de las Curvas Isoyetas consiste, primero en localizar en un plano el parteaguas de la cuenca y las estaciones existentes dentro y cerca de ellas, anotándole a cada una el valor de su lluvia media anual.

Después se buscará puntos que tenga el mismo valor de precipitación y se unirán todos ellos por líneas curvas. (Figura 2.10).

La precipitación media de la cuenca (P_{mc}) se evalúa ponderando la precipitación entre Isoyetas sucesivas (comúnmente el promedio) multiplicando por el área entre Isoyetas esto es:

$$P_{mc} = \frac{\sum A_i * P_i}{A_T}$$

Donde:

A_i = Área entre cada dos isoyetas dentro del parteaguas de la cuenca

A_T = Área total de la cuenca

P_i = Precipitación media entre cada dos isoyetas, por lo general se toma el valor medio entre ellas

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

$$P_{mc} = \frac{(500 * 0.2508) + (450 * 0.0260) + (400 * 24.3387) + (380 * 84.1239) + (360 * 156.4470) + (340 * 0.0083)}{265.19}$$

$$P_{mc} = 370.235 \text{ mm}$$

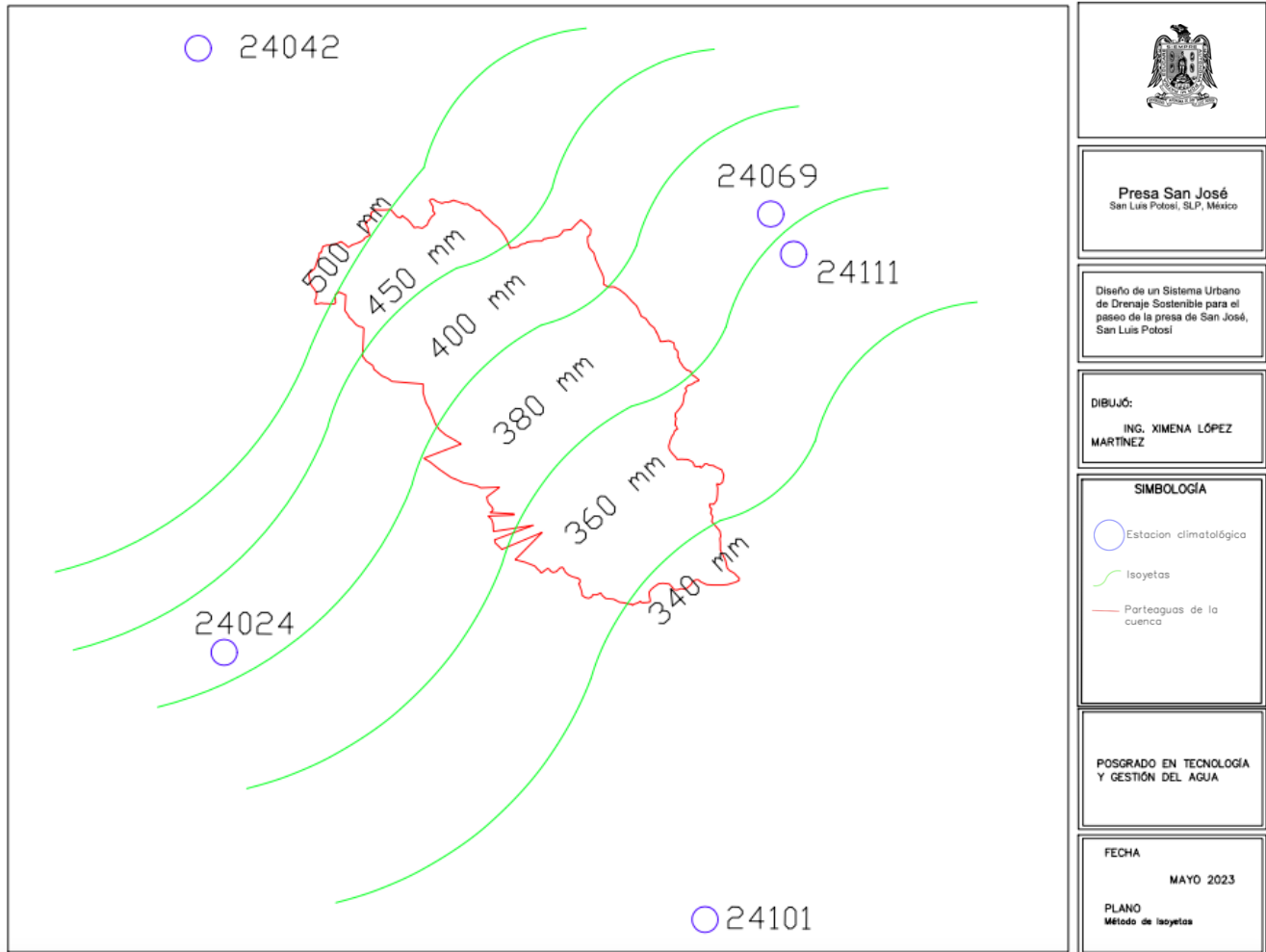


Figura 2. 10. Curvas Isoyetas.

2.4.2 Método de los polígonos de Thiessen

El método consiste en colocar en un mapa las estaciones pluviométricas y el área o cuenca para la que se realiza el análisis, en seguida forman triángulos con las estaciones más próximas entre ellas y posteriormente se trazan las mediatrices o bisectrices perpendiculares a cada lado de los triángulos formados, definiéndose unos polígonos alrededor de cada estación pluviométrica. La precipitación promedio sobre la cuenca se evalúa con la siguiente ecuación (*Campos-Aranda, 1984*):

$$P = \frac{\sum A_i}{A_T} * P_i$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Donde:

A_i = Área del polígono de cada una de las estaciones i dentro del parteaguas de la cuenca en km^2 o cm^2

A_T = Área total de la cuenca en km^2 o cm^2

P_i = Precipitación registrada en la estación i durante la tormenta analizada o durante el período de estudio, en milímetros

$$P = \frac{(39.974 * 408.638) + (89.632 * 381.900) + (18.619 * 320.104) + (74.652 * 362.723) + (41.760 * 565.308)}{265.19}$$

$$P = 404.139 \text{ mm}$$

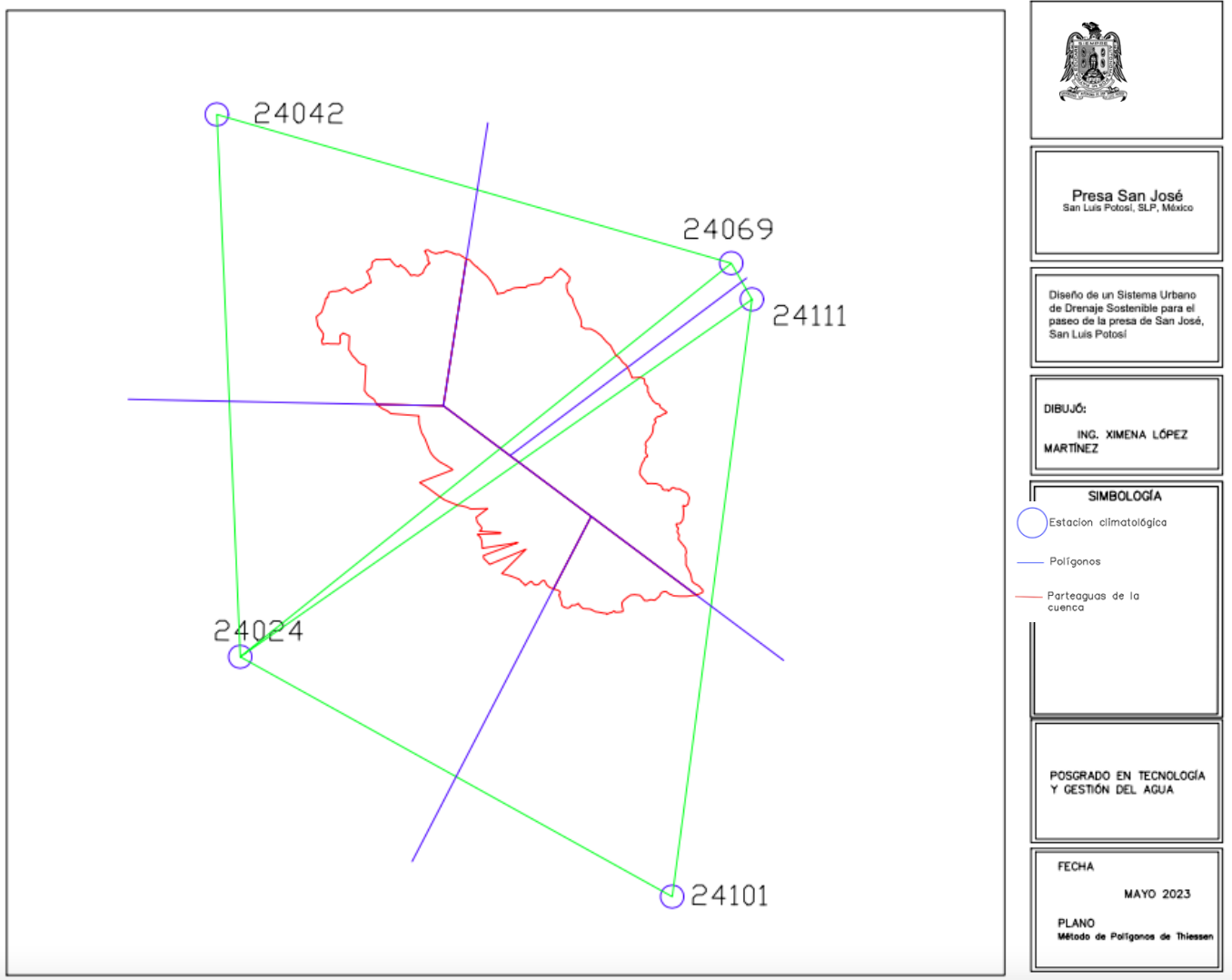


Figura 2. 11. Método de Polígonos de Thiessen.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.4.3 Estación base

Una estación base se determina en base a su cercanía a la cuenca que se este estudiando, esta puede estar dentro de la cuenca o lo más cerca posible de la misma.

Para la cuenca en estudio se eligirá la estación más cercana a la boquilla, siendo esta la estación 24069 con el nombre de San Luis Potosí (DGE).

2.4.4 Factor de transporte

Es muy comun que en ocasiones la estación base no coincida con el centroide de la cuenca, es por esto que se deben transportar los datos, simulando una estación en el centroide de la cuenca. Esto se realiza a partir de un factor de transporte.

El valor de factor de transporte (FT) es calculado mediante los métodos de curvas isoyetas o polígonos de Thiessen, de acuerdo con la influencia de área de las estaciones y la precipitación media anual de la estación base elegida mediante las siguientes ecuaciones:

$$FT = \frac{P_{mc}}{P_{mb}}$$

$$P_{mc} = \frac{\sum A_i * P_i}{A_T}$$

Donde:

P_{mc} = PMA de la cuenca en mm

P_{mb} = PMA de la estación base en mm

A_i = Área de la estación o curva dentro de la cuenca en km^2

A_T = Área Total de la cuenca en km^2

P_i = PMA del polígono o curva correspondiente dentro de la cuenca en mm

Mediante el método de curvas isoyetas:

$$FT = \frac{370.23}{381.90}$$

$$FT = 0.9694 \approx 1$$

Mediante el método de polígonos de Thiessen:

$$FT = \frac{404.139}{381.90}$$

$$FT = 1.058$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

De esta manera se obtienen las precipitaciones representativas dentro de la cuenca de estudio, tanto anual como la máxima de 24 horas para los siguientes cálculos.

2.4.5 Precipitación media anual en la cuenca

La precipitación media anual de la cuenca (PMA) con el factor de transporte calculado será de 391.70 mm, con una precipitación anual registrada como se muestra en la Figura 2.12.

De esta manera se ven afectados también los datos anuales registrados por la estación base, como se muestra en la Tabla 2.6.

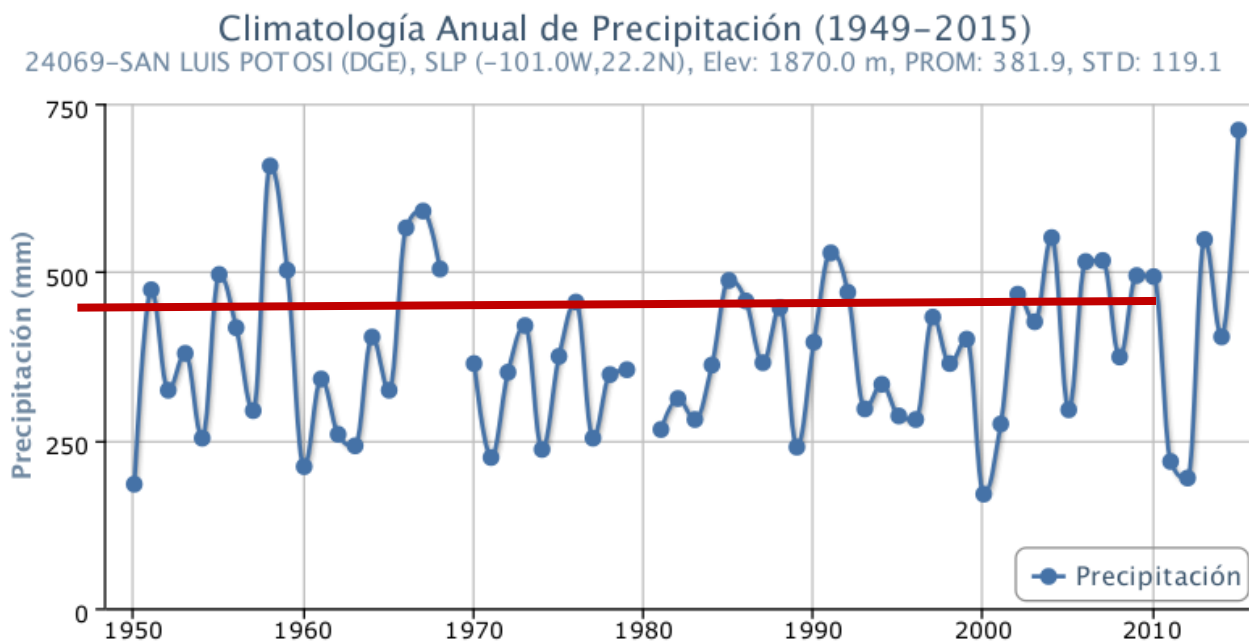


Figura 2.12. Gráfica de comparativa de precipitaciones en la estación base y la cuenca. (CLICOM).

Tabla 2.6. Comparativa de precipitaciones máximas anuales en la estación base y la cuenca.

Año	Estación base	Cuenca	Año	Estación base	Cuenca
1949	108.00	114.37	1983	311.80	330.20
1950	338.00	357.94	1984	280.40	296.94
1951	184.30	195.17	1985	361.60	382.93
1952	473.20	501.12	1986	487.20	515.94
1953	323.90	343.01	1987	456.70	483.65
1954	378.90	401.26	1988	364.80	386.32
1955	252.80	267.72	1989	446.50	472.84
1956	495.90	525.16	1990	239.50	253.63

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Año	Estación base	Cuenca	Año	Estación base	Cuenca
1957	417.00	441.60	1991	395.50	418.83
1958	293.60	310.92	1992	528.10	559.26
1959	657.20	695.97	1993	469.60	497.31
1960	502.40	532.04	1994	296.10	313.57
1961	210.60	223.03	1995	332.80	352.44
1962	340.50	360.59	1996	285.70	302.56
1963	258.30	273.54	1997	280.40	296.94
1964	241.40	255.64	1998	432.60	458.12
1965	403.20	426.99	1999	363.70	385.16
1966	324.00	343.12	2000	399.80	423.39
1967	565.20	598.55	2001	169.60	179.61
1968	590.30	625.13	2002	273.90	290.06
1969	504.10	533.84	2003	466.80	494.34
1970	220.70	233.72	2004	425.70	450.82
1971	363.50	384.95	2005	550.80	583.30
1972	224.00	237.22	2006	295.10	312.51
1973	350.70	371.39	2007	515.20	545.60
1974	420.10	444.89	2008	516.90	547.40
1975	235.90	249.82	2009	373.50	395.54
1976	374.40	396.49	2010	494.50	523.68
1977	455.10	481.95	2011	492.70	521.77
1978	252.80	267.72	2012	218.00	230.86
1979	347.20	367.68	2013	193.40	204.81
1980	354.60	375.52	2014	548.10	580.44
1981	438.90	464.80	2015	403.40	427.20
1982	265.60	281.27	2016	710.50	752.42

2.4.6 Precipitación máxima 24 horas en la cuenca

Una vez identificada la estación base y sus PMA, se procede a obtener los registros de lluvias diarias. Con la ayuda del software CLICOM proporcionado por el CICESE se obtuvieron las precipitaciones máximas de 24 horas. Tabla 2.7

Tabla 2. 7. Comparativa de precipitaciones máximas de 24 horas en la estación base y la cuenca.

Año	P Anual	Afectado por FT	Año	P Anual	Afectado por FT
1949	15.90	16.847	1986	44.00	46.621
1950	20.60	21.827	1987	41.00	43.442

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Año	P Anual	Afectado por FT	Año	P Anual	Afectado por FT
1951	50.90	53.932	1988	55.00	58.276
1952	40.50	42.912	1989	21.50	22.781
1953	63.60	67.388	1990	29.80	31.575
1954	41.90	44.396	1991	41.50	43.972
1955	60.00	63.574	1992	25.40	26.913
1956	35.90	38.038	1993	59.00	62.514
1957	48.60	51.495	1994	33.50	35.495
1958	63.00	66.752	1995	46.50	49.270
1959	35.50	37.614	1996	51.00	54.038
1960	40.00	42.382	1997	42.70	45.243
1961	63.20	66.964	1998	35.50	37.614
1962	39.40	41.747	1999	45.50	48.210
1963	27.20	28.820	2000	25.90	27.443
1964	59.00	62.514	2001	20.70	21.933
1965	32.00	33.906	2002	37.50	39.734
1966	30.00	31.787	2003	40.20	42.594
1967	40.20	42.594	2004	44.60	47.256
1968	31.50	33.376	2005	43.30	45.879
1969	31.50	33.376	2006	76.90	81.480
1970	52.00	55.097	2007	42.80	45.349
1971	28.40	30.092	2008	46.10	48.846
1972	31.30	33.164	2009	42.50	45.031
1973	35.00	37.085	2010	45.30	47.998
1974	28.50	30.197	2011	44.50	47.150
1975	57.20	60.607	2012	19.66	20.829
1976	58.00	61.454	2013	52.48	55.600
1977	42.90	45.455	2014	27.75	29.403
1978	26.40	27.972	2015	56.69	60.068
1979	65.50	69.401	2016	28.79	30.507
1980	22.00	23.310	2017	35.16	37.252
1981	34.20	36.237	2018	46.78	49.570
1982	66.50	70.461	2019	22.40	23.734
1983	26.00	27.549	2020	31.63	33.509
1984	31.50	33.376	2021	47.16	49.972
1985	46.50	49.270	2022	21.58	22.869

Con el fin de obtener una predicción de lo que pudiera llover en el futuro, es necesario, a partir de un análisis probabilístico, obtener funciones de distribución, que permitan obtener las posibles precipitaciones máximas anuales que se pudieran presentar durante diferentes periodos de retorno.

Aunque existen un número importante de distribuciones de probabilidad empleadas en hidrología son sólo unas cuantas las comúnmente utilizadas, debido a que los datos hidrológicos de diversos tipos han probado en repetidas ocasiones ajustarse satisfactoriamente a un cierto modelo teórico.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Las funciones de distribución más empleadas en hidrología son: Log-Pearson Tipo III, Gumbel y Gamma Incompleta.

2.4.7 Distribución Log-Pearson III

Esta distribución es un caso especial de la Gama, es asimétrica y depende de tres parámetros estadísticos, haciéndola bastante flexible. Este procedimiento se lleva a cabo al igual que los modelos normal y log normal, con la excepción de que el factor de frecuencia se establece de la Tabla de (Campos-Aranda, 1984), B-4, en función de la probabilidad o coeficiente Cs o g, según se trate su distribución.

$$X = 10^{\log X}$$

$$\log X = \overline{\log x} + K \cdot I_v$$

$$I_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\log x_i - \log \bar{x})^2} \quad ; \quad K = g = \frac{n \sum (\log x_i - \log \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)(I_v)^3}$$

Donde:

I_v = índice de variabilidad

g = coeficiente de oblicuidad, cuando este es igual a cero, se reduce a una distribución log-normal.

Una vez obtenidos los datos, se calculan los parámetros para la distribución, si el valor de oblicuidad no se encuentra en la tabla, este se interpola mediante los existentes como se muestra en la para el cálculo de la distribución como se muestra a continuación.

Tabla 2. 8. Obtención de K de acuerdo al coeficiente de oblicuidad.

P(X<=x)	K		
	-0.8	-0.855119	-0.9
0.01	-2.891	-2.92738	-2.957
0.05	-1.839	-1.84947	-1.858
0.1	-1.336	0.13843	1.339
0.2	-0.780	-0.77394	-0.769
0.5	0.132	0.14082	0.148
0.8	0.856	0.85490	0.854
0.9	1.166	1.15553	1.147
0.96	1.448	1.42540	1.407
0.98	1.606	1.57458	1.549
0.99	1.733	1.69276	1.660
0.998	1.948	1.88957	1.842

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para mayor comprensión de la gráfica de la Figura 2.13, los datos calculados por el método de Log-Pearson tipo III se encuentran en el Anexo 2.2.

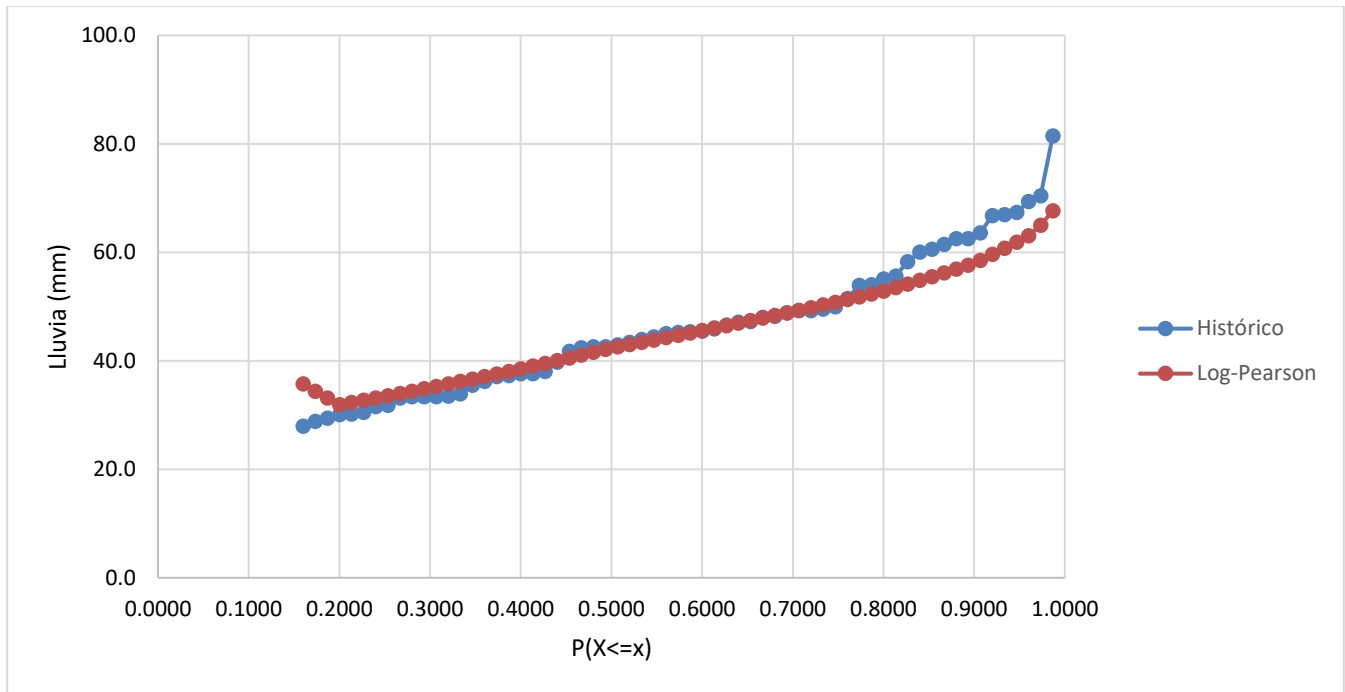


Figura 2.13. Gráfico de Log Pearson III.

2.4.8 Distribución Gamma Incompleta

La distribución Gamma Incompleta o de dos parámetros es bastante flexible, su parámetro de forma a y el de escala d , se evalúan por medio de las expresiones a continuación.

$$a = \frac{\bar{x}^2}{S^2} \quad ; \quad b = \frac{S^2}{\bar{x}}$$

En función del parámetro de forma a y de la probabilidad, se determinan los valores buscados de la variable $X = u \cdot S$, siendo u la variable reducida y S la desviación típica. El parámetro de forma a , se encuentra en la Tabla de (Campos-Aranda, 1984), B-5, mediante este se calcula la variable reducida para cada orden de dato.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 2. 9. Obtención de u de acuerdo con el parámetro de forma a .

P(X<=x)	u		
	12	12.860945	13
0.001	1.16	1.25470	1.27
0.01	1.56	1.67192	1.69
0.1	2.26	2.38053	2.40
0.3	2.88	3.00053	3.02
0.5	3.37	3.49053	3.51
0.8	4.27	4.37331	4.39
0.9	4.79	4.82444	4.83
0.95	5.26	5.38053	5.40
0.99	6.20	6.31192	6.33
0.995	6.58	6.68331	6.70
0.999	7.39	7.48470	7.50

Para mayor comprensión de la gráfica de la Figura 2.14, los datos calculados por el método de Gamma Incompleta III se encuentran en el Anexo 2.3.

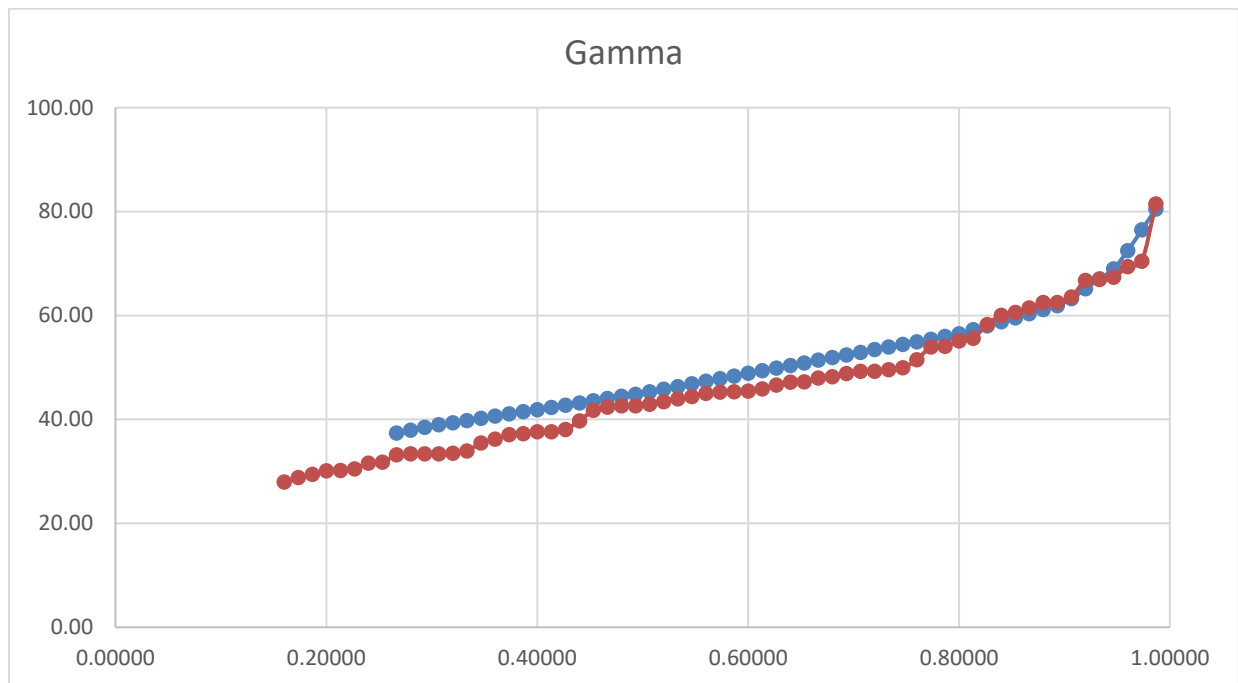


Figura 2. 14. Gráfico de Gamma Incompleta.

2.4.9 Distribución Gumbel Simple

Esta distribución es de tipo exponencial ya que, al crecer x , converge a una función exponencial, esta también es conocida como Distribución de valores extremos tipo I.

Los valores extremos son valores máximos o mínimos seleccionados de conjuntos de datos (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Para el caso de esta distribución, su limitante es el número de datos ya que su variable reducida está en función de ellos.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

V.T. Chow (1954) demostró que es básicamente un caso especial de la distribución Log-normal, pues en la función Gumbel se tiene un coeficiente de asimetría (C_v) constante e igual a 1.139, formulándose su ecuación como se muestra.

$$X = \bar{x} + \left(\frac{y - \bar{y}n}{\sigma n} \right) S$$

$$y = -\text{Ln}[-\text{Ln} P(X \leq x)] \quad ; \quad S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

X = Valor buscado de una determinada probabilidad o periodo de retorno.

\bar{x}, S = Media y desviación típica de los datos, respectivamente.

$\bar{y}n, \sigma n$ = Monstantes teóricas, función del tamaño n de la muestra. Se obtienen de la Tabla de (Campos-Aranda, 1984), B-8.

y = Variable reducida, función de la probabilidad.

El cálculo de la distribución Gumbel simple está en función del número de eventos de la serie, donde mediante las constantes teóricas, se evalúa la variable reducida para el factor de frecuencia y X buscado.

Al determinar las constantes teóricas para el número de datos, se evalúan sus parámetros y se obtienen los valores buscados, como se muestra en la siguiente tabla.

Por último, en una gráfica con ejes coordenados log-normal se grafican los valores de X calculados y los datos del registro histórico, para poder apreciar la bondad del ajuste, con la que el método cuenta, para la cuenca en estudio.

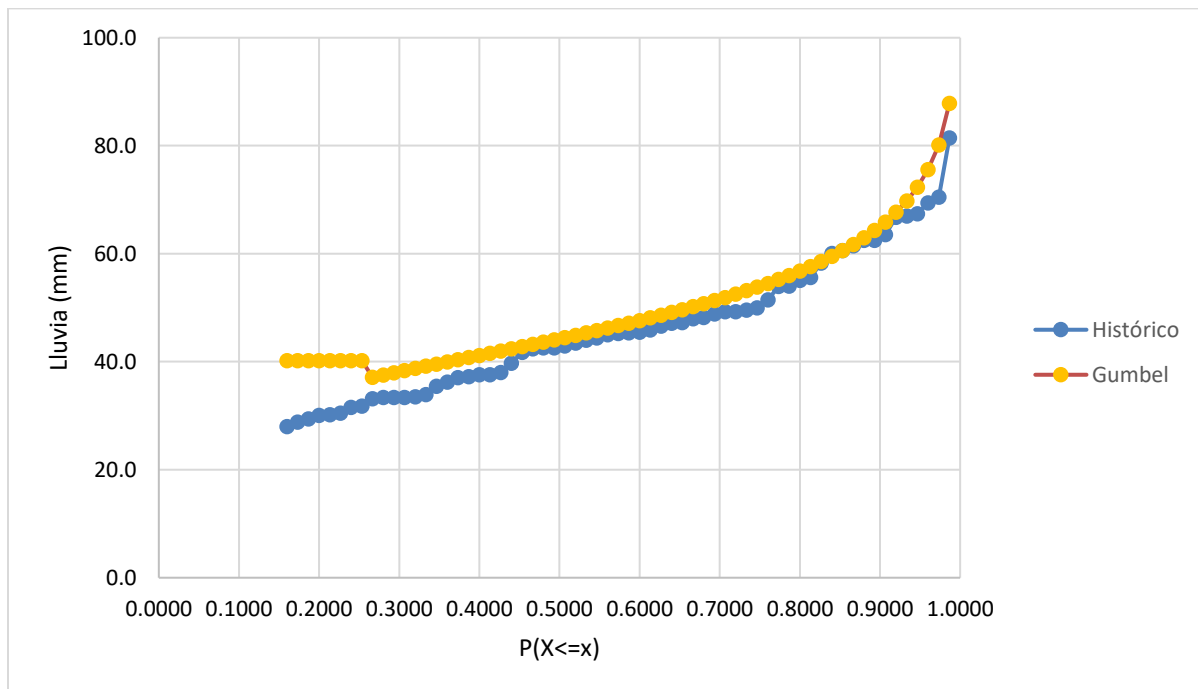


Figura 2. 15. Gráfico de Gumbel Simple.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para mayor comprensión de la gráfica de la Figura 2.15, los datos calculados por el método de Gumbel Simple se encuentran en el Anexo 2.4.

2.4.10 Elección de la mejor distribución

De acuerdo con las recomendaciones para la aplicación de alguna distribución y con los datos máximos que se tienen en las estaciones, los resultados de las tres metodologías seleccionadas tienen resultados similares a los de la cuenca. Para la selección de la distribución se utilizan ecuaciones de bondad de ajuste como el error cuadrático medio, mediante la siguiente ecuación:

$$Error = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{historico_i} - X_{calculado_i})^2}$$

El método que proporcione el menor error será el elegido. Los valores del error obtenidos en cada método se muestran en la Tabla 2.10.

Tabla 2. 10. Errores calculados de cada método para la cuenca en estudio.

CUENCA	GAMMA	LOG-PEARSON III	GUMBEL
Presa de San José	5647.51138	392.693251	903.686682

Observando los datos mostrados en la Tabla 2.10, se concluye que el método de Log-Pearson III es el que tienen el mejor ajuste.

Por lo tanto, con esta distribución se obtienen las lluvias probables diarias en los periodos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años mostrados en la Tabla 2.11.

Tabla 2. 11. Lluvias probables para la cuenca en estudio.

Tr	P(X<=x)	K	log(X)	X	P
2	0.5000	0.1408	1.627	42.4	47.9
5	0.8000	0.8549	1.723	52.8	59.7
10	0.9000	1.1555	1.763	58.0	65.5
25	0.9600	1.4254	1.800	63.0	71.2
50	0.9800	1.5746	1.820	66.0	74.6
100	0.9900	1.6928	1.8356	68.5	77.4

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.5 Curvas I – D – Tr

La lluvia se define mediante tres variables: magnitud o lámina, duración y frecuencia. La magnitud de la lluvia es la precipitación total ocurrida en la duración de la tormenta; la frecuencia se expresa por el periodo de retorno de la lluvia o su intervalo de ocurrencia, que es el tiempo promedio en años en el cual el evento puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en promedio. Las curvas I – D – Tr forman una gráfica en la que concentran las características de las tormentas de la zona región, con respecto a las variables mencionadas. (Campos-Aranda & Gómez de L., 1990).

Para obtener las curvas I-D-Tr, se utilizará el método de Cheng (Chen, 1983). Donde presenta una fórmula general de intensidad de lluvia – periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas y periodos de retorno mayores de un año. Para la aplicación de la fórmula de Chen, se requiere de la estimación de los cocientes lluvia – duración (R) y lluvia – periodo de retorno (F) con las siguientes ecuaciones.

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}} \quad ; \quad F = \frac{P_1^{100}}{P_{24}^{100}}$$

La fórmula propuesta por Chen para estimar la lluvia en milímetros de duración t en minutos y periodo de retorno Tr en años, es la que se muestra en la ecuación siguiente.

$$P_t^T = \frac{a \cdot P_1^{10} \log(10^{2-F} \cdot T^{F-1})t}{(t + b)^c} \quad ; \quad I_t^T = \frac{P_t^T}{t}$$

Donde:

P_1^{10} = Precipitación de duración 60 minutos y periodo de retorno 10 años (mm).

a, b, c = Parámetros en función del cociente R , se determinan mediante las siguientes ecuaciones.

Si $0.10 \leq R \leq 0.60$:

$$\begin{aligned} a &= -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \\ b &= -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \\ c &= -0.06498345 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \end{aligned}$$

Si $0.20 \leq R \leq 0.70$:

$$\begin{aligned} a &= 21.03453 - 186.4681 \cdot R + 825.4915 \cdot R^2 - 1,084.846 \cdot R^3 + 524.06 \cdot R^4 \\ b &= 3.487775 - 68.13976 \cdot R + 389.4625 \cdot R^2 - 612.4041 \cdot R^3 + 315.8721 \cdot R^4 \\ c &= 0.2677553 + 0.9481759 \cdot R + 2.109415 \cdot R^2 - 4.827012 \cdot R^3 + 2.459584 \cdot R^4 \end{aligned}$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Aplicando el método detallado anteriormente, se empieza por multiplicar las predicciones de lluvia diaria para periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años por 1.13 para convertirlas en precipitaciones de 24 horas de duración e igual $Tr(P^{Tr})$. 24

Tabla 2. 12. Precipitaciones convertidas a 24 horas.

Tr	LLUVIA MAX (mm)	P_{24}^{Tr} (mm)
10	59.5	67.22
25	71.7	80.99
50	80.9	91.40
100	90.1	101.82

Este método necesita el valor de la intensidad de la lluvia para 60 minutos para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

La Organización Meteorológica Mundial, indica que el cociente entre la lluvia en una hora de período de retorno de 2 años y la de 24 horas e igual frecuencia, se ha relacionado con la ocurrencia de tormentas, mediante estudios que incluyeron un amplio rango de climas del mundo, las relaciones encontradas se observan en la Tabla 2.13.

Tabla 2. 13. Cociente entre la lluvia de 1h y la de 24 h.

Número medio de días con lluvia por año *	1	8	16	24 o mayor
$(P_1 \text{ hora} / P_{24 \text{ horas}})_{2 \text{ años}}$	0.20	0.30	0.40	0.50

*Días con lluvia mayor o igual a un milímetro

Para conocer el valor de la precipitación con intensidad de 1 hora para los periodos de retorno faltantes, se utilizará la fórmula de Bell.

$$P_t^{Tr} = [0.35 \ln(Tr) + 0.76] [0.54 (t)^{0.25} - 0.5] P_{60 \text{ min}}^{2 \text{ años}}$$

Sustituyendo el valor de la intensidad de $t = 60$ minutos y el valor de la precipitación para una intensidad de 1 hora y 2 años de periodo de retorno, la ecuación queda:

$$P_{60 \text{ min}}^{Tr} = [0.35 \ln(Tr) + 0.76] [0.54 (60)^{0.25} - 0.5] 28.59$$

Los valores obtenidos aplicando la fórmula de Bell se muestran en la Tabla 2.14.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 2. 14. Valores de intensidad de la lluvia para 60 minutos.

Tr	P
2	33.52
10	52.64
25	63.43
50	71.58
100	79.74

Con los valores mostrados en la Tabla 2.14 se obtiene los valores de R y de F .

$$R = \frac{P_1^{Tr}}{P_{24}^{Tr}}; \quad F = \frac{P_{24}^{100}}{P_{24}^{10}}$$

$$R = 0.78. \quad F = 1.51471$$

Con los datos calculados se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2.15, y se grafican los valores de intensidad- duración en una gráfica logarítmica para obtener las curvas I-D-Tr. (Figura 2.16)

Tabla 2. 15. Valores obtenidos aplicando el método de Cheng.

Tr	alfa	DURACION (min)											Tiempo Conce
		5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	1440	
													68.45
2	1933.0	134.5	108.4	91.0	78.6	62.0	47.4	38.5	30.9	25.9	22.4	2.5	34.9
5	2551.3	177.5	143.0	120.1	103.7	81.9	62.6	50.8	40.8	34.2	29.5	3.4	46.1
10	3019.1	210.1	169.2	142.1	122.8	96.9	74.0	60.2	48.3	40.5	35.0	4.0	54.5
25	3637.5	253.1	203.9	171.2	147.9	116.7	89.2	72.5	58.2	48.8	42.1	4.8	65.7
50	4105.3	285.7	230.1	193.3	166.9	131.7	100.7	81.8	65.7	55.1	47.5	5.4	74.1
100	4573.1	318.2	256.4	215.3	186.0	146.7	112.1	91.1	73.2	61.4	53.0	6.0	82.5

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

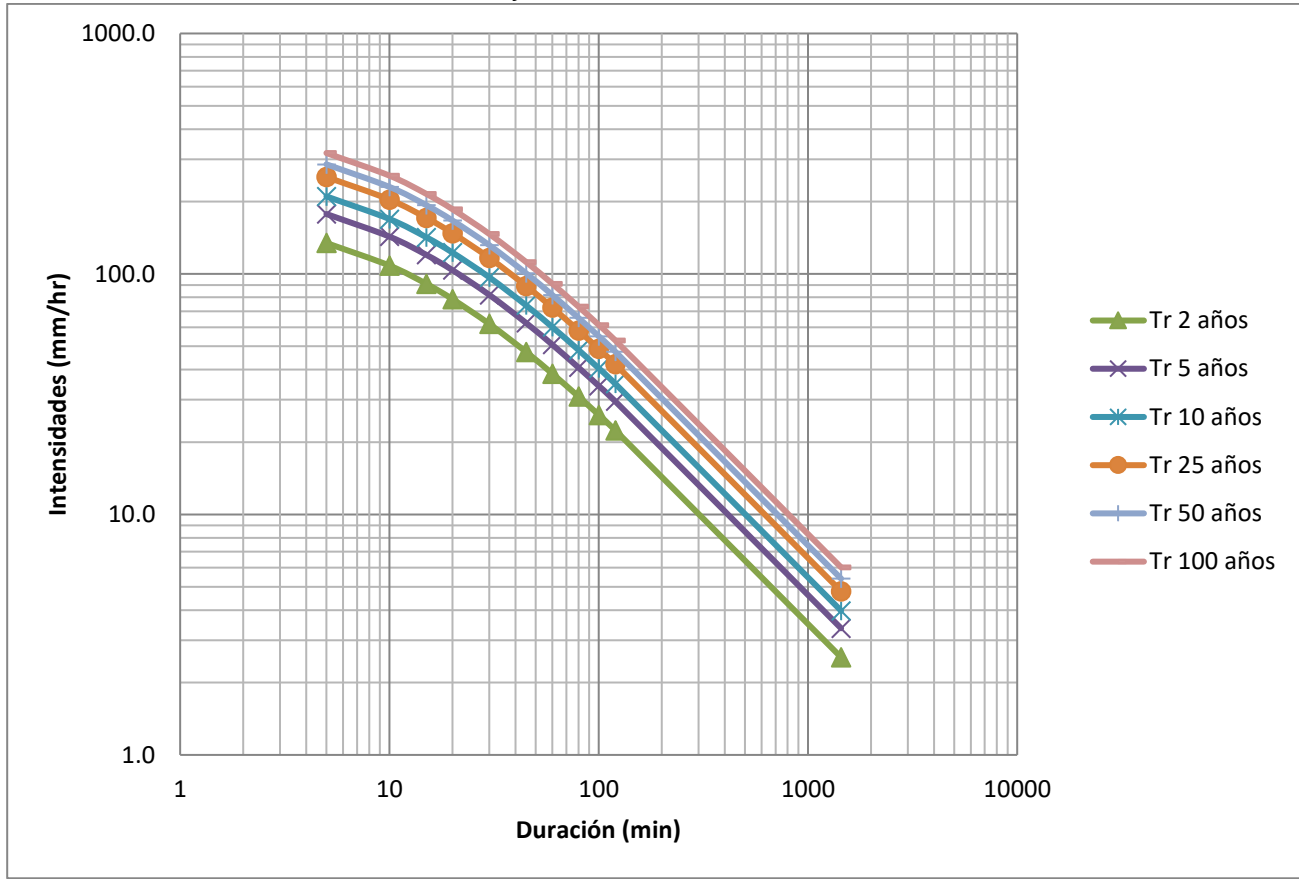


Figura 2. 16. Curvas de intensidad, duración y período de retorno.

2.6 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de una tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más distante, hasta la salida de la cuenca o sitio del proyecto, o bien el lapso transcurrido desde el final de la tormenta hasta el término de su hidrograma de escurrimiento superficial. (Campos-Aranda, 2010).

Naturalmente el tiempo de concentración depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere, en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y los cauces, y de la rugosidad de la superficie de estos. (Aparicio Mijares, 1989).

Existen diferentes metodologías para la obtención del tiempo de concentración, este se calcula dependiendo de las especificaciones de cada metodología, para el caso de la cuenca de la Presa de San José, se utilizan 3 metodologías que se describen a continuación.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.6.1 Fórmula de Kirpich

Una de las fórmulas empíricas más conocidas para estimar el tiempo de viaje en flujos concentrados es la Kirpich, calibrada en cuencas pequeñas agrícolas y parcialmente boscosas de Tennessee, esta es:

$$T_c = \frac{0.0195 \cdot L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde, T_c es el tiempo de concentración en minutos, L_c es la longitud del cauce principal en metros y S la pendiente estimada como el desnivel total del tramo (H) en metros entre L_c .

En la Tabla 2.16 se muestra el valor del tiempo de concentración, para la cuenca, calculado por este método.

Tabla 2. 16. Tiempo de concentración según Kirpich.

Kirpich				
	Lc (m)	S (m/m)	Tc (min)	Tc (hr)
CUENCA 01	39428.88	0.0200	303.82	5.06363731

2.6.2 Fórmula del Soil Conservation Service (SCS)

Ecuación desarrollada por el SCS a partir de información de cuencas de uso agrícola; ha sido adaptada a pequeñas cuencas urbanas con áreas inferiores a 800 Ha; se ha encontrado que generalmente es buena cuando el área se encuentra completamente pavimentada; para áreas mixtas tiene tendencia a la sobreestimación; se aplican factores de ajuste para corregir efectos de mejoras en canales e impermeabilización de superficies. La ecuación es:

$$T_c = \frac{0.0136 \cdot L^{0.80}}{\sqrt{S_c}} \left(\frac{1000}{N} - 9 \right)^{0.70}$$

Donde, L_c es la longitud del cauce principal en metros, S su pendiente en m/m y CN el número de la curva de escurrimiento ponderado.

La Tabla 2.17 muestra los valores del tiempo de concentración, para la cuenca, calculados por este método.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 2. 17. Tiempo de concentración según SCS.

SCS					
	Lc (m)	S (m/m)	CN	Tc (min)	Tc (hr)
CUENCA 01	39428.88	0.0200	80	1096.81	18.2801811

2.6.3 Método de Chow

Se usa para estimar el tiempo de concentración de cuencas naturales de área cuya extensión no sobrepase los 3,000 km². (Rodríguez R., 2018). Se utiliza la expresión:

$$T_c = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64}$$

Donde, T_c es el tiempo de concentración en horas, L_c es la longitud del cauce principal en m; y S es la pendiente media del cauce en porcentaje.

Los valores del tiempo de concentración calculados por este método son mostrados en la Tabla 2.18.

Tabla 2. 18. Tiempo de concentración según Chow.

Método de Chow				
	Lc (m)	S (%)	Tc (hr)	Tc (min)
CUENCA 01	39428.88	2.00	6.994	419.66

2.7 Curvas P – D – Tr

Las curvas de Precipitación, Duración, Periodo de Retorno (P-D-Tr), sirven para relacionar la altura de la lluvia en 24 horas con la duración de la tormenta y así, asociarlo a ciertos periodos de retorno.

La elaboración de estas curvas parte de las características propias de la cuenca, básicamente sus estaciones de influencia y el tiempo de concentración.

Para la construcción de las curvas *P-D-Tr* se utilizó el modelo de Emil Kuishiling y C.E. Gransky. Las fórmulas son las siguientes:

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

$$P_T = \frac{K T^{1-e}}{1-e}$$

$$K = \frac{P_{24}(1-e)}{24^{1-e}}$$

Donde:

- P_T = Precipitación en el tiempo T (mm)
- P₂₄ = Precipitación en un tiempo de 24 horas (mm)
- T = Tiempo de duración de la lluvia (hr)
- e = Coeficiente de Kuishiling

Tabla 2. 19. Valores del coeficiente de Kuishiling.

Tr (años)	Pmax 24 (mm)	K	5	10	15	20	30	45	60	80	100	120	1440	606.7614
2	67.04	7.463	6.54	8.69	10.27	11.56	13.66	16.13	18.16	20.44	22.40	24.14	67.04	47.00
5	80.61	8.974	7.86	10.45	12.35	13.90	16.42	19.40	21.83	24.57	26.93	29.03	80.61	56.51
10	85.28	9.494	8.32	11.06	13.07	14.71	17.37	20.52	23.10	26.00	28.50	30.71	85.28	59.79
25	87.74	9.768	8.56	11.38	13.44	15.13	17.87	21.12	23.77	26.75	29.32	31.60	87.74	61.51
50	88.41	9.842	8.62	11.47	13.55	15.25	18.01	21.28	23.95	26.95	29.54	31.84	88.41	61.98
100	88.75	9.879	8.66	11.51	13.60	15.30	18.08	21.36	24.04	27.05	29.65	31.96	88.75	62.21

Aplicando las fórmulas anteriores y con los resultados obtenidos, se calculan los datos para formar las curvas Precipitación- Duración-Periodo de Retorno. (Figura 2.17)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

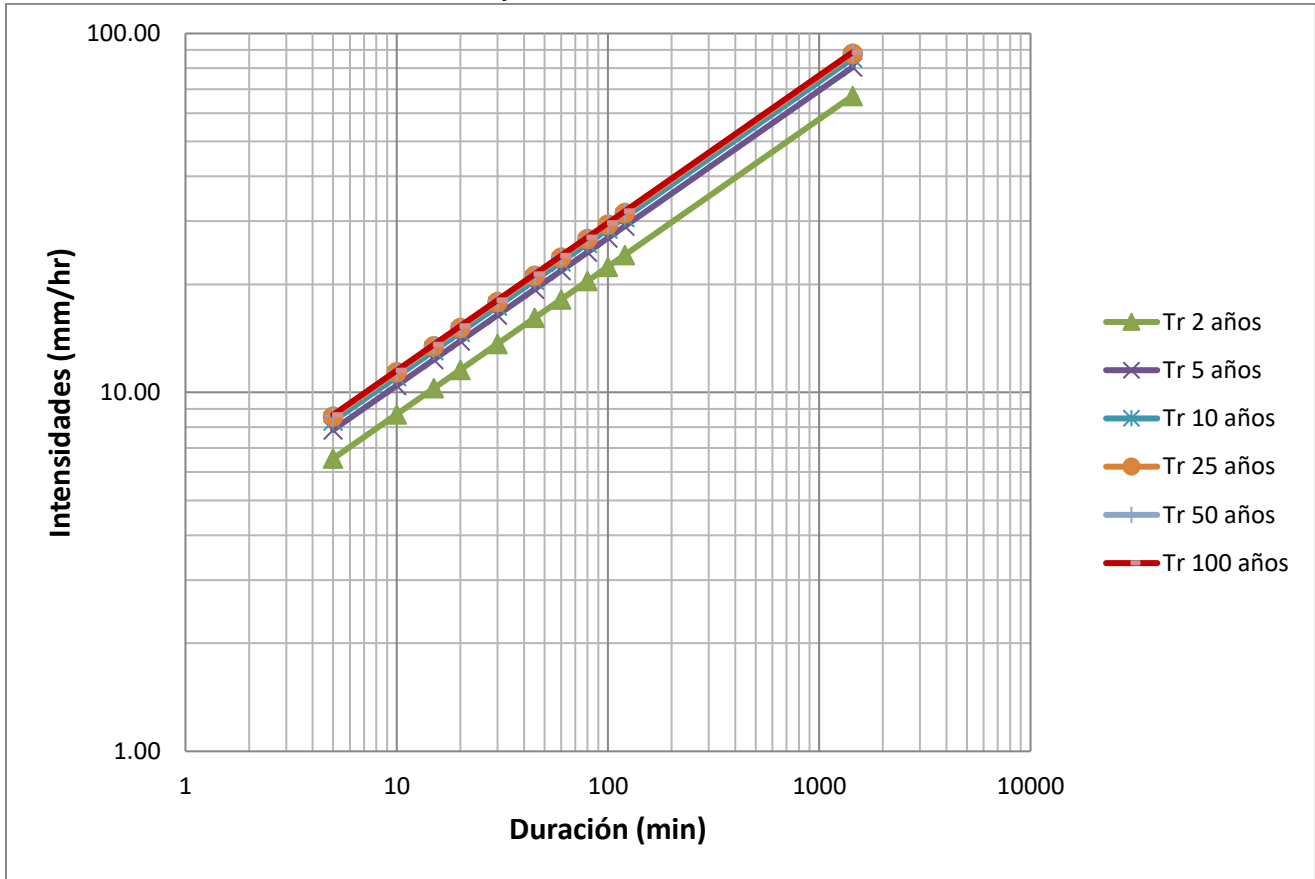


Figura 2. 17. Curvas de precipitación, duración y período de retorno.

2.8 Gasto- Esguerrimiento

El esguerrimiento es la variable que indicará el volumen de agua pluvial que llegará a la zona en estudio, con este dato se podrá diseñar el canal o colector pluvial que servirán, para proteger la zona de estudio, y conducir las aguas pluviales al canal existente, en algunos casos.

Las estimaciones del gasto por esguerrimiento, de las cuencas en estudio, se realizan utilizando hidrogramas sintéticos o fórmulas empíricas, de manera que puede conducir a valores erróneos, cuando se aplica un solo método, ya que, con frecuencia, las cuencas en estudio no tienen similitud con las cuencas que se emplearon para su deducción.

Por lo tanto, se recomienda emplear por lo menos tres métodos para calcular el gasto por esguerrimiento.

En este trabajo los métodos que se utilizarán: Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT), Método Racional y Método de Ven Te Chow.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Antes de calcular el gasto por escurrimiento, los métodos que se utilizarán para calcular el escurrimiento requieren del cálculo previo de los siguientes parámetros:

- Lluvia en Exceso
- Coeficiente de Escurrimiento
- Intensidad

2.8.1 Lluvia en exceso (Pe)

De toda la lluvia que cae sobre la superficie terrestre, una parte de ella se infiltra o se estanca, y la otra parte escurre. A esa cantidad de agua que escurre se le conoce como lluvia en exceso o precipitación efectiva (Pe). Para obtener la lluvia en exceso se emplea la siguiente ecuación:

$$Pe = \frac{(P_d \frac{500}{CN} + 5.08)^2}{P_d + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

Donde:

P_d = Precipitación acumulada en cm (obtenida de las curvas P-D-Tr)

CN = Número de escurrimiento adimensional

Los valores de la precipitación en exceso para la cuenca en estudio se presentan en la Tabla 2.20.

Tabla 2. 20. Valores de la precipitación en exceso para la cuenca en estudio.

Tr	Pd	Pe	C
2	47.00	12.03	0.256
5	56.51	17.89	0.317
10	59.79	20.05	0.335
25	61.51	21.21	0.345
50	61.98	21.53	0.347
100	62.21	21.69	0.349

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.8.2 Coeficiente de Escurrimiento

La relación que existe entre el caudal de entrada al sistema y el gasto pico se le conoce como coeficiente de escurrimiento. Para obtener este coeficiente la siguiente ecuación:

$$C = \frac{P_e}{P_d}$$

Los resultados se muestran en la Tabla 2.21.

2.8.3 Intensidad

Para calcular la intensidad (I) se utiliza la siguiente ecuación:

$$K = \frac{P_{24}(1 - e)}{24^{1-e}}$$

Donde:

K = Parámetro de la ecuación de distribución de lluvia en el tiempo

Tc = Tiempo de concentración (hr)

Los valores de la intensidad (I) y el coeficiente de escurrimiento (C) calculados para la cuenca en estudio, se muestran en la Tabla 2.21.

Tabla 2. 21. Cálculo de C e I para la cuenca en estudio.

Tr	C (adimensional)	I (mm/hr)
2	0.65567375	16.6758713
5	0.701	20.051
10	0.714	21.213
25	0.721	21.825
50	0.722	21.991
100	0.723	22.074

2.8.4 Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

El hidrograma unitario se define como el hidrograma de gasto resultante de una lluvia en exceso unitaria, ocurriendo uniformemente sobre la cuenca y durante la duración unitaria especificada. La definición anterior limita a cuencas no mayores a 1,300 km², de ser mayor se

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

recomienda la creación de subcuencas, ya que en tales cuencas es todavía muy probable que la lluvia procedente de un fenómeno no ciclónico iguales a la magnitud de las crecientes originadas por las precipitaciones ciclónicas. (Campos-Aranda, 2010).

Este método, desarrollado por el SCS, también llamado del “número de curva” consta de dos partes. En una de ellas se hace una estimación del volumen de escurrimiento resultante de una precipitación - escurrimiento directo, y en la otra se determina el tiempo de distribución del escurrimiento, incluyendo el caudal punta.

Para la distribución en el tiempo del escurrimiento se hace uso del hidrograma unitario adimensional (Figura 2.18).

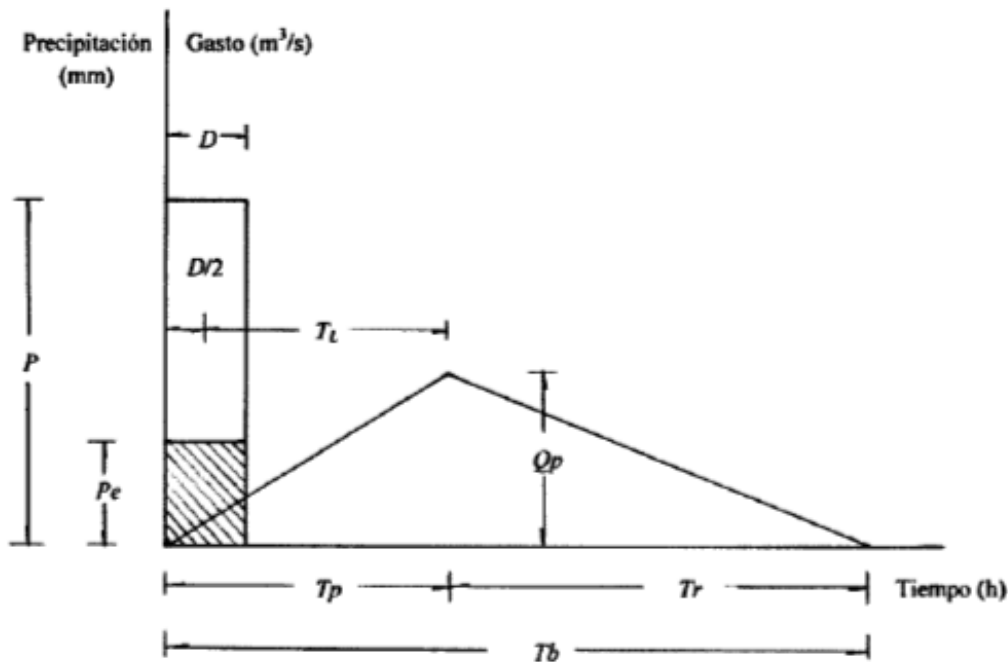


Figura 2. 18. Componentes geométricos del HUT. (Campos-Aranda, 2010).

La escala de tiempo del hidrograma se expresa en unidades del período de ascenso (T_p) del mismo, y los gastos de escurrimiento se expresan en unidades del caudal de escurrimiento de punta (q_p).

Dado que el área del hidrograma unitario triangular ($q_p \times 2.67 T_p / 2$) es igual al escurrimiento directo que genera cierto pulso Pe sobre un área de cuenca A , al despejar el valor del gasto máximo asociado se tiene que:

$$Q_d = \frac{0.556 Pe A}{n T_p}$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Donde:

Pe = Lluvia en exceso (mm)

A= Área de la cuenca (km²)

n = Número de la cuenca

Tp = Tiempo pico (hr)

Qd = Gasto de diseño (m³/s)

Posteriormente, se procede a estimar la duración en exceso utilizando la ecuación:

$$tr = 2\sqrt{Tc} = 1.048 \text{ hr}$$

Por último, el tiempo pico (Tp) está dado por la ecuación:

$$Tp = \frac{tr}{2} + t_i = 0.689 \text{ hr}$$

Para el cálculo del número de la cuenca (n) se tiene lo siguiente:

Si $A \leq 250\text{km}^2$ entonces $n=2$

Si $A > 250\text{km}^2$ entonces $n = 2 + \frac{A-250}{1583.33}$

Como el área de la cuenca en estudio es mayor a 250 km² entonces el valor de n es de: **n= 2.009**.

En la Tabla 2.22 se presentan los valores del gasto de diseño para los distintos periodos de retorno.

Tabla 2. 22. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (HUT).

Tr	A	Pd	Pe	Tp	Q
2	265.194	47.00	12.03	9.248	95.437
5	265.194	56.51	17.89	9.248	141.906
10	265.194	59.79	20.05	9.248	159.071
25	265.194	61.51	21.21	9.248	168.307
50	265.194	61.98	21.53	9.248	170.842
100	265.194	62.21	21.69	9.248	172.113

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2.8.5 Método Racional

El método racional se basa, en que una lluvia constante y uniforme que cae sobre la cuenca en estudio producirá un gasto de descarga, el cual alcanzará su valor máximo cuando todos los puntos de la cuenca estén contribuyendo al mismo tiempo en el punto de diseño.

La Figura 2.19 muestra la hipótesis básica de la fórmula racional.

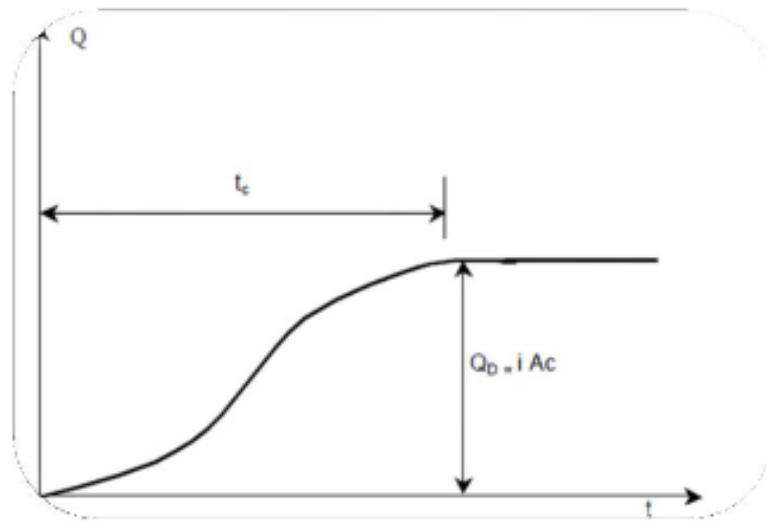


Figura 2.19. Hipótesis fundamental de la fórmula racional. .

La hipótesis se satisface para un intervalo de tiempo, denominado tiempo de concentración T_c , definido como el tiempo que tarda el agua en fluir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de aforo o de estudio.

El gasto pico o máximo se define con la expresión:

$$Q_d = 0.278 * C * I * A$$

Donde:

Q_d = Gasto de diseño (m^3/s)

C = Coeficiente de escurrimiento

I = Intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

A = Área de la cuenca (km²)

Los valores del coeficiente de escurrimiento y de la intensidad, ya fueron previamente calculados.

En la Tabla 2.23 se presenta los valores calculados del gasto de diseño para la cuenca en estudio.

Tabla 2. 23. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (Método Racional).

CUENCA				
Tr	C	I	A	Q
2	0.256	4.647	265.1935	87.692
5	0.317	5.588	265.1935	130.390
10	0.335	5.912	265.1935	146.162
25	0.345	6.082	265.1935	154.649
50	0.347	6.129	265.1935	156.978
100	0.349	6.152	265.1935	158.146

2.8.6 Método de Ven Te Chow

Para calcular el gasto máximo correspondiente para un periodo de retorno, utilizando este método, es necesario contar con el valor del número de curva de escurrimiento (CN), el cual fue calculado en el presente estudio teniendo un CN = 80.

Es necesario hacer notar que los valores que se obtiene por el método de Ven Te Chow son muy sensibles a la variación del número de escurrimiento, por lo que su determinación debe de hacerse cuidadosamente.

Con base a la precipitación en exceso (P_e) y el tiempo de concentración, se determina el factor de escurrimiento (X), en centímetros por hora con la siguiente ecuación:

$$X = \frac{P_e}{T_c}$$

Después, se calcula el tiempo de retraso (tr) mediante la fórmula:

$$tr = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{Sc}} \right)^{0.64}$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Donde la longitud del cauce principal (L) esta expresada en metros y su pendiente media (Sc) en por ciento.

Posteriormente, se calcula la relación entre la duración de la tormenta seleccionada o tiempo concentración y el tiempo de retraso (Tc / tr) y luego con la ayuda de la Figura 2.20 del manual de la Secretaria de Comunicación y Transporte de México, (SCT), se determina el factor de reducción pico (Z) adimensional.

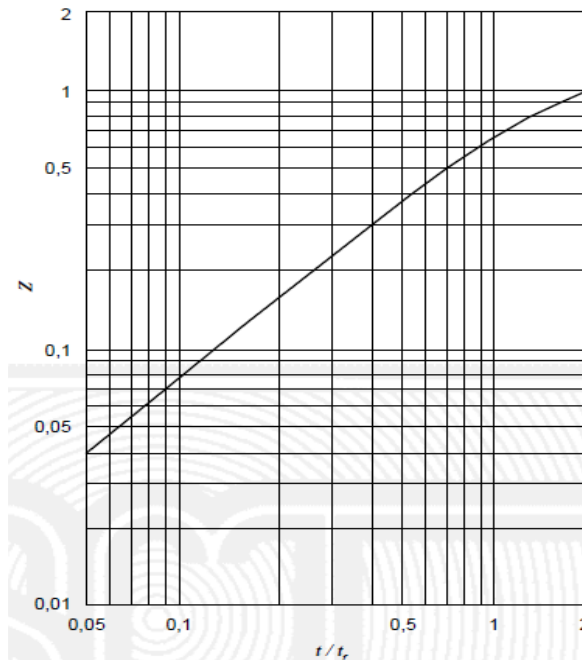


Figura 2. 20. Factor de reducción del pico Z , con base en la relación t/tr (SCT).

El gasto que produciría la precipitación con la duración de la tormenta seleccionada, para el periodo de retorno establecido se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = 2.78 A X Z$$

Donde A es el área de la cuenca en km^2 .

Todos los datos necesarios para calcula el gasto de agua pluvial que genera la cuenca utilizando este método se muestran en la Tabla 2.24.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 2. 24. Gasto del escurrimiento generado por la cuenca (Método Ven Te Chow).

Tr años	Pd mm	Pe mm	X cm/hr	tr hr	Tc / tr	Z	Q
2	47.00	12.03	0.119	3.532	2.863	0.8	70.154
5	56.51	17.89	0.177	3.532	2.863	0.8	104.312
10	59.79	20.05	0.198	3.532	2.863	0.8	116.930
25	61.51	21.21	0.210	3.532	2.863	0.8	123.719
50	61.98	21.53	0.213	3.532	2.863	0.8	125.582
100	62.21	21.69	0.215	3.532	2.863	0.8	126.517

2.8.7 Comparación de gastos

Para concluir, en la Tabla 2.25 se muestran una comparación del valor de los gastos calculados por los tres métodos vistos y para los diferentes periodos de retorno considerados.

Tabla 2. 25. Comparación de Gastos.

Cuenca en estudio			
Tr	HUT	Racional	Ven Te Chow
2	48.516	44.579	35.663
5	85.192	78.279	62.623
10	106.368	97.736	78.189
25	146.564	134.670	107.736
50	171.888	157.939	126.351
100	184.936	169.928	135.942

Tomando la recomendación de Campos 2010, el valor del gasto de escurrimiento que se considerará en este estudio es la mediana de los tres valores expuestos por los tres métodos analizados.

Observando la Tabla 2.25, la mediana corresponde a los valores arrojados por el método Racional.

Para obtener el hidrograma de escurrimiento se multiplica las ordenadas del hidrograma adimensional por el valor del gasto pico y las abscisas del mismo hidrograma adimensional por el tiempo pico para cada periodo de retorno. En la Figura 2.21 se muestra el hidrograma de escurrimiento.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

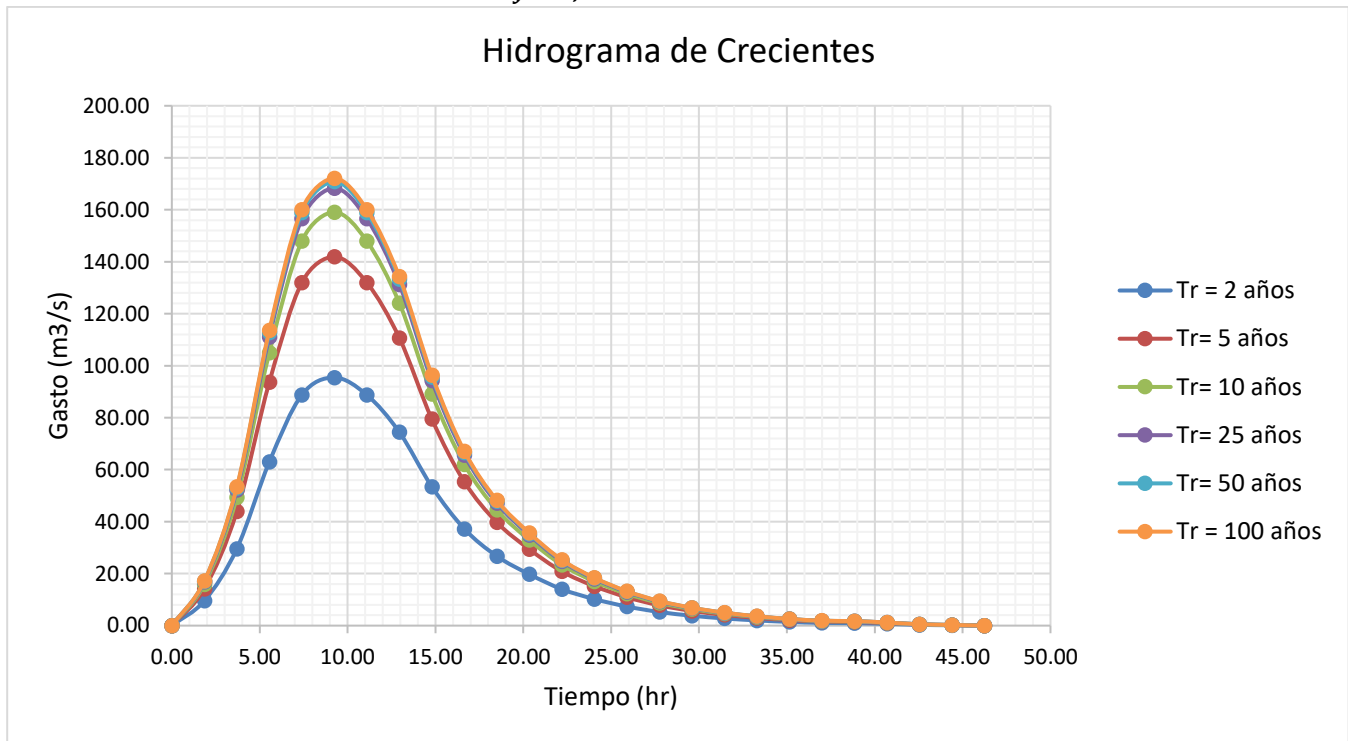


Figura 2. 21. Hidrograma de Crecientes. .

2.9 Balance Hídrico Superficial

Para Pladeyra (2003), la evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere de una estimación correcta del balance hidrológico, es decir, comprender el ciclo en sus diferentes fases, la forma en que el agua que se recibe por precipitación y se reparte entre el proceso de evapotranspiración, escorrentía e infiltración.

La ecuación de Balance Hidrológico es una expresión muy simple, aunque la cuantificación de sus términos es normalmente complicada por la falta de medidas directas y por la variación espacial de la evapotranspiración, de las pérdidas profundas (en acuíferos) y de las variaciones del agua almacenada en la cuenca (Llorens, 2003).

En general podemos afirmar que:

- Del agua que cae en un determinado sitio (precipitación = PP)
- Parte vuelve a la atmósfera ya sea por evaporación directa o por transpiración de la vegetación (evapotranspiración = ET);
- Otra parte escurre por la superficie de la cuenca (escorrentía superficial = Esc).

Este escurrimiento, fluye a través de la red de drenaje hasta alcanzar los cauces principales y finalmente el mar, y el resto se infiltra en el terreno y se incorpora al sistema de aguas subterráneas o acuífero (infiltración = I).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Estas magnitudes deben cumplir con la siguiente ecuación que se conoce con el nombre de Balance Hidrológico (Figura 2.22):

$$P = ETR + ES + I$$

Por medio del Balance Hidrológico, se conoce el estado de humedad de la cuenca la cual esta asociada al aporte de precipitación recibida y descontando las perdidas generadas, estamos en la condición de clasificar el tipo de año ya sea húmedo, normal o seco.

Esto permitirá planificar el recurso hídrico, en base a las demandas.

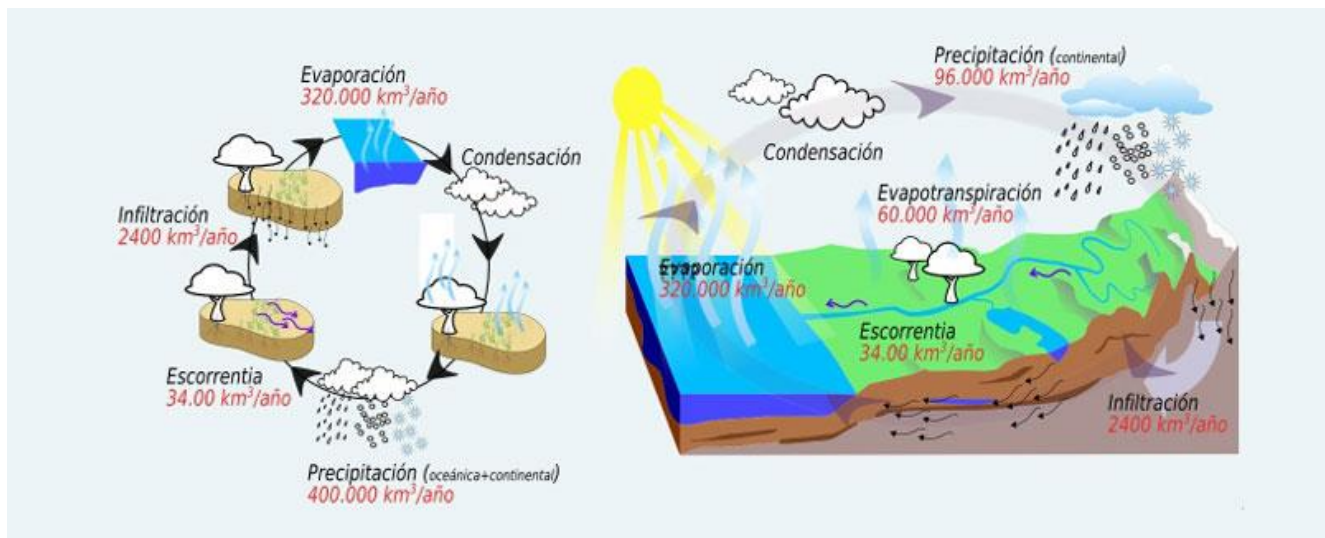


Figura 2. 22. Esquema del Balance Hídrico. (Ordoñez, 2011).

2.9.1 Evapotranspiración

Es el total de agua convertido en vapor por una cobertura vegetal; incluye la evaporación desde el suelo, la evaporación del agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas. (Gálvez, 2011).

La evapotranspiración, es la combinación de dos procesos separados que originan pérdida de agua:

- **Evaporación:** es el proceso por el cual el agua líquida es convertido en vapor de agua (vaporización). La energía requerida para cambiar el estado de las moléculas de agua a vapor es la radiación solar directa, la temperatura ambiental del aire.
- **Transpiración:** Consiste en la vaporización del agua líquida contenida en las plantas y el vapor removido a la atmósfera. La pérdida del agua es a través de las estomas de las plantas.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

La transpiración, depende de la energía radiante, gradiente de presión de vapor y viento, radiación, temperatura del aire, humedad del aire y viento. La razón de la transpiración también esta influenciada por, la característica de la vegetación, aspecto del ambiente y práctica de cultivo. (Gálvez, 2011).

Los factores que influyen en la Evaporación son los siguientes:

- Radiación Solar
- Temperatura
- Humedad: menos humedad, más evaporación
- Presión Atmosférica: la altitud, la latitud y longitud
- Viento: más viento, más evaporación

La evaporación desde un suelo desnudo depende de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El tipo de suelo (textura, estructura, etc.)
- El grado de humedad del suelo

La transpiración esta en función de:

- El poder evaporante de la atmósfera
- El grado de humedad del suelo
- El tipo de planta
- Variaciones estacionales
- Variaciones interanuales

La correcta determinación de la ETR es uno de los mayores problemas prácticos que se debe afrontar, debido a que su cuantificación básicamente se realiza a través de métodos y modelos semi-empíricos, donde el requerimiento de información juega un papel importante en el tema de la selección de los mismo. Mientras mas variables tenga el método, más real es el calculo. (Gálvez, 2011).

Entre lo diferentes métodos se tienen aquellos como Turc y Coutagne.

Método de Turc

Este método propuesto por L. Turc en 1961 se basa sobre la temperatura del aire y la radiación solar recibida en la superficie, ya que es la principal fuente de energía que alimenta el proceso de evapotranspiración, por ello se considera de mayor precisión a diferencia de otros métodos. Es uno de los de mayor uso en el mundo debido a sus buenos resultados (Luis, 2011).

Basándose en la siguiente ecuación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}}$$

Donde:

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

ETR= Evapotranspiración real en mm/año.

P= Precipitación en mm/año.

T= Temperatura media anual en °C.

La precipitación media fue calculada anteriormente en el apartado 2.4 obteniendo un resultado de 370.23 mm/año. Y la temperatura media de la zona de estudio es de 17.44 °C según datos registrados en la plataforma de CLICOM de un período de 1949 a 2015.

Aplicando la ecuación de Turc obtenemos que:

$$L = 300 + 25 (17.44) + 0.05 (17.44)^3$$

$$L = 1001.65842$$

Por lo tanto:

$$ETR = \frac{370.23}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{370.23^2}{1001.65842^2}\right)}}$$

$$ETR = 363.63 \text{ mm/año}$$

Método de Coutagne

Es un Método empírico que se basa en el balance hídrico de la cuenca, tomando como entradas a la precipitación y como salida a la evapotranspiración real en la cuenca (Sánchez, 1992).

La fórmula de la evapotranspiración real en la cuenca descrita por Coutagne es:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = \left(\frac{1.00}{0.80 + 0.14 T}\right)$$

Rango de validez $\frac{1}{8\lambda} \leq P \leq \frac{1}{2\lambda}$

Si $P < \frac{1}{8\lambda}$; $ETR = P$

Si $P > \frac{1}{2\lambda}$; $ETR = 0.20 + 0.035T$

Donde:

ETR= Evapotranspiración real en m/año.

P= Precipitación en m/año.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

T= Temperatura media anual en °C.

Utilizando los mismos datos que se tienen en el método de Turc obtenemos que:

$$\lambda = \left(\frac{1.00}{0.80 + 0.14 * 17.44} \right)$$

$$\lambda = 0.3084$$

$$\frac{1}{8\lambda} = 0.40530813; \quad P = \frac{370.23}{1000} = 0.37023$$

Como $P < \frac{1}{8\lambda}$ entonces $ETR = P$

$$ETR = 370.23 \text{ mm/año}$$

2.9.2 Escorrentía

El agua de las precipitaciones que no es evaporada ni infiltrada, escurre superficialmente en forma de:

- Escorrentía directa, que es el agua que llega directamente a los cauces superficiales en un periodo corto de tiempo tras la precipitación, y que engloba la escorrentía superficial y la sub-superficial (agua que tras un corto recorrido lateral sale a la superficie sin llegar a la zona freática).
- Escorrentía basal, que es la que alimenta a los cauces superficiales en época de estiaje.

Una vez estimados los volúmenes de agua que se infiltran mensualmente en cada subcuenca, se establece que el agua restante es la que va a escurrir superficialmente, lo que denominamos caudal o escurrimiento superficial. (Gálvez, 2011).

Por lo tanto, se puede calcular la escorrentía mediante el coeficiente de escurrimiento del apartado 2.8 de la siguiente manera:

$$ES = Ce * P$$

Donde $Ce = 0.589$ y $P = 370.23 \text{ mm/año}$; entonces:

$$ES = 0.589 * 370.23$$

$$ES = 218.06$$

2.9.3 Infiltración

La infiltración es el volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo. (Gálvez, 2011).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Entre los factores que afectan la capacidad de infiltración tenemos:

- Entrada superficial: La superficie del suelo puede estar cerrada por la acumulación de partículas que impidan, o retrasen la entrada de agua al suelo.
- Transmisión a través del suelo: El agua no puede continuar entrando en el suelo con mayor rapidez que la de su transmisión hacia abajo, dependiendo de los distintos estratos.
- Acumulación en la capacidad de almacenamiento: El almacenamiento disponible depende de la porosidad, espesor del horizonte y cantidad de humedad existente.
- Características del medio permeable: La capacidad de infiltración está relacionada con el tamaño del poro y su distribución, el tipo de suelo –arenoso, arcilloso-, la vegetación, la estructura y capas de suelos.
- Características del fluido: La contaminación del agua infiltrada por partículas finas o coloides, la temperatura y viscosidad del fluido, y la cantidad de sales que lleva.

Como ya se obtuvo la P, ETR y ES podemos determinar la cantidad de agua infiltrada acomodando la ecuación de la siguiente manera:

$$I = P - ETR$$

$$I = 370.23 - 363.63$$

$$I = 6.60$$

Ya que bajo las condiciones de nuestra zona de estudio se considera que el agua que escurre también se evapotranspira. Para comprender de mejor manera nuestro balance hídrico se observa la Figura 2.23.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

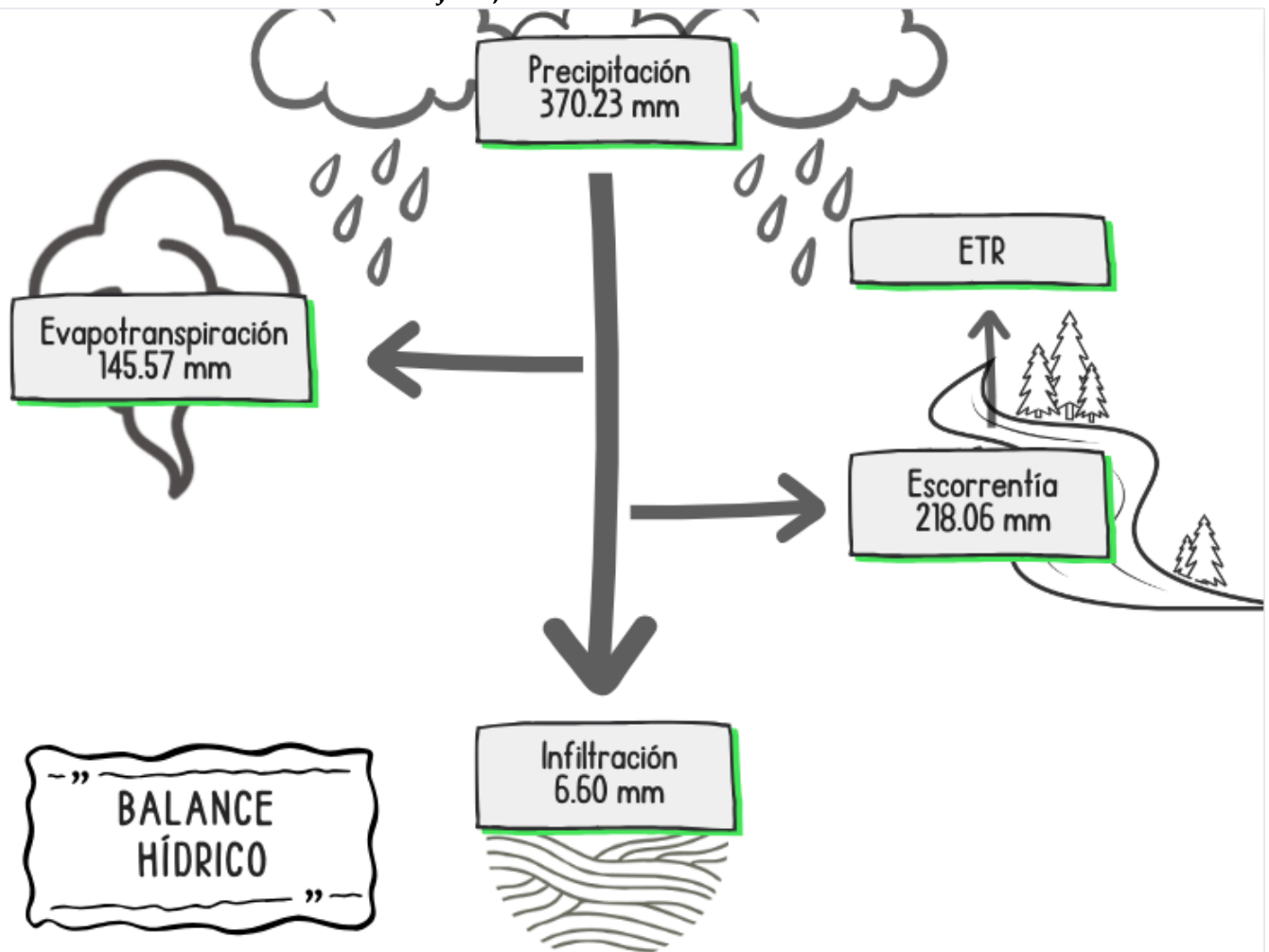


Figura 2. 23. Balance Hídrico de la zona de estudio. .

3. OBTENCIÓN DE LA TOPO-BATIMETRÍA EN EL VASO Y ZONA DE ESTUDIO

3.1 Levantamiento topográfico

Un levantamiento topográfico consiste en realizar las mediciones necesarias en la zona de interés, con el objetivo de obtener una representación plana o tridimensional. Un levantamiento topográfico depende de la representación que se pretenda dar, así mismo se usan las metodologías de planimetría y altimetría, en donde la primera consiste en determinar la ubicación de los puntos del terreno en el plano de proyección XY, y la otra corresponde al eje vertical. La representación de un terreno está compuesta por la planimetría complementada con detalles altimétricos. (Gallego & Sánchez, 2013).

Los levantamientos topográficos se componen de dos partes, los trabajos de campo, que son la toma de datos sobre el propio terreno, y el trabajo de gabinete, que comprende el post – procesamiento de la información generada y la representación. Así mismo, el levantamiento se basa en el conjunto de operaciones para obtener las proyecciones horizontales y verticales de los puntos. (Gallego & Sánchez, 2013).

3.1.1 Tipos de levantamientos

Los instrumentos o metodologías utilizadas para la representación del terreno dependen de los objetivos de esta, por lo que INEGI los clasifica en:

- Levantamiento de propiedades: como determinación de linderos, derecho de vía, adquisición de datos para planos oficiales o división de tierras.
- Levantamientos catastrales: con el objetivo de fijar límites de propiedad para registro y control de bienes.
- Levantamientos de construcción: donde se involucran obras como fraccionamientos, carreteras, vías férreas, canales, ductos y líneas de transmisión.
- Levantamientos subterráneos: enfocados en la explotación minera y construcción de túneles y lumbreras.
- Levantamiento de apoyo terrestre para fotogrametría: su objetivo es dar escala a las fotografías aéreas con fines métricos.
- Levantamientos hidrográficos: comprenden operaciones para obtener la información topográfica de cuerpos de agua, comúnmente llamado batimetría.

Los levantamientos se efectúan para diferentes usos, en la actualidad, el uso de herramientas para ello ha ido avanzando conforme la tecnología. El procedimiento topográfico que determina las coordenadas de puntos sobre la superficie del terreno se hace mediante métodos taquimétricos, este procedimiento se utiliza para el levantamiento de detalles o puntos de relleno en donde no se requiera mucha precisión. (Reyes I. & Hernández N., 2009).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Hasta los 90, los procedimientos se realizaban con teodolitos y mira vertical, actualmente se usan estaciones totales electrónicas, equipos GPS y fotogrametría aérea, dependiendo del detalle y precisión requeridos, dando como resultado el desplazamiento de la taquimetría tradicional mediante teodolito y mira vertical. (Reyes I. & Hernández N., 2009).

3.1.2 Representación gráfica del relieve del terreno

Cuando se realiza el levantamiento topográfico, el relieve se puede representar en diversos formatos, según el software implementado, ya que satisfacen distintas necesidades, a continuación, se mencionan los principales formatos utilizados.

Curva de nivel. Línea curva en la cartografía que representa la misma cota de elevación del terreno. (INEGI, 2006).

Modelo digital de elevación (MDE). Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. (INEGI, 2015).

Modelo digital del terreno (MDT). Representación cuantitativa en formato digital (ráster) de la superficie terrestre, una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismos, tales como la vegetación, edificaciones, coches, etc. (IITEJ, 2003).

TIN. La red de triángulos irregulares (del inglés *Triangular Irregular Network*), es construida a partir de un conjunto de puntos espaciales, siendo cada uno de sus puntos un vértice de al menos un triángulo de la red. (INEGI, 2014).

TIFF. Formato de archivos de imágenes con etiquetas (*Tagged Image File Format*), se utiliza para el almacenamiento de imágenes referenciadas. (IITEJ, 2019).

X, Y, Z. Una expresión para coordenadas, con significados separados para coordenadas cartesianas y coordenadas rectangulares. En los sistemas de coordenadas rectangulares, X representa el eje este-oeste, Y al eje norte-sur, y Z al eje de altura. (IITEJ, 2003).

3.2 Sistemas de referencia y proyección cartográfica

Un sistema de referencia terrestre se define como las prescripciones y convenciones, junto con un modelo matemático de la Tierra, que se utilizan para definir en cualquier momento un sistema de ejes coordenados, para la ubicación de puntos en nuestro planeta. Una de las características de estos sistemas de referencia es que, ubican su centro lo más cerca posible al centro de gravedad de la Tierra (INEGI, 2019).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Los sistemas de referencia terrestres son sistemas que están ligados a la tierra. (Figura 3.1). Su plano fundamental es el ecuador, el eje Z se encuentra en dirección de eje de rotación terrestre, el eje X se encuentra en dirección de la intersección del meridiano de Greenwich con el Ecuador y el eje Y forma un triángulo directo con los anteriores. (Quirós Rosado, 2014).

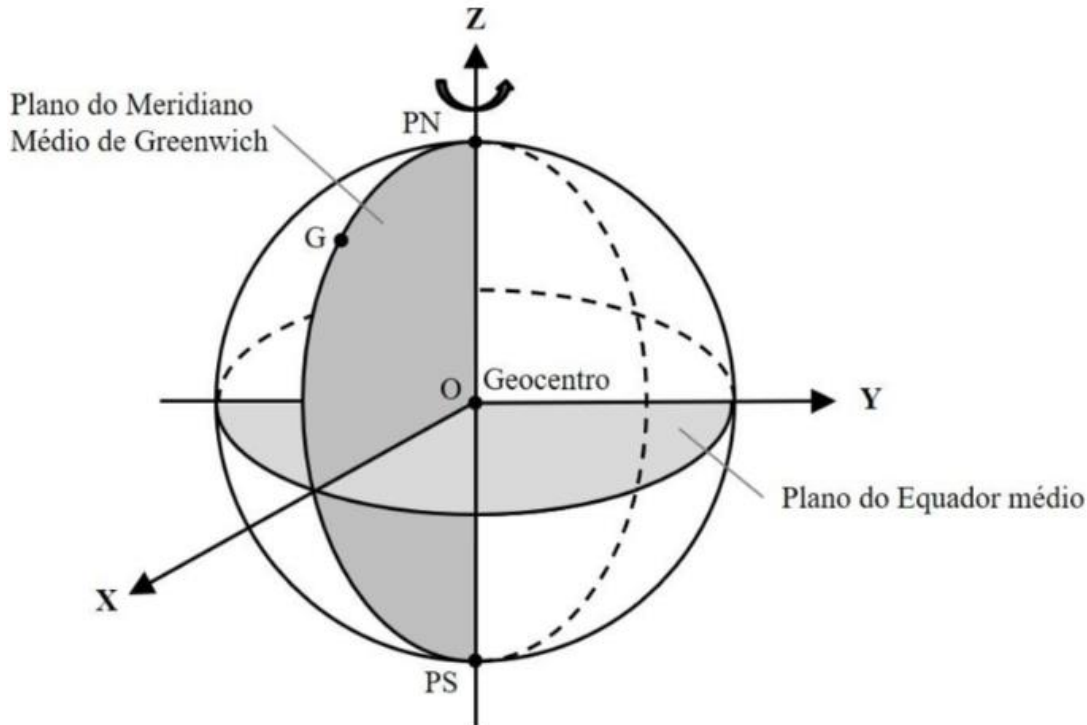


Figura 3. 1. Sistema de referencia terrestre. (Silvio De Freitas ,2020). .

Los marcos de referencia son la materialización de los sistemas de referencia; esta se efectúa mediante puntos establecidos sobre la superficie terrestre, que son directamente accesibles para su ocupación u observación. Así mismo, se refleja la parametrización de las coordenadas de los puntos, que forman el marco de referencia con un sistema de coordenadas X, Y y Z (INEGI, 2019).

Los marcos de referencia están alineados con el marco ITRF (International Terrestrial Reference Frame) y comparten recursos y datos de estaciones GNSS, actualmente existen diferentes sistemas y marcos de referencia que se utilizan según el lugar del estudio (INEGI, 2019):

- Marco de referencia terrestre internacional ITRF2008.- El sistema de referencia se materializa a través de las coordenadas de una serie de estaciones distribuidas por todo el mundo, este marco está establecido y mantenido por la IERS.
- Sistema y marco de referencia WGS84 (World Geodetic System 1984). - El sistema de referencia utiliza la constelación de satélites estadounidense GPS para definir la posición y orientación del marco, este marco, además ha alineado las estaciones del WGS84 con estaciones del ITRF de manera periódica, por lo que son marcos virtualmente idénticos.
- Marco de referencia IGS (International GNSS Service). - El marco IGS es también establecido de la ITRS, comparte recursos y datos con estaciones GPS o GLONASS

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

permanentes en todo el mundo, al estar alineado además con el ITRF pueden a variar unos milímetros sus coordenadas.

- Sistema y marco de referencia terrestre europeo ETRF89.- Su sistema de coordenadas es el mismo que el del ITRS, este marco de referencia se define mediante 36 estaciones del ITRS en Europa, estableciéndose como el más utilizado en Europa.

El ITRF 2008 se adoptó como el marco de referencia en INEGI, así mismo, para la georreferenciación de los levantamientos topográficos de la zona de estudio de esta tesis.

3.3 Fotogrametría

La fotogrametría es la ciencia que se ocupa de estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto.

La fotogrametría es una de las actividades más emblemáticas actualmente, comprende la fotografía aérea y la obtención de modelos de elevaciones, siendo información de referencia básica para la realización de la cartografía y la obtención de información geográfica en general: ocupación del suelo, urbanismo, ordenación del territorio, catastro, gestión forestal, hidrología, etc.

Se puede clasificar de acuerdo con los instrumentos que son utilizados, en función de la distancia que se tiene al objeto y el equipo fotogramétrico.

3.3.1 Clasificación de la fotogrametría

Fotogrametría analógica: surgió en la década de los 30 hasta 1960 aproximadamente, las fotografías tomadas de los equipos son colocadas en un restituidor analógico que es un aparato de tipo óptico o mecánico donde un operador de forma manual realiza la orientación interior y exterior para crear un modelo esteroscopio. Posteriormente la topografía se lleva a cabo de manera manual también mediante el seguimiento de los detalles de la superficie del modelo. (Figura 3.2). (*Quirós Rosado, 2014*).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

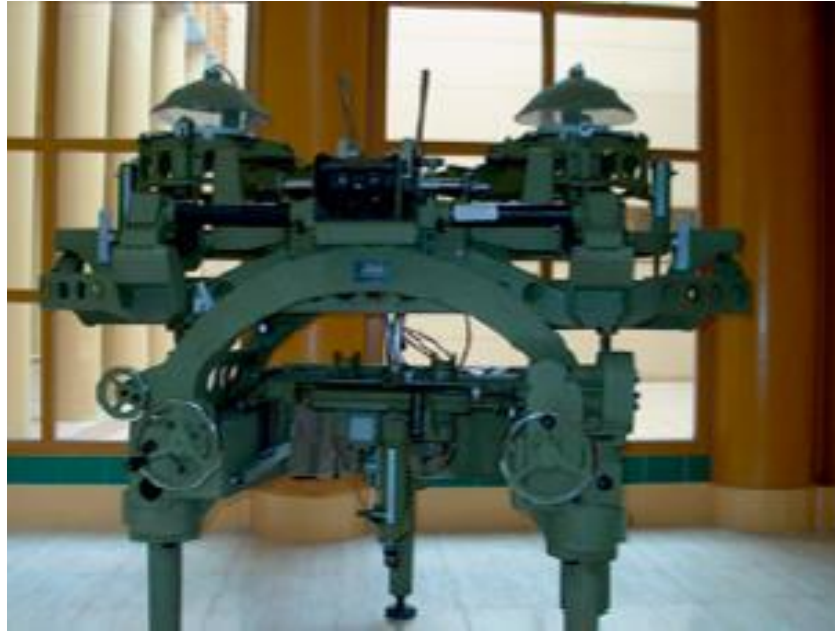


Figura 3. 2. Restituidor analógico (Quirós Rosado, 2014).

Fotogrametría digital: surge entre los años 1960 a 1990 aproximadamente, con el avance tecnológico de computación, sustituyendo los aparatos analógicos, mediante el uso de un monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas XY de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas del computador del sistema. Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior en forma analítica y procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos tipo CAD. (Figura 3.3). (Quirós Rosado, 2014).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 3.3. Restituidor analógico con sistemas computacionales (Quirós Rosado, 2014).

Fotogrametría digital: hacia 1990 con el avance tecnológico, al igual que con el equipo utilizado en la fotogrametría analógica, este surge para equipos computacionales más desarrollados, permitiendo no sólo hacer mediciones y la proyección de coordenadas XY, sino posibilitando la explotación de imágenes, y permitiendo una generación automática de MDE y ortomosaicos, además de generación y visualización de modelos tridimensionales, la salida de estos procesos puede ser en formato raster o vectorial. (Jauregui, 2010).

En función a la distancia al objeto, la fotogrametría se clasifica en:

- Fotogrametría espacial: imágenes tomadas mediante satelitales.
- Fotogrametría aérea: medición en fotogramas aéreos, comúnmente por un VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado).
- Fotogrametría terrestre: las imágenes son tomadas desde la superficie terrestre.

3.3.2 Fotogrametría aérea

Mediante la fotogrametría aérea es posible realizar mediciones a partir de fotografías mediante la medición indirecta, esta permite determinar el estado geométrico de un objeto, su variación con el tiempo y la distancia recorrida por el mismo. La obtención de mediciones mediante la fotogrametría se denomina *restitución fotogramétrica*, que consiste en la operación inversa a la toma de fotografías, reconstruyendo a partir de las imágenes un objeto o fenómeno original. Con las fotografías se pretende obtener un plano, es decir, una proyección ortogonal del terreno fotografiado, sin embargo, una fotografía es, en el caso ideal, una proyección central, la restitución ya mencionada, consistirá en transformar la proyección central en una ortogonal,

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

donde las posiciones planimétricas de los puntos imagen son las mismas que las de los puntos del terreno original, ya que estos se proyectan perpendicularmente al plano de referencia. (García M. et al., 2014).

Cuando se realiza un levantamiento fotogramétrico es necesario contar con recubrimientos horizontales y transversales, para esto se requiere de un software de planeación, el cual permite realizar un plan de forma que se abarque todo el terreno con las fotografías al momento se transponerlas.

3.3.3 Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)

Un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT), también conocido como UAV por sus siglas en inglés “Unmanned Aerial Vehicle”, o bien dron, trata de un vehículo pilotado mediante un radio control o programado mediante un software de planificación segura. Existe una diversidad de VANT que se clasifican de acuerdo con sus clases, tamaños y aplicaciones. (Moreno M., 2019).

En la actualidad existe una amplia variedad de tipos y modelos de VANT, para el levantamiento topográfico en el paseo de la Presa de San José y sus zonas aledañas, se utilizó el VANT Phantom 4 Pro (Figura 3.4). Diseñado para uso profesional, a continuación, se mencionan las principales características. (Tabla 3.1).



Figura 3. 4. VANT Phantom 4 Pro con control.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla 3. 1. Características técnicas del Phantom 4 Pro.

Características	Especificaciones
Aeronave	
Peso (batería y hélices incluidas)	1 388 g
Tamaño diagonal (sin hélices)	350 mm
Velocidad de ascenso máx.	Modo-P: 5 m/s (16.4 ft/s)
Velocidad de descenso máx..	modo-P: 3 m/s (9.8 ft/s)
Velocidad máx..	50 km/h (31 mph) (modo-P)
Ángulo de inclinación máx.	25° (Modo-P)
Altura máx. de servicio m.s.n.m.	6,000 m (19 685 pies)
Resistencia al viento máx.	10 m/s
Tiempo de vuelo máx.	30 minutos aprox.
Rango de temperatura de funcionamiento	De 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)
Sistemas de posicionamiento por satélite	GPS / GLONASS
Rango de precisión de vuelo estacionario Vertical	±0,1 m (con posicionamiento visual)
	±0,5 m (con posicionamiento por GPS)
Rango de precisión de vuelo estacionario Horizontal	±0,3 m (con posicionamiento visual)
	±1,5 m (con posicionamiento por GPS)
Sistema de visión	Sistema de visión frontal
Sistema de visión	Sistema de visión frontal, posterior e inferior
Rango de velocidad	≤50 km/h (31 mph) a 2 m (6.6 pies) del suelo
Rango de Altitud	0 - 10 m (0 - 33 pies)
Rango de Operación	0 - 10 m (0 - 33 pies)
Rango de detección de obstáculos	0.7 - 30 m (2 - 98 pies)
Campo de visión	Frontal: 60° (horizontal), 27° (vertical), Posterior: 60° (horizontal), 27° (vertical), Inferior: 70° (de frente y hacia atrás), 50° (a izquierda y derecha)
Frecuencia de detención	Frontal: 10 Hz, Inferior: 20 Hz, Posterior: 10 Hz
Estabilizador	
Estabilización	3-ejes (cabeceo, alabeo, guiñada)
Intervalo controlable	Inclinación -90° a + 30°
Velocidad angular máxima controlable	Cabeceo = 90°/s
Cámara	
Sensor	1"CMOS
Rango ISO	Vídeo: 100 - 3200 (Automático) - 100 - 6400 (Manual)
	Foto: 100 - 3200 (Automático) - 100- 12800 (Manual)
Rango ISO	100 - 3200 (Automático)
Velocidad obturador mecánico	8 - 1/2000 s
Velocidad obturador electrónico	8 - 1/8000 s
Tamaños de imagen	Proporción de imagen 3:2: 5472 x 3648
	Proporción de imagen 4:3: 4864 x 3648
	Proporción de imagen 16:9: 5472 x 3078
Tamaño de imagen de vídeo	4096x2160(4096x2160 24/25/30/48/50p)
	3840x2160(3840x2160 24/25/30/48/50/60p)
	2720x1530(2720x1530 24/25/30/48/50/60p)
	1920x1080(1920x1080 24/25/30/48/50/60/120p)
Modos de fotografía	1280x720(1280x720 24/25/30/48/50/60/120p)
	Disparo único
	Disparo en ráfaga: 3/5/7/10/14 fotogramas
	Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 horquilla de exposición a 0.7EV bias

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Características	Especificaciones
Cámara	
Formato de Foto y Video	Foto: JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG Video: MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)
Rango de temperatura de funcionamiento	de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)
Control remoto	
Potencia de transmisión (PIRE)	2.400 GHz - 2.483 GHz
Distancia de transmisión máx.	Conformidad con FCC: 7 km); conforme con CE: 3,5 km (sin obstáculos, libre de interferencias)
Corriente/Voltaje/Batería	1.2 A @7.4 V/ 6000mAh. 2S LiPo
Puerto de salida de vídeo	GL300F: USB y GL300E: HDMI
Soporte de dispositivos móviles	GL300E: tabletas y teléfonos inteligentes
	GL300F: Pantalla de 5,5 pulg., 1920x1080, 1000 cd/m ²

3.3.4 Software de planeación

Un software de planeación simplifica el vuelo, el proceso y el análisis de los datos que se generan del mismo para optimizar el tiempo de trabajo, este incluye la automatización de un plan de vuelo, la georrectificación de imágenes y generación de modelos en 2D/3D. (Singhal et al., 2018).

Actualmente la calidad de los resultados del levantamiento topográfico la define una planificación eficiente, donde se define la altura adecuada, la duración de cada vuelo, el área que cubrirá y los transectos que tendrá que realizar para una correcta toma de fotografías. Algunas de las aplicaciones que son más utilizadas son:

- Aplicaciones propias de DJI: una de las más recientes es DJI GS Pro, está orientada a la planificación y vuelos autónomos de los VANT, la aplicación es compatible con los VANT de la misma, actualmente solo está disponible para iPad. DJI, también tiene la aplicación DJI Pilot, disponible para Android, está diseñada para mapeo aéreo, así como transmisión de imágenes en tiempo real, maniobras y uso y control de la cámara.
- Pix4d Capture: es una aplicación disponible para Android y iOS, es compatible con diferentes marcas de VANT, su funcionamiento es sencillo, se configuran aspectos de velocidad y ángulo de inclinación de la cámara. Dentro del programa se definen las rutas, ya sea de forma cuadrícula, doble cuadrícula o circular, asegurando la reconstrucción de mapas planos, volúmenes y objetos tridimensionales.
- Mission Planner: esta aplicación está sólo para Windows, con el se pueden planificar los vuelos desde la computadora para posteriormente pasarla al VANT. Permite ajustar y cambiar los parámetros de la controladora para diferentes configuraciones físicas del VANT.
- UGCS: al igual que las dos anteriores, es compatible con diferentes VANT, es una aplicación de escritorio disponible para Windows, MacOS y Linux. Los vuelos se planifican desde una computadora, por si cantidad de configuraciones y herramientas,

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

no la hace una aplicación sencilla de utilizar, se es posible planificar varios vuelos y cambios de batería.

- DroneDeploy: esta aplicación es muy intuitiva y sencilla de usar, es compatible con la mayoría de los drones de la marca DJI, además de estar disponible para Android, iOS y online. La planificación de vuelos dentro de la plataforma es realmente sencilla, dentro de ella se selecciona el área para sobrevolar, altura del vuelo, dirección y despegue. Al ser la aplicación muy intuitiva, al momento de planear el vuelo, esta predispone las direcciones y el punto de despegue, dentro de sus configuraciones avanzadas es posible manejar esto manualmente, dependiendo de los requerimientos de las reconstrucciones deseadas. La aplicación es libre sólo para planeación de vuelo, ya que el mapeo y configuraciones más avanzadas tienen un costo mensual o anual.

Los vuelos para este levantamiento topográfico se planificaron por medio del software de DroneDeploy, siendo este un software de uso libre y gratuito. Los vuelos generados en la página web permite realizar los planes de manera intuitiva, optimizando las características del vuelo, posteriormente son vinculados y descargados durante el trabajo en campo a la app en el dispositivo electrónico a utilizar y al VANT. (Figura 3.5).

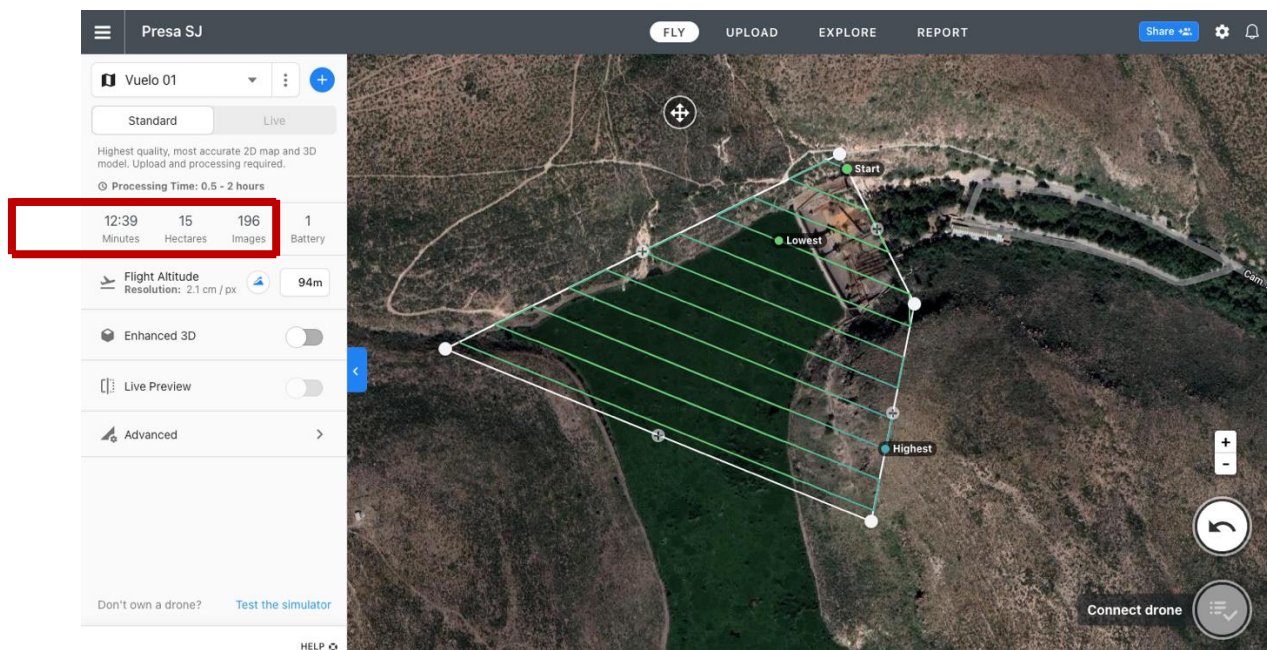


Figura 3.5. Interfaz de DroneDeploy para un plan de vuelo de la zona de estudio.

No hay un límite de vuelos, lo único que podría limitarlos sería la cantidad de baterías que estén disponibles y cargadas para utilizar. Se pueden planificar los necesarios para cubrir con toda la zona de interés. Una vez que están planificados, se pueden iniciar en campo. La aplicación no permitirá despegar el VANT hasta que verifica que este tenga buena conexión con la app, la cámara esté girando correctamente, el controlador esté conectado y este se comunica con los satélites cercanos. (Figura 3.6).

Para el presente estudio fue necesario planificar 8 vuelos de alrededor de 12 a 15 minutos cada uno, con una altura de 90 y 96 metros y utilizando una batería por vuelo. (Figura 3.7).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

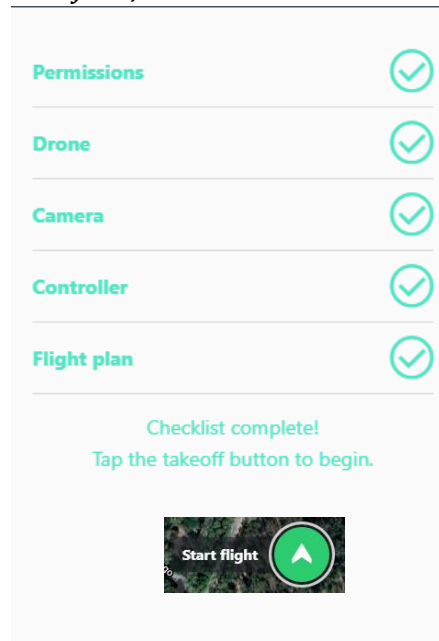


Figura 3. 6. Checklist e inicio del vuelo en la app.

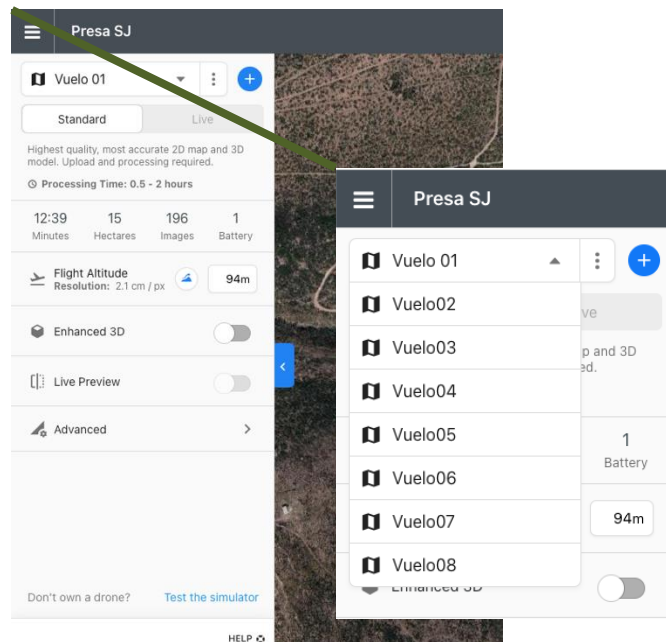


Figura 3. 7. Interfaz de los ocho vuelos planificados.

3.4 Georreferenciación

La georreferenciación permite obtener el posicionamiento espacial a documentos topográficos mediante un sistema de coordenadas y datos específicos, para poder obtener esta información es necesaria la geodesia espacial, la cual está enfocada en la recepción de señales electromagnéticas emitidas por dispositivos embarcados en satélites artificiales. La aplicación

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

de estas técnicas para la definición de campos de referencia incluye la geodesia satelital (Berné V., Anquela J., & Garrido V., 2014).

Para levantamientos topográficos, la geodesia espacial es utilizada para obtener la información espacial de diferentes puntos de control terrestre (PCT) y con ello generar una topografía georreferenciada.

3.4.1 Puntos de Control Terrestre (PCT)

El levantamiento de los puntos de control terrestre (PCT), consiste en determinar el posicionamiento (XYZ) de distintos puntos, los cuales son utilizados para georreferenciar la topografía del cauce y sus zonas aledañas.

Donde por posicionamiento se entiende, como la determinación en el espacio de objetos móviles o estáticos, en un sistema de coordenadas determinado y datum específico, para ello, son varias las técnicas que se implementadas. Pero sin duda alguna en el campo de la georreferenciación y del posicionamiento preciso en la Tierra, las técnicas apoyadas en satélites artificiales son actualmente las de mayor importancia, fundamentalmente en espacios abiertos (Berné Valero et al., 2019).

Para realizar un posicionamiento, se requiere del GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como un sistema global de posicionamiento y navegación, que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite, y proporcionan posicionamiento y navegación, así como el mejor sistema de definición de tiempos (PNT) con cobertura global (Berné Valero et al., 2019).

3.4.2 Sistemas Satelitales de Navegación Global (GNSS)

Los GNSS (Sistemas Satelitales de Navegación Global - *Global Navigation Satellite System*) son constelaciones satelitales que transmiten señales a partir de las cuales es posible determinar la posición de un receptor ubicado en cualquier parte del mundo. (La Valle, Garcia, Roncagliolo, & Muravchik, 2013).

Para obtener la solución de posición un receptor de GNSS debe recibir señales de al menos cuatro satélites. Disponer de un receptor capaz de operar con distintos GNSS, aumenta considerablemente el número de satélites visibles, y asegura la continuidad en la solución de posición, incluso bajo condiciones de funcionamiento adversas. Por otra parte, con dos frecuencias de portadora es posible medir el retardo ionosférico, logrando una importante mejora en la precisión de la solución de posición frente a los usuarios que utilizan una única portadora (Lopez La Valles et al., 2011).

El uso de receptores multibanda, es habitual en aplicaciones de posicionamiento diferencial de alta precisión, donde es posible alcanzar errores del orden del centímetro (Parkinson & Spilker, 1995).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.4.3 Receptores GNSS

Con los receptores es posible realizar un levantamiento estático o uno cinemático. El estático se realiza con dos o más receptores, los puntos que van a ser levantados no representan ningún tipo de desplazamiento o movimiento con respecto a otros puntos cercanos a ellos, haciendo necesario de un punto con coordenadas conocidas, como la estación base, lo receptores permanecen en el sitio dependiendo de la distancia a la que se encuentre el receptor base, mientras que en el cinemático requiere de 2 receptores, uno que esté observando desde un punto extremo una base conocida y el otro que se mueva sobre los puntos cuyas coordenadas se requieran conocer, uno de los receptores se mantiene fijo durante todo el levantamiento sobre una de las estaciones de referencia, el otro se desplaza de su estación inicial de referencia a los puntos a determinar, asegurándose de mantener bloqueadas las lecturas de fase durante su movimiento. *(González & Juan, 1996)*.

3.5 Levantamiento de los puntos de control terrestre

En la actualidad existen múltiples métodos y equipos GNSS, que determinan la ubicación espacial en un sistema de coordenadas ya determinado, con una alta precisión en base a los puntos de control terrestre (PCT).

Al realizarse un levantamiento a detalle de una zona muy extensa, es recomendable cubrir el área con una red de triangulación, es decir, una red de puntos de control terrestres en los que el o los vuelos se puedan apoyar.

La triangulación consiste en un esqueleto básico compuesto por triángulos, es la base del levantamiento para la referenciación correcta de la proyección. *(Garrido-Villén, 2015)*.

Es necesario conocer las coordenadas de los puntos de control terrestre para georreferenciar posteriormente de manera precisa la topografía de la zona de estudio, mediante el siguiente equipo.

3.5.1 Equipo TRIMBLE R8s

El levantamiento de los PCT se llevó a cabo mediante la antena receptora Trimble R8S. Con doble banda de frecuencia con el que se puede recibir la señal transmitida de las diferentes constelaciones existentes, GPS, GLONASS, Galileo y BeiDou. *(Trimble-Inc., 2016)*.

El equipo de levantamiento consta de la unidad receptora con antena TRIMBLE R8s (1), extensión de antena vertical (2), y trípode (3) (Figura 3.8), además de su controlador TRIMBLE TSC3 (Figura 3.9) para el post – procesamiento de datos, se conecta una memoria externa al receptor, el cual, al tener el sistema operativo de Windows se copian directamente los datos de los puntos a la memoria.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 3. 8. Equipo TRIMBLE.



Figura 3. 9. TRIMBLE TSC3.

Los PCT deben ser registrados mediante una cruz de cal o pintura ya que son utilizados para la georreferenciación del levantamiento topográfico, es necesario que todos los puntos sean ubicados en zonas totalmente despejadas, para evitar de esta manera la interferencia de las señales satelitales y se pueda visualizar al momento de capturar las fotografías con el VANT.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Se realizó un levantamiento estático rápido, el cual consiste en determinar las coordenadas de los PCT a partir del procesamiento de los valores crudos registrados en la zona de estudio por la antena receptora. A continuación, se desglosará el trabajo de campo realizado.

Encender el equipo. - Antes de encender la antena receptora R8s se debe instalar la antena, una vez instalada se inicia la antena y la controladora TSC3.

Nivelación del equipo. - La antena se coloca en la extensión y esta al trípode, se ubica sobre el PCT donde queremos conocer las coordenadas exactas y se nivela el triback, apoyándose en la burbuja de nivel situada en el trípode.

Configuración del equipo. - Con la controladora se crea una plantilla nueva de trabajo, donde se determina el nombre del proyecto, el tipo de levantamiento a realizar y el sistema de referencia de la zona de estudio.

Levantamiento del PCT.- Con la plantilla creada se inicia con el levantamiento de los PCT. Para cada uno de ellos es necesario ingresar diferentes datos de entrada, como: nombre designado al punto, la altura de la antena al terreno en metros.

El tiempo que se debe dejar inmóvil el equipo dependerá de las condiciones de conexión que este tenga con las constelaciones GNSS, el nivel de trayectoria múltiple y la proximidad de obstrucciones, como arboles y edificios altos. Las trayectorias múltiples ocurren cuando las señales GNSS se reflejan sobre objetos tales como el terreno, edificios o árboles. (Trimble-Inc., 2016).

Este puede variar entre los 12 y 30 minutos, de una forma similar se debe observar que en la pantalla de la controladora el PDOP (por sus siglas en inglés, Dilución de Precisión de Posición) sea de 1-4 y no mayor a 7.

Una vez concluido el tiempo requerido para el posicionamiento del PCT, se finaliza el levantamiento y sin apagar el equipo se repite el procedimiento para cada uno de los PCT.

Exportación de datos. - Al concluir cada levantamiento, se deben exportar los datos de los PCT. Para esto, se debe introducir una memoria USB a la controladora, seleccionar en el menú principal la opción de topografía general, ventana de instrumento y elegir la opción de exportar archivos GNSS.

Se le determina como datos crudos a los datos exportados de la controladora, ya que requieren de un post procesamiento que ajustará y minimizará los errores que pudieran existir en el levantamiento, mediante la información que se registra del desplazamiento de los satélites, así como la triangulación de los PCT con la base de datos de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.5.2 Descarga de datos de la Red Geodésica Nacional Activa del INEGI

Para la descarga de datos de posicionamiento de la red activa se requiere conocer la hora en la que fue realizado el levantamiento y la zona horaria en la que se encuentra el lugar de estudio. Todos los sistemas GNSS existentes procuran mantener sus escalas de tiempo de sistema muy cercanas al UTC (Tiempo Universal Coordinado), que es el sistema oficial de tiempo internacionalmente adoptado. El UTC se obtiene a partir de una media ponderada de las señales de un conjunto de relojes atómicos, localizados en cerca de 70 laboratorios nacionales de todo el mundo.

Las zonas horarias están definidas con relación al UTC y están centradas a las fronteras y a los meridianos con una longitud que es un múltiplo de 15°, estas zonas parten del meridiano de Greenwich (también conocido como meridiano cero), que recibe ese nombre por pasar por el Real Observatorio de Greenwich, en Londres. En México, el Centro Nacional de Metrología, CENAM, materializa la escala UTC., dicha materialización es reconocida a nivel internacional como UTC(CNM). La mayor parte del territorio mexicano se encuentra en la zona -6.

De acuerdo con lo anterior y a la zona horaria en la que se encuentra el país, la hora oficial en los Estados Unidos Mexicanos está definida en términos de la UTC (CNM) de acuerdo con las siguientes relaciones:

- a. Tiempo Sureste = UTC (CNM) – 5
- b. Tiempo Centro = UTC (CNM) – N
- c. Tiempo Pacífico = UTC (CNM) – (N + 1)
- d. Tiempo Noroeste = UTC (CNM) – (N + 2)

Donde N es 6 hr para el horario de invierno y 5 para el de verano, a excepción de los estados de Sonora y Quintana Roo. (CENAM (Centro Nacional de Meteorología), 2021).

La estación base para la corrección de coordenadas de cada punto tomado es la estación ISLP San Luis Potosí, SLP. Esta se encuentra sobre la torre de ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en la ciudad de San Luis Potosí, por la zona en la que se encuentra con el meridiano cero, la estación inicia su día a las 18:00 horas en horario de invierno y a las 19:00 horas en verano, tomándose esta como la hora primera del día. (Tabla 3.2).

Tabla 3. 2. Horario para estaciones de la zona centro.

Invierno	Verano	Meridiano cero
18:00	19:00	01:00
19:00	20:00	02:00
20:00	21:00	03:00
21:00	22:00	04:00
22:00	23:00	05:00
23:00	24:00	06:00
24:00	01:00	07:00
01:00	02:00	08:00
02:00	03:00	09:00

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

03:00	04:00	10:00
04:00	05:00	11:00
05:00	06:00	12:00
06:00	07:00	13:00
07:00	08:00	14:00
08:00	09:00	15:00
09:00	10:00	16:00
10:00	11:00	17:00
11:00	12:00	18:00
12:00	13:00	19:00
13:00	14:00	20:00
14:00	15:00	21:00
15:00	16:00	22:00
16:00	17:00	23:00
17:00	18:00	24:00

En base a esto se ingresa a la página web de la Red Geodésica Nacional Activa de INEGI:
<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rqna/>

Y se realizan los siguientes pasos:

1. Se selecciona la estación fija ISLP.
2. Se establece la fecha y hora, tanto inicial como final del levantamiento ya correlacionada con la que se tuvo en campo.
3. Posteriormente, ingresando la información da la opción para descargar el archivo donde nos proporcionan los datos obtenidos de la estación fija cuando se realizó el levantamiento en campo. De requerir más de una estación fija o diferentes fechas, simplemente se repite el proceso.

3.5.3 Post – Procesamiento de los PCT

Para procesar los PCT, Trimble cuenta con el software computacional *Trimble Business Center (TBC)*, ideal para analizar los datos de levantamientos GNSS y terrestres (estación total y nivel) registrados en campo. El software ofrece funciones exclusivas y cuenta con dos configuraciones principales, la *configuración Estándar*, diseñada para: transferir, procesar, ajustar y revisar datos de levantamientos terrestres y GPS (sólo frecuencia L1), así, como la *configuración Avanzada*, que está diseñada para transferir, procesar, ajustar y revisar datos de levantamientos terrestres y GNSS (frecuencias L1 y L2) (*Trimble, 2008*).

Siendo la configuración avanzada la implementada en el procesamiento de los PCT, que consiste en importar los datos crudos del levantamiento de campo, así como los archivos RINEX pertenecientes a las estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI, logrando referenciar los proyectos geográficos al marco geodésico oficial de México a

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

partir del ajuste de los datos levantados (antena R8s), con las estaciones de control de la RGNA en el Trimble Business Center (TBC).

El procesamiento o ajuste de los PCT se realiza en el software TBC, que cuenta con un interfaz intuitivo que facilita el proceso. La metodología desarrollada, consiste en seleccionar un sistema de referencia e importar los datos de la antena GNSS R8s, así como los valores descargados de la RGNA. Para lograr el ajuste óptimo se describe el procedimiento para el procesamiento mediante Trimble Business Center.

1. Se debe ingresar la llave del software al equipo donde se va a realizar el procesamiento.
2. Abrir el software, generar un proyecto nuevo y guardarlo. (Figura 3.10).

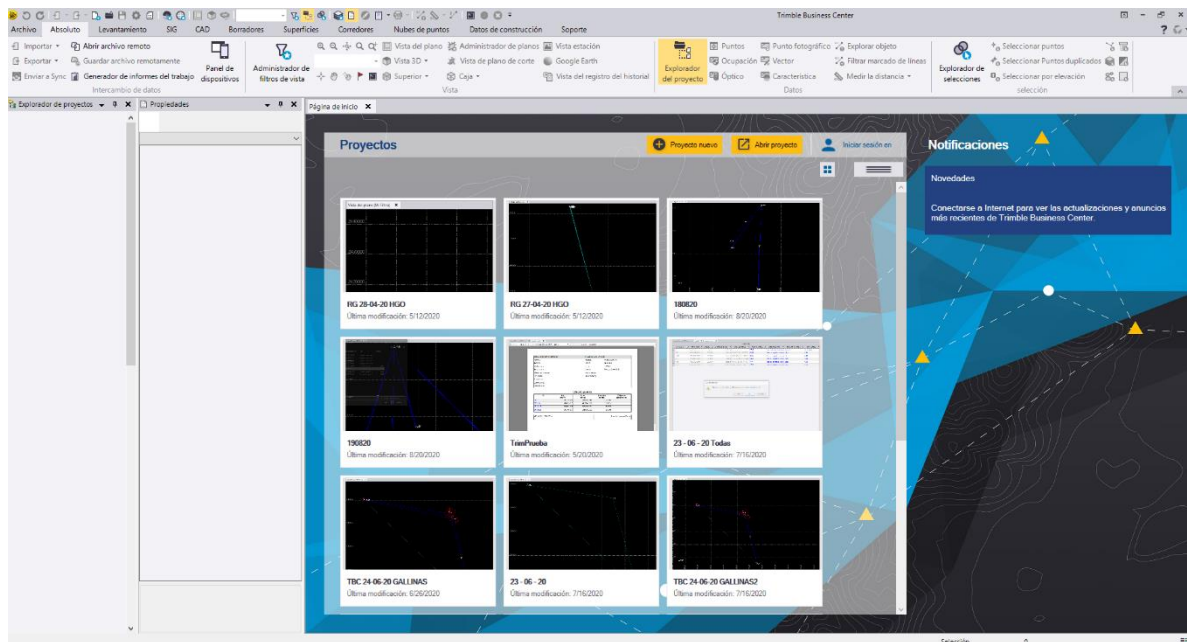


Figura 3. 10. Interfaz del software TBC.

3. Establecer el sistema de coordenadas con el que se ha estado trabajando desde campo, de ser necesario se realiza el cambio en el cuadro de la Figura 3.11

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

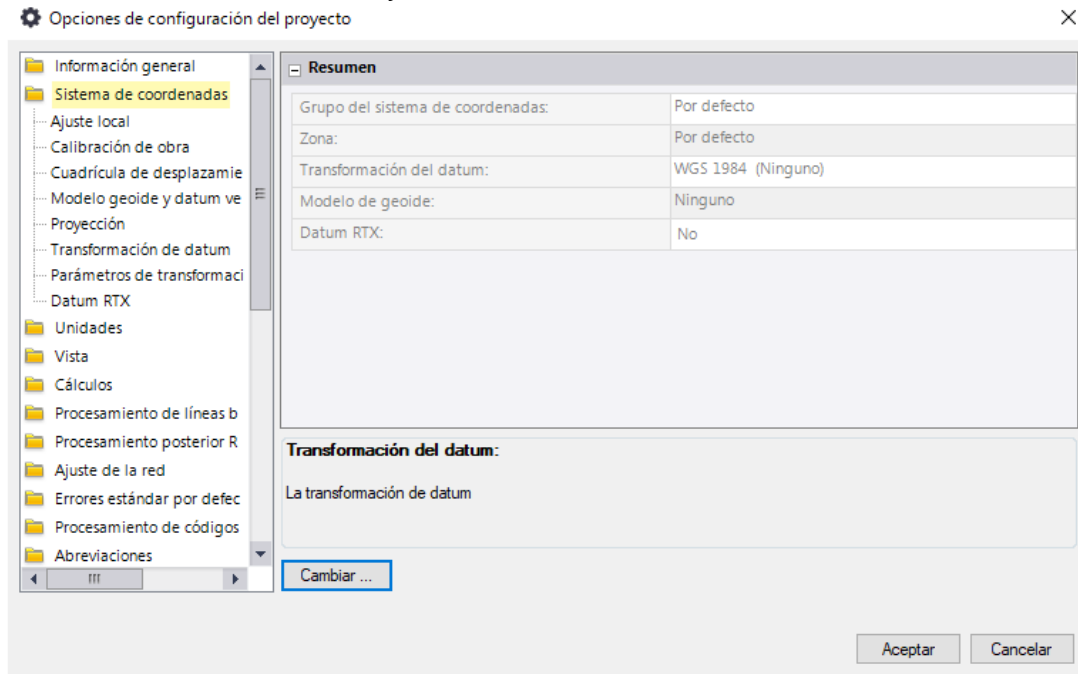


Figura 3. 11. Configuración del sistema de coordenadas del proyecto.

4. Importar los datos del levantamiento de campo. Para esto se tienen dos opciones, la primera es simplemente arrastrar los archivos y la segunda, buscar la carpeta en la pestaña de importar. (Figura 3.12).

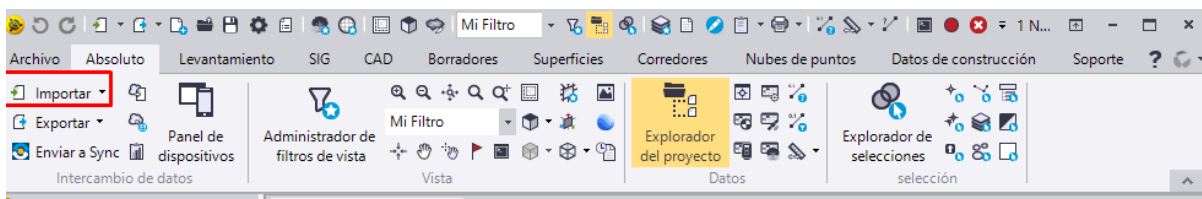


Figura 3. 12. Pestaña para importar los datos del levantamiento.

5. Al importar los archivos se abre una ventana de “Comprobación de datos brutos del receptor”, se debe verificar la información del punto, la antena y el receptor. Dentro de la información de la antena se puede modificar la altura de los puntos en dado caso que se tuviera un error. (Figura 3.13).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

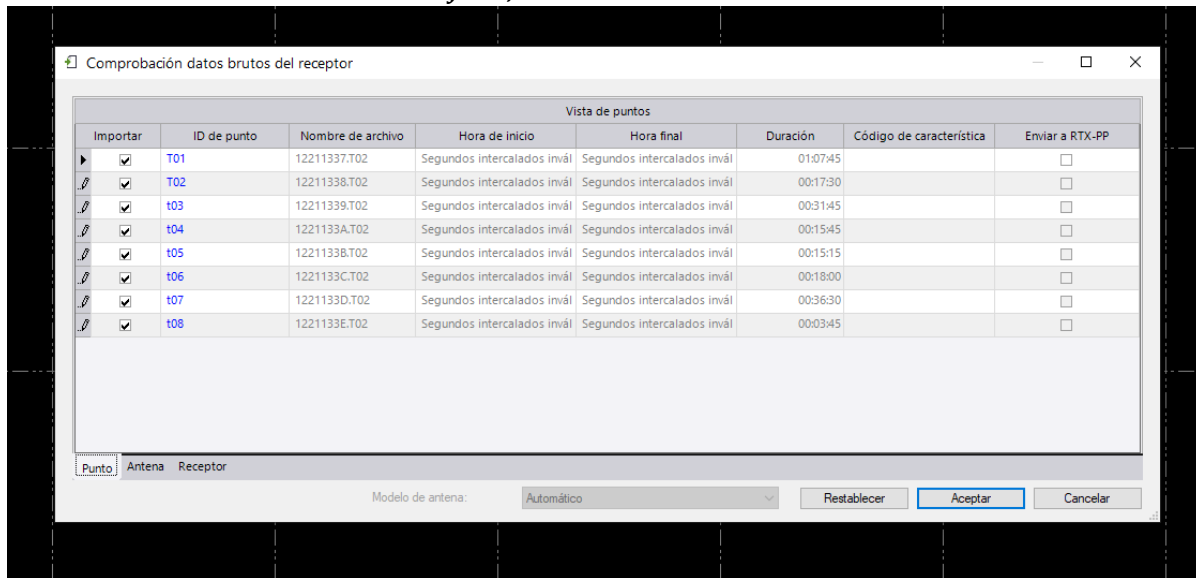


Figura 3. 13. Ventana para verificación de PCT.

6. Importar los datos de la estación de control descargados de la RGNA en formato RINEX, donde es necesario revisar que coincidan las coordenadas de la antena con las que se indican en el archivo. (Paso 4 y 5).
7. Automáticamente el software identifica la información de la estación base que abarca los puntos levantados, por lo tanto, el mismo descarta los horarios que de alguna manera quedaron vacíos.
8. Se podrá visualizar dentro de la vista del plano los puntos de control ya unidos con la estación base que se importó. (Figura 3.14).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

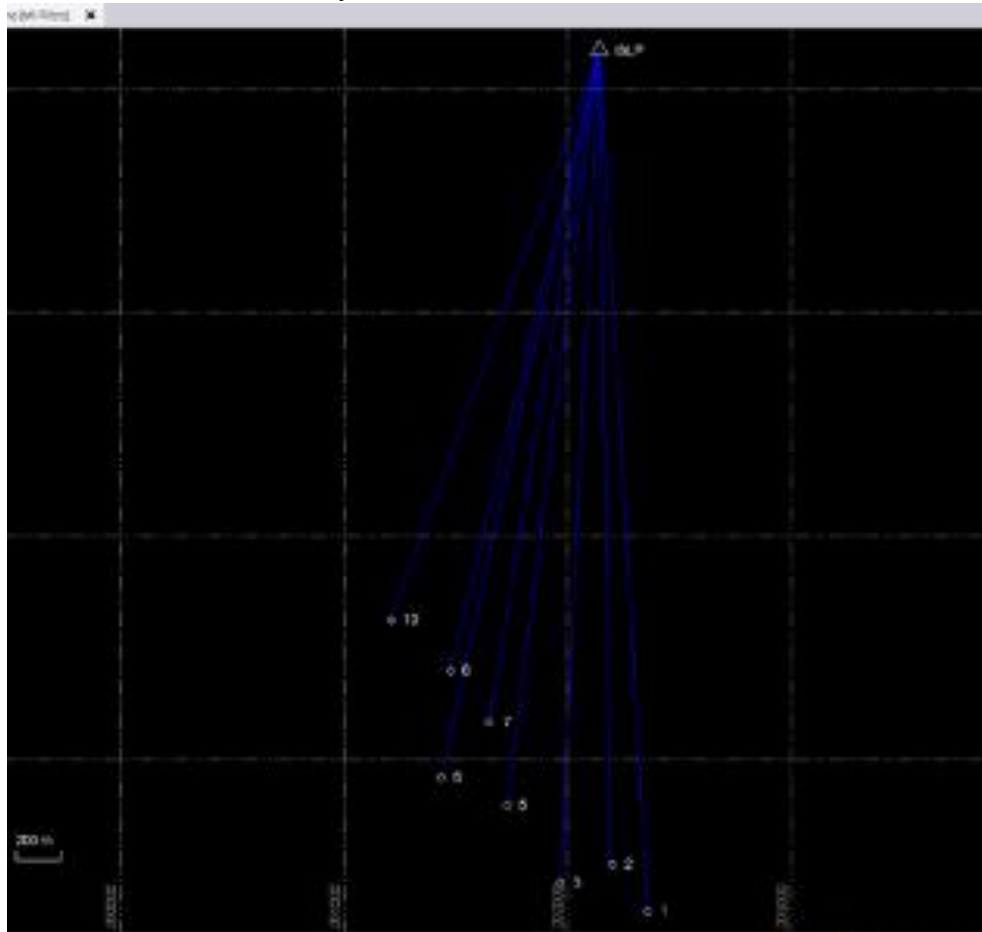
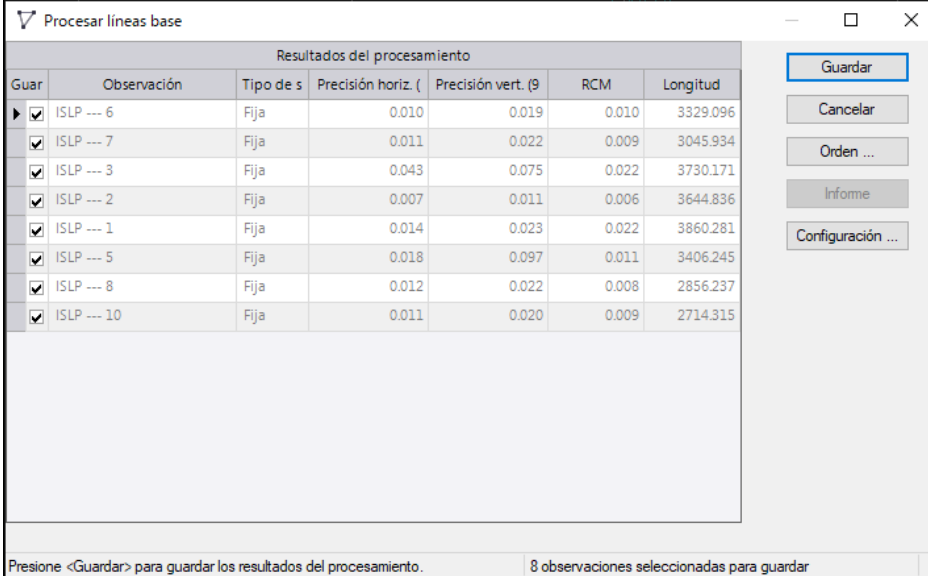


Figura 3. 14. Vista del plano de los PCT y la estación base.

9. Se seleccionan los datos de la estación de la RGNA en “Explorador de proyectos” y fijarla como calidad de control, dar clic en aceptar.
10. En algunas ocasiones la zona de estudio se encuentra cerca de la estación base y no es necesario el uso de efemérides, como es en el presente estudio. En caso de no ser así, las efemérides se obtienen en la pestaña de Levantamiento y posteriormente Descarga de internet.
11. Dar clic en la pestaña de Levantamiento y ubicar la opción de “Procesar líneas base”. (Figura 3.15).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Resultados del procesamiento						
Guar	Observación	Tipo de s	Precisión horiz. (Precisión vert. (9	RCM	Longitud
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 6	Fija	0.010	0.019	0.010	3329.096
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 7	Fija	0.011	0.022	0.009	3045.934
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 3	Fija	0.043	0.075	0.022	3730.171
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 2	Fija	0.007	0.011	0.006	3644.836
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 1	Fija	0.014	0.023	0.022	3860.281
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 5	Fija	0.018	0.097	0.011	3406.245
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 8	Fija	0.012	0.022	0.008	2856.237
<input checked="" type="checkbox"/>	ISLP --- 10	Fija	0.011	0.020	0.009	2714.315

Figura 3. 15. Ventana de procesar líneas base.

12. Se debe verificar en la ventana de “Editor de sesiones”, que las frecuencias sean uniformes para poder continuar.

13. Finalmente, se exporta el reporte de las líneas base con sus coordenadas (XYZ), es decir, de cada uno de los PCT.

Estos pueden ser exportados en Excel, PDF y/o Word.

3.5.4 Post – Procesamiento de fotogrametría

Al contar con las coordenadas corregidas de los puntos de control terrestre y las imágenes ya capturadas con el VANT en los vuelos realizados, se puede realizar el procesamiento fotogramétrico.

En la actualidad hay una gran variedad de software, los cuales cuentan con distintos enfoques, pero todos son utilizados para el post – procesamiento fotogramétrico, tales como: COLMAP, Meshroom, MicMac, OpenMVG, VisualSFM, Agisoft Metashape, LiMapper, Photomodeler, entre otros. (Übel, 2021).

En el presente estudio se proceso mediante el software de Agisoft Metashape, dado que es un programa de fotogrametría profesional ruso, utilizado para sistemas de información geográfica y cuenta con herramientas para la generación de un mallado 2D/3D, y permite clasificar los puntos para realizar una reconstrucción de la geometría mediante el reconocimiento de varios objetos. El número de fotos que pueden ser procesadas por el mismo depende de los parámetros de RAM. (Übel, 2021).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Las numerosas herramientas de medición permiten a los usuarios de minería, topografía y otros, llevar a cabo mediciones volumétricas. Entre las distintas características de Agisoft, encontramos la posibilidad de editar modelos 4D, lo que significa que se pueden grabar escenas en 3D y luego manipularlas. (Übel, 2021).

3.5.4.1 Análisis preliminar

Como resultado de cada uno de los ocho vuelos realizados se capturaron alrededor de 200 y 300 fotos por cada vuelo, donde pueden existir algunas con errores de captura. Es importante revisarlas y desechar aquellas que cuenten con distorsiones, desenfoques o que no se encuentren en el ángulo de inclinación correcto.

Una vez que se tienen las fotos, es necesario ejecutar el software e importar las mismas. Cabe mencionar que el interfaz del software resulta bastante intuitivo. (Figura 3.16).

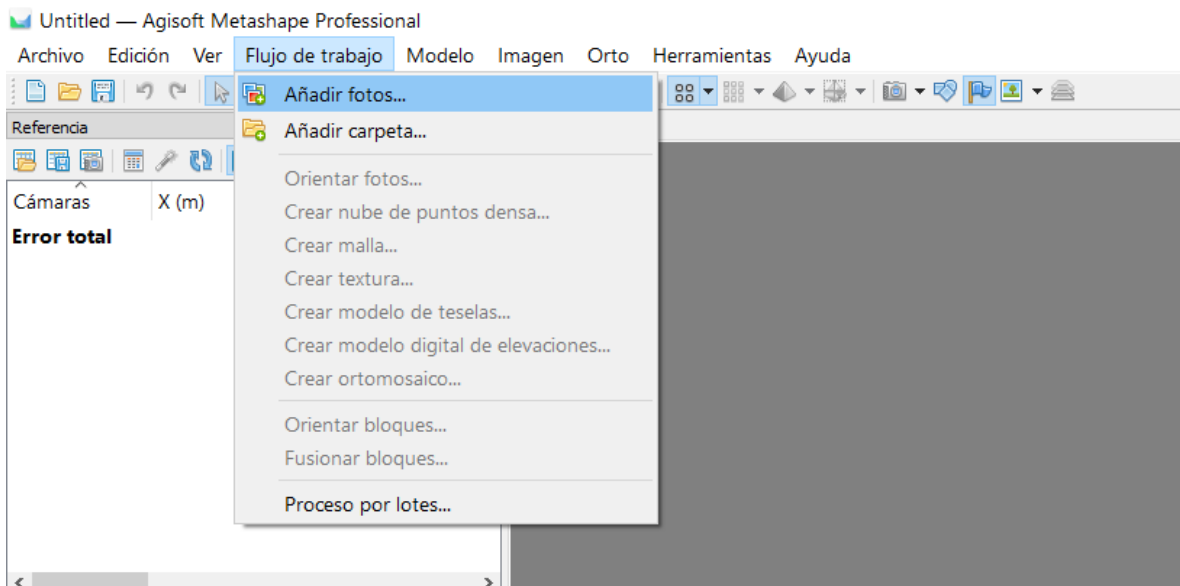


Figura 3. 16. Importar las fotos.

Los PCT se agregan de manera manual en donde se agregan sus coordenadas XYZ obtenidas anteriormente. Estos se ubican en el software. (Figura 3.17).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

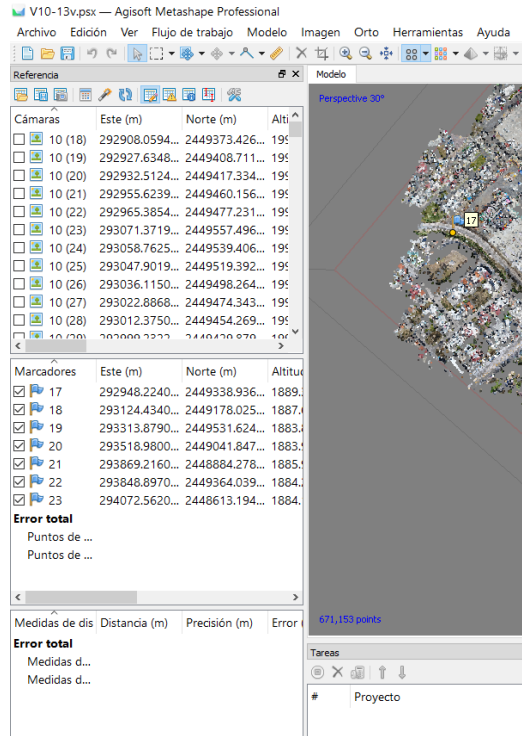


Figura 3. 17. Fotos y puntos de control agregados.

3.5.4.2 Orientación de fotos

De acuerdo con el manual de Agisoft, la posición de la cámara al momento de capturar las fotografías está definida, por los parámetros de orientación interna y externa de la propia cámara. Los parámetros de orientación interna incluyen: la distancia focal de la cámara, las coordenadas del punto principal de la imagen y coeficientes de distorsión del lente, mientras que los parámetros de orientación exterior definen la posición y orientación de la cámara. (Agisoft LLC, 2021).

Durante la orientación de la imagen, constan de 3 componentes de traslación y 3 ángulos de rotación de Euler. En muchos casos, los sistemas de levantamiento están equipados con sistemas GPS/GNSS para medir los parámetros de orientación exterior durante la captura (Agisoft LLC, 2021).

Es decir, que, una vez añadidas las fotos del vuelo al software, estas se alinean en la pestaña de “Flujo de trabajo” y dar clic en “Orientar fotos”. Se abrirá una ventana donde se especifica la precisión y la preselección genérica. (Figura 3.18).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

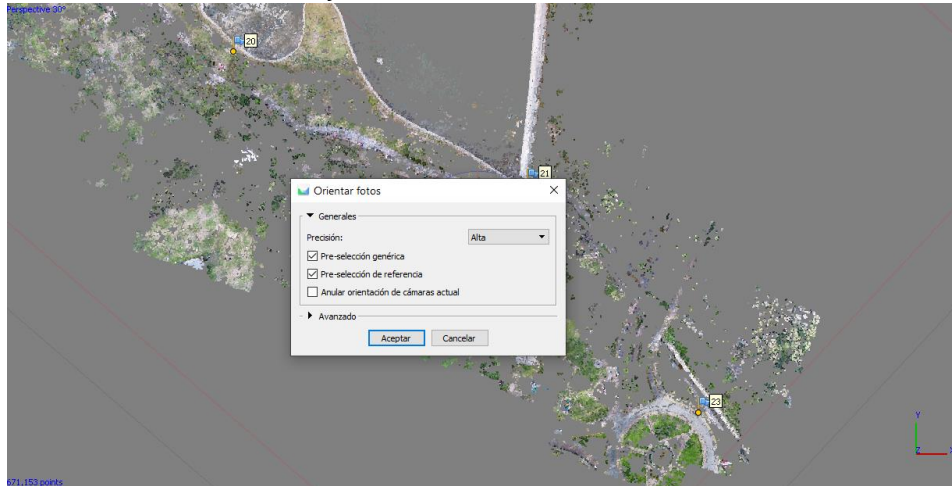


Figura 3. 18. Ventana de orientar fotos.

3.5.4.3 Georreferenciación

Esto consiste en seleccionar correctamente el sistema de coordenadas con el que el proyecto se esta trabajando, en este caso en particular el sistema de referencia utilizado es el WGS 1984 UTM Zone 14 North.

Este se selecciona en la parte izquierda de la pantalla en “Referencia” y se abrirá una ventana donde podremos modificar el sistema en caso de que no este ya seleccionado. (Figura 3.19).

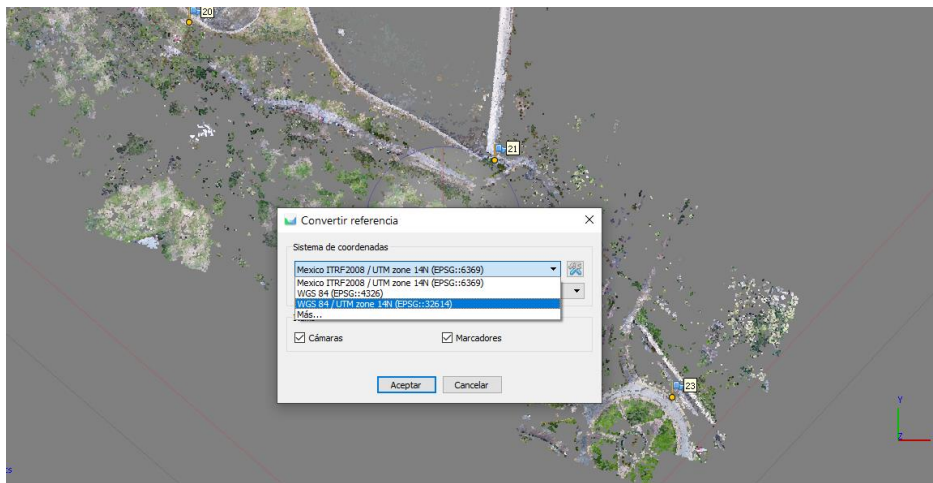


Figura 3. 19. Ventana de selección de sistema de coordenadas.

Una vez realizado esto, se recomienda desactivar todas las cámaras (fotos) y solo dejar activos los marcadores para optimizar los siguientes procesos.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.5.4.4 Nube de puntos densa

La generación de la nube de puntos densa está basada en los mapas de profundidad, calculados a partir de las imágenes superpuestas, considerando la orientación relativa exterior e interior. El software construye múltiples mapas de profundidad generados para cada cámara (foto) donde se fusionan para crear un nuevo mapa de profundidad combinado, utilizando información de las regiones superpuestas, para filtrar mediciones de profundidad incorrectas (Agisoft LLC, 2021).

Los mapas de profundidad combinados, generados para cada cámara, se transforman en nubes de puntos densas parciales, que luego se fusionan en una nube de puntos densa final, con un paso adicional de filtrado de ruido aplicado en regiones superpuestas (Agisoft LLC, 2021).

Una nube de puntos densa se puede editar y clasificar dentro del entorno de Metashape y usarse como base para etapas de procesamiento tales como la construcción del mallado y el MDE.

En la pestaña “Flujo de trabajo” se elige la opción de “Crear nube de puntos densa” y posteriormente clic en aceptar, el software iniciará con el proceso y este puede variar desde los 30 minutos o 4 horas aproximadamente. (Figura 3.20).

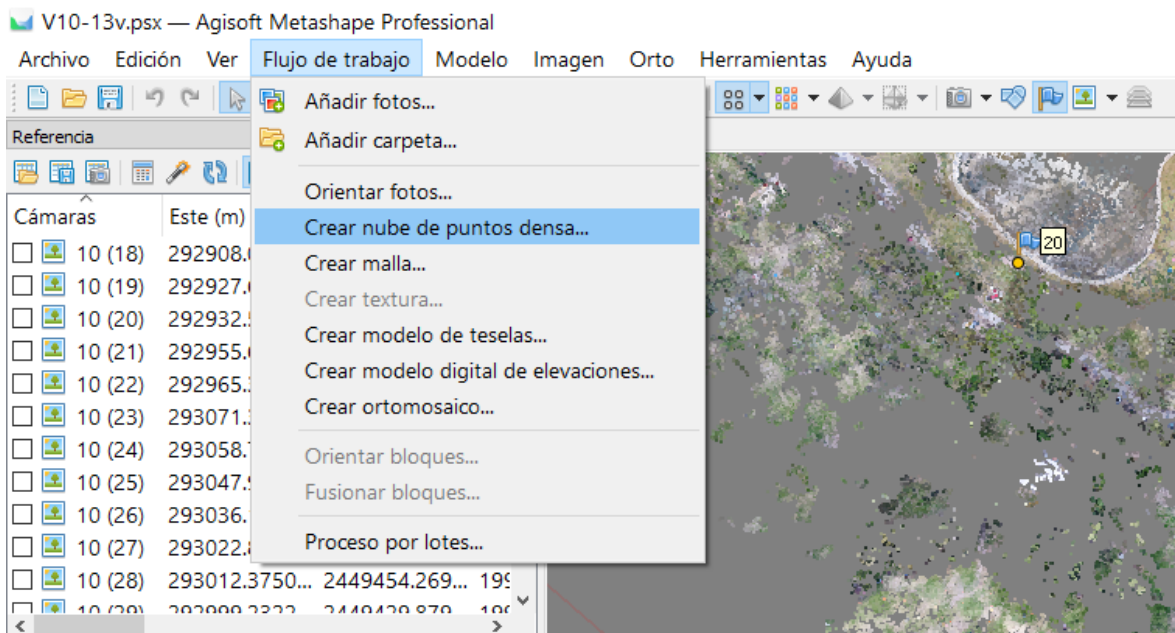


Figura 3. 20. Ventana de crear nube de puntos densa.

3.5.4.5 Clasificación de nube de puntos densa

Esta herramienta me permite conocer los MDE y los MDT ya que consiste en la identificación de diferentes colores, estructuras, vegetación o superficies captadas mediante la agrupación de píxeles de las fotografías capturadas. (Figura 3.21).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

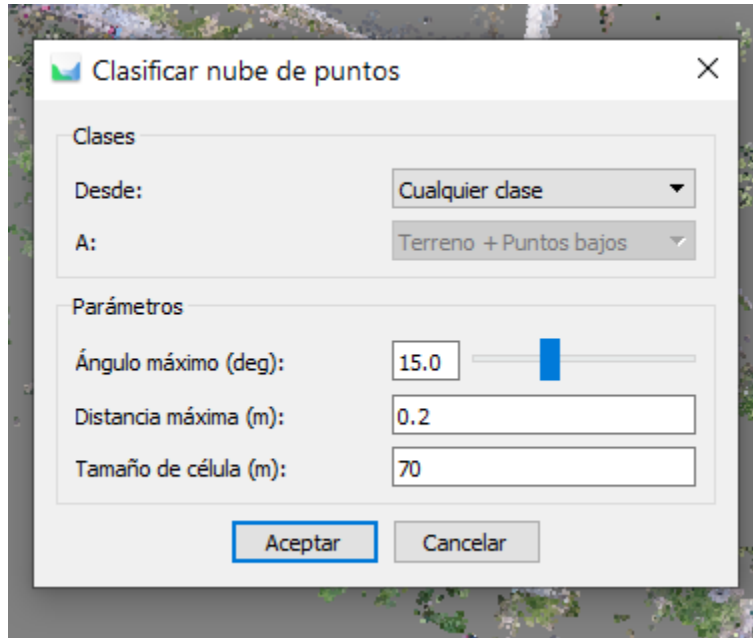


Figura 3. 21. Clasificación de nube de puntos.

Al hablar del modelo digital de superficie (MDS) cabe mencionar que no es necesario realizar una clasificación, ya que, este considera la elevación de absolutamente todas las superficies existentes.

Por otro lado, para un modelo digital de terreno (MDT), si es necesario realizarla para determinar el relieve de la superficie terrestre, de esta manera se van descartando otras superficies alternas que se pudieran tener en la zona de estudio.

3.5.4.6 Mallado

El software es capaz de reconstruir el modelo de malla poligonal, mediante la generación de la nube de puntos densa o basada en los datos de mapas de profundidad.

Es posible obtener un modelo digital de elevaciones (MDE) de superficie, de terreno y si se requiere de una selección de objetos en particular.

Para crearlo, es necesario ingresar a la pestaña de “Flujo de trabajo” y dar clic en crear malla. (Figura 3.22).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

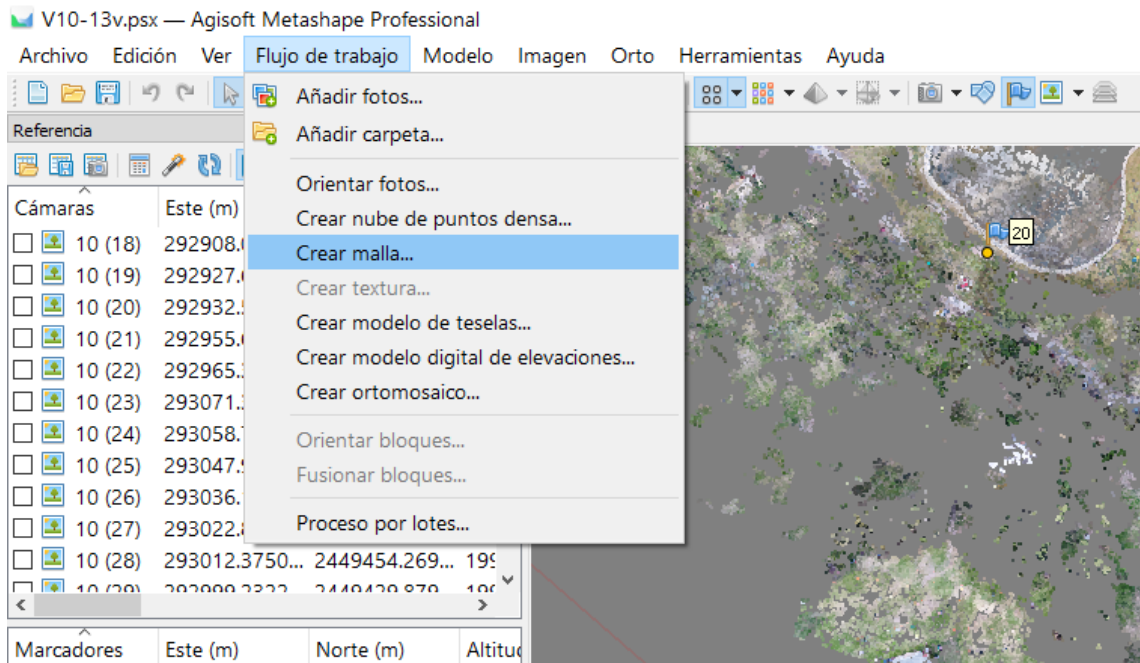


Figura 3. 22. Crear malla.

3.5.4.7 Obtención del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

El software permite crear un modelo digital de superficie (MDE), es decir, un modelo 2.5D de la superficie de la Tierra con todos los objetos en él, y el modelo digital del terreno (MDT) (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3), representa la superficie del suelo desnudo sin ningún objeto como vegetación y edificios. (Agisoft LLC, 2021).

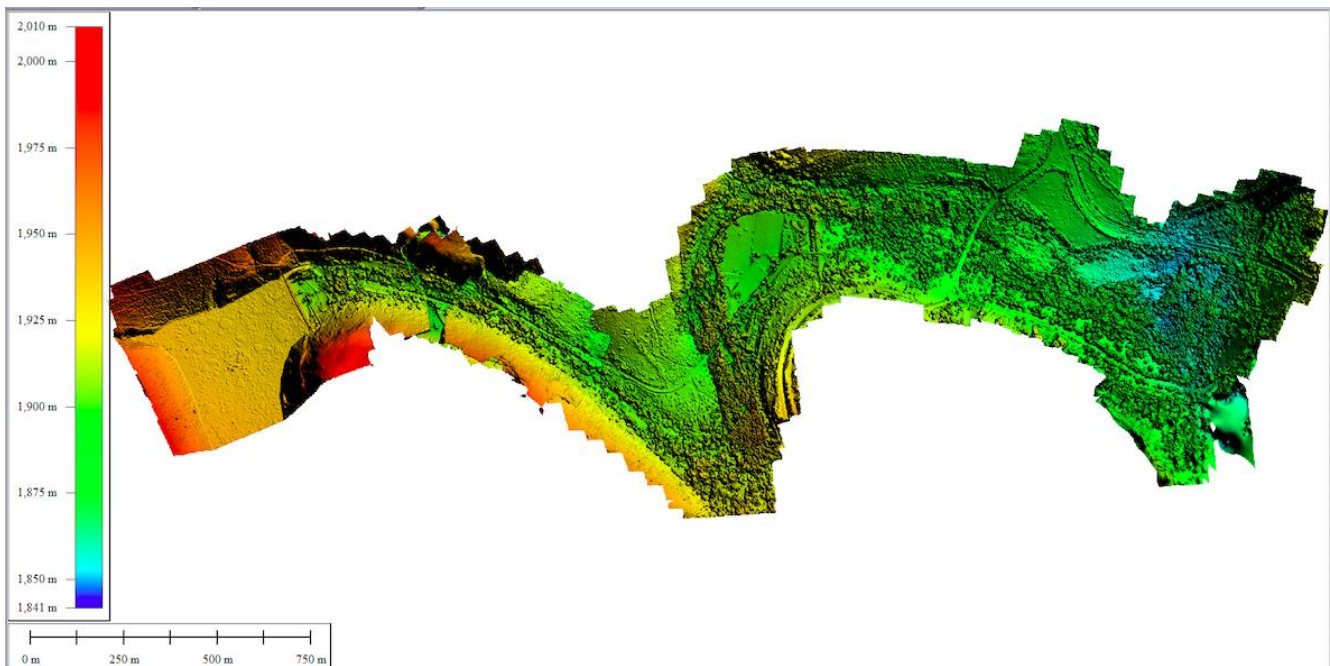


Figura 3. 23. Modelo digital de elevaciones.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

A partir de los modelos digitales, es posible realizar mediciones de puntos, distancias, áreas y volúmenes, además, los archivos se pueden exportar en diversos formatos (.asci, .TIFF, .Kml, etc.), logrando manejar la información en los sistemas de información geográfica y de ser necesario generar curvas de nivel. (Agisoft LLC, 2021).

3.5.4.8 Ortomosaico

El software permite utilizar las proyecciones geográfica, plana o cilíndrica, la cual, sirve para la tarea más típica de crear un ortomosaico en una coordenada geográfica (Agisoft LLC, 2021).

El ortomosaico es una fusión de las fotografías originales proyectadas en la superficie del objeto y transformadas en la proyección seleccionada. Puede ser un modelo poligonal o un modelo digital, se pueden exportar en diversos formatos (.TIFF, .kml, etc.).

3.6 Batimetría

Una batimetría se refiere al levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc.; es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua. (IDEAM, 2014).

Al igual que en los levantamientos topográficos convencionales, se determinan las coordenadas X, Y y Z, esta última corresponde a las profundidades de los cuerpos de agua levantados. De esta manera dependiendo del detalle con el que se lleve a cabo la batimetría, se pueden describir los fondos y el relieve de los cuerpos de agua y todas aquellas anomalías que en ellos puedan existir. (IDEAM, 2014).

Las aplicaciones de los levantamientos batimétricos son muy amplias, permiten estimar los volúmenes almacenados en los cuerpos de agua y conocer la dinámica de los lechos de ríos identificando zonas de socavación y áreas de depósito, que en ocasiones puede ocasionar la formación de islas en el río; también ofrece información para la navegación en grandes ríos. (IDEAM, 2014).

El estudio de la batimetría se lleva a cabo mediante diferentes técnicas, el uso de cada una de ellas puede dar diferentes resultados en función de la precisión utilizada. Entre las técnicas más usadas destacan los ecosondas Monohaz y Multihaz. Este sistema permite emitir ondas de sonido que miden la distancia entre la superficie del agua y el fondo marino, así como objetos suspendidos en esta o que reposan en el fondo. (Campillos, 2017).

La diferencia entre el mono y multihaz es que la sonda monohaz permite obtener la profundidad en un punto, de forma de que al mover la embarcación utilizando la sonda monohaz, se tiene la batimetría de una línea. Mientras que, la sonda multihaz permite obtener la profundidad de

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

una línea, de forma que al mover la embarcación se tiene la batimetría de un área (abanico de información). (Campillos, 2017).

Una de las técnicas más utilizadas es mediante un molinete colgado de un puente o un bote anclado en las dos orillas, lastrándolo para que no sea arrastrado por la corriente y haciendo que se mantenga en la vertical del observador. En caso de que el cauce sea más pequeño, el molinete puede ser manejado por el mismo operador, el cual podría ubicarse en el interior de la corriente. (Galecio, 2017).

Cuando se realiza una batimetría es necesario implementar el efecto Doppler mediante los equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). - Este es un perfilador con efecto Doppler similar a un sonar, utilizado para medir las velocidades de la corriente de agua. Utiliza el efecto Doppler de las ondas de sonido dispersadas desde las partículas dentro de la columna de agua. Obteniendo área, velocidad y caudal de forma inmediata con su respectiva batimetría del cauce. (Tec, 2023).

Se denomina efecto Doppler a la variación en la longitud de onda que se produce cuando las ondas electromagnéticas se reflejan en un objeto en movimiento. Esta variación es proporcional a la velocidad del objeto. Si se denominará f_1 a la frecuencia de la onda emitida, al reflejarse en una partícula con movimiento de velocidad v y de sentido contrario al avance de la onda, la frecuencia reflejada f_2 tendrá el valor $f_2 = f_1 + v/\lambda$, donde λ es la longitud de onda emitida. Por tanto, conocida la longitud de onda λ y la frecuencia emitida f_1 , así como la frecuencia recibida f_2 , se puede conocer la velocidad de una partícula mediante la siguiente ecuación: (Martínez Alvarez et al., 2004).

$$v = (f_2 - f_1)\lambda$$

Por tanto, si se instala un emisor-receptor de ondas de alta frecuencia, en una corriente, se puede relacionar el efecto Doppler producido en las ondas reflejadas por las partículas en suspensión con la velocidad del flujo en la sección. (Figura 3.24).

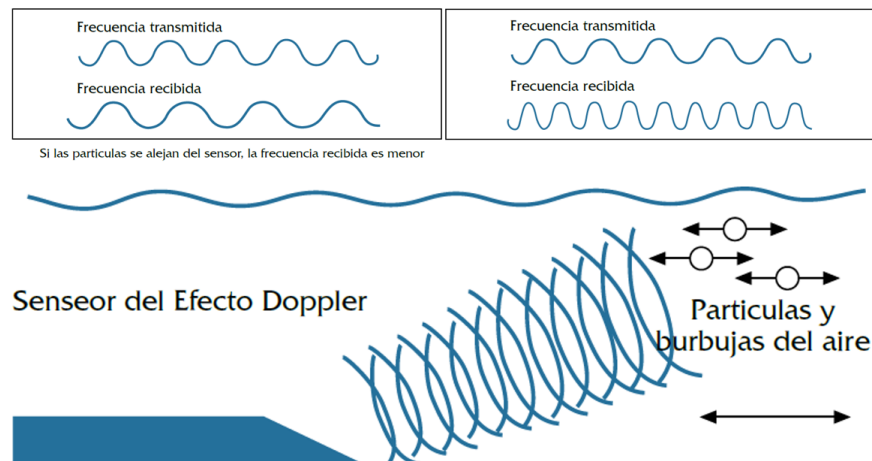


Figura 3. 24. Relación del efecto Doppler-velocidad.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

El perfilador acústico, emite pulsos de sonido llamados zumbidos (*pings*) que al encontrarse con las partículas transportadas por el fluido, se dispersan ondas de sonido de retorno, con una frecuencia diferente a la emitida, resultando que la velocidad del flujo es proporcional a la variación de frecuencia, según la siguiente relación: (*RD Instruments, 2008*).

$$F_{doppler} = -2F_{fuente} \frac{V}{C}$$

Donde:

V = velocidad relativa entre la fuente y el receptor.

$F_{doppler}$ y F_{Fuente} = frecuencia recibida y transmitida respectivamente.

C = velocidad del sonido.

Las mediciones se hacen durante un periodo de tiempo en el cual es computado el cambio de frecuencia promedio. Además, las mediciones pueden hacerse a distintas profundidades, de forma de poder obtener un perfil de velocidades en el flujo.

En las mediciones hechas con estos instrumentos la mayor parte de la energía en un pulso tiene una dirección conocida, sin embargo, una pequeña parte de esta energía es emitida en todas direcciones lo que, al ser captado por el receptor, puede generar interferencias en las mediciones. Estas interferencias pueden generar errores en el perfil de velocidades de hasta un 10%. (*Galecio, 2017*).

Particularmente los levantamientos batimétricos son insumo indispensable para aplicar cualquier software de modelación hidráulica lo cual permite evaluar el tránsito de crecientes con fines de pronóstico hidrológico.

En la actualidad existe una diversa cantidad de equipos para realizar este tipo de levantamientos.

3.6.1.3 RiverRay ADCP

Para el estudio presente, se utilizó el equipo *RiverRay ADCP* (Figura 3.25), desarrollado por la compañía *Teledyne RD Instruments*, el cual, para el aforo de caudales es montado sobre un *Hydroboard*, que permite la flotabilidad del equipo, para posteriormente vincularse de manera alámbrica o por bluetooth a una laptop y un GPS.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 3. 25. Equipo RiverRay ADCP y GPS.

Esta integrado por 4 haces ADP (Acoustic Doppler Pro) de 3.0 MHz y 4 haces ADP de 1.0 MHz. Los haces permiten medir la velocidad de sonido en un rango de ± 9.5 m/s y 70 metros, cuenta con una memoria interna de 16 MB, un haz acústico vertical (ecosonda) de 0.5 MHz para medir la profundidad, sensor de inclinación y de temperatura.

A continuación, se tiene la ficha de especificaciones técnicas del equipo RiverRay ADCP. (Tabla 3.3).

Tabla 3. 3. Especificaciones técnicas de RiverRay.

Velocidad de Perfilamiento	
Modo de operación	Banda ancha o pulso - coherente, atm
Rango de velocidad	± 5 m/s por default, ± 20 m/s may
Rango de perfilamiento	0.4 a 40.0 m
	± 0.3 % de la velocidad del agua relativo al ADCP
Precisión	(\pm mm/s)
Resolución	1 mm/s
Número de celdas	Atm, 25 típicas. Máximo de 200
Tamaño de celdas	Atm. Mínimo 10 cm
Rango de celda superficial	25 cm ²
Velocidad de salida de datos	1 - 2 Hz

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Rastreo del Fondo			
Modo de operación	Banda ancha		
Rango de velocidad	±9.5 m/s		
Profundidad máxima	70 metros		
Precisión	±0.3 % de la velocidad de fondo relativo al ADCP (±2 mm/s)		
Resolución	1 mm		
Medición de Profundidad			
Rango	0.3 a 70 metros		
Precisión	1 % (temperatura y perfil de salinidad uniforme en agua)		
Resolución	1 mm		
Sensores Estándar			
Sensor	Temperatura	Inclinación (estado sólido)	Compás (estado sólido)
Rango	menos 5 a 45 °C	±15 °	0 - 359.99 °
Precisión	±0.4 °C	±0.5 °	±2 °
Fuente de poder			
Voltaje de entrada	10.5 a 18 VDC		
Consumo de energía	1.5 W típica		
Batería	12 V, 7A-hr lead		
Acid gel cell	Recargable		
Capacidad de batería	Mayor a 40 horas en operación continua		
Ambiental			
Temperatura de operación	menos 5 a 45 °C		
Temperatura de almacenaje	1.5 W típica		
Comunicación			
Estándares	RS- 232, 1200 a 115,200		
Baudios	115,200		
Rango	200 metros		
Línea de vista	Mayor a 30 km		

3.6.1.4 Sistema de posicionamiento Global (GPS)

En la actualidad existen por lo menos 24 satélites disponibles para poder efectuar diversas mediciones. Estos se encuentran a una distancia de alrededor de 20,200 km de altura y su período de revolución es de 12 horas, cuantan con una inclinación de 55 grados con respecto al plano ecuatorial ya optimizado, teniendo como resultado una cobertura mundial.

De acuerdo a la configuración propuesta se obtiene que de 4 a 6 satélites pueden ser observados desde cualquier parte del globo terraqueo las 24 horas del día, permitiendo de esta manera una navegación y posicionamiento continuo.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para el último estudio realizado en el año de 2013 por Elvia Raquel Blanco se trabajó con un equipo GPS de marca FURUNO. (Figura 3.26). A continuación, se presenta su ficha técnica. (Tabla 3.4).

Tabla 3. 4. Especificaciones técnicas de equipo GPS.

Equipo GPS	
Marca	FURUNO
Modelo	GP-1650DF
Unidad de presentación	
Tipo	GP-1650DF
Frecuencia	50/200 kHz
No. de Serie	3415 - 3294
Distancia de la brújula	
SDT	0.8 metros
STEER	0.6 metros
Clase de equipo	B
Hecho en	Japón

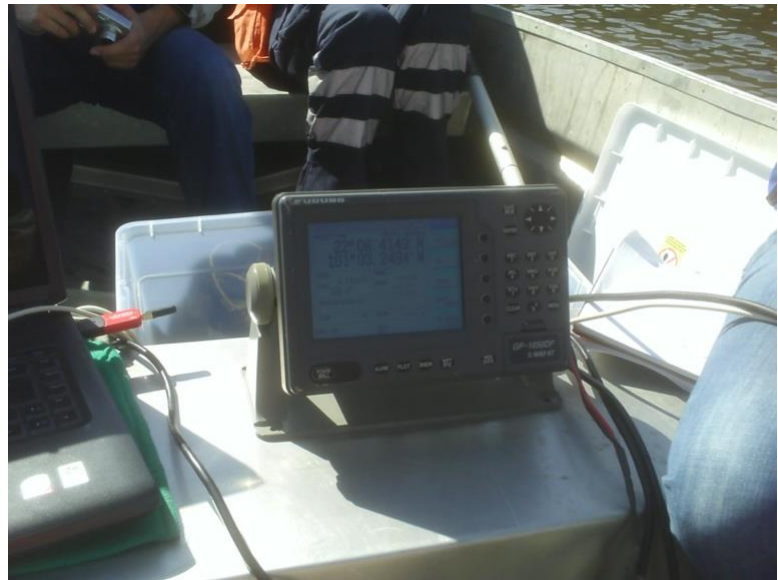


Figura 3. 26 .Equipo FURUNO. (Elvia, 2013).

Este GPS viene equipado con una antena de la misma marca (Figura 3.27), la cual permite tener diferentes maniobras con el GPS ya que cuenta con un cable estándar de 10 metros de largo.



Figura 3. 27.Antena FURUNO. (Elvia, 2013).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.6.1.5 Inversor de corriente

Se encarga de convertir la corriente continua en corriente alterna, es decir, cambia el voltaje. Es un adaptador de corrientes que esta basado en un sistema de baterías para permitir el uso de aparatos convencionales de corriente alterna directamente o por medio de un sistema de cableado. Con esta herramienta es posible conectar una computadora portátil que permite almacenar los datos que se van recolectando por el RiverRay durante la campaña de medición.

Para el presente estudio se utilizó el inversor de marca Samlex 450. (Figura 3.28).



Figura 3. 28. Equipo inversor de corriente.

Es necesario contar con una fuente de poder como una batería marina con un voltaje de entrada de 10.5 a 18 VCD.

3.6.2 Campaña de medición

Se realizó el día 30 de noviembre del 2013 a partir de las 9:00 a.m. por Elvia Raquel Blanco y la supervisión del doctor Clemente Rodríguez Cuevas, con el apoyo de protección civil municipal, que prestó un par de lanchas de motor, chalecos salvavidas, cuerdas, herramientas y una ambulancia en caso de alguna emergencia. (Figura 3.29).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 3. 29. Apoyo de protección civil. (Elvia, 2013).

El estudio se inició aguas arriba de la Presa de San José. (Figura 3.30).



Figura 3. 30. Aguas arriba de la Presa de San José. (Elvia, 2013).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.6.2.1 Instalación de los equipos

Para comenzar, se instaló el RiverRay ADCP sobre el hydroboard (Figura 3.31) para conectar los cables a la batería marina y poder proporcionar la electricidad necesaria. Seguido de la conexión de la computadora al inversor y a la batería.

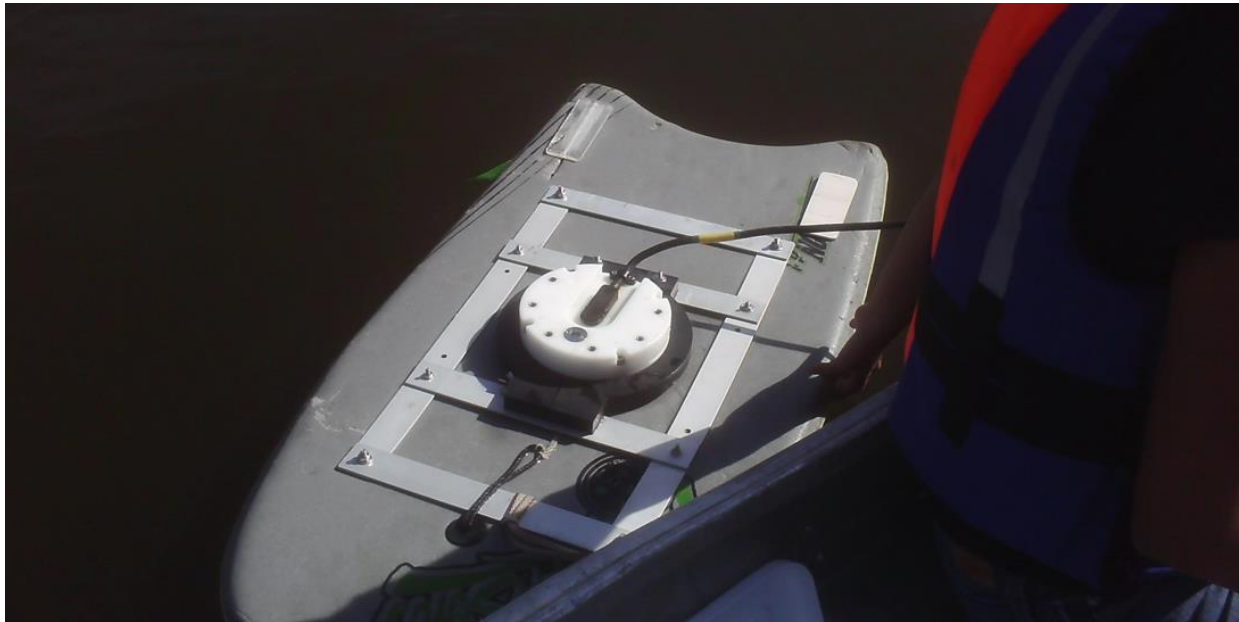


Figura 3. 31. ADCP instalado en el hydroboard. (Elvia, 2013).

Se debe instalar el controlador de Bluetooth para configurar los equipos, se utilizó un UD100 para conectar con la computadora mediante su puerto USB.

Al vincular los dispositivos vía bluetooth, se procede a configurar las características de la campaña de medición, para este caso de estudio debe ser para el aforo de caudales mediante la configuración de perfilador de corrientes.

3.6.2.2 Calibración del equipo

Este procedimiento es necesario cada vez que se pretenda realizar una medición, ya que es utilizado para compensar los campos magnéticos específicos para el sitio de estudio.

Se realiza mediante dos tipos de movimientos, simulando el movimiento del agua. El primero consiste en rotar sobre su propio eje el dispositivo ADCP, desde los 0 hasta los 360 grados, el segundo movimiento consiste en una rotación de una inclinación vertical, donde conforme a la calibración y los movimientos realizados los recuadros en el software van cambiando de color y siendo el color verde intenso, el óptimo.

Finalmente, el equipo ADCP debe encontrarse con su foco en color azul y de esta manera, se puede iniciar con el recorrido de los transectos necesarios.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

3.6.2.3 Transectos

Para lograr una medición óptima se recomienda que el traslado del hydroboard sea a una velocidad inferior a la del flujo del agua que se tiene, por otro lado, se debe repetir el proceso de una misma sección un par de ocasiones.

El software WinRiverII proporciona las profundidades en tiempo real, por lo que se monitoreo que el equipo ADCP contara siempre con un tirante mínimo de 70 centímetros.

Como resultado se obtuvieron un total de 4 transectos (Figuras 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35), cada uno varia entre los 30 y 90 minutos, con un promedio de 130 puntos por cada uno.



Figura 3. 32. Transecto 000. (Elvia, 2013).



Figura 3. 33. Transecto 001. (Elvia, 2013).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 3. 34. Transecto 002. (Elvia, 2013).



Figura 3. 35. Transecto 003. (Elvia, 2013).

3.6.3 Interpretación de la información obtenida en campaña de medición

El software de WinRiver II además de registrar las mediciones de los perfiles de velocidad y de caudal en tiempo real, también permite realizar una recopilación y así el análisis de los mismos. El procesamiento o bien, ajuste de los datos obtenidos se realiza por medio del mismo interfaz antes utilizado, siendo este uno intuitivo que facilita el proceso. (Figura 3.36).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

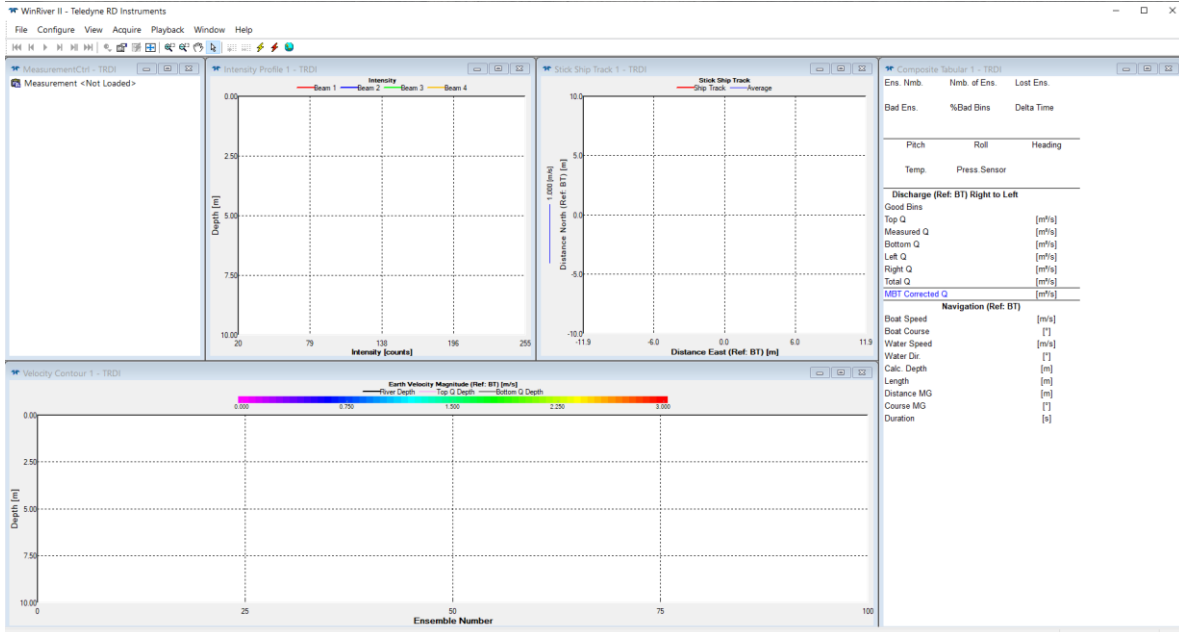


Figura 3. 36. Interfaz de WinRiverII.

A continuación, se detalla la metodología desarrollada para la obtención de la batimetría.

1. Una vez que se tiene abierto el software de WinRiverII se procede a buscar el archivo de medición en formato (.mmt). (Figura 3.37). Dar clic en “Abrir”.

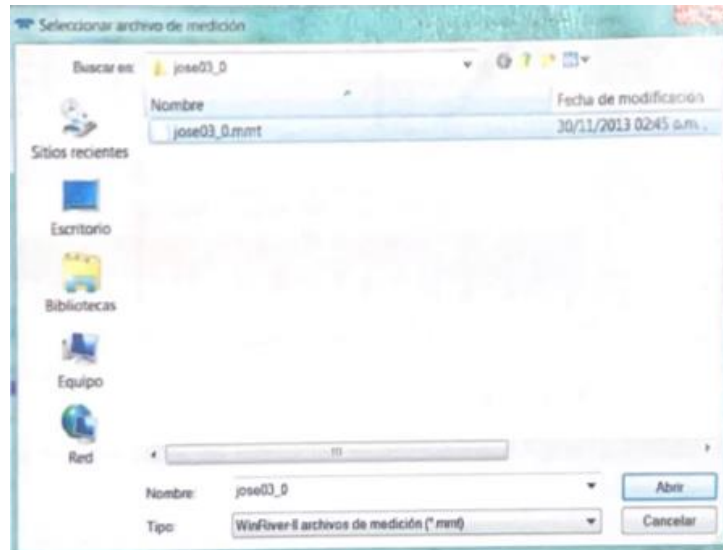


Figura 3. 37. Ventana de selección de archivo.

2. De primera vista se agregó el archivo de medición el cual nos muestra los transectos realizados en campo y que fueron guardados en el mismo. (Figura 3.38).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

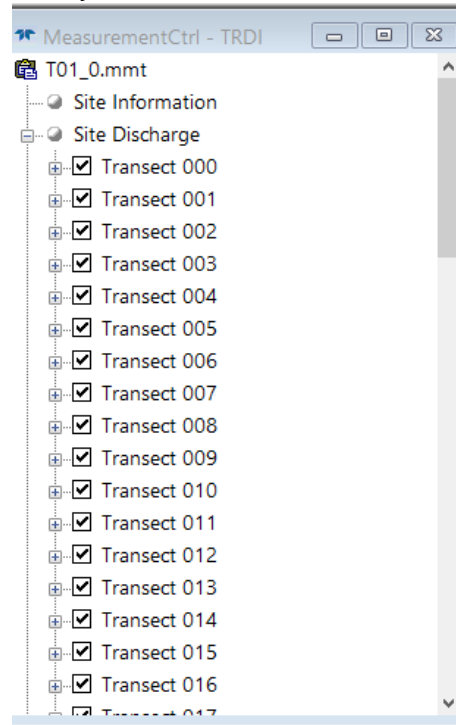


Figura 3. 38. Visualización de los transectos guardados en el archivo.

3. En la pestaña de “Configuración” se busca la opción de ASCII Output donde se debe verificar que este encendida (ON) la parte de Classic ASCII Output. (Figura 3.39).

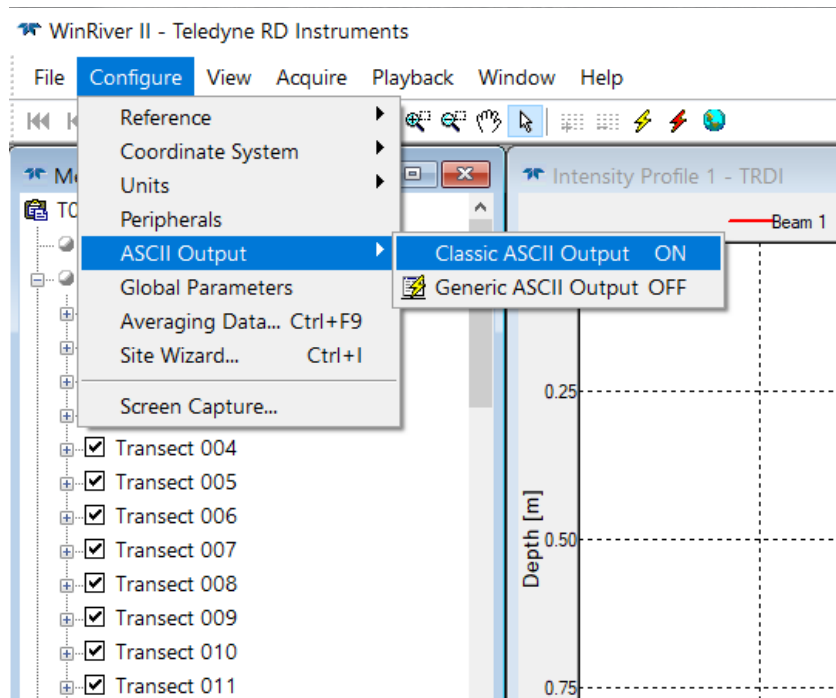


Figura 3. 39. Encender el modo Classic ASCII Output.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

- Procedemos en trabajar cada uno de los transectos, es decir, seleccionamos de uno por uno dando clic derecho y arrojará tres opciones. Seleccionar “Reprocesar transecto”. (Figura 3.40).

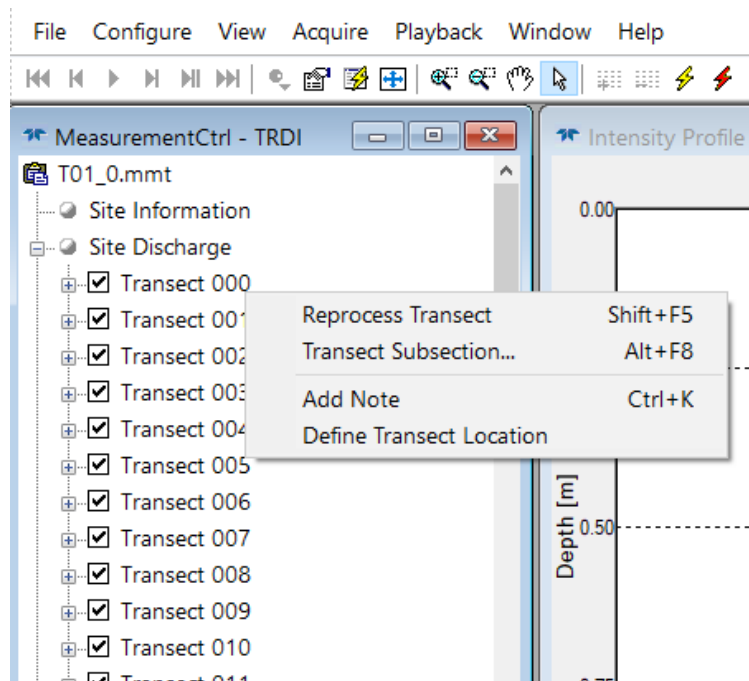


Figura 3. 40. Reprocesar transecto.

- Se habilitarán los otros recuadros como: el perfil de intensidad, la huella de bastón de embarcación, el contorno de velocidad y los gastos o descarga de forma detallada. (Figura 3.41).

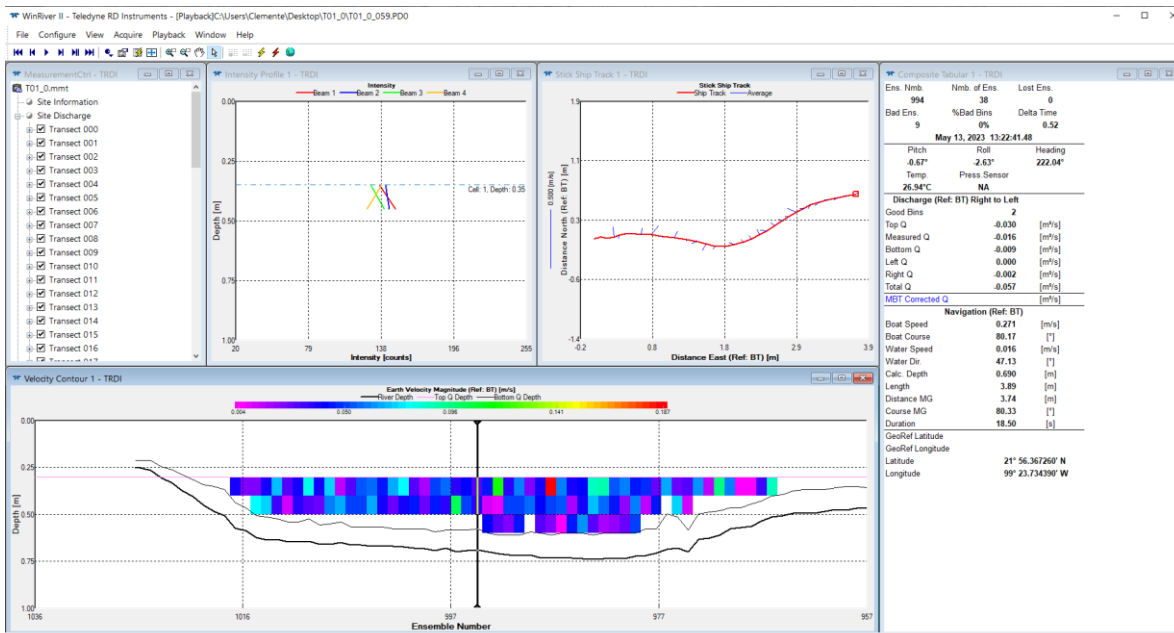


Figura 3. 41. Corrida de transecto.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

6. Procedemos a guardar los datos obtenidos, se recomienda que se maneje una sola carpeta por archivo de medición ya que después nos genera un archivo por transecto.
7. Los archivos en ASCII se abren mediante el software creado por el Dr. Clemente Rodríguez Cuevas el cual determino como “Fortran”.
8. Mediante este software se buscará eliminar cualquier error que se hayan generado en los archivos y de esta manera poderlos exportar a Excel para un mejor análisis de estos.
9. Se repiten los pasos del 1 al 9 en caso de tener más de un archivo de medición, en este caso en particular se repitió el proceso 4 veces. Uno para cada uno de los transectos mostrados en el apartado anterior.

Obteniendo como resultado la batimetría del vaso de la Presa de San José (Figura 3.42), el cual, junto con la topografía obtenida anteriormente, se utilizarán para la modelación hidrodinámica del paseo de la Presa de San José.

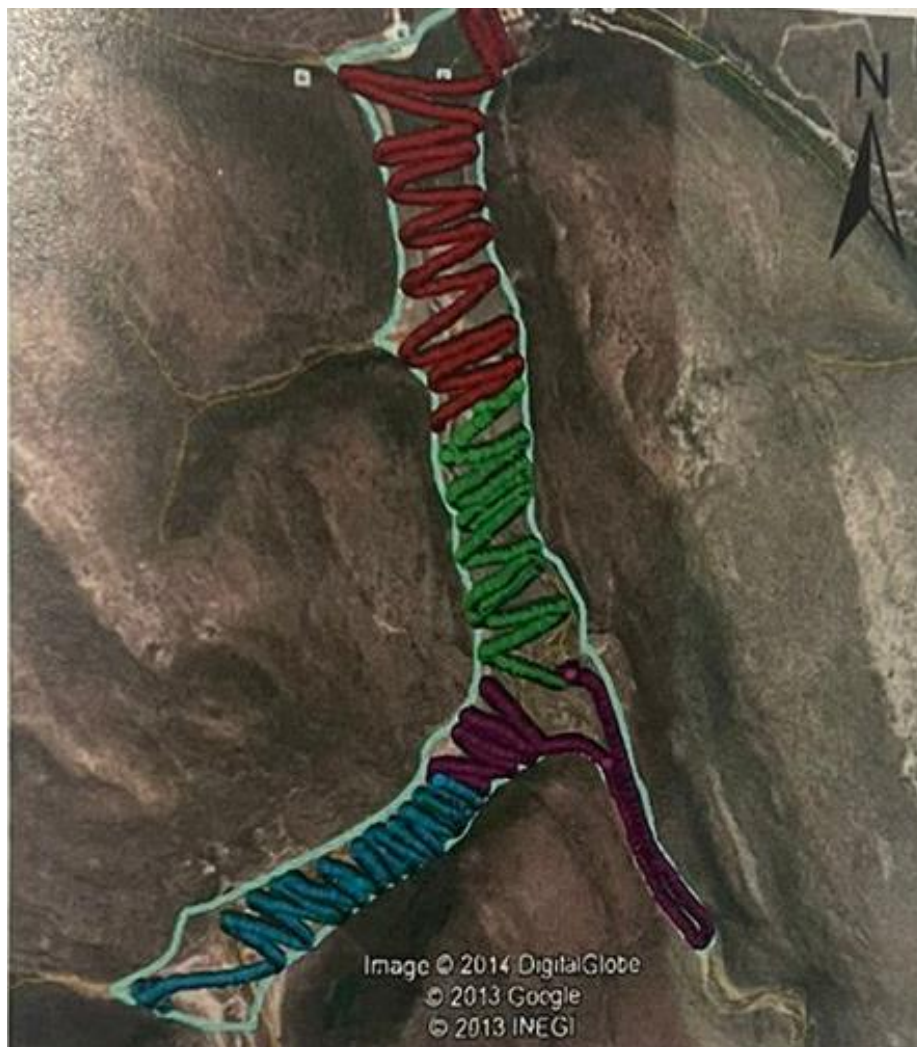


Figura 3. 42. Cuatro transectos que conforman la batimetría del vaso de la Presa de San José.

4. SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE

4.1 Introducción

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) son técnicas de gestión de aguas pluviales y planeamiento urbano que persiguen reproducir y/o restituir los procesos hidrológicos previos al desarrollo, integrando estratégicamente elementos de control de escorrentía en el paisaje urbano. (Joya, 2015).

Los SUDS buscan reproducir el comportamiento de la cuenca en su estado natural, en la mejora del estado de las masas de agua; protección frente a inundaciones y sequías; adaptación y mitigación (sumideros de CO₂) al impacto del cambio climático; reducción del consumo energético en el ciclo urbano del agua (aprovechamiento de pluviales, menor volumen de agua a plantas de tratamiento, menos bombeos, etc.); provisión de servicios ecosistémicos, la conectividad y la restauración ecológicas para la conservación de la biodiversidad, reforzando los valores del agua y de los espacios verdes. (Joya, 2015).

Los SUDS forman parte de las infraestructuras verdes urbanas y son perfectamente compatibles con los sistemas tradicionales de gestión de aguas pluviales urbanas, con los que se consigue disminuir las escorrentías que acaban siendo recibidas en colectores, tanques o etc, además de reducir los arrastres de sólidos, y, en última estancia, vertidas a los medios receptores sin un tratamiento adecuado. (Joya, 2015).

De esta manera se alinean con los tres ejes básicos de la sostenibilidad:

- Economía: control y gestión eficiente de la cantidad de escorrentías urbanas, reduciendo la producción de escorrentía y dotando así de una mayor resiliencia a los sistemas convencionales existentes.
- Medio ambiente: control, gestión y recuperación de la calidad del agua de lluvia, haciendo frente a la contaminación difusa
- Sociedad: valoración y potenciación del paisaje urbano con la puesta en valor de los beneficios añadidos para el propio ciudadano y para la biodiversidad en el ecosistema urbano.

Así, los SUDS constituyen un gran recurso educativo para sensibilizar sobre las buenas prácticas en el uso del agua y las alternativas técnicas para mejorar su gestión. (Joya, 2015).

Bajo la denominación SUDS, encontramos infraestructuras como:

- Techos o cubiertas vegetadas
- Pavimentos permeables
- Pozos y zanjas de infiltración
- Parques inundables
- Drenes filtrantes
- Franjas filtrantes
- Cunetas Verdes

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

- Balsas o depósitos de detención
- Estanques o humedales artificiales
- Depósitos de infiltración y retención
- Sistemas de Captación de Aguas de Lluvias (SCALL)

Por mencionar algunos de ellos. (Figura 4.1).



Figura 4.1. Ejemplos de infraestructura denominada SUDS.

En algunas literaturas se puede encontrar como SUD (Sistema Urbano de Drenaje) o bien como SbN (Soluciones Basadas en la Naturaleza).

4.2 Agenda 2030 para un desarrollo Sostenible de la Organización de las Naciones Unidas (ONU)

El lento crecimiento económico mundial, las desigualdades sociales y la degradación ambiental que son característicos de nuestra realidad actual presentan desafíos sin precedentes para la comunidad internacional. En efecto, estamos frente a un cambio de época: la opción de continuar con los mismos patrones de producción, energía y consumo ya no es viable, lo que hace necesario transformar el paradigma de desarrollo dominante en uno que nos lleve por la vía del desarrollo sostenible, inclusivo y con visión de largo plazo. (Unidas, 2018).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Los 193 Estados Miembros de las Naciones Unidas, junto con un gran número de actores de la sociedad civil, el mundo académico y el sector privado, entablaron un proceso de negociación abierto, democrático y participativo, que resultó en la proclamación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con sus Objetivos de Desarrollo Sostenible, en septiembre de 2015. (Unidas, 2018).

La Agenda 2030 es una agenda transformadora, que pone a la igualdad y dignidad de las personas en el centro y llama a cambiar nuestro estilo de desarrollo, respetando el medio ambiente. Esta compuesta por 17 Objetivos y 169 Metas, donde de estos, los objetivos: 6 (garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos), 9 (construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación), 11 (lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles) y 15 (proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad), tienen que ver directamente con el desarrollo en los entornos urbanos. (Figura 4.2).



Figura 4. 2. Objetivos de desarrollo sostenible. (ONU).

4.3 Antecedentes internacionales

Los SUDS en el panorama internacional cuentan con una trayectoria de casi 50 años en los países en los que se originaron.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Existen numerosas experiencias de implantación de SUDS a nivel internacional que ponen de manifiesto cómo grandes urbes están afrontando los nuevos retos del drenaje urbano en este marco y están creando la tendencia para el futuro. Un ejemplo indiscutible de éxito en la implantación de los SUDS es la ciudad de Nueva York que ha puesto en marcha proyectos y programas relacionados con la infraestructura verde, convirtiéndose en líder mundial en esta disciplina. (*Ambiente, 2011*).

Entre el 2005 y la actualidad, el Instituto Municipal de Urbanismo de Barcelona (IMU, BAGURSA) viene desarrollando a través de determinadas obras la implementación de SUDS en el espacio público con un objetivo que ha sido claro y una constante hasta ahora: gestionar la escorrentía de forma alternativa y autónoma a los sistemas unitarios, utilizando sus mismos parámetros de partida. (*Ambiente, 2011*).

Las diferentes intervenciones desde el 2005 se han ido perfeccionando hasta llegar a la definición de modelos probados que sirven de base en la redacción de planes y estudios técnicos sobre los SUDS y que son replicables en el resto de la ciudad y extrapolables a otras ciudades. (*Ambiente, 2011*).

Algunas de las obras que ejemplifican esto en Barcelona, son:

- Urbanización del entorno de Can Cortada. (Figura 4.3).



Figura 4. 3.Can Cortada (Barcelona). (Roberto Soto F.).

- Urbanización del barrio de Bon Pastor, “el camino del agua en el paisaje urbano, barrio de Bon Pastor. (Figura 4.4).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 4. Bon Pastor (Barcelona). (Roberto Soto F.).

- Plaza de las Dones de Nou Barris, Roquetas. (Figura 4.5).



Figura 4. 5. Calle Nou Barris (Barcelona). (Roberto Soto F.).

En Santander (Cantabria) se rehabilitó, en 2008, el parque urbano de Las Llamas apostando por principios de diseño sostenibles. El parque de 300.000 m² cuenta con un humedal artificial, un estanque y un aparcamiento permeable experimental, donde se han monitorizado durante 5 años diferentes tipologías: asfalto y hormigón poroso, césped reforzado con celdas de hormigón y de polipropileno y adoquines permeables, así como varios geotextiles (Andrés Valeri et al., 2016). (Figura 4.6).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 6. SUDS en Santander. (Andrés-Valeri et al.-2016).

En 2010 se publica el “NYC Green Infrastructure Plan” que define una estrategia basada en infraestructura verde para la consecución de los objetivos previamente definidos: reducir el volumen de vertidos al medio, gestionar la lluvia en origen mediante SUDS y potenciar los beneficios añadidos para promover la sostenibilidad de la ciudad. (Ambiente, 2011). (Figura 4.7).



Figura 4. 7. Ejemplo de infraestructura verde de New Jersey, EEUU. (Kandyce Perry).

El municipio de Benaguasil (Valencia), con 11.000 habitantes, es todo un ejemplo por hacer frente a la impermeabilización del suelo con estrategias SUDS.

Entre 2010 y 2015, se construyeron y monitorizaron cinco SUDS: jardines de lluvia en el polígono industrial “Les Eres” y en el parque Costa Ermita; un aljibe en el centro juvenil; y una cubierta vegetada y un aljibe en el centro social. Su monitorización ha permitido verificar que los SUDS tienen beneficios tanto en calidad como en cantidad, reduciendo así los problemas en el núcleo urbano en tiempos de lluvia. Esta enriquecedora experiencia fue galardonada con el Premio Ciudad Sostenible 2015 (Ballester olmos y Anguís et al., 2015 y 2016). (Figura 4.8).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 8. SUDS en Benaguasli (Valencia). (GreenBlueManagement).

4.3.1 Situación en Colombia

Comprendiendo la relación que debe existir entre el desarrollo urbano y la naturaleza, Colombia tiene como objetivo ser un país verde, ecologista. Durante los últimos años las administraciones distritales han estado apostando por la transformación urbana a través de proyectos de infraestructura azul y verde, en búsqueda de nuevas oportunidades de desarrollo económico, social y urbano.

Es por esto que se mencionarán tres casos que se están desarrollando actualmente en el país, tales como: la ronda del río Sinú, el Ecoparque de Mallorquín y la recuperación del tren de Puerto Mocho.

La ronda del río Sinú a su paso por la ciudad de Montería, Córdoba, Colombia (Figura 4.9) ha tenido un importante papel y significado para la ciudad, desde los siglos XVII y XVIII ha sido terreno fértil y propicio para el cultivo ante la potencialidad de conectar los mercados de Cartagena y Portobello, (Vidal Ortega, 2008). Esta importancia, convirtió el espacio de la ladera del río (posteriormente avenida) en un importante puerto estratégico para el comercio de alimentos y otros productos de subsistencia (Garcés Prettel y Jaramillo Echeverri, 2017).

Actualmente cuentan con la Fase I (Figura 4.9) y II ya en uso, y en construcción la Fase III en las cuales se puede contemplar el diseño paisajista, protegiendo la naturaleza como lo marca su ley. Donde se declara que al momento de talar un árbol la relación deberá ser de 1 a 10.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 9. Ronda del Río Sinú.

Barranquilla es agua y presenta un gran potencial de crecimiento habiéndose, en primera instancia, conectado con el río Magdalena desde el Gran Malecón, diseñado por Puerta de Oro, y ahora reconectándose con la ciénaga y el mar Caribe a través de la ciénaga de Mallorquín.

El ecoparque de la Ciénaga de Mallorquín se presenta como una de las obras más emblemáticas de la ciudad debido a su desarrollo técnico e ingeniería, funcionando de referente para las obras de infraestructura. Además, reúne una inversión que se expande más allá de su construcción alcanzando la recuperación de la playa de Puerto Mocho y la zona del tren turístico, y buscando garantizar el saneamiento del cuerpo de agua y sus vertimientos.

En noviembre de 2022 se tuvo la oportunidad de visitar el proceso constructivo del ecoparque, donde se pudo observar el desarrollo de la etapa 1 y 2. (Figura 4.10).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 10. Proceso constructivo del Ecoparque etapa 1.

Por otro lado, se cuenta también se pretende iniciar con el proceso de recuperación del tren turístico que llevará desde el barrio Las Flores hasta Puerto Mocho y la apertura de la licitación para hacer la recuperación de la playa de Puerto Mocho, en Barranquilla, Colombia.

La playa de puerto Mocho, ubicada entre el río, el mar y la ciénaga, está rodeada de manglares de gran importancia paisajística para la ciudad y para la región, por lo cual se proyecta aprovechar su potencial turístico, cultural y ecológico mediante una intervención urbana y restauración ambiental.

El trayecto del tren será de 2.5 kilómetros hasta llegar al puerto desde la calle 106 en la colonia las Flores, donde se contará con dos estaciones para la llegada y la salida del tren. (Figura 4.11).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 11. Condiciones actuales de la vía del tren.

4.4 Antecedentes nacionales

En México van pocos años en los que se han estado incorporando estos Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible.

En el estado de Jalisco en el año 2016 se empezó a invertir en los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, en construcción de colectores mixtos, vasos y depósitos de regulación, en la recuperación de cauces y arroyos mediante su ampliación, protección y mejoramiento de diseño urbanístico. (Figura 4.12).



Figura 4. 12. Recuperación de cauce en Jalisco, México.

En la ciudad de México el abastecimiento de agua reproduce un esquema de desigualdad en la población.

Es por eso, que durante el año del 2019 comenzó la operación del Programa Social Sistemas de Captación de Aguas de Lluvia (Programa SCALL), cuyo objetivo fue mejorar las condiciones de acceso del agua de la población en viviendas de pocos recursos, de la mano de la reutilización del agua de lluvias. (Ambiente S. d., 2019). (Figura 4.13).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 13. Elementos para la instalación de un SCALL en CDMX.

En Morelia Michoacan, una de las iniciativas del H. Ayuntamiento es el saneamiento del Río chiquito, eliminando la descarga de aguas residuales en la zona mediante un Colector Sanitario que se implementará con el sistema convencional ya existente. (Figura 4.14).



Figura 4. 14. Cauce del Río Chiquito, vista hacia aguas abajo. (SOCIAL,C., 2016).

En el estado de San Luis Potosí se diseño y construyo una azotea verde en el Edificio B de la Facultad de Ingeniería. El proyecto incluye: área para el unihuerto urbano, área de trabajo con bodega y herramientas para plomería, carpintería, etc; área cultural con equipo multimedia y una infraestructura académica para las clases. (Algara, 2015). (Figura 4.15).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 15. Uni techo en la Facultad de Ingeniería. (Facultad de Ingeniería, 2018).

En la ciudad de San Luis Potosí se está buscando la manera de que el gobierno ya exija por lo menos la implementación de un sistema a la hora de realizar cualquier tipo de construcción, para poder llegar a ser una ciudad esponja.

Ya que una ciudad esponja es aquella que aprovecha la infraestructura urbana verde, desde la revegetación de superficies impermeables hasta los techos verdes y humedales construidos, para dar resultados positivos en términos de disponibilidad de agua, calidad y reducción de inundaciones.

4.5 Funcionamiento de los SUDS

Los SUDS generalmente actúan en el origen de las escorrentías, es decir, en los puntos donde se produce el contacto de la lluvia con la superficie ya sea azoteas, calzadas, aceras, jardines, etc.

Estas técnicas se basan en tres objetivos fundamentales, tales como:

- Reducir los volúmenes totales
- Mejorar la calidad de las aguas
- Reducir los caudales pico vertidos

Como ya se mencionó antes, los SUDS son un conjunto de técnicas que reproducen los procesos hidrológicos naturales, y que complementan al drenaje tradicional para la gestión de

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

las escorrentías. Es por eso que existen varias formas de clasificar los SUDS, dependiendo de su función principal.

Para poderlos clasificar según su funcionamiento se debe conocer sus posibles funciones hidrológicas que pueden realizar.

Filtración: Se denomina filtración al proceso de separación de partículas sólidas de un líquido utilizando un material poroso llamado filtro. La técnica consiste en verter la mezcla sólido-líquido que se quiere tratar sobre un filtro que permita el paso del líquido pero que retenga las partículas sólidas. (*Carbotecnia, 2023*).

Detención: Se refiere a detener temporalmente el agua hasta que se cumplan las condiciones para drenarlas, el objetivo es controlar el volumen para poder reducir el impacto en los sistemas que reciben estas aguas posteriormente. (*Lang, 2023*).

Tratamiento: La principal función del tratamiento de agua es favorecer procesos físicos y biológicos, para potabilizar o limpiar el agua para la población, ya sea para un uso industrial o su consumo humano. (*Carbotecnia, 2023*).

Retención: Consiste en evitar drenar el agua en los campos por medio de los canales, retener el agua hasta que desaparezca por medio de filtración, evaporación o evapotranspiración. (*Lang, 2023*).

Infiltración: Es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo. La tasa de infiltración, en la ciencia del suelo, es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber la precipitación o la irrigación. (*Úbeda, 2018*).

4.5 Tipos de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible aplicables al estudio

A continuación, se presentan algunos de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible que pueden adaptarse al estudio en cuestión.

4.5.1 Sistemas de Techos Verdes o Cubiertas Vegetadas

Un techo verde, azotea verde o cubierta vegetada es el techo de un edificio que está parcial o totalmente cubierto de vegetación, ya sea en suelo o en un medio de cultivo apropiado. (*Mayén, 2020*). (Figura 4.16).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 16. Ejemplo de un techo verde. (Pau Seguí).

Los techos verdes deberán mitigar el pico de crecientes asociados con eventos de precipitación con periodos de retorno de 2 años.

. La vegetación a utilizar deberá estar en condiciones de soportar periodos alternados de humedecimiento y secado al igual que con periodos de calor y frío. La vegetación deberá ser perene, resistente a la sequía, con poco requerimiento de agua después de que ya se encuentra establecida, con preferencia por suelos bien drenados, autosustentable (es decir, que no requiera de fertilizantes o herbicidas), capaces de resistir calor, frío y vientos extremos, con capacidad para sobrevivir en suelos pobres con tendencia a la acidez y resistente al fuego. La variedad de plantas a utilizar deberá ser lo más amplia posible para favorecer la biodiversidad y la estética del techo terminado. (*Ambiente, 2011*).

Igualmente deberá proveerse de drenaje adecuado y suficiente en los techos verdes vegetados buscando evitar la generación de empozamientos. Por otra parte, deberá tenerse presente que la vegetación instalada en pendientes mayores al 2% deberá anclarse debidamente con el fin de evitar su arrastre hacia las canales de drenaje ante eventos de precipitación extremos. No sobra decir que las cargas muertas superimpuestas por los diferentes elementos que conforman las cubiertas verdes deben ser consideradas durante el diseño estructural del edificio que los contendrán. (*Ambiente, 2011*).

Con respecto a la impermeabilización de las cubiertas, debe asegurarse que los materiales utilizados para tal fin sean resistentes a la penetración de raíces. Especial cuidado deberá tenerse al proveer drenaje al techo verde, por cuanto las tuberías de drenaje de los techos deberán construirse separadas del medio de soporte de la vegetación. De establecerse equipos mecánicos en las vecindades de las cubiertas vegetalizadas, estos equipos deberán

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

estar aislados de la zona vegetalizada y deberán contar con drenaje separado con el fin de mitigar posibles escapes de combustibles o lubricantes. (Ambiente, 2011).

4.5.2 Drenes filtrantes

Los drenes filtrantes son SUDS conformados por excavaciones poco profundas de entre 1 y 2 metros, cubiertas con telas de geo-textil y rellenas con materiales pétreos gruesos como la grava, que crean almacenamiento temporal subsuperficial para posteriormente dirigirlos con un drenaje común. (Figura 4.17).

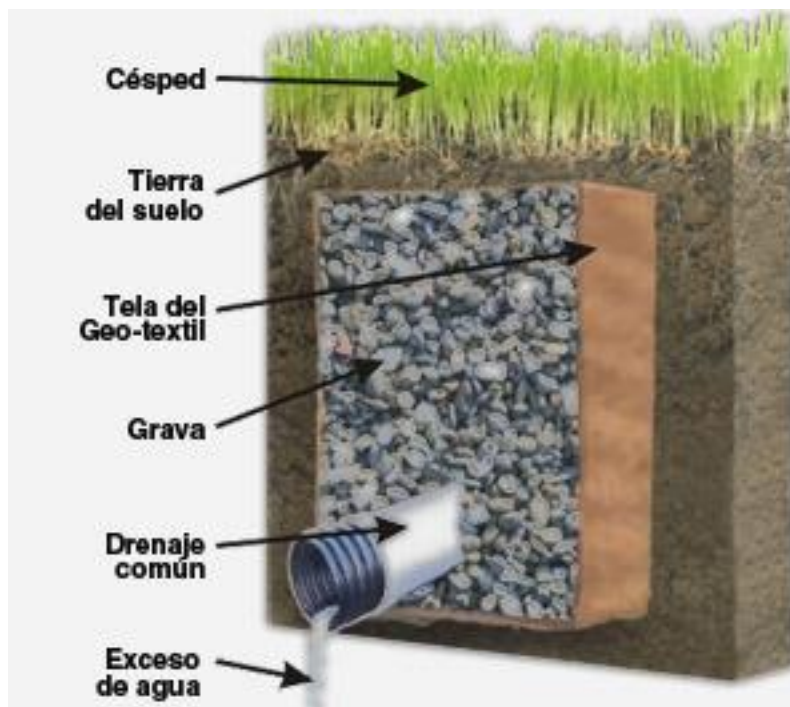


Figura 4. 17. Ejemplo de un dren filtrante. (SuD Sostenible, 2017).

Estos sistemas poseen la desventaja de que pueden llegar a colmatarse con facilidad, por lo que deberán diseñarse cuidadosamente sus capas granulares interiores con el fin de maximizar su tiempo de vida útil. Estos elementos pueden captar lateralmente la escorrentía proveniente de vías, o de un colector que previamente haya recolectado aguas pluviales no circuladas con anterioridad a través de otro sistema SUDS. Estos sistemas deberán tener superficies cóncavas que permitan la concentración de la escorrentía hacia el centro del elemento. (Ambiente, 2011).

Los drenes filtrantes serán vegetados o no, en cuyo caso debe disponerse de un geotextil filtrante en las capas superiores del material de relleno que separe la franja de suelo que soporta la vegetación del resto del material granular, mientras que simultáneamente se garantice la percolación adecuada del agua en superficie.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Deberá tenerse en cuenta que, dadas las condiciones de suelos, estos sistemas incorporarán tuberías de drenaje subsuperficial que garanticen el drenaje completo de estos sistemas hacia el sistema de alcantarillado. *(Ambiente, 2011)*.

Los drenes filtrantes son elementos que requieren de mantenimiento y que de colmatarse implican el retiro y recolocación del material de relleno, por lo que su uso debe limitarse a aquellas zonas en donde no se esperen grandes flujos de sedimentos o en donde se provean sistemas de remoción de sólidos antes de que el agua sea descargada al interior del dren. *(Ambiente, 2011)*.

Estos sistemas podrán diseñarse como sistemas de filtro utilizando para su conformación materiales granulares que permitan evacuar la totalidad de agua almacenada dentro del sistema en un lapso de tiempo no mayor a 24 horas. Sobre los drenes filtrantes podrá existir un almacenamiento temporal del agua lluvia mientras el agua es filtrada, garantizando en todo caso a través del diseño del sistema que la evacuación completa del sistema no se haga en un lapso no mayor al antes establecido, ni que se generen láminas que generen encharcamientos en vías o el urbanismo circundante. *(Ambiente, 2011)*.

4.5.3 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables proporcionan un medio propicio para el tráfico peatonal o vehicular permitiendo simultáneamente la percolación de las aguas lluvias a las capas inferiores de la estructura de pavimento.

El objetivo de este SUDS consiste en filtrar el agua lluvia temporalmente disminuyendo así la cantidad de escorrentía que de otra manera quedaría en superficie. *(Ambiente, 2011)*.

Allí en donde se plantee su uso, la estructura de cimentación o de soporte deberá disponer de subdrenajes que conduzcan el agua percolada a través del sistema granular hacia las redes locales de alcantarillado pluvial. *(Ambiente, 2011)*.

La estructura de soporte además puede estar envuelta en una membrana flexible impermeable que impida la saturación del suelo circundante. De preferencia, estas superficies deberán estar conformadas por superficies de grava, por concreto o asfalto poroso, o por pavimentos articulados con gran separación entre unidades individuales con el fin de facilitar el paso del agua hacia las capas inferiores. (Figura 4.18). *(Ambiente, 2011)*.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

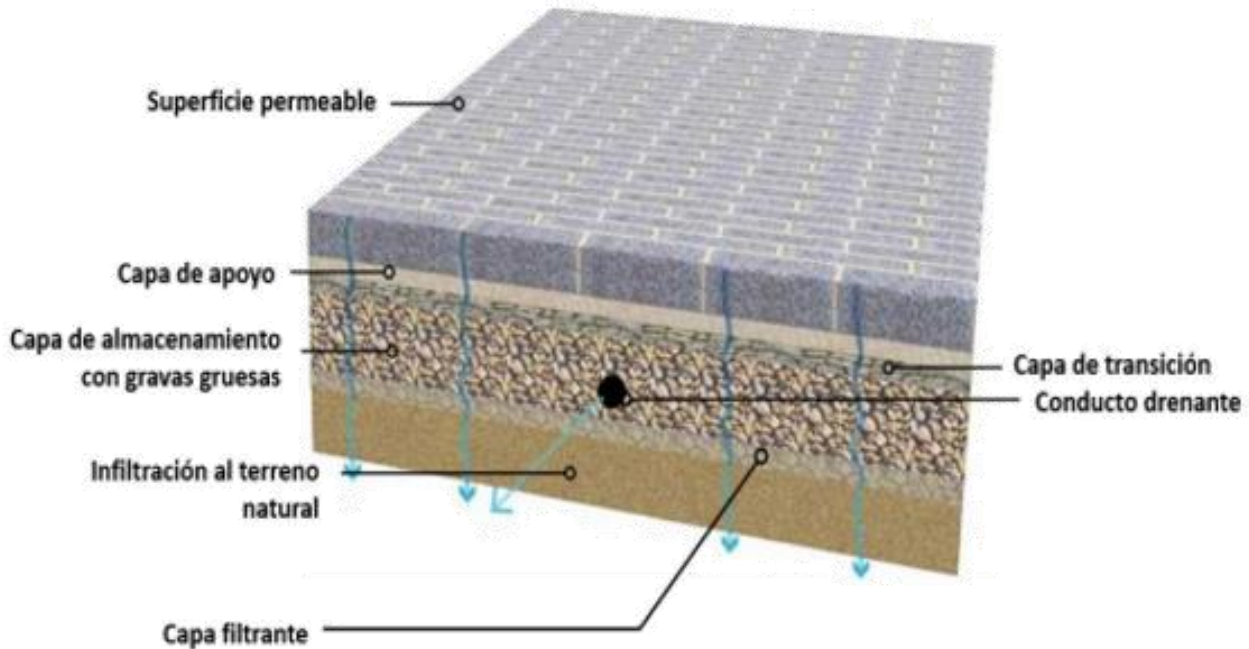


Figura 4. 18. Ejemplo de las capas de un pavimento permeable.

4.5.4 Parques lineales o inundables

Los parques lineales nacen por la necesidad de establecer espacios de respiro en las ciudades. Para ello se delimitan áreas verdes bajas, es decir en las que no hay árboles grandes. Éstas se extienden a lo largo de un camellón, en él se pueden colocar diversos elementos que sirvan de esparcimiento o descanso para los que transitan por él. Para esto se usan bancas, juegos recreativos, ciclistas, aparatos para hacer ejercicio, pistas para correr o patinar, puestos y comercios, bebederos, fuentes, etc. (Alegres, 2022). (Figura 4.19).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 19. Áreas recreativas de un parque lineal.

Así mismo, comprenden infraestructura de seguridad y sanidad como botes de basura, baños públicos y una iluminación adecuada que permita visitar el parque incluso de noche. (Alegres, 2022).

En los parques lineales encontramos que predominan áreas con vegetación ornamental de diferentes tamaños y árboles que den sombra; también encontramos mobiliario urbano como bancas, bebederos y aparatos para hacer ejercicio. (Alegres, 2022).

Uno de los principales objetivos de un parque lineal es conectar zonas de una ciudad con determinada relevancia cultural, de esparcimiento, de servicios, económica, histórica y/o territorial. Para lo anterior, se reinventa el concepto de vía, calle o avenida, quitándole “lo gris” y fomentando el uso de transportes alternativos al automóvil. (Alegres, 2022).

Una de sus características principales es que un parque lineal, como su nombre lo indica ocupa un espacio geográfico lineal, esto le da una ventaja debido a que se pueden diseñar de forma paralela a un río, un zanjón, vías principales y secundarias, montañas entre otros. (Alegres, 2022). (Figura 4.20).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 20. Ejemplo de parque lineal.

4.5.5 Estanque de detención

Son depósitos que almacenan temporalmente la escorrentía generada aguas arriba, laminando los caudales punta y atenuando los picos de caudal. Esto reduce considerablemente el riesgo de inundación. Como no almacenan agua de forma permanente, también se les llama depósitos secos. (Figura 4.21). (Sostenible, 2023).



Figura 4. 21. Ejemplo de un estanque de detención. (Ana Abellán, 2022).

Favorecen la sedimentación de contaminantes eliminándolos así de la masa de agua. Pueden ser compaginados con otros usos, como los recreacionales, en parques e instalaciones

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

deportivas o localizarse en “zonas muertas”, zonas que no tienen ningún uso en la actualidad ni proyectado. (Sostenible, 2023).

Para un correcto funcionamiento el área drenante ha de estar comprendida entre 4 y 30 hectáreas; la pendiente longitudinal, ha de ser inferior al 15%, las diferencias de cotas entrada-salida del agua ha de ser de metro y medio y hay que impermeabilizar previamente el suelo. (Sostenible, 2023).

4.6 Análisis de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Para obtener un análisis óptimo y acertado se presentan a continuación matrices de multicriterio para cada uno de los SUDS mencionados anteriormente.

Donde se observa su descripción general resumida, la relación que tiene el sistema con la naturaleza, sus parámetros técnicos y de diseño, las condiciones para su implementación y los beneficios y limitaciones.

Si bien, para utilizar este tipo de matrices se deben de proponer los parámetros con los que se medirán los diferentes sistemas. Para este caso en particular, se tomarán como base los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, es decir, se calificarán de acuerdo con el tipo y uso de suelo, la topografía, la geología, el balance hidrológico, entre otros. Siendo el 1 el valor más bajo y el 3 el más alto en la actuación.

TECHO VERDE										
Información base										
Tipo	1	2	3	Tipo de acción: 1= protección/ conservación; 2= restauración y manejo ; 3= remodelación y creación						
Desafíos abordados	1	2	3	Escas ez de n agua	Contaminaci ón de agua	Estré s por calor	Crecimien to rápido	Problem as de salud	Pérdid a de hábitat	Pérdida de biodiversidad
	X				X	X	X	X	X	X
Descripción general										
Los techos verdes a menudo se asocian con edificios residenciales, hoteles o estacionamientos subterráneos. Los sistemas de ajardinamiento más complejos y pesados se caracterizan por un mayor esfuerzo de instalación, mantenimiento y manejo (riego regular y fertilización) lo que conduce a costos más altos para el tipo de sistema mencionado en comparación con los techos verdes extensivos. La vegetación verde intensiva a menudo se establece en techos que son accesibles para fines públicos o recreativos y también para medidas regulares de mantenimiento. El tipo de techo verde intensivo es frecuentado regularmente por humanos: diferentes actividades que incluyen jardinería, relajación y socialización están designadas para techos verdes intensivos. Para permitir las actividades humanas en los techos verdes y la integración de plantas, árboles y elementos arquitectónicos más grandes, los techos adecuados deben ser relativamente planos. Las plantas apropiadas para techos verdes intensivos son principalmente árboles, arbustos y plantas perennes.										
Relación con la naturaleza										

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

<p>El modelo para un techo verde es suelo natural con su cubierta vegetal. A través del establecimiento de techos verdes (intensivos) en los edificios, se replican diferentes servicios de las capas de vegetación natural. Como resultado, el potencial para mitigar el efecto isla de calor urbano es mayor en comparación con las superficies selladas sin vegetación (techo negro). Los techos verdes intensivos pueden proporcionar una variedad de servicios ecosistémicos y beneficios para el medio ambiente circundante y el microclima. Para habilitar estos servicios, se debe replicar una cubierta de suelo natural cultivada. La capa de vegetación absorbe la radiación solar para la fotosíntesis. Grandes árboles y plantas cubren la superficie de los edificios y, por lo tanto, brindan sombra para el descanso del usuario. Las plantas y los árboles también protegen de la transmisión de calor al interior del edificio.</p>	
<p>Parámetros técnicos y de diseño</p>	
<p>Existen diferentes sistemas de enverdecimiento para techos verdes intensivos, y por lo tanto no hay una construcción uniforme. Existe el relleno de sustrato que es una mezcla de sustrato que varía en altura en la capa de drenaje y las macetas que se componen de un sustrato en la capa de drenaje en la planta. Además de los sistemas mencionados existen otras construcciones especiales para cubiertas verdes intensivas, tales como: plantas: gran variedad (árboles, arbustos y plantas perennes) teniendo un requerimiento de agua necesario.</p>	
<p>Condiciones para implementación</p>	
<p>Edificios de hormigón sólidos y estables/capacidad de carga, tejados de hormigón planos o relativamente planos y estructuras subterráneas de hormigón, riego artificial, pero al menos (agua de lluvia) instalación de riego en períodos críticos/secos y en algunos casos se necesitan placas especiales que distribuyan la presión en el techo (para jardineras).</p>	
<p>Beneficios y limitaciones</p>	
<p>Beneficios: salud humana y calidad de vida, gestión y calidad de las aguas pluviales/ pluviales, mejora la calidad del aire (reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero) - valor estético/atractivo visual, producción de alimentos, espacio adicional (techo intensivo), rendimiento térmico/reducción de la temperatura, reducción de energía para edificios (calefacción/refrigeración), reducción de ruido/transmisión de sonido, provisión de hábitat para la vida silvestre urbana.</p> <p>Limitaciones potenciales: desarrollo limitado de hábitats no perturbados debido a actividades humanas/fines públicos, dispersión limitada de flora y fauna debido al mantenimiento y manejo regulares, espacio limitado para el enraizamiento (aunque el medio de crecimiento es relativamente grueso).</p>	
<p>Actuación</p>	
Conducción de agua	3
Infiltración de agua	2
Retención de agua	2
Almacenamiento de agua	3
Reutilización de agua	3
Filtración de agua	2
Provisión de hábitat	2
Conectividad	2
Aparencia	2
Funcionalidad	1
Interacción social	1

DRENES FILTRANTES										
Información base										
Tipo	1	2	3	Tipo de acción: 1= protección/ conservación; 2= restauración y manejo ; 3= remodelación y creación						
Desafíos abordados	Inundación	Escasez de agua	Contaminación de agua	Estrés por calor	Crecimiento rápido	Problemas de salud	Pérdida de hábitat	Pérdida de biodiversidad		
	X		X	X			X	X		
Descripción general										
<p>Son zanjas poco profundas recubiertas de geotextil y rellenas de material filtrante, en el que suele haber un conducto inferior de transporte.</p>										

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Relación con la naturaleza	
Los drenes filtrantes son capaces de captar lateralmente la escorrentía proveniente de vías o de algún colector que ya haya recolectado aguas pluviales, estos suelen ser cubiertos de vegetación por su superficie y de esta manera reestablecer un poco del ecosistema.	
Parámetros técnicos y de diseño	
Estos son excavaciones poco profundas de entre 1 y 2 metros, generalmente se componen de una capa geotextil, seguida de un material de relleno (según se especifique) y la tubería que llevara el agua recolectada.	
Condiciones para implementación	
Para tener un impacto máximo en el clima urbano, la distribución espacial equitativa es importante. Estos SUDS requieren de mantenimiento continuo. A demás, depende del suelo con el que se cuenta para poder implementarlos.	
Beneficios y limitaciones	
Potenciales: Permiten transportar aguas de lluvia y aguas tratadas. Posibles limitaciones: Se pueden colmatar con facilidad, dadas sus capas granulares que los componen.	
Actuación	
Conducción de agua	3
Infiltración de agua	1
Retención de agua	2
Almacenamiento de agua	2
Reutilización de agua	2
Filtración de agua	2
Provisión de habitat	1
Conectividad	1
Aparencia	1
Funcionalidad	2
Interacción social	1

PAVIMENTO PERMEABLE										
Información base										
Tipo	1	2	3	Tipo de acción: 1= protección/ conservación; 2= restauración y manejo ; 3= remodelación y creación						
Desafíos abordados	Inundación	Escasez de agua	Contaminación de agua	Estrés por calor	Crecimiento rápido	Problemas de salud	Pérdida de hábitat	Pérdida de biodiversidad		
	X	X	X							
Descripción general										
Los pavimentos permeables son un tipo especial de pavimento, que gracias a su diseño permite la infiltración del agua por medio de su estructura y permite el almacenamiento temporal de la misma en la subbase, para su posterior disposición o infiltración en el terreno.										
Relación con la naturaleza										
El adecuado manejo del agua de lluvia, siendo una cualidad reconocida positivamente por organismos internacionales. Reduciendo los impactos de las corrientes superficiales y la impermeabilidad del suelo.										
Parámetros técnicos y de diseño										

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Se deben realizar estudios topográficos, geotécnicos, hidrológicos, de tráfico y un diseño geométrico y de pavimento. Generando un pavimento que cumpla con su resistencia y no pueda provocar algún accidente posteriormente, pero sin dejar de lado el porcentaje de permeabilidad del mismo. Así como la armonía de los materiales utilizados con el ambiente.	
Condiciones para implementación	
La estructura deberá disponer de subdrenajes que conduzcan el agua percolada a través del sistema granular hacia las redes locales de alcantarillado pluvial, en la mayoría de los casos que ya estén existentes.	
Beneficios y limitaciones	
Beneficios: Regula los caudales pico vertidos en avenidas. Limitaciones: Alto costo de mantenimiento, limitaciones al diseñar y existen componentes no tan agradables con el medio ambiente.	
Actuación	
Conducción de agua	3
Infiltración de agua	1
Retención de agua	2
Almacenamiento de agua	1
Reutilización de agua	1
Filtración de agua	3
Provisión de habitat	1
Conectividad	2
Aparencia	3
Funcionalidad	2
Interacción social	2

PARQUES LINEALES									
Información base									
Tipo	1	2	3	Tipo de acción: 1= protección/ conservación; 2= restauración y manejo ; 3= remodelación y creación					
Desafíos abordados	Inundación	Escasez de agua	Contaminación de agua	Estrés por calor	Crecimiento rápido	Problemas de salud	Pérdida de hábitat	Pérdida de biodiversidad	
			X	X		X	X	X	
Descripción general									
Áreas de infraestructura abandonada, que se transforman en parques lineales, juegan un papel importante en las redes de infraestructura verde urbana y ayudan a renaturalizar las ciudades. Además, la regeneración a lo largo de cursos de agua y ríos a menudo da como resultado parques interconectados lineales.									
Relación con la naturaleza									
Las áreas de transición entre biomas se denominan ecotonos, los corredores verdes con sus elementos naturales lineales pueden verse como ecotonos que conectan áreas vecinas y áreas distantes. Los ecotonos suelen ser ricos en biodiversidad porque están conectados a dos (o más) biotopos diferentes.									
Parámetros técnicos y de diseño									
Cuando los corredores verdes se basan en infraestructura abandonada, la ubicación y las propiedades de la red son más o menos fijas. Para nuevos desarrollos, se pueden diseñar corredores verdes como elementos de conexión.									
Condiciones para implementación									
La infraestructura de tráfico abandonada puede ser la forma más conveniente de establecer parques lineales y corredores verdes. La falta de cuidado y el abandono sostenido del área conducen a un desarrollo automático de las características naturales del espacio. Para nuevos desarrollos urbanos también se pueden diseñar y construir elementos lineales.									

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Beneficios y limitaciones	
Beneficios: Los elementos lineales son muy importantes para la conectividad, la reutilización de la antigua infraestructura gris abre un gran potencial para crear un sistema interconectado. Posibles limitaciones: dependiendo del uso anterior, el parque lineal o corredores verdes, pueden necesitar un alto nivel de mantenimiento.	
Actuación	
Conducción de agua	3
Infiltración de agua	2
Retención de agua	3
Almacenamiento de agua	3
Reutilización de agua	3
Filtración de agua	2
Provisión de habitat	3
Conectividad	3
Aparencia	3
Funcionalidad	3
Interacción social	3

ESTANQUE DE DETENCION								
Información base								
Tipo	1	2	3	Tipo de acción: 1= protección/ conservación; 2= restauración y manejo ; 3= remodelación y creación				
Desafíos abordados	Inundación	Escasez de agua	Contaminación de agua	Estrés por calor	Crecimiento rápido	Problemas de salud	Pérdida de hábitat	Pérdida de biodiversidad
					X			
Descripción general								
<p>Los estanques de detención secos son cuencas de almacenamiento superficiales que retienen las aguas pluviales. Durante los periodos de fuertes lluvias, el área se inunda y podría llevar al llenado del estanque de detención en casos de lluvias de mayor duración. Después de que termina la lluvia, el agua fluye en el sistema de alcantarillado. Si no hay lluvias intensas, los estanques de detención están secos y podrían usarse como área verde.</p>								
Relación con la naturaleza								
Un paisaje natural contiene una superficie heterogénea con áreas ligeramente elevadas y partes bajas muy próximas, formando un mosaico de microcondiciones. El agua permanece en las partes bajas durante algún tiempo hasta que se infiltra o se evapora.								
Parámetros técnicos y de diseño								
Los estanques de detención pueden formar parte de espacios públicos (parque infantil, campo de deportes, ...), tienen que estar en la parte más baja del parque, espacio verde.								
Condiciones para implementación								
Podría considerarse en la planificación del parque (el área se puede usar de otra manera), espacio suficiente para inundarse.								
Beneficios y limitaciones								

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Beneficios: Regula las lluvias intensas, es posible el uso multifuncional del estanque de detención Limitaciones: opciones de diseño limitadas, espacios verdes con demasiadas funciones	
Actuación	
Conducción de agua	2
Infiltración de agua	3
Retención de agua	3
Almacenamiento de agua	2
Reutilización de agua	2
Filtración de agua	2
Provisión de habitat	1
Conectividad	2
Aparencia	1
Funcionalidad	2
Interacción social	2

4.6.1 Elección del SUDS para la zona de estudio

En el presente trabajo el Sistema Urbano de Drenaje Sostenible que más se adapta a las condiciones del proyecto y resulta favorable con el desarrollo de San Luis Potosí, es el del parque lineal dados los resultados obtenidos por las matrices anteriores.

El parque inundable podrá reducir los excesos de los caudales pico vertidos en temporada de lluvias, en el paseo del parque urbano de la Presa de San José.

Esta escorrentía desemboca en el boulevard Río Santiago y este provoca una obstrucción de la vialidad por varios días, colapsando de esta manera toda la ciudad.

Siendo no solo un proyecto que beneficie a la preservación del recurso sino también una innovación en la ciudad con la aplicación de este sistema, un mejoramiento urbanístico dentro del parque urbano y proveer actividades recreativas en el mismo, para todos los habitantes de la capital potosina.

Cabe mencionar que este tipo de parques pueden ser utilizados durante los días sin lluvia, es decir que a diferencia de otros SUDS este resulta ser utilizado en cualquier temporada del año, ya que tienen la misma funcionalidad que cualquier otro parque.

4.7 Diseño del Parque lineal

Se pretende desarrollar un parque con estrategias de intervención que va ligado no solo con lo hidrológico sino también con lo urbano, paisajístico y arquitectónico generando una solución sustentable. Todo esto con el objetivo de dar el primer paso para convertir a San Luis Potosí en una ciudad esponja.

El proyecto será por medio de la mutabilidad del paisaje, el cual está ligado con el aumento del agua en el terreno y como este va logrando manipular la naturaleza para poder recrear el

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

equilibrio entre la urbanización y la naturaleza, que logre preservar las condiciones naturales y de protección dado que este fue declarado área natural protegida.

Con esto obtenemos la primera limitación que se tiene, no se puede modificar completamente el parque urbano, por lo tanto, el proyecto se dividirá en dos módulos o etapas.

Donde la arquitectura logra fusionarse con la naturaleza y un espacio público propuesto. Por lo tanto, el proyecto constara de los siguientes diseños como: el de topografía, el arquitectónico, el pluvial y las visualizaciones en 3D por medio de renders.

4.7.1 Topografía

El levantamiento topográfico realizado en el capítulo 3 sirvió para obtener las curvas de nivel de las dos etapas que podrán ser modificadas.

Estas sirven para conocer de qué manera es que se comporta el terreno y realizar un mejor diseño arquitectónico conociendo las amenidades de la zona de estudio, por otro lado, se utilizan para analizar el escurrimiento del agua ya que este como se observó anteriormente viene del punto más alto, al más bajo.

Se muestran a continuación los planos, uno para cada etapa. (Figura 4.22 y 4.23).

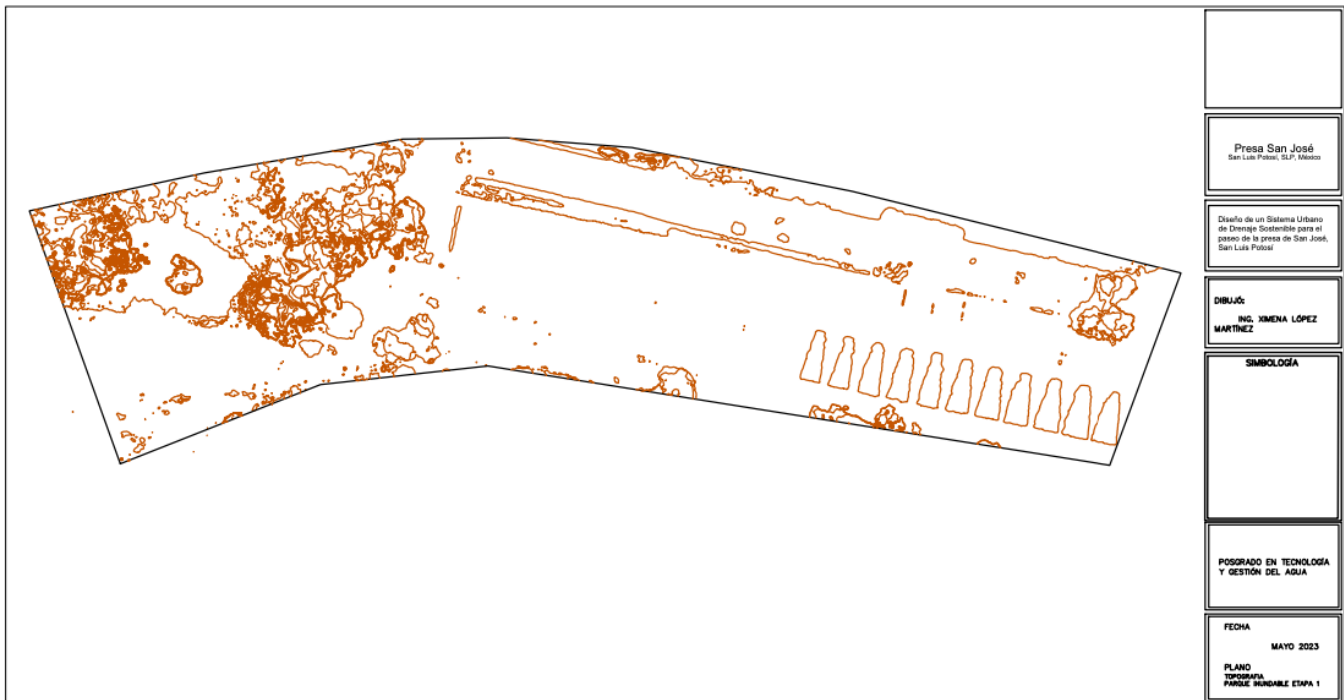


Figura 4. 22. Plano Topográfico de la Etapa 1.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

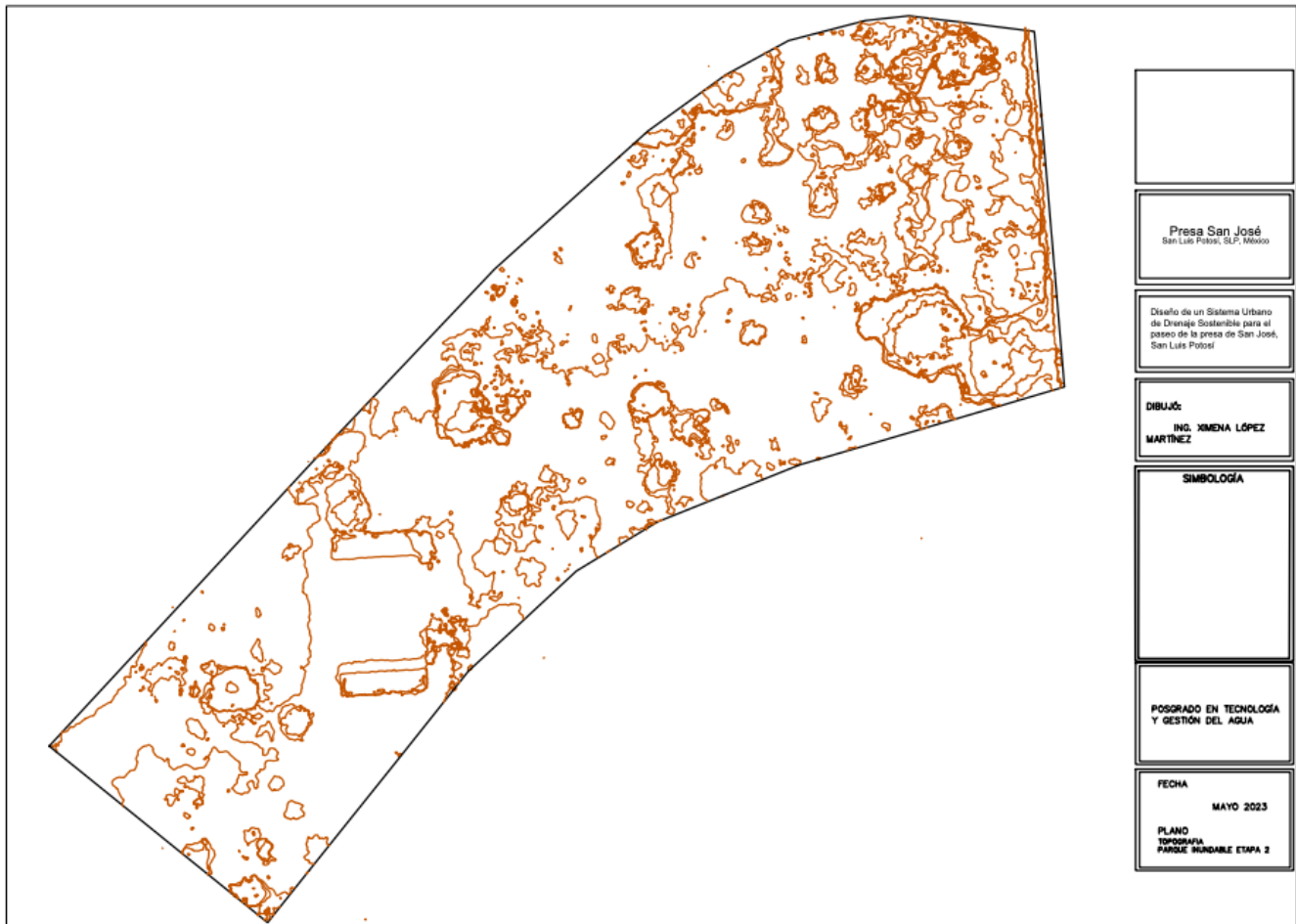


Figura 4. 23. Plano Topográfico de la Etapa 2.

4.7.2 Diseño arquitectónico

El diseño arquitectónico es un proceso lógico y científico capaz de reflejar e interpretar las necesidades humanas para la creación de áreas dedicadas a la realización de actividades específicas (*Pura, s. fc*).

Debe ser apropiado, además buscar eficacia, productividad y permitir la accesibilidad (*Arquigrafico, s.fc*). No se limita al aspecto tecnológico, también incluye el lado estético que tanta influencia tiene en la vida diaria de las personas (*Diseño, s.fc*).

La primera etapa constará de un área de juegos infantiles, un área para ejercicio, dos áreas verdes para la convivencia, baños para hombres y para mujeres, área de comida y un área de estacionamiento. (Figura 2.24)

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

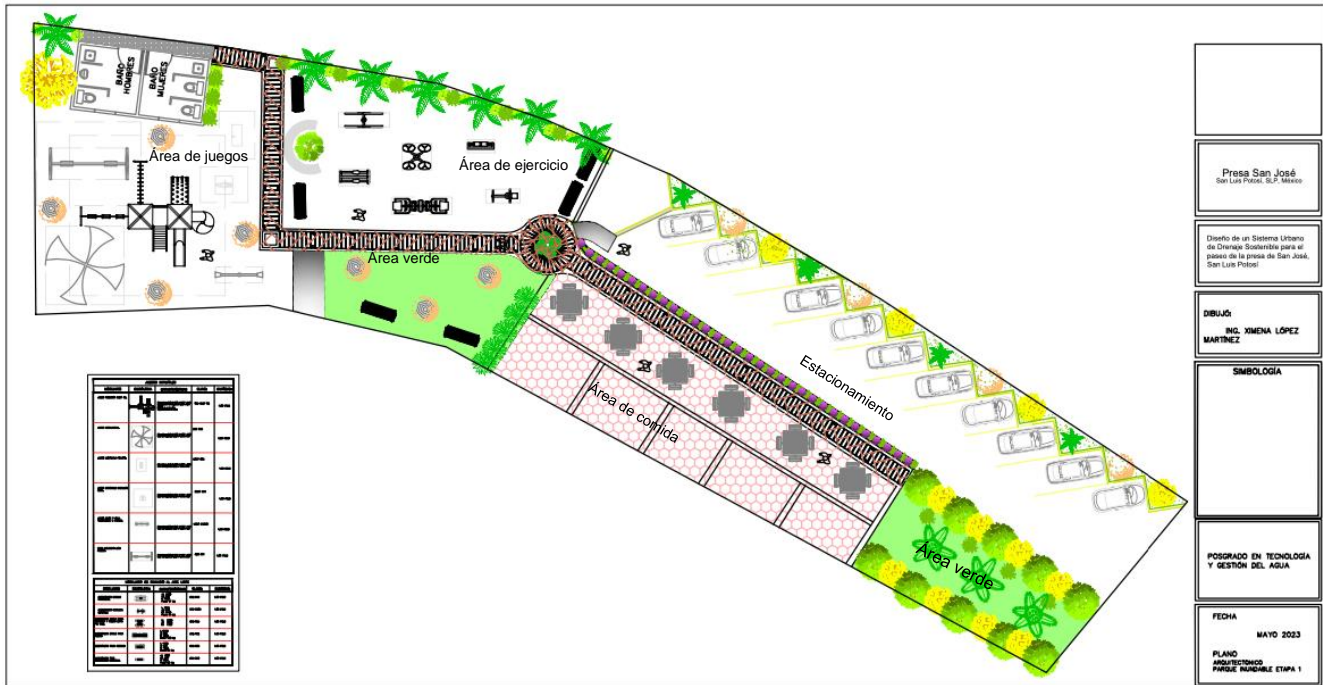


Figura 4. 24. Plano de diseño arquitectónico de la Etapa 1.

Para la segunda etapa se contempla un área de comida, un área de juegos infantiles, una cancha deportiva de concreto para diferentes actividades recreativas, un área de ejercicio, área de comercios y áreas verdes para la convivencia. (Figura 2.25).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 25. Plano de diseño arquitectónico de la Etapa 2.

4.7.3 Diseño pluvial

Una vez que se tiene el diseño arquitectónico y que sabemos cuál es el comportamiento del terreno se puede iniciar con el diseño pluvial dado que aprovecharemos las pendientes que por naturaleza ya se tienen, entre otros aspectos.

Para la Etapa 1 se tienen diferentes sistemas en las áreas de juegos, ejercicio y verdes ya que se tendrán unos alcantarillados que disminuirán el caudal pico vertido en las temporadas altas de lluvia, simulando unos drenes filtrantes los cuales al final el agua que no se haya infiltrado en las áreas se regresara a su cauce principal.

Por otro lado, se contarán con bajadas pluviales, en los techos ya que se captará el agua de lluvia que en estos pueda caer y se almacenará en dos cisternas, la primera será de 2x2x1 metros, ubicada por los baños ya que se podrá reutilizar para el uso de los W.C. y entre otros, la segunda será de las mismas dimensiones, ubicada cerca del área de comida para reutilizarla de ser necesaria. (Figura 2.26).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

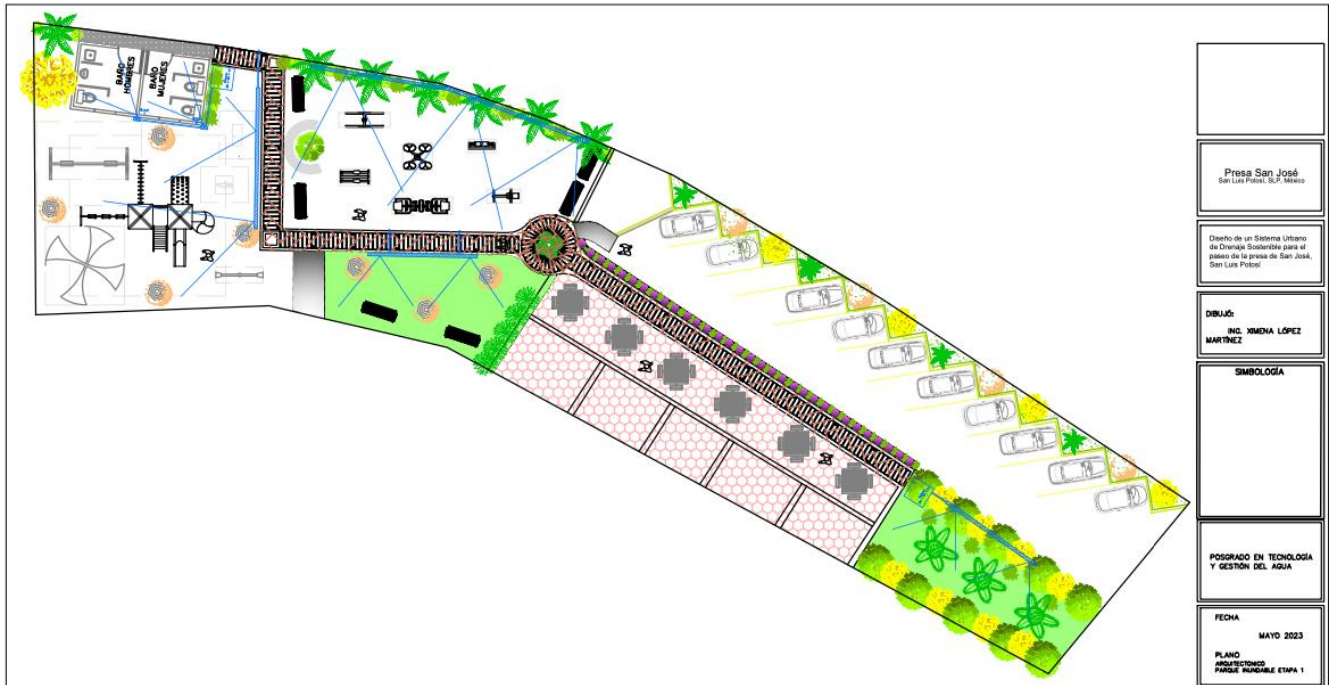


Figura 4. 26. Plano de diseño pluvial de la Etapa

En la Etapa 2 se utilizarán de la misma manera los sistemas de alcantarillado en las áreas verdes, dejando una toma de salida en caso de que requieran el agua en las instalaciones del atlético de San Luis, el otro sistema ubicado del lado del área de comercios se conducirá hasta una cisterna que se ubicara en el punto más bajo, en este caso se considera solo dejar la obra de toma para el uso que mejor se le pueda dar al agua. (Figura 4.27).

De igual forma en ambas etapas se está considerando bajo los criterios del balance hidrológico realizado en el capítulo 2 que cierta cantidad del agua que precipite o escurra en las zonas puede evaporarse y/o infiltrarse. Aunque la infiltración sea mínima fue considerada para el diseño.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 27. Plano de diseño pluvial de la Etapa 2.

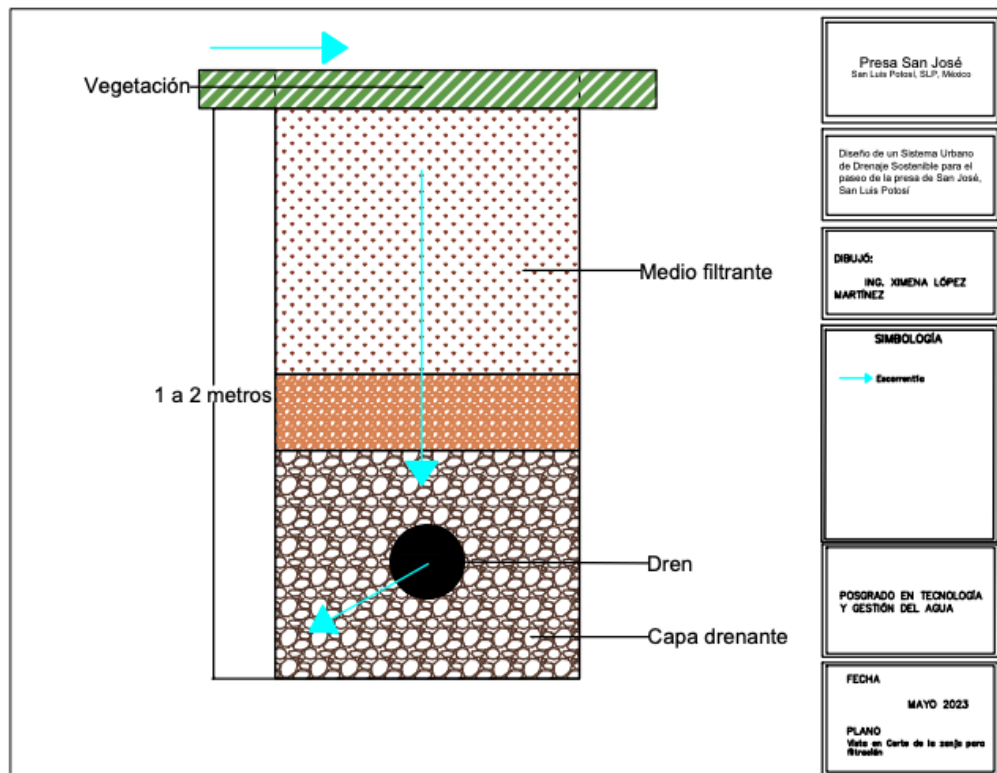


Figura 4. 28. Plano de especificaciones del alcanarillado para áreas verdes.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

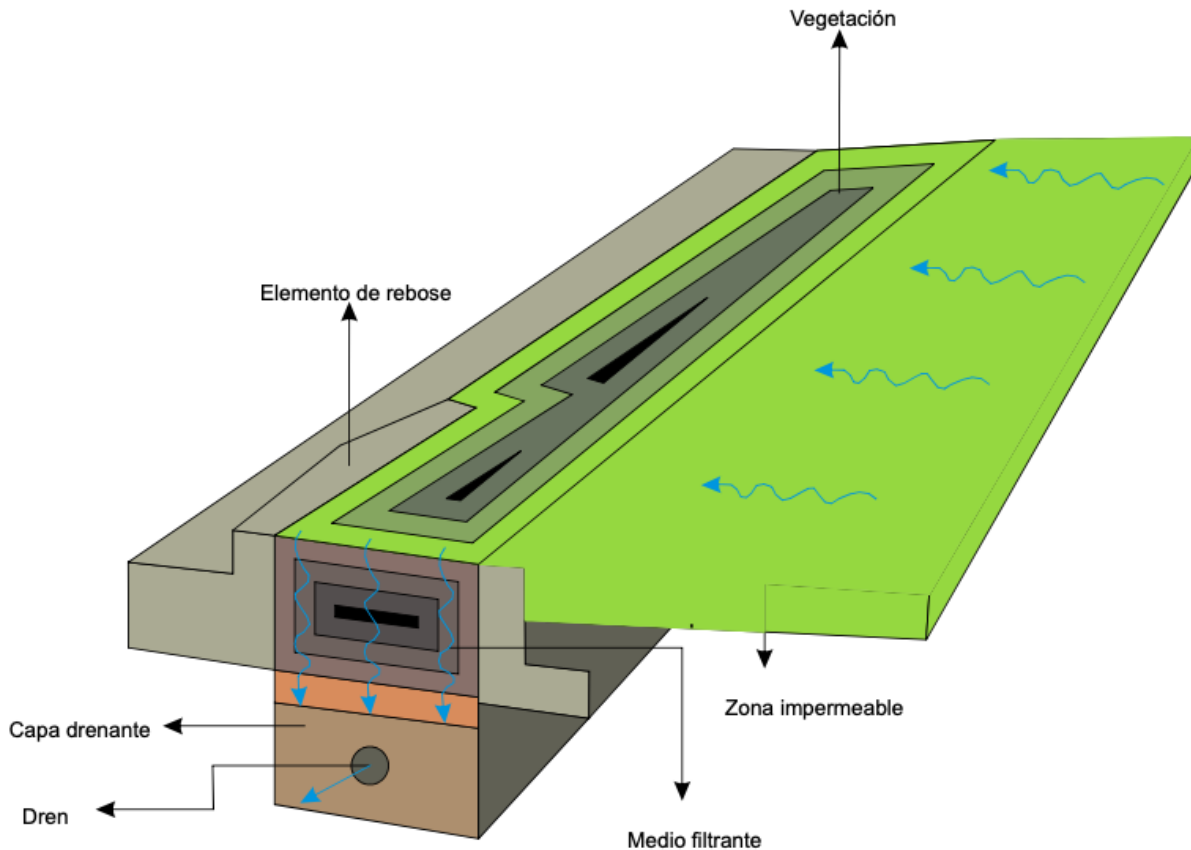


Figura 4. 29. Vista 3D del alcantarillado para áreas verdes.

4.8.4 Renders

La palabra render es inglesa, y su traducción literal sería ‘representación’. Se refiere a una representación gráfica, una imagen o vídeo creado a través de un software. El objetivo del render es crear una imagen o vídeo con el que mostrar un concepto, idea o proyecto de forma digital y realista. (Lumion, 2023).

Los renders se pueden crear para diferentes sectores, no sólo se crean renders para arquitectura, si no también para diseño de paisaje, diseño de interiores, proyectos de ingeniería civil y otros muchos otros sectores y aplicaciones. (Lumion, 2023).

En este caso se utilizaron para poder visualizar el diseño arquitectónico y de paisaje de ambas etapas.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 30. Localización de la Etapa 1 en el camino de la presa de San José.



Figura 4. 31. Etapa 1.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”



Figura 4. 32. Área de comida en la Etapa 1.



Figura 4. 33. Parte de la cancha deportiva, área verde y área de comida de la Etapa 2.

5. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL RÍO SANTIAGO, TRAMO PASEO DE LA PRESA DE SAN JOSÉ

5.1 Modelos numéricos

La palabra modelo tiene varias acepciones y se utiliza tanto que a veces es difícil discernir el significado de la palabra (Konikow y Bredehoeft 1992). Una manera simple de definir un modelo es la representación de un sistema o proceso real. Un modelo conceptual es una hipótesis de cómo se comporta un sistema o un proceso. Esta hipótesis se puede expresar de forma cuantitativa con un modelo numérico. (Konikow, s.fc).

Los modelos numéricos son abstracciones que representan los procesos en forma de ecuaciones; las propiedades físicas se representan como constantes o coeficientes de las ecuaciones y las medidas del estado o el potencial del sistema se hace como variables. (Konikow, s.fc).

La modelación hidrodinámica de ríos es una herramienta fundamental en el estudio del comportamiento hidráulico, ante distintos escenarios. Actualmente, con el empleo de estudios hidrológicos y la modelos hidrodinámicos, en diferentes dimensiones espaciales (1D, 2D y 3D), se pueden manejar escenarios, que ayudan a la prevención de catástrofes (inundaciones y sequías), y la toma de decisiones ingenieriles. (Figura 5.1).

Precisa del uso de la teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. (Ochoa et al., 2016).

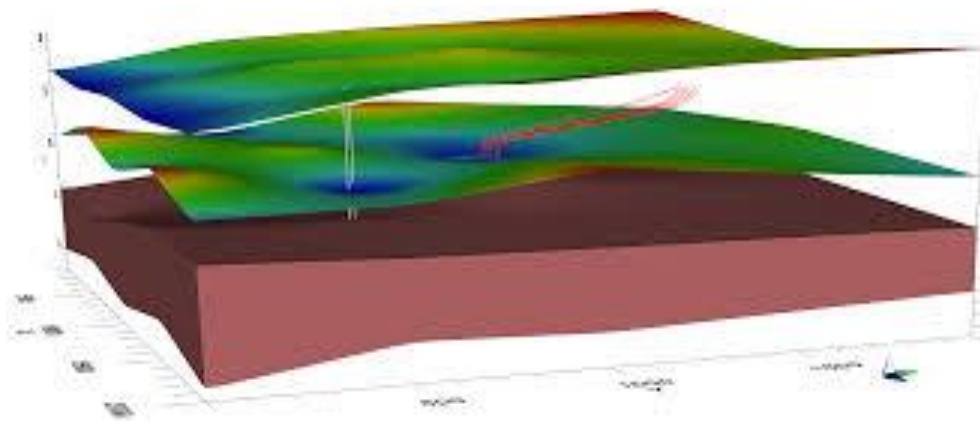


Figura 5.1. Ejemplo de un modelo numérico. (GeoQuantics).

5.1.1 Clasificación de modelos

Los primeros modelos numéricos se desarrollaron exclusivamente para resolver un problema en particular, generalmente de flujo de agua. Actualmente los modelos son genéricos con

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo similares, con módulos adicionales para resolver otros fenómenos como transporte de sedimentos, dispersión de contaminantes, calidad del agua e inclusive modelación de habitat de peces u otras criaturas acuáticas. Es por eso que existen diferentes maneras de clasifica los modelos numéricos, aquí se verán algunos criterios. (Vásquez, 2003).

5.1.1.1 Dimensionalidad

Los modelos unidimensionales (1D) se asume que una de las dimensiones prevalece sobre las otras dos. Esta dimensión es la longitudinal a lo largo del eje del río o canal. La información topográfica e hidráulica se introduce mediante secciones transversales, en las cuales se calculan el tirante y la velocidad promedio en toda la sección transversal. Es decir, toda la sección representada por un único valor medio de velocidad, no considerándose variaciones en la distribución de velocidades tanto horizontal como verticalmente. Asumen por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones. (Vásquez, 2003). (Figura 5.2).

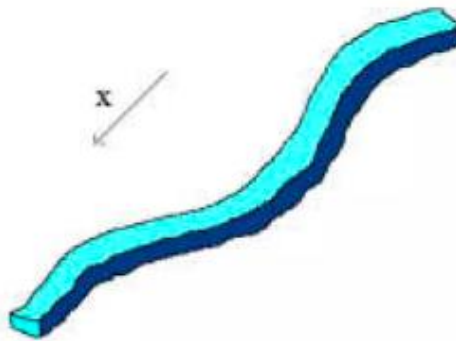


Figura 5. 2. Esquema de un modelo hidráulico unidimensional (X).

En estos, las ecuaciones gobernantes son usadas para analizar situaciones de flujo típico como: la ecuación de continuidad y momento, o la ecuación de la energía. Sin embargo, la ecuación de momento se usa si el flujo tiene discontinuidades, ya que, a diferencia de la ecuación de energía, no es necesario conocer la cantidad de pérdidas en las discontinuidades (Chaudhry, 2008).

Uno de los modelos unidimensionales más utilizados es:

DYRESM. Este es un modelo para la hidrodinámica de embalses, desarrollado por el *Center for Water Research*, en Australia. El modelo unidimensional, de la dirección vertical (profundidad), proyecta los perfiles de valores de variables en la columna de agua, asumiendo uniformidad en las otras dos dimensiones. Fue desarrollado para predecir la distribución vertical de las variables de temperatura, salinidad y densidad en lagos y embalses que satisfacen la aproximación unidimensional (Arbat et al., 2009).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Estos son aplicables en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a 20 veces el ancho.

Por otro lado, los modelos bidimensionales (2D) consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor. Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos como lagos, donde la variación vertical de velocidad es pequeña con respecto a la variación horizontal, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas. (Vásquez, 2003). (Figura 5.3).

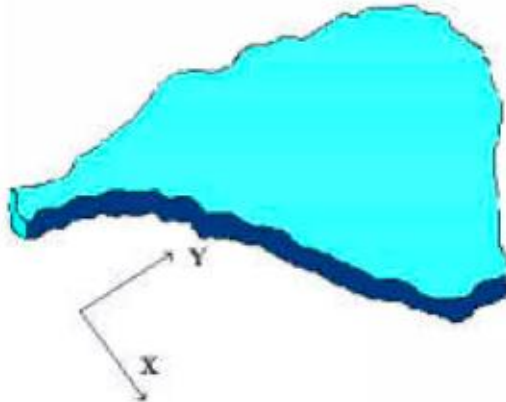


Figura 5. 3. Esquema de un modelo hidráulico bidimensional (X, Y).

Uno de los más utilizados es:

HEC – RAS. Sistema compuesto de un interfaz gráfico de usuario (*Graphical User Interfaz – GUI*) desarrollado por el *US Army Corps of Engineer*, cuenta con componentes de análisis separados, datos de almacenamiento y capacidades de gestión, facilidad en reportes gráficos y tablas. Hec – Ras contiene cuatro componentes de análisis de canales naturales y construidos (*US Army Corps of Engineers, 2016*).

Y, por último, los modelos tridimensionales (3D) representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad, y por tanto aplicables a cualquier caso práctico. (Vásquez, 2003). (Figura 5.4).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

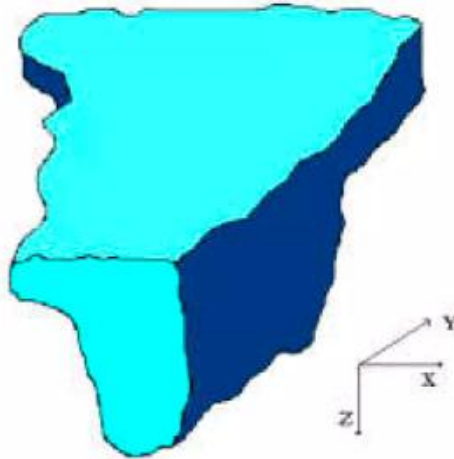


Figura 5. 4. Esquema de un modelo hidráulico tridimensional (X,Y,Z).

La mayoría de los modelos bidimensionales y tridimensionales son de paga, es decir que se requiere de una licencia para utilizarlos. La ventaja es que al contar con una licencia se tiene la seguridad de que el soporte se encuentra impartido por una institución la cual se encarga de mantener actualizado el software para mejorar su uso. A continuación, se describen algunos de los modelos más utilizados:

MIKE DHI. Es un modelo europeo desarrollado por el DHI (*Danish Hydraulic Institute*) en Dinamarca. Los modelos denominados *MIKE 21* y *MIKE 3*, para 2D y 3D respectivamente, representan posiblemente, la alternativa comercial más difundida en la consultoría internacional. La herramienta MIKE, contiene software diseñado exclusivamente para el estudio del agua, siendo *MIKE 21*, una herramienta de simulación útil para modelar flujos de superficie libre 3D y procesos asociados de calidad y sedimento en el agua; mientras que *MIKE 3*, es herramienta que suple necesidades específicas, de las cuales se encuentran: el módulo de hidrodinámica, transporte de sedimentos; y *ECOLAB* (*MIKE by DHI, 2015; MIKE By DHI, 2014*).

DELFT 3D. Al igual que el anterior, este es un modelo europeo desarrollado por el instituto independiente DELTARES de Holanda. Representa una de las plataformas más utilizada por la consultoría internacional, contando con cientos de estudios alrededor del mundo. *DELFT* puede simular tormentas ciclónicas, huracanes, tsunamis, flujos detallados y niveles de agua, olas, transporte y morfología de sedimentos y calidad del agua, siendo capaz de manejar las interacciones entre estos procesos. El programa está diseñado para ser utilizada tanto por expertos en el dominio como por no expertos, que pueden variar desde consultores e ingenieros o contratistas, hasta reguladores y funcionarios gubernamentales (*Deltares, 2021*).

EFDC. El *EFDC* (*Environmental Fluid Dynamics Code*) es un modelo tridimensional desarrollado a fines de los 80, para estudios de calidad de aguas en zonas costeras y estuarios, además internamente incluye un modelo de calidad, denominado *HEM3D*. *EFDC* es el modelo hidrodinámico 3D adoptado y recomendado por la EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*), para los estudios de calidad de aguas.

Desde sus inicios, el modelo *EFDC* ha sido mejorado sistemáticamente. El cual, enlaza un modelo hidrodinámico de diferencias finitas y un modelo de calidad de agua. Cabe resaltar que el *EFDC*, es capaz de resolver las ecuaciones que describen el transporte de sedimentos

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

suspendidos, de contaminantes tóxicos y de variables de calidad de agua (*Sámano Celorio, 2011*). *Dynamics Solutions*, es la empresa que tiene la tarea de actualizar, difundir, capacitar y generar herramientas de libre acceso para el pre y post proceso.

WASP5. El modelo incluye especificaciones de flujo de sedimentación para contabilizar las pérdidas, así como los aportes desde el sedimento por suspensión. Este modelo, además, presenta un compartimento (TOXI) de transporte y destino de productos químicos orgánicos y metales para cualquier tipo de sistema acuático. Dicho compartimento maneja explícitamente muchos de los procesos fisicoquímicos relacionados con estas sustancias, exceptuando aquellos concernientes a procesos de reducción y de precipitación-disolución. Este modelo es capaz de manejar de uno a tres químicos y de uno a tres tipos de material particulado (clases de sólidos) (*Sámano Celorio, 2011*).

5.1.1.2 Método de cálculo

El agua es un medio continuo construido por un número casi infinito de partículas. Determinar la velocidad de cada partícula es virtualmente imposible y poco práctico, por ello este continuo se divide en elementos discretos de tamaño finito, que la memoria de una computadora es capaz de manejar. En los casos más simples de flujo 1D, la discretización se realiza a nivel de secciones transversales, siendo el método de cálculo por etapas: se realiza el balance energético en una sección y se procede a la siguiente, hasta terminar con todas. (*Vásquez, 2003*).

Los modelos 2D y 3D requieren resolver las ecuaciones diferenciales y por tanto una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos principales son el Método de Elementos Finitos (MEF), el Método de Diferencias Finitas (MDF) y más recientemente el Método de Volúmenes Finitos (MVF). Estos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finitos de puntos discretos en dicho dominio. Cuando los valores buscados como el tirante, la velocidad, etc, en dichos puntos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximado mediante métodos de interpolación. (*Vásquez, 2003*).

Todos estos modelos proporcionan mucho detalle y precisión, siendo capaces de manejar condiciones de borde e iniciales complejas.

5.1.1.3 Variación en el tiempo

En el flujo permanente se asume que todas las magnitudes hidráulicas son constantes en el tiempo. Esta es la opción por defecto de todos los modelos numéricos. En el flujo no permanente o transitorio las magnitudes como tirantes o velocidades pueden cambiar con el tiempo, como en el caso del tránsito de una onda de avenidas a través de un río. Algunos programas tienen capacidad para modelación en régimen no permanente, siendo especialmente útiles para estudios de transporte de sedimento, pues la erosión y deposición modifican gradualmente la sección hidráulica. (*Vásquez, 2003*).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Todo esto también involucra el tiempo de procesamiento que se lleva cada uno de los modelos para simular el escenario adecuado.

Para este trabajo se realizó la modelación hidrodinámica implementando los modelos numéricos de Hec-Ras (1D y 2D) y EFDC Explorer (3D).

5.1.2 Ecuaciones para modelos numéricos

Un modelo numérico es capaz de resolver ecuaciones lineales simultáneas y diferenciales parciales, ordinarias; también puede resolver mediante interpolación, diferenciación, integración y realizar una aproximación numérica y sus errores.

Para los modelos que serán utilizados en este trabajo se tienen las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales gobiernan el movimiento de flujo Newtoniano y son obtenidas mediante la aplicación de leyes físicas de conservación de la masa, cantidad de movimiento y propiedades termodinámicas. (Zárate, 2016).

Por lo tanto y de acuerdo con Broomans (2003), las ecuaciones de Navier-Stokes se representan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} * \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \Delta u + f_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} * \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \Delta v - f_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} * \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \Delta w - f_z - \frac{\rho}{\rho_0} g$$

Donde:

u, v, w = representan las componentes de velocidad en las direcciones x, y, z , respectivamente.

ρ, ρ_0 = se refieren a la densidad y densidad de referencia.

p = presión.

ν = viscosidad cinemática.

t = tiempo.

g = la aceleración por acción de la gravedad de la tierra.

f_x, f_y, f_z = las componentes de fuerza por el efecto Coriolis por unidad de masa.

Estas últimas están definidas por:

$$(f_x, f_y, f_z)^T = -2\Omega \times (u, v, w)^T$$

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Donde Ω representa el vector de rotación de la tierra. Por lo tanto, las ecuaciones de Navier-Stokes solo pueden aplicarse suponiendo que la densidad es constante o en caso de que la aproximación de Boussinesq es aplicada.

Predicción No.1: La aproximación de Boussinesq establece que, si la variación de la densidad es pequeña, la densidad puede ser utilizada como constante en todos sus términos, menos en el gravitacional. (*Broomans, 2003*).

Generalmente las variaciones en las velocidades de flujo y la presión son muy pequeñas para ser representadas en un esquema numérico, es por esto que se deben descomponer las ecuaciones de velocidades y presiones:

$$u = \bar{u} + u' ; v = \bar{v} + v' ; w = \bar{w} + w'$$

$$p = \bar{p} + p'$$

Donde:

u', v', w' = representan la desviación de las velocidades y presión respecto de su valor promediado. (fluctuaciones)

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$ = son las velocidades y presión horizontal ya promediadas respecto al tiempo.

De esta manera se puede determinar que:

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\tau) d(\tau)$$

Donde el período de T debe ser mayor que la escala de tiempo en la turbulencia, pero menor que los efectos periódicos largos, tipo las mareas.

Al sustituir las ecuaciones de Navier y las de velocidades y presiones, y promediar las ecuaciones respecto al tiempo se obtienen las ecuaciones RANS (Reynolds), se obtiene que:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} = -1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f_x$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} = -1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + f_y$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} = -1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - f_z - \frac{\rho}{\rho_0} g$$

Las correlaciones entre las componentes fluctuantes de velocidad son desconocidas, ya que estas son responsables de la pérdida de momento en la dirección media del flujo, así que aparecen para actuar como un esfuerzo en el fluido y se le conoce como esfuerzo de Reynolds. (*Onchi, 2021*).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Predicción No. 2: Los esfuerzos de Reynolds como los esfuerzos viscosos dependen de la deformación del flujo medio. Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{u', v'} = v_t \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)$$

Donde v se le conoce como viscosidad turbulenta.

Predicción No. 3: Las ecuaciones de aguas superficiales en 3D, se determinan como Shallow Water Equations o ecuaciones de Saint-Venant, sólo cuando el flujo satisface ciertas relaciones características. (Onchi, 2021).

Se presentan en condiciones donde las magnitudes y las velocidades horizontales son mayores que las verticales. Por medio de esta, se pueden despreciar los terminos $\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y}$ sustituyendo en la ecuación de RANS de la componente w , por una distribución en la presión hidrostática.

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial z} = -\rho g$$

Ya una vez integrada nos queda que:

$$\bar{p}(x, y, z, t) = g \int_z^\zeta \rho dz + p_a$$

Donde:

$\zeta = \zeta(x, y, z, t)$ representa el nivel de la superficie libre en un plano de referencia $z=0$.
 p_a = presión atmosférica.

Posteriormente se aplica la integración de Leibniz en la ecuación de RANS de la componente u .

$$-1 \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\zeta \frac{\partial \rho}{\partial x} z' - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}$$

En algunos casos se puede considerar una densidad constante y despreciar el gradiente de presión atmosférica para obtener las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_v + 2 \frac{\partial}{\partial x} (v_t^H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + f_u + 2 \frac{\partial}{\partial y} (v_t^H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_t^H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

Determinando f como el parámetro de Coriolis con la ecuación:

$$f = 2\Omega \sin\phi$$

Donde:

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Ω = la velocidad angular de la tierra.

ϕ = la altitud.

Conociendo la ecuación de continuidad se determina que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Y al integrarla a lo largo del eje vertical, se obtiene:

$$w(x, y, \zeta, t) - w(x, y, z, t) = - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz - \int_{-d}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} dz$$

Donde:

$d = d(x, y)$ = la profundidad del agua debajo el plano de referencia $z=0$.

Este no depende del tiempo ya que los cambios morfológicos debidos del flujo son muy mínimos. Por lo tanto, se puede reescribir la ecuación anterior para $z = \zeta(x, y, t)$.

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}$$

Una expresión similar puede ser:

$$w = -u \frac{\partial d}{\partial x} - v \frac{\partial d}{\partial y}$$

Al integrar ambas ecuaciones, nos queda que:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-d}^{\zeta} v dz$$

Si bien, se define que:

$$U = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} u dz \quad y \quad V = \frac{1}{H} \int_{-d}^{\zeta} v dz$$

$$H = H(x, y, t) = \zeta + d$$

La ecuación se lee de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0$$

Se concluye que todo parte de las ecuaciones de Navier-Stokes, realizando una integración en dos dimensiones. Pero al no contar con una solución analítica de las ecuaciones

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

diferenciales parciales es necesario, pasar de un espacio continuo a un espacio discreto para obtener resultados, realizando una aproximación numérica.

Para esto existen diferentes métodos de aproximación, algunos de ellos son:

Método de Diferencias Finitas (FDM). - Esta basado en la expansión de la serie de Taylor local, aproximando las ecuaciones diferenciales parciales, esta discretización espacial suele carecer de versatilidad, es decir, no sirve para geometrías complejas. (Fontes, 2010).

Método de Volúmenes Finitos (FVM). - Se basa en calcular los valores de variables conservadas, promediadas mediante todo el volumen, se dice que hace uso de un volumen de control. (Fontes, 2010)

Método de Elementos Finitos (FEM). - Este método tiene en particular que cuenta con la derivación de las ecuaciones discretizadas, se considera superior para los problemas de dominio complejos. (Zienkiewicz, 2005).

5.2 Hec- Ras

El sistema de Hec – Ras desarrollado por el *Hydrologic Engineering Center* del *US Army Corps of Engineers*, contiene diversas características de diseño hidráulico, basadas en el cálculo de secciones transversales, obtenidos del relieve. Hec-Ras admite perfiles de superficie de agua de flujo constante e inestable; calculando la hidrodinámica combinada unidimensional y bidimensional, transporte de sedimentos, análisis de la temperatura del agua y análisis de la calidad del agua, brindando además el mapeo espacial de muchos parámetros calculados, como son: profundidad, elevación de la superficie del agua, velocidad, etc. (US Army Corps of Engineers, 2021).

5.2.2 Proceso para la modelación en Hec-Ras

El interfaz del software Hec-Ras es muy intuitivo, consiste en un sistema gráfico de usuario. (Figura 5.5).

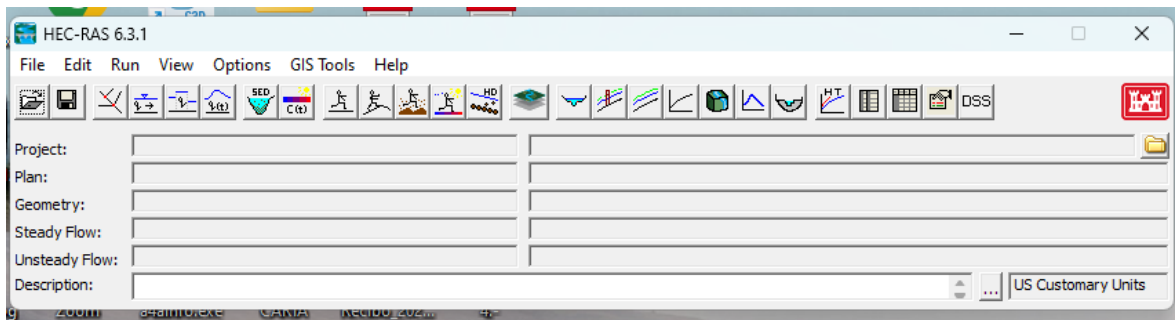


Figura 5. 5. Interfaz de Hec-Ras.

Lo primero que se debe realizar antes de ejecutar el software es crear un nuevo proyecto (Figura 5.6) y posteriormente darle en guardar como.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

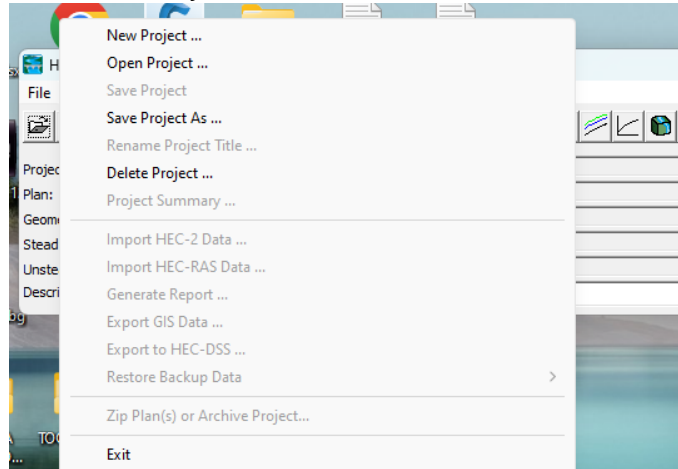


Figura 5. 6. Crear nuevo proyecto y guardar como.

Ahora si se procede a introducir las características del modelo:

1. Para crear un nuevo terreno, se debe importar el modelo digital de terreno, que se obtuvo anteriormente en el capítulo 3, este puede ser en formato .TIFF o a partir de las coordenadas XYZ. (Figura 5.7)

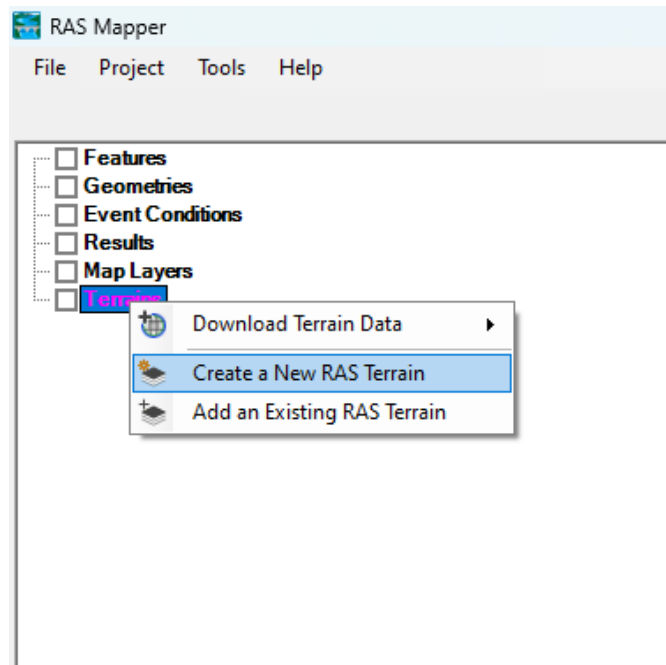


Figura 5. 7. Crear un nuevo terreno.

2. Se debe establecer la zona de proyección que se requiere, en este caso sera la zona UTM 14 N. Se le da clic en “Project” y “Set Projection”. (Figura 5.8).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

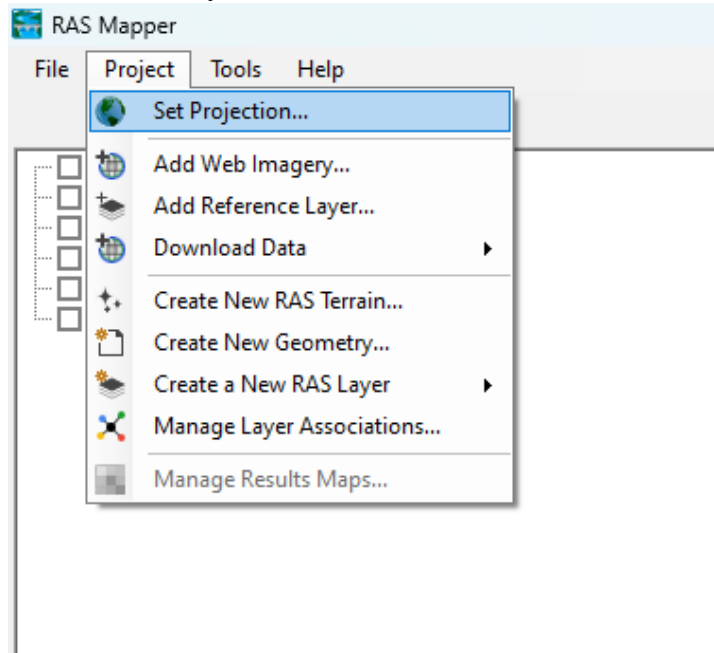


Figura 5. 8. Establecer proyección.

3. Una vez determinada la proyección y agregado el terreno podremos apreciar en la ventana de geometría el MDE. (Figura 5.9).

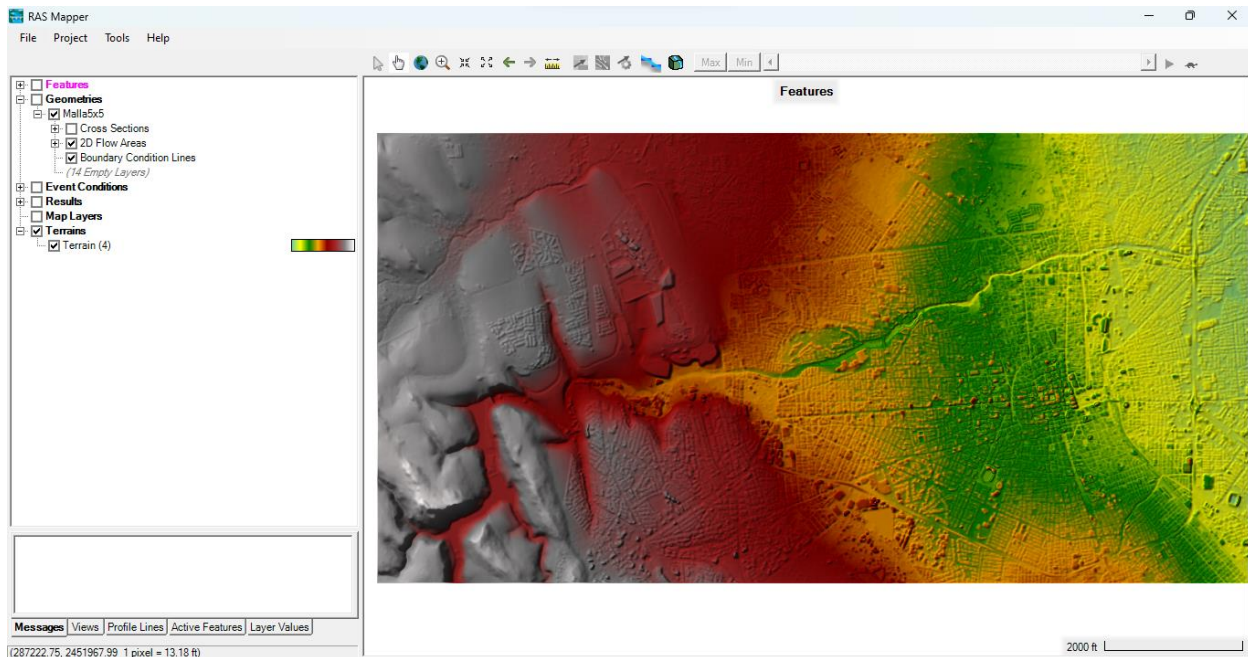


Figura 5. 9. Terreno creado, ventana de geometría.

4. Continuamos con la creación de una nueva geometría para poder determinar nuestro perímetro para la zona de estudio. Para este caso en particular se genero una malla con un Delta X y un Delta Y de 5 metros. (Figura 5.10).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

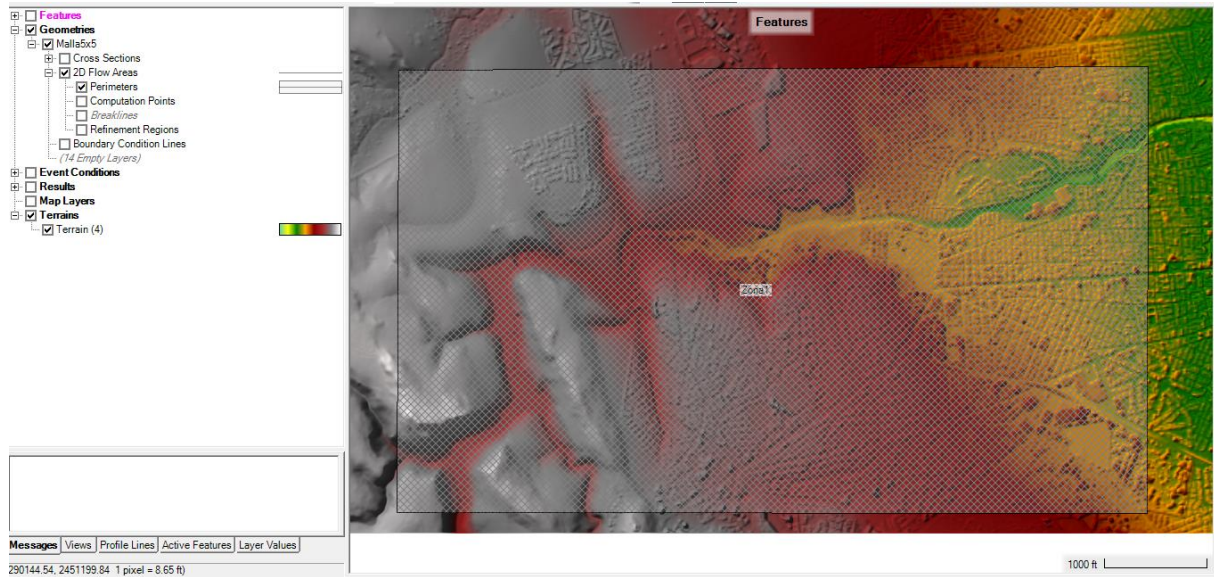


Figura 5. 10. Perímetro y malla creada.

5. Una vez que se tiene la malla que se puede determinar como general, se puede refinar o generar una región más detallada. En el presente estudio se genero una región con un Delta X y un Delta Y de 2.5 metros. (Figura 5.11).

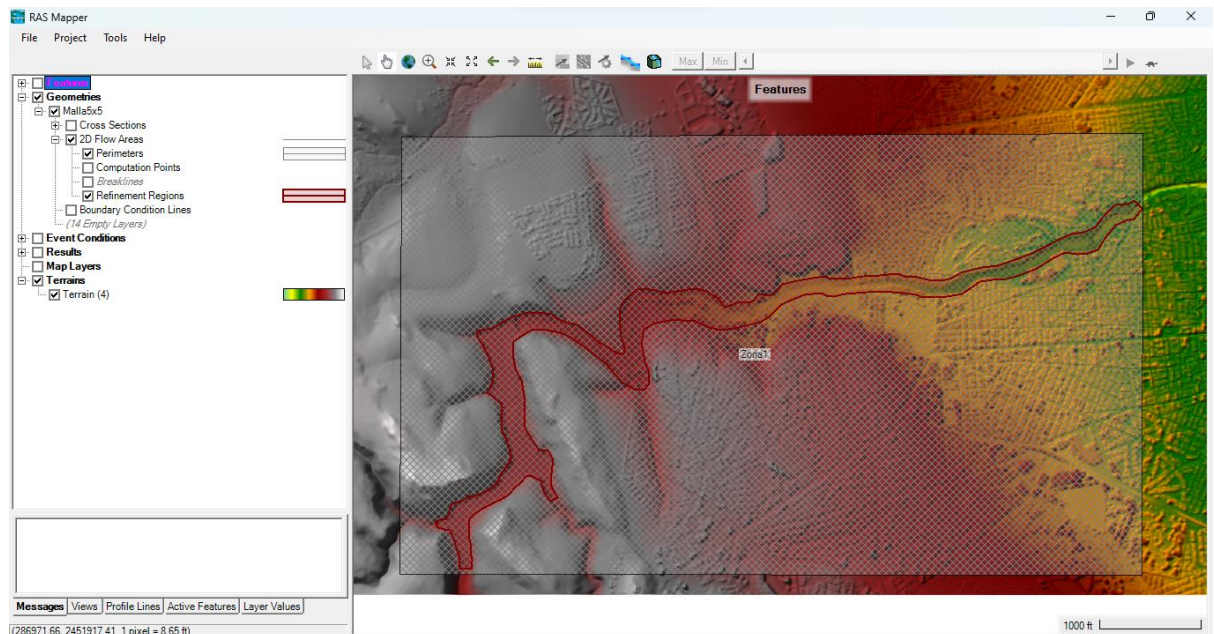


Figura 5. 11. Región detallada/refinada.

Obteniendo como resultado 1498004 celdas y considerando un coeficiente de Manning de 0.06.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

6. Al caracterizar los puntos anteriores se procede a trazar las condiciones de frontera, las cuales se establecerán a partir de las condiciones de entrada y de salida. Se deben dibujar las líneas por fuera de las mallas creadas, se reconocen por ser de color azul. (Figura 5.12).

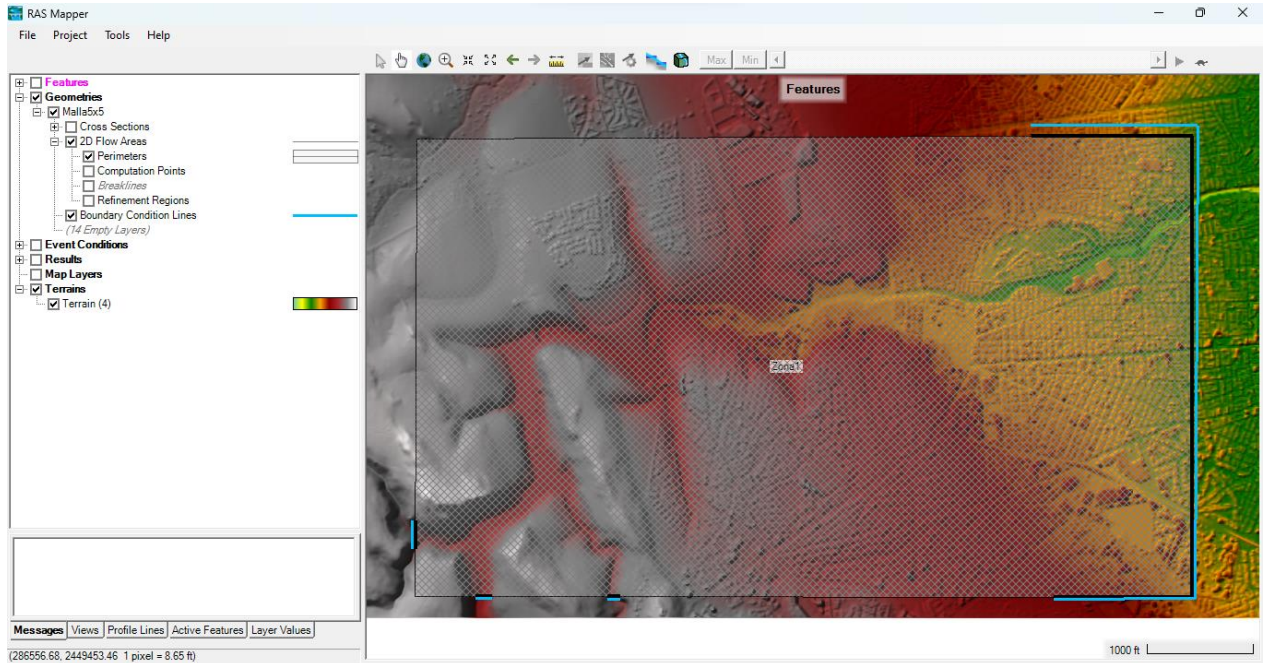


Figura 5.12. Trazado de condiciones de frontera.

Se trazaron tres condiciones de entrada por los flujos que continuamente entran al vaso de la presa de San José y una condición de salida para que el flujo no se estanque en los límites de la malla.

7. Se recomienda guardar hasta este punto y regresar a la ventana principal de Hec-Ras donde se cargará la geometría realizada. (Figura 5.13).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

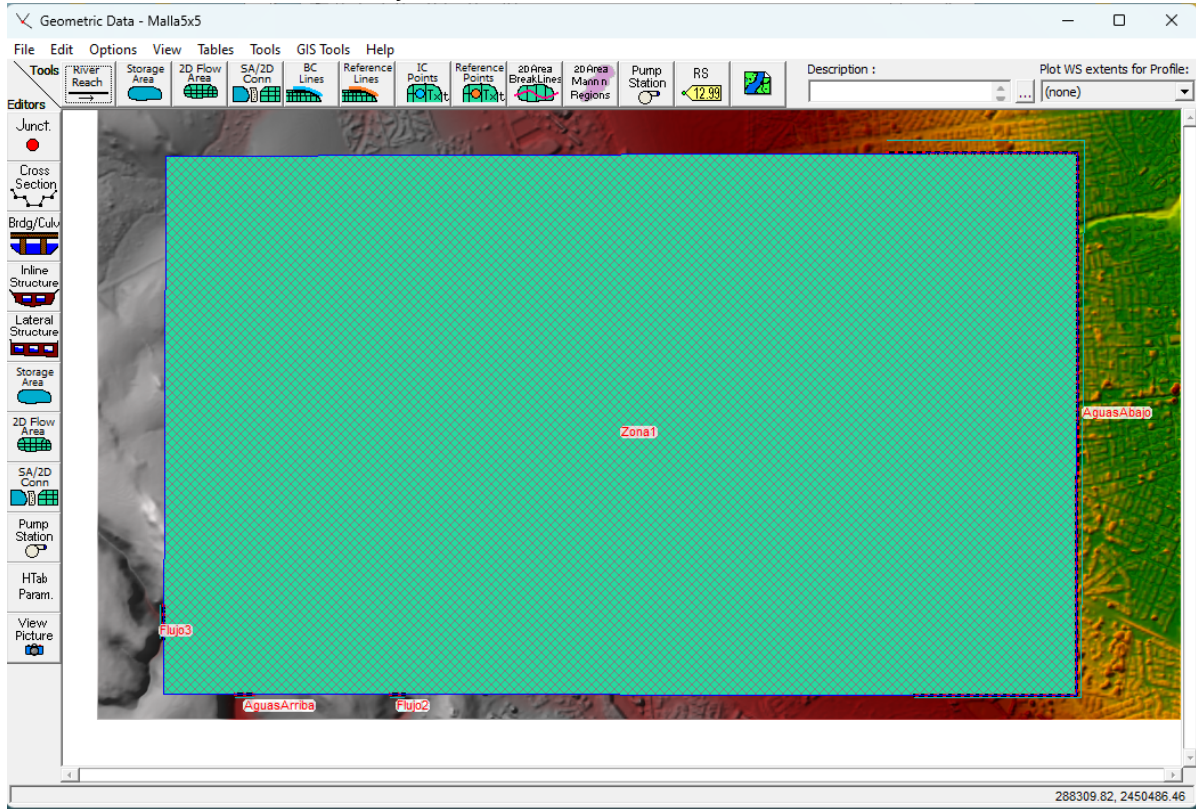


Figura 5. 13. Cargar la geometría realizada.

8. Posteriormente se debe realizar una calibración y validación del Hec-Ras en donde se recurre al registro de escenarios reales registrados durante las campañas de medición en el tramo de estudio. Donde se introducen las condiciones de frontera en lo trazado anteriormente, y se analiza que la respuesta del modelo numérico sea adecuada estadísticamente a los registros adquiridos y comparandolos con las variables hidráulicas. (Figura 5.14).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

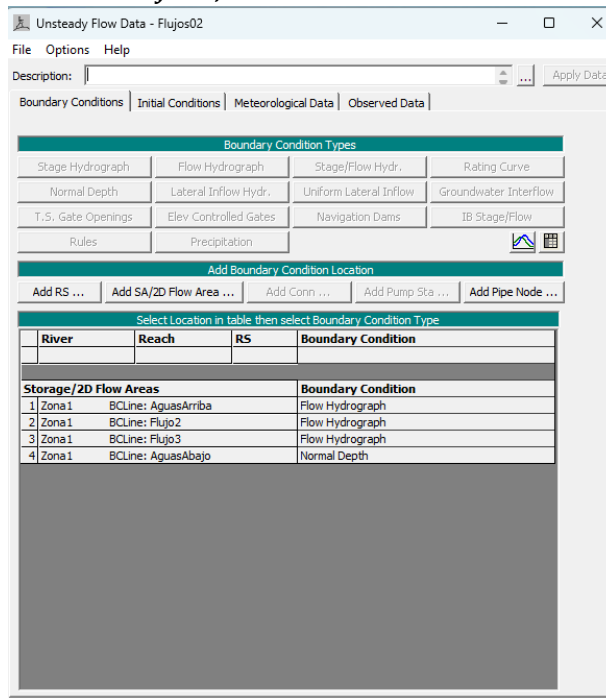


Figura 5. 14. Calibración del modelo Hec-Ras.

La calibración y validación de los modelos se pueden apreciar en los siguientes subcapítulos.

5.2.3 Escenarios propuestos

Escenario 1

Para el primer escenario simulado, se trabajó con un período de retorno de 10 años el cual basándose en los datos obtenidos anteriormente se tiene un gasto de 78.189 m³/s como entrada.

En este escenario se considera la batimetría, es decir, el vaso de la presa de San José no se encuentra completamente seco, sino con diferentes niveles de agua.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

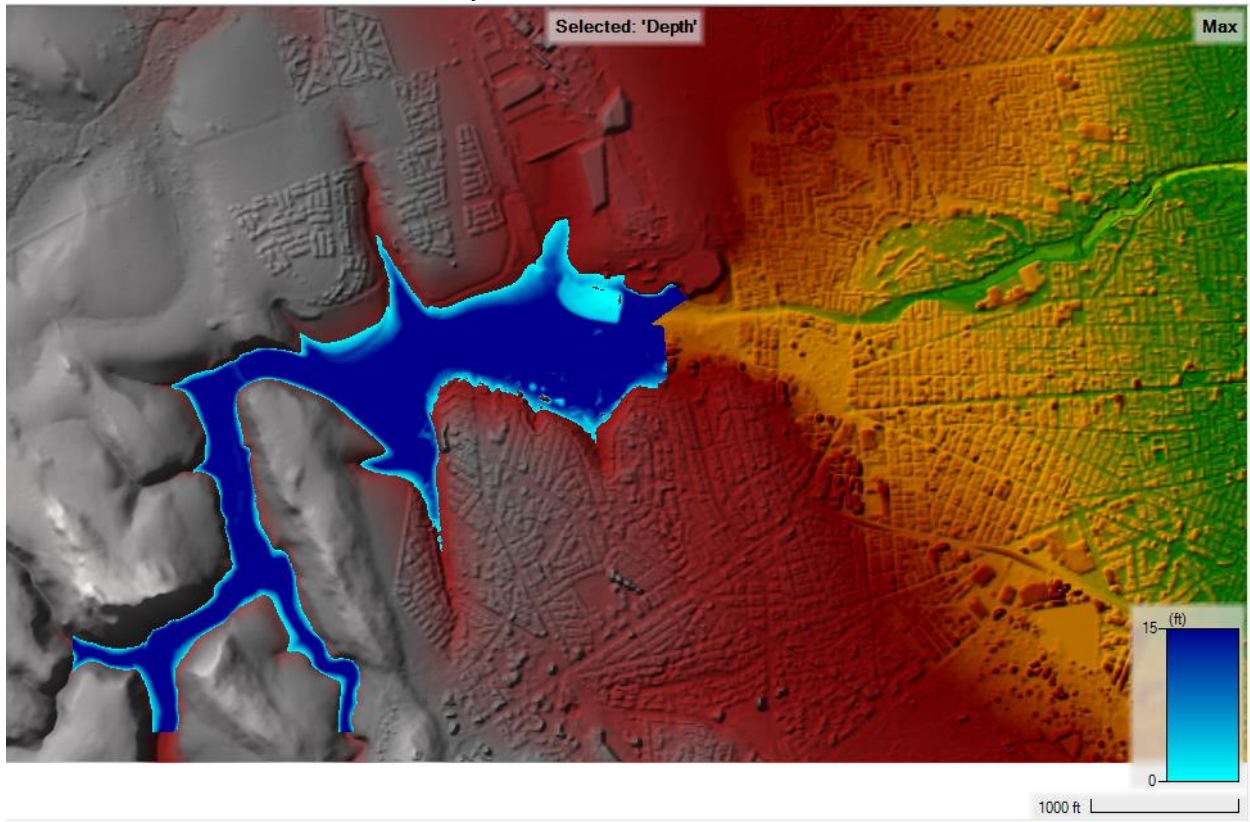


Figura 5. 15. Máxima altura de agua en un día para un período de retorno de 10 años.

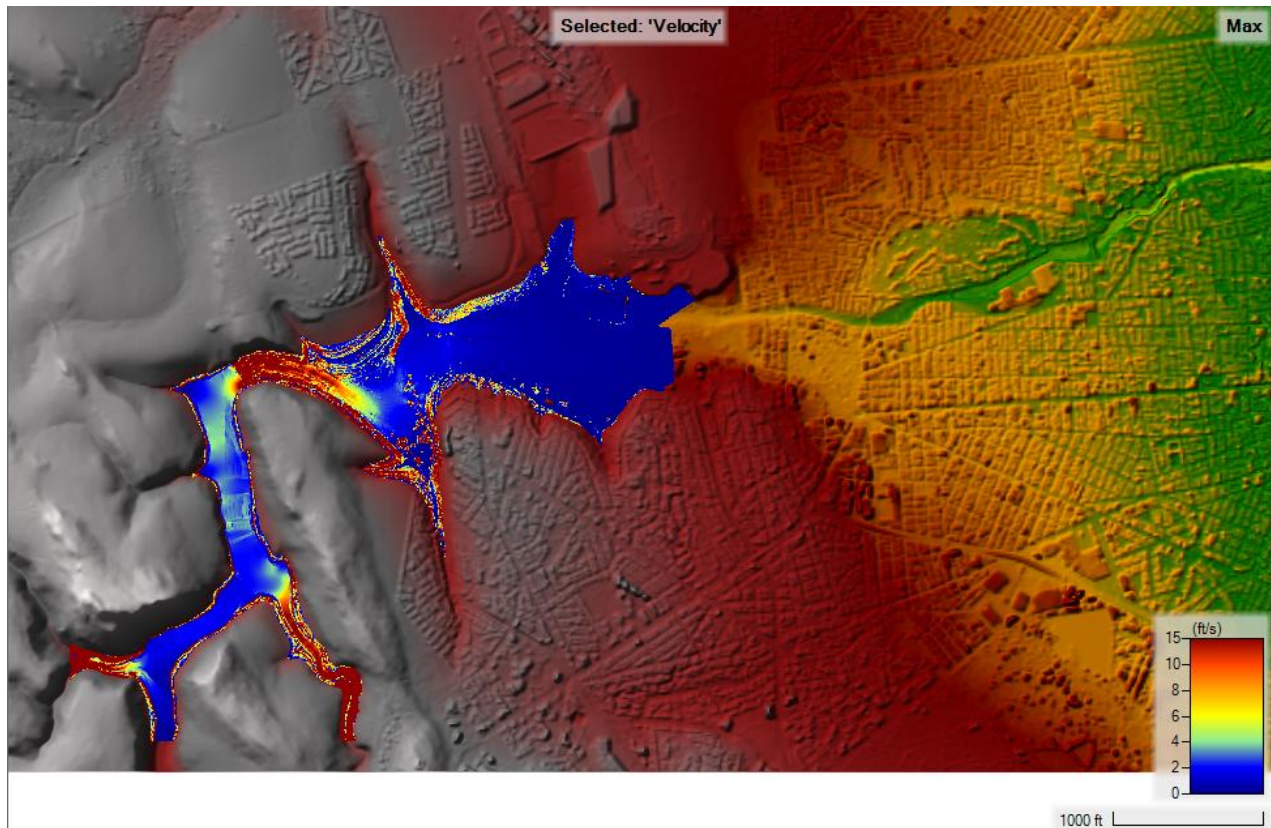


Figura 5. 16. Velocidades en un día para un período de retorno de 10 años.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Como se puede observar en la Figura 5.15 al tener dos días el flujo continuo del agua este puede desbordar el río Santiago y de esta manera generar inundaciones dentro y en zonas aledañas al Parque Urbano.

Por otro lado, se observa que las velocidades son algo constantes y las más altas se tienen aguas debajo de la cortina de la presa de San Jose, ya que estos al sobrepasar la capacidad de dicha presa se ven como excedentes vertidos sin control alguno. Aunque no es una gran cantidad de agua, debe ser considerado.

Escenario 2

Al realizar diferentes ensayos con un período de retorno de 25 años se determino que no eran tan considerables los cambios con el de 10 años por lo tanto nos enfocamos en el de 50 años.

Por lo tanto, el segundo escenario se trabajo con Tr de 50 años en el cual se considero un gasto de 126.351 m³/s. De la misma manera que el escenario 1, se esta considerando la batimetría para la simulación.

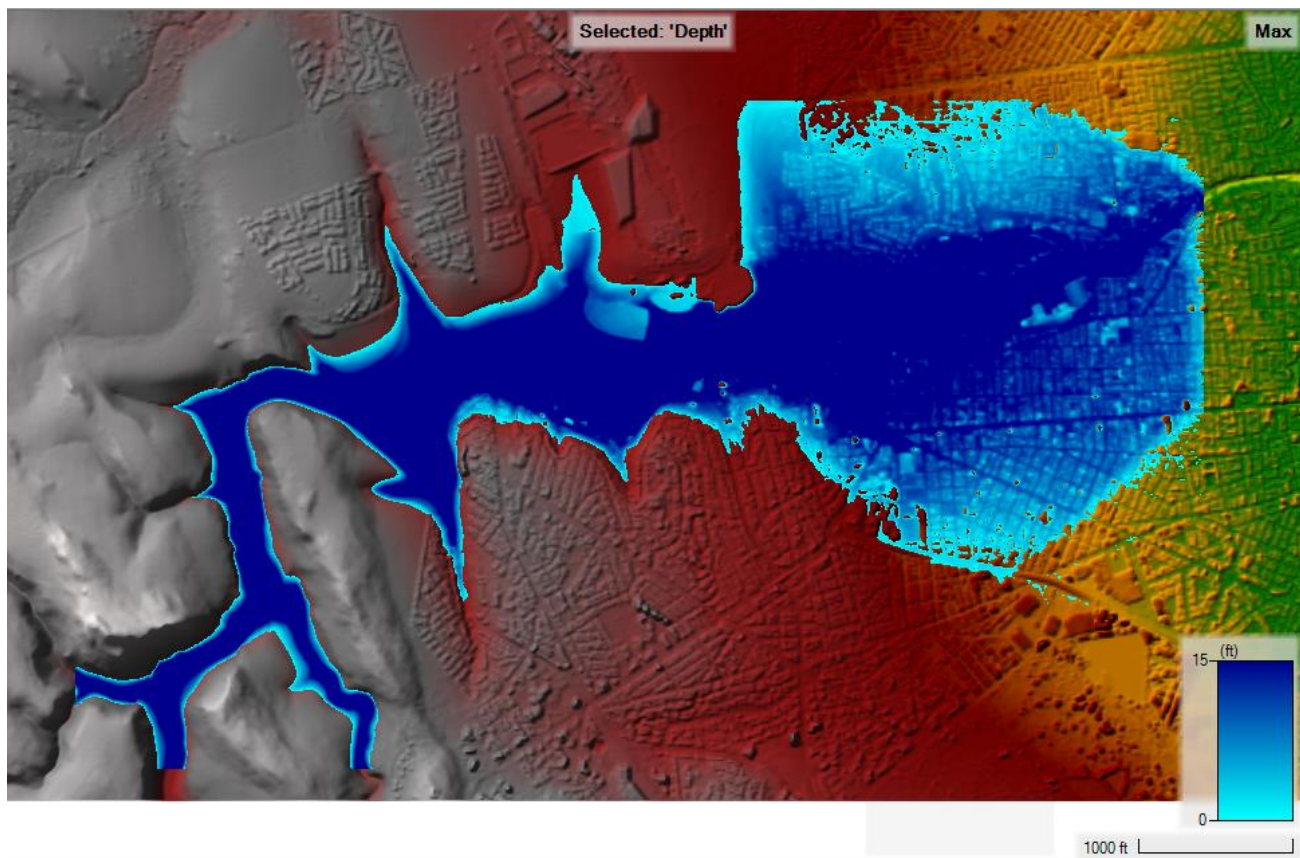


Figura 5. 17. Máxima altura de agua en un día para un período de retorno de 50 años.

Como se puede observar en la Figura 5.15 se ven en peligro de inundación varias zonas urbanas de la ciudad de San Luis Potosí, teniendo un evento como este. Es por eso que se

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

decidió modelar más de 24 horas para conocer el comportamiento a lo largo del cauce y dándole tiempo para que ocurra una evapotranspiración y/o infiltración en algunas zonas.

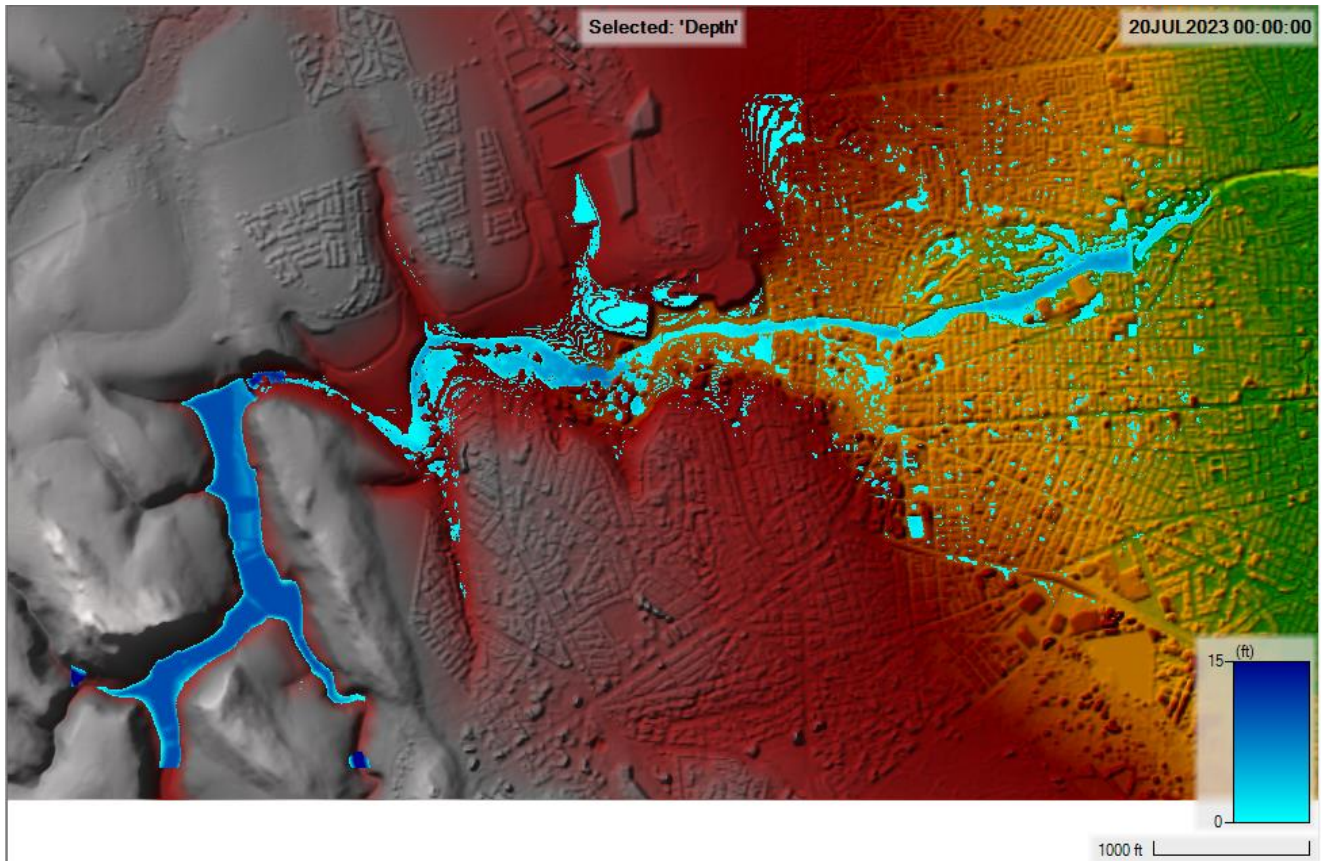


Figura 5. 18. Máxima altura de agua en dos días para un período de retorno de 50 años. Ilustración

El simular más horas nos permite apreciar con más precisión cuales serían las zonas que seguirían siendo afectadas por inundación dentro del Parque Urbano y de la ciudad de San Luis Potosí.

Este escenario, aunque suele ser algo no concurrente es una posibilidad y es momento de tomar algunas alternativas para prevenir diferentes accidentes, catastrofes, etc.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

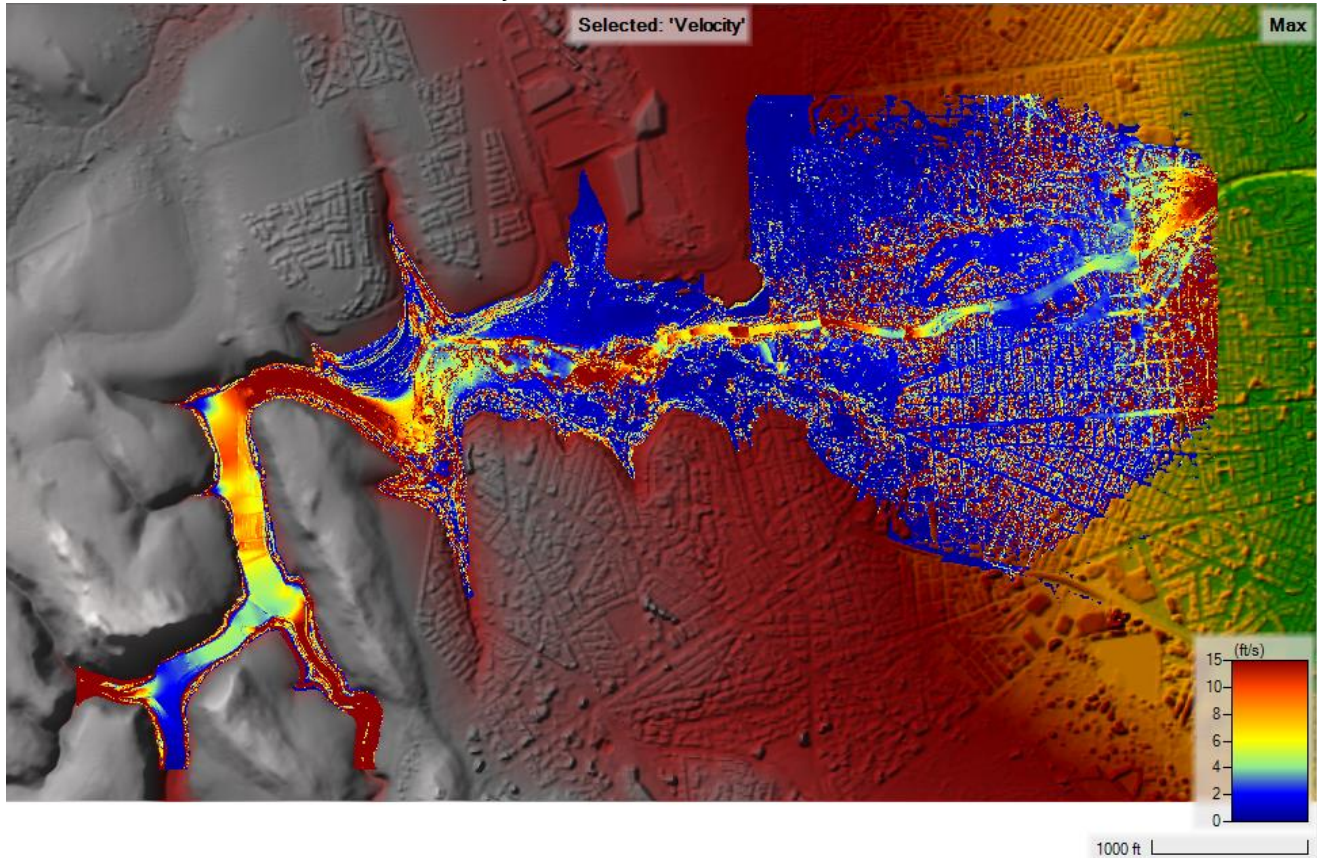


Figura 5. 19. Velocidades en un día para un período de retorno de 50 años.

Si bien, las velocidades en este escenario se presentan más altas que la del escenario 1, dado que el caudal que ahora desborda por la cortina es mayor y el flujo mantiene una velocidad a lo largo de su cauce, dentro de la zona del Parque Urbano se pueden observar igual velocidades altas y medias.

5.3 EFDC Explorer

El modelo EFDC, desarrollado inicialmente en el Virginia Institute of Marine Science y posteriormente patrocinado por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (US EPA), tiene la capacidad de analizar la hidrodinámica de forma bidimensional y tridimensional, resolviendo las ecuaciones de movimiento (verticalmente hidrostáticas) y de superficie libre, junto con las ecuaciones de continuidad y de balance de masa, además, presenta módulos acoplados de salinidad, temperatura, sedimentos y transporte de contaminantes (Hamrick, 1992).

Se trata, de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua, que puede aplicarse a cualquier cuerpo de agua superficial, incluidos los lagos y los ríos. El EFDC se desarrolló mediante una estructura caracterizada por: a) un modelo construido con celdas de elementos finitos; b) que es posible humedecer y secar en el procesado del contorno; c) que permite el intercambio de calor con la atmósfera, y d) que simula la calidad del agua (Torres-Bejarano et al., 2016).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Entre otras aplicaciones importantes del EFDC, destacan la transferencia de agua para el control de la eutrofización en los lagos y la predicción de la temperatura del agua en los embalses, y también como herramienta de gestión para la restauración de la calidad del agua. (Torres-Bejarano et al., 2016).

Las diferentes versiones del EFDC Explorer son muy completas y flexibles.

5.3.2 Procesos para modelar en EFDC Explorer 8.4

La modelación hidrodinámica del río Santiago, en el tramo del paseo de la presa de San José, permitira conocer la respuesta del cauce ante el escenario hidrometeorológico que se pudiera presentar.

Es necesario definir el tramo de estudio, las condiciones de frontera e iniciales y los datos climatológicos para poder modelar.

El interfaz del software EFDC es un sistema compuesto de un interfaz gráfico de usuario, intuitivo para realizar el procesamiento del modelo, cuenta con 6 pestañas, tales como: el mapa, la descripción, el dominio, los módulos implementados, el o los tiempos y las características hidrodinámicas. (Figura 5.20).

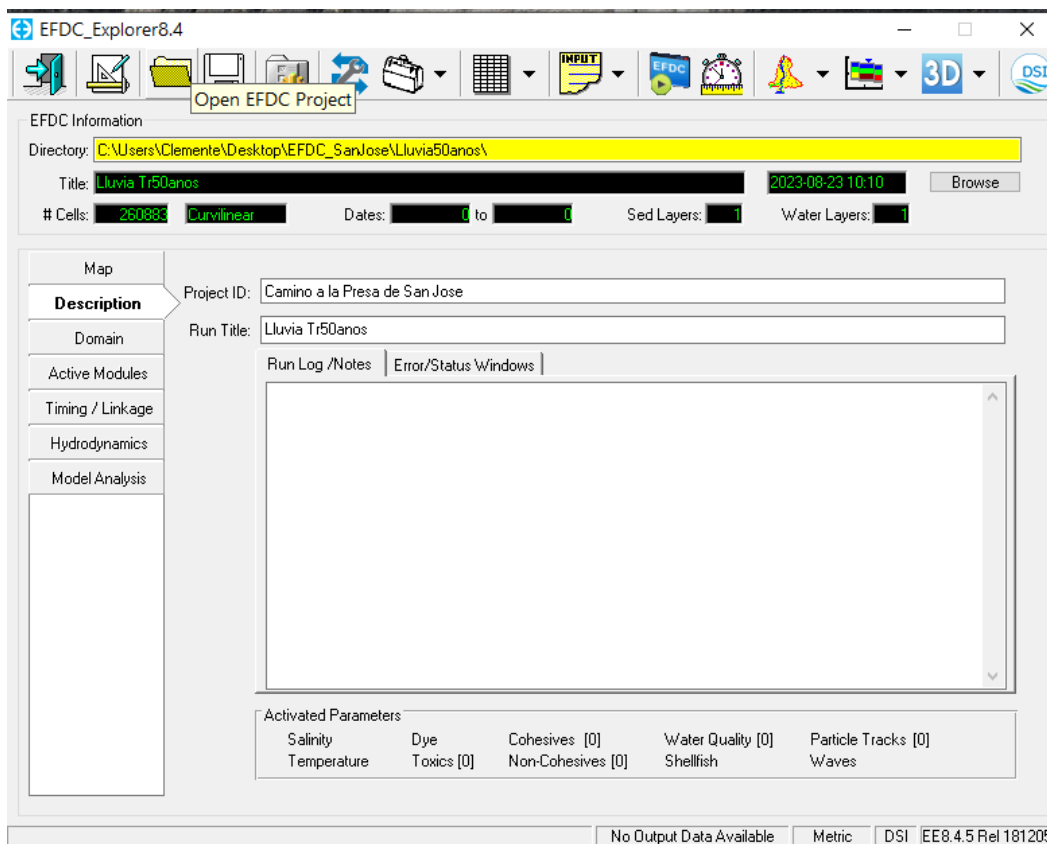


Figura 5. 20. Interfaz del EFDC Explorer.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

1. Para iniciar con este software se debe de generar un nuevo proyecto y agregar la descripción de lo que se va a modelar.
2. Para poder generar una malla directamente en el EFDC es necesario contar con un archivo .dxf en el cual este trazado el perímetro del área de estudio, en la pestaña de Domain se podrá encontrar esta opción. Una vez ingresado el archivo se determinará el tamaño de los delta X, y Y. En este estudio se utilizaron de 10 metros y el software generara en automático la malla curvilínea que se requiere.
3. Se deben agregar las condiciones iniciales, determinadas anteriormente. Es decir, la topo-batimetría del cauce mediante las coordenadas XYZ exportadas en un archivo de texto. (Figura 5.21)

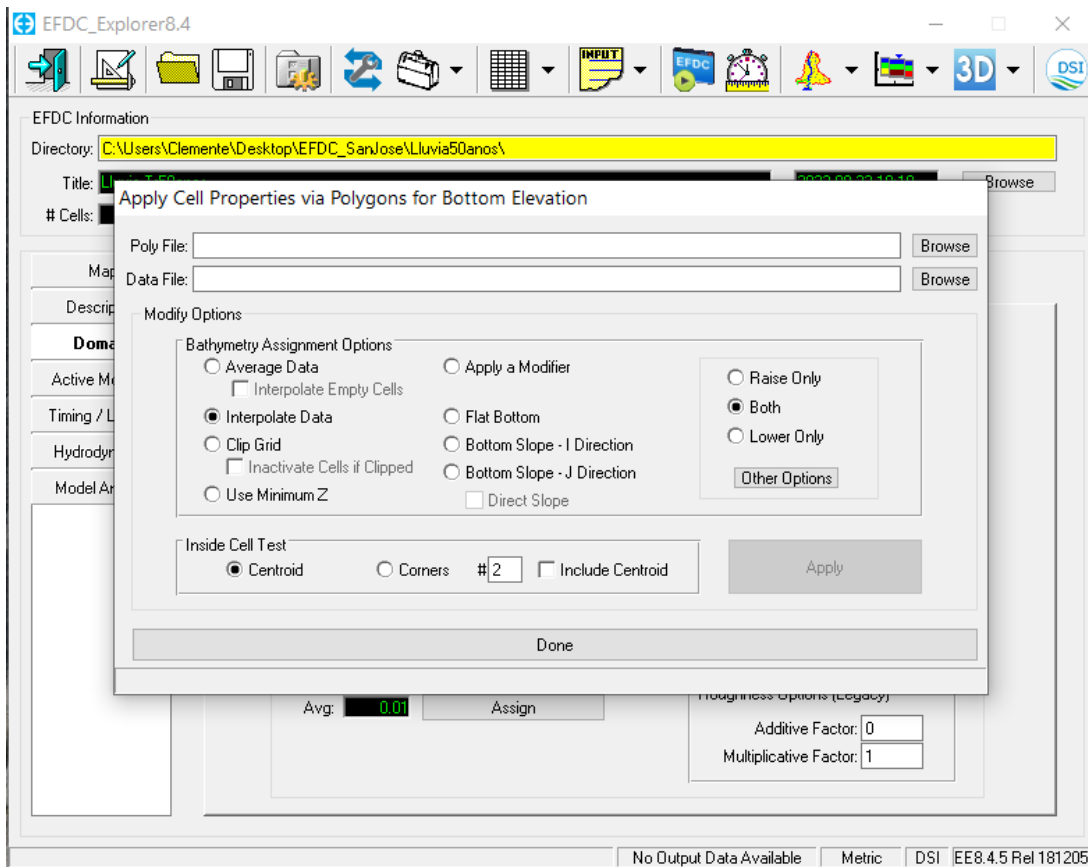


Figura 5. 21. Añadir la topo-batimetría.

4. Una ve agregada la topografía se debe verificar la zona de proyección en la que se trabajara, para eso en la pestaña de Domain podemos encontrar la configuración en GRID. (Figura 5.22). Para el estudio se requiere de la zona UTM 14 N.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

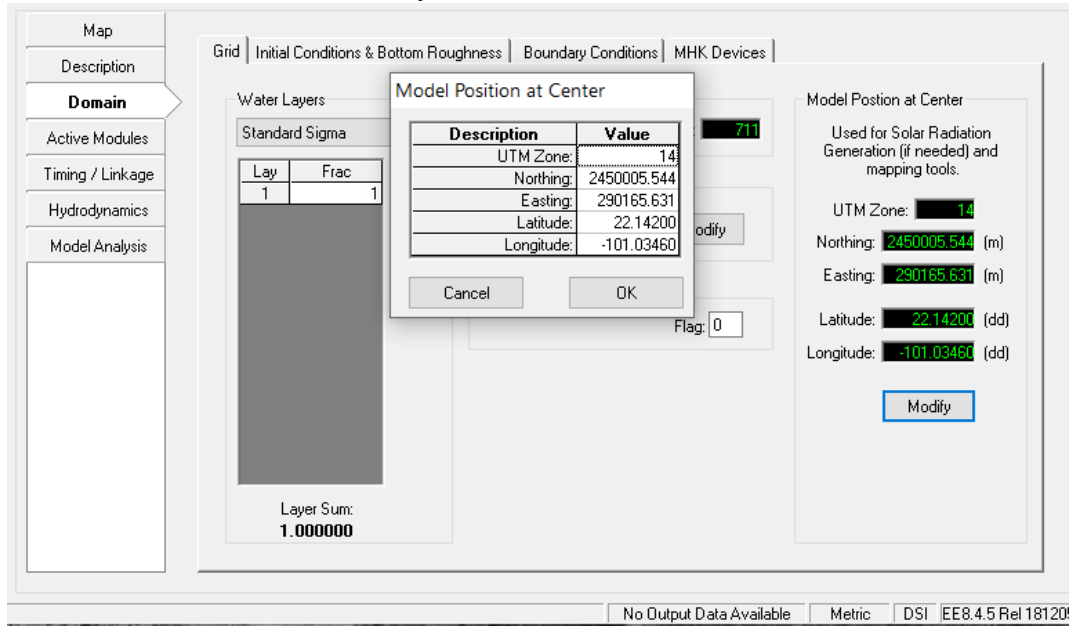


Figura 5. 22. Proyección de la zona de estudio.

- Se deben agregar las diferentes condiciones de frontera que están determinadas por la precipitación que se tendrá en cierto período de retorno. (Figura 5.23).

De igual forma se ingresan las condiciones iniciales para el modelo, para este caso en particular se tuvo que generar una condición en el perímetro de la malla, dado que el agua debe seguir su curso y no quedarse estancada. Esto para obtener resultados más realistas.

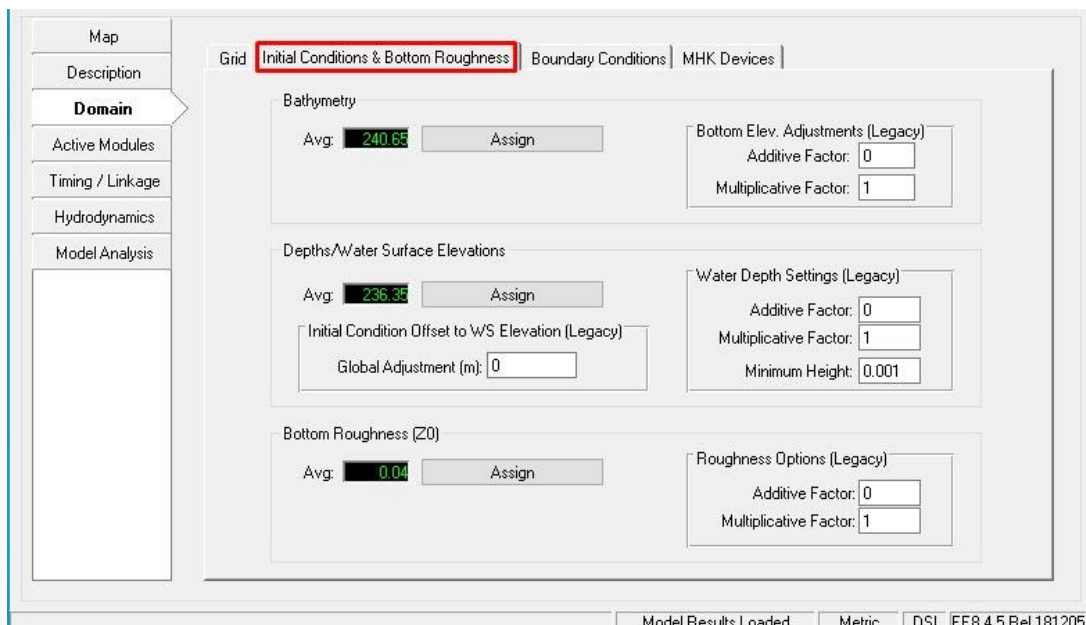


Figura 5. 23. Condiciones de frontera.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

6. Posteriormente en la pestaña de Timing se asignarán los valores del tiempo para las corridas del modelo, que varía del escenario. Mediante este parámetro se puede determinar la fecha de inicio del modelo, los períodos y la duración de cada período, generalmente se utiliza de 24 horas. (Figura 5.24).

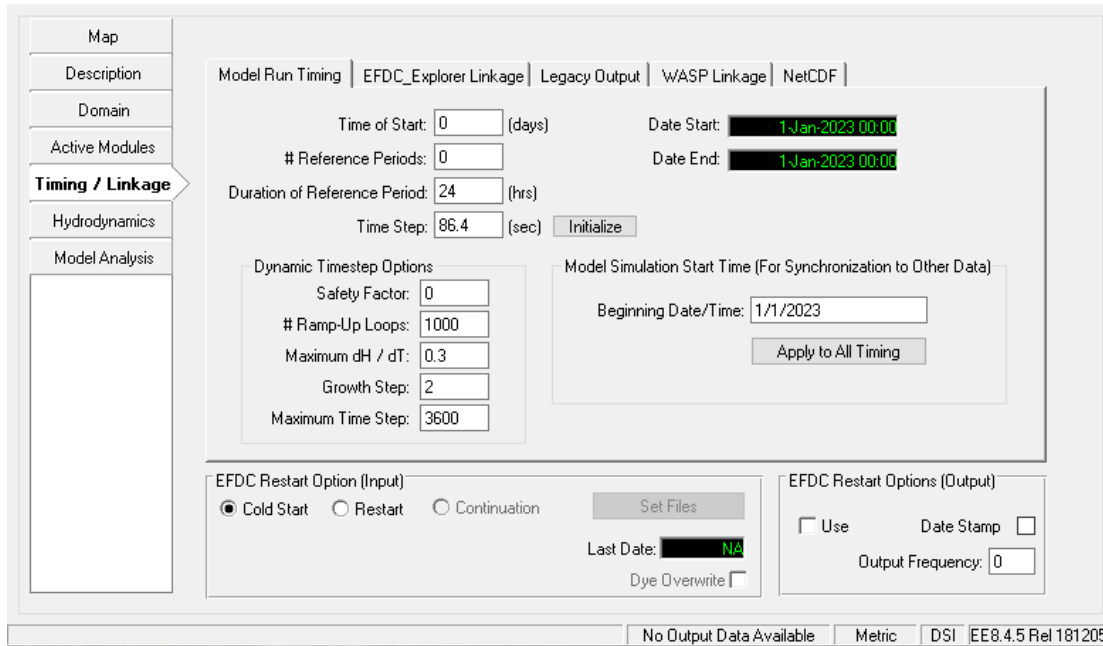


Figura 5. 24.Pestaña de Timing.

Una de las principales características y ventajas presentes en el EFDC Explorer, es la opción del tiempo dinámico (*Dynamic Time Step*), que permite que el software optimice (aumente o decremente), el paso del tiempo según considere adecuado, reduciendo así los tiempos del cálculo.

7. Siguiendo, en la pestaña de Hydrodynamics, el software permite acceder a otro tipo de configuraciones de turbulencia, mojado y celdas secas, así como la vegetación dentro del modelo. En este trabajo fue necesario utilizar algunas de estas opciones. (Figura 5.25).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

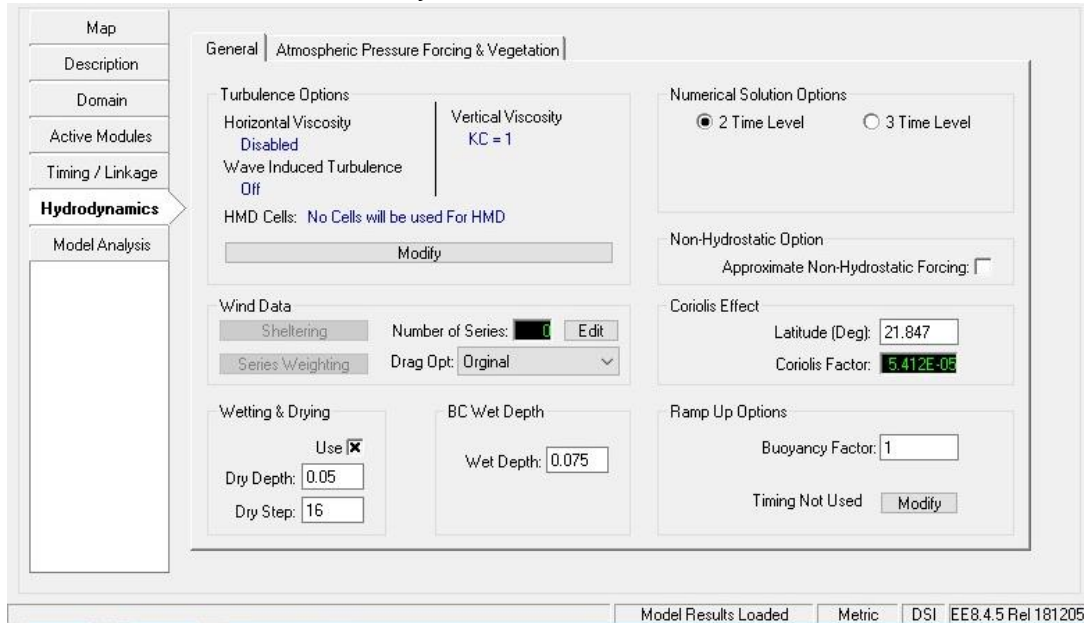


Figura 5. 25. Pestaña de Hydrodynamics.

8. A continuación, se debe realizar un análisis de sensibilidad y una calibración, los cuales consisten prácticamente en rectificar el comportamiento del modelo. Es decir, que se debe correr un par de veces el modelo para observar el comportamiento del cauce, entre otros aspectos, que tengan relación con los datos ya registrados. Esto también sirve para optimizar los tiempos de la modelación, apoyándose en parámetros como el tiempo y la malla.

5.3.5 Escenarios propuestos

A diferencia con los escenarios anteriores de Hec-Ras se tiene que, para calibrar estos modelos se tomaron en cuenta otras consideraciones tales como el funcionamiento óptimo de la presa del Peaje y del Potosino, reduciendo de esta manera el gasto real de la presa de San José.

Escenarios sin SUDS

Se trabajó con períodos de retorno de 2, 5 y 10 años en condiciones actuales de la presa de San José, utilizando su hidrograma correspondiente. Cada uno fue modelado para observar el comportamiento del río por un día (24 horas). (Figura 5.26).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

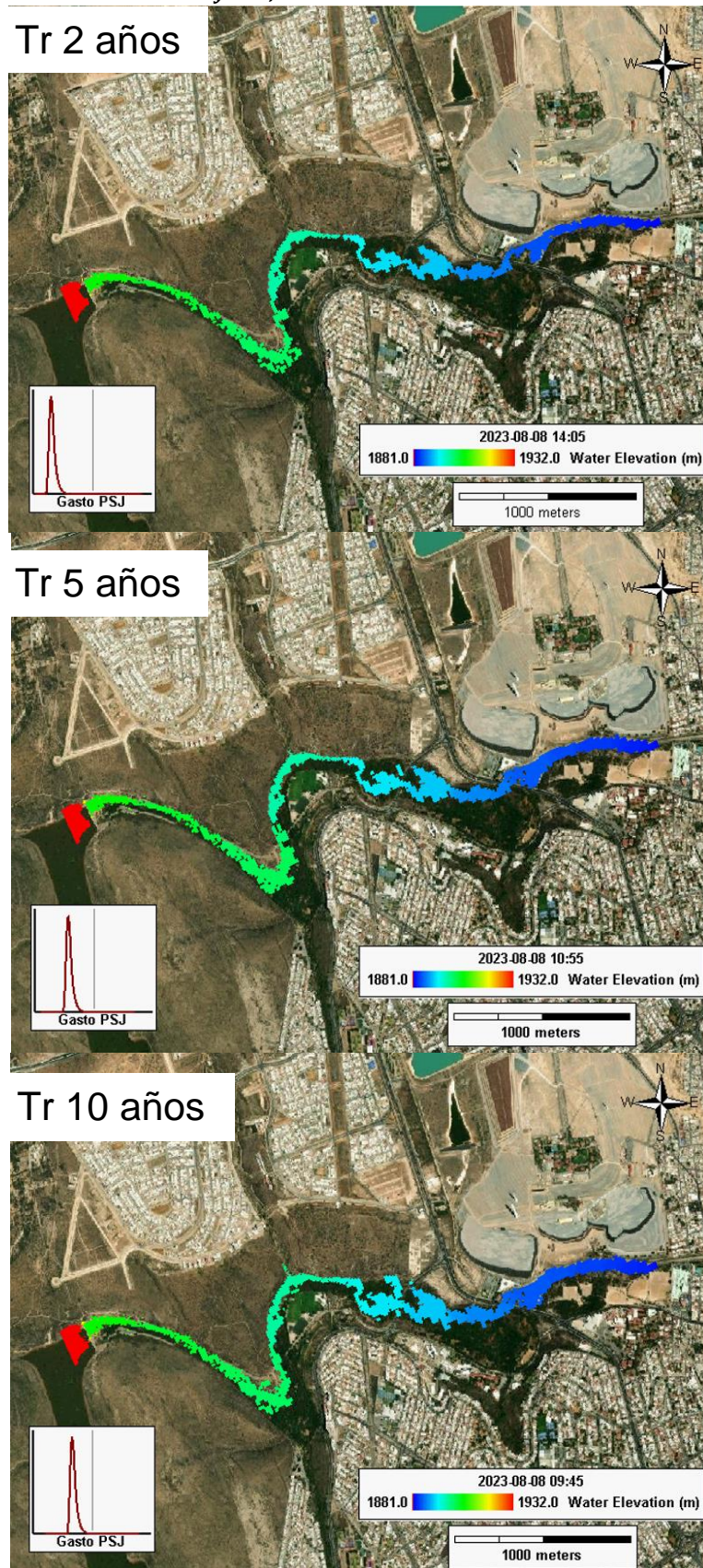


Figura 5. 26. Escenarios para los períodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Se observa en los diferentes períodos que después de pasar por el hidrograma el parque urbano ya se encuentra totalmente con agua, sin embargo, aunque los gastos van aumentando, no existen desbordamientos muy considerables en ninguno.

Al analizar los tiempos, se observa que para un período de retorno de dos años el agua recorre el parque urbano alrededor de las 14:00 horas, para un período de retorno de cinco años a las 10:55 horas y finalmente para un período de retorno de diez años a las 9:45 horas.

Escenarios con SUDS

Se realizó una calibración con los gastos reales de la presa de San José y se utilizaron los períodos de retorno de 2, 5 y 10 años, agregando las zonas (Etapa 1 y Etapa 2) con los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles diseñados anteriormente para observar el impacto que estos tendrían al ser aplicados dentro de la zona de estudio.

Cabe mencionar que las áreas de aplicación se encuentran con un total de 5200.1063 m² las cuales al agregarle la profundidad del sistema estos funcionan optimamente como parques inundables, sin afectar las zonas aledañas a estos.

Se muestra el comportamiento del río aguas debajo de la presa, del lado izquierdo cuando el hidrograma está en su punto pico y del lado derecho una vez que ha pasado el hidrograma total. (Figura 5.27, 5.28 y 5.29).

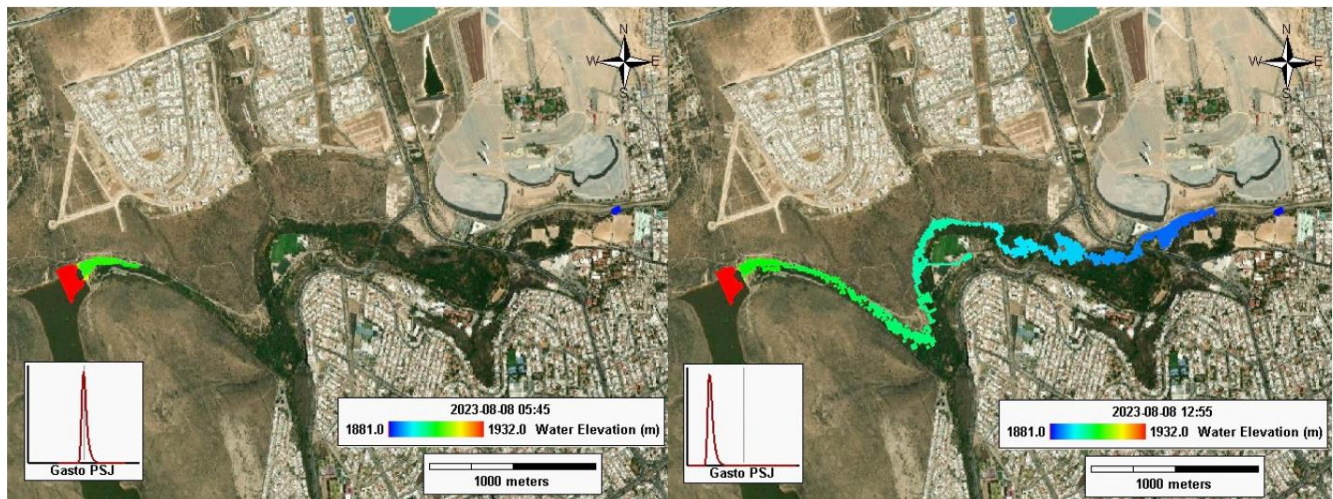


Figura 5. 27. Visualización para un período de retorno de 2 años.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

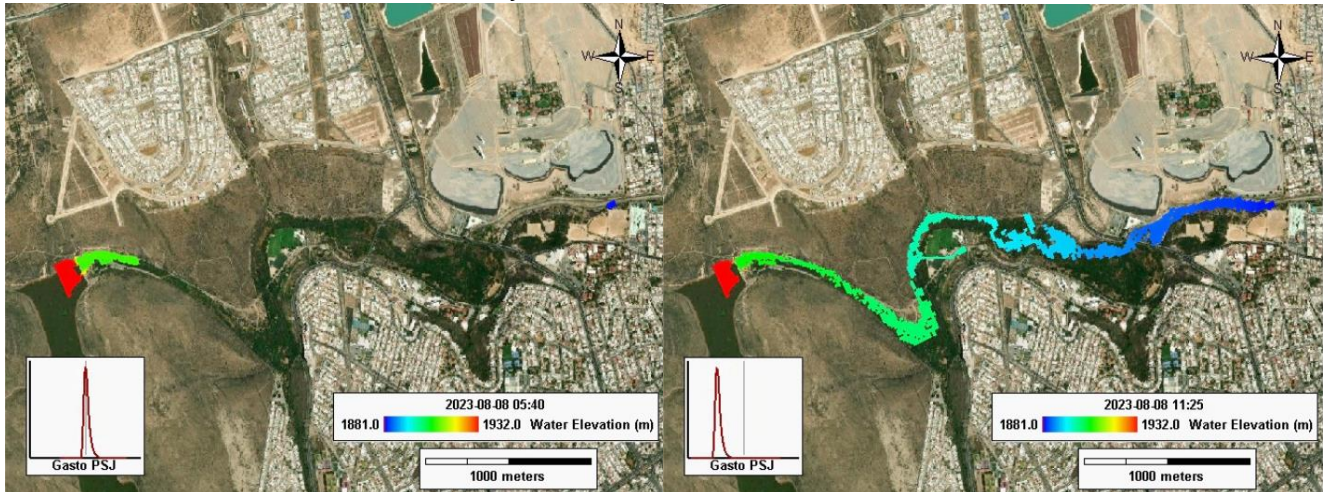


Figura 5. 28. Visualización para un período de retorno de 5 años.

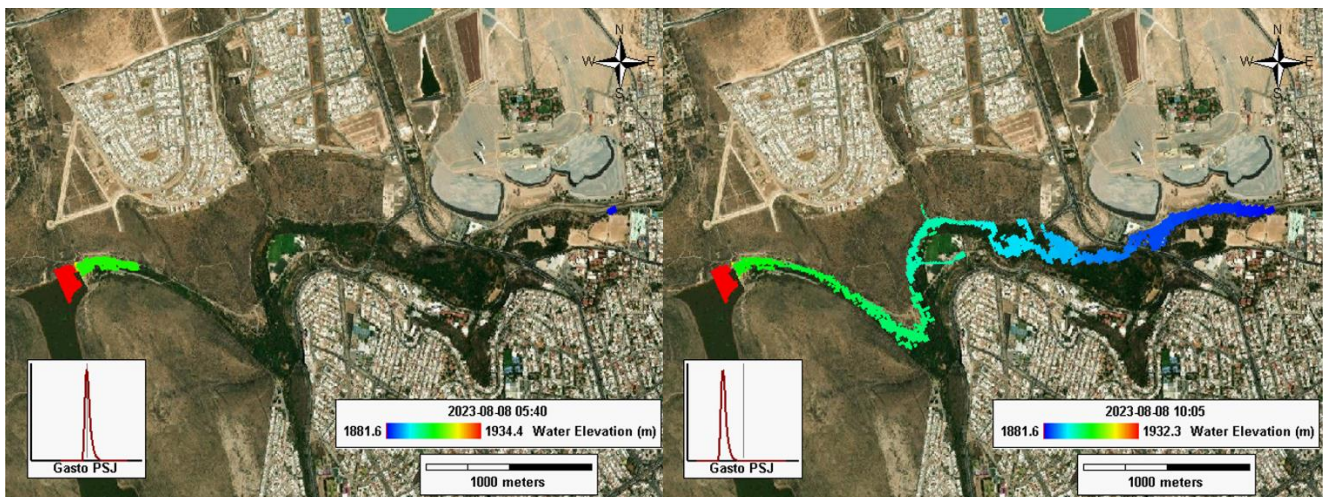


Figura 5. 29. Visualización para un período de retorno de 10 años.

Para tener una comparativa más precisa se exportaron los datos de los hidrogramas de salida de los tres escenarios sin SUDS y los de los tres escenarios con SUDS para observar de manera gráfica los gastos obtenidos donde se podrá determinar si estos son funcionales en cuanto a la retención de agua. (Figura 5.30).

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

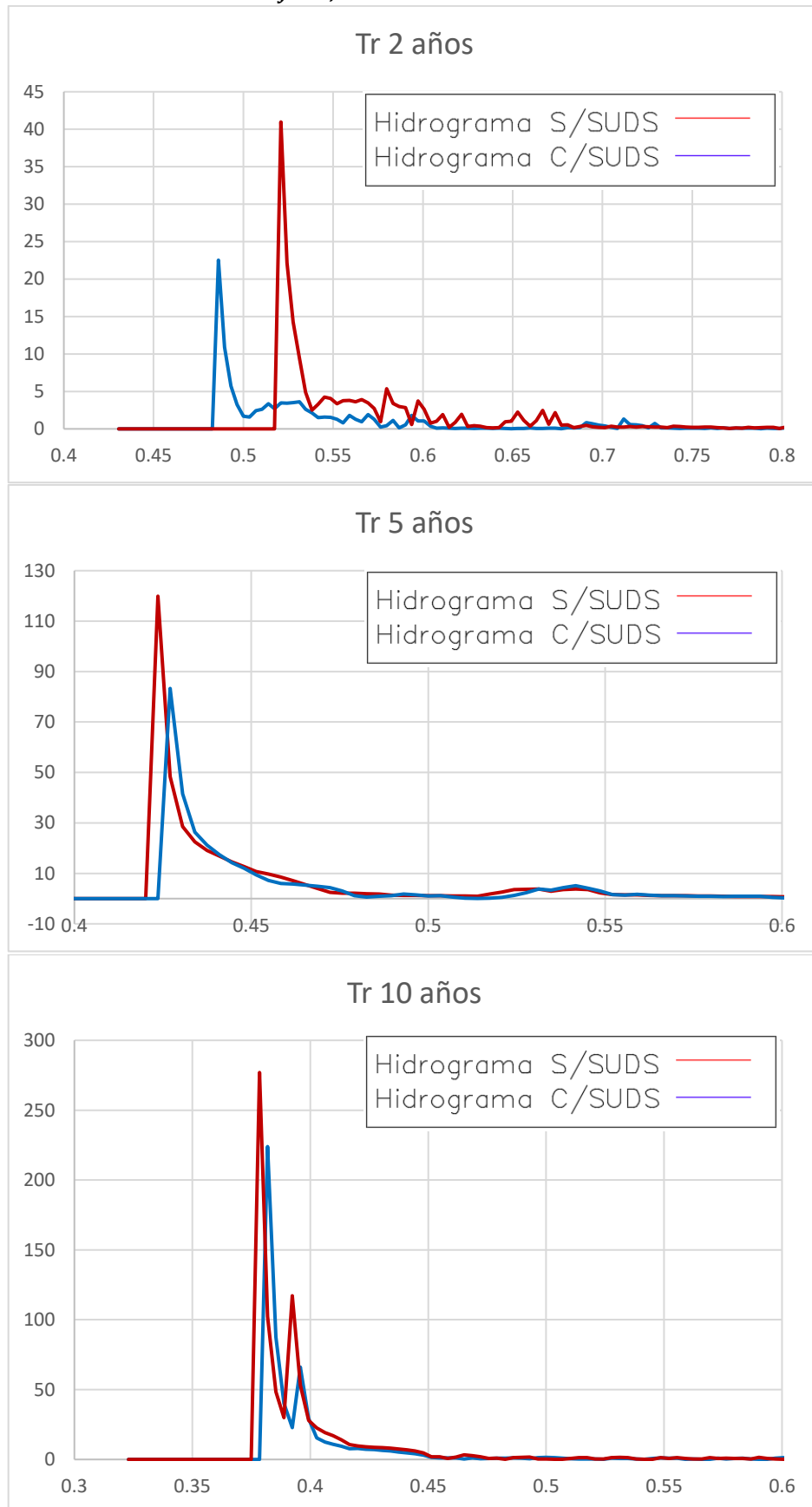


Figura 5. 30. Hidrogramas para los diferentes escenarios.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para los tres períodos de retorno se observa una disminución del gasto al momento de su pico, para comprobar esto se realizó un cálculo del área bajo la curva para los 6 escenarios, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5.1. Volumen del área bajo la curva.

Tr	Volumen S/SUDS	Volumen C/SUDS	Porcentaje de retención	Tiempo de retraso en el pico del hidrograma
2	34971.60128	31224.644	10.71	-0.83 hr
5	107143.8417	96918.898	9.54	0.08 hr
10	143761.9935	132146.331	8.08	0.08 hr

Mediante la Tabla 5.1 se confirma que existe una diferencia en los volúmenes, a favor de la implementación de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible con porcentajes mayores al 10% en cualquiera de los escenarios propuestos. De la misma manera se observa que en relación con el tiempo también existe una diferencia, la cual permite que el flujo llegue un poco más tarde a la vialidad conocida como Río Santiago.

Haciendo énfasis en el escenario para dos años, el pico del hidrograma se presenta antes en el tiempo debido a que este tarda más en llegar al segundo SUDS, sin embargo, con la modelación y el hidrograma final se tiene que, efectivamente ambos SUDS están trabajando y disminuyendo el volumen total de escurrimiento.

Estos escenarios fueron realizados para conocer el escurrimiento en la zona de estudio y el comportamiento del río dentro de la misma. Pero también es importante visualizar las zonas afectadas por una precipitación atípica, es por esto por lo que se tiene el siguiente escenario.

Escenario de precipitación

Al realizar diferentes calibraciones del modelo con un período de retorno de 10 y 25 años se determinó que no eran considerables los resultados, por lo tanto, se realizó el enfoque a un período mayor.

Para este escenario se simuló una lluvia con un período de retorno de 50 años, con una precipitación de 74.6 milímetros de agua por 24 horas.

En este escenario se consideró la batimetría para que el vaso de la presa de San José no estuviera completamente seco, sin embargo, para el cauce y zonas aledañas se manejaron celdas completamente secas para detectar las zonas de inundación.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

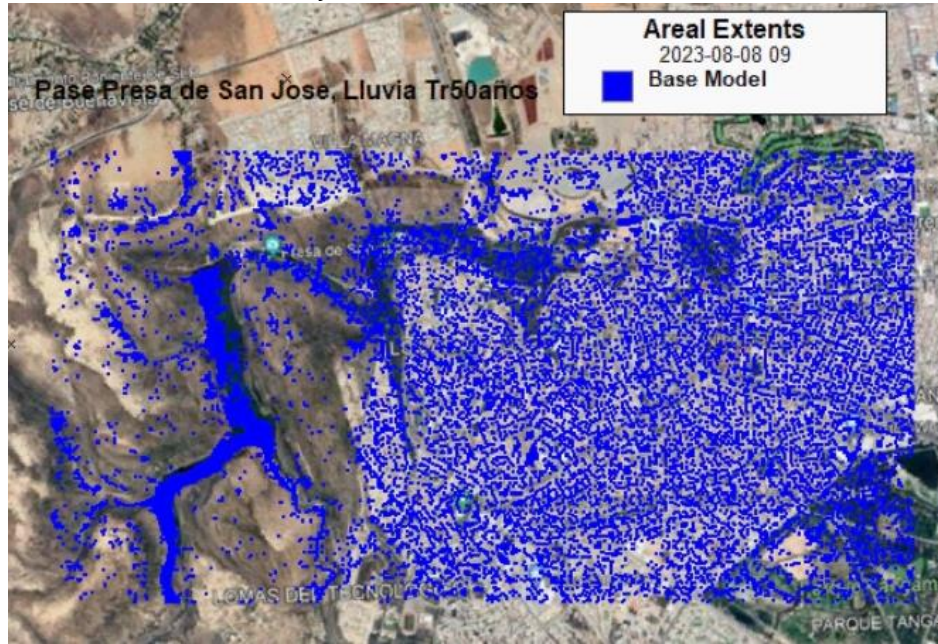


Figura 5. 31. Precipitación para un Tr de 50 años en 2D.

En la Figura 5.31 se observa el modelo, donde solo han transcurrido entre 4 y 5 horas de precipitación continua. Donde el color azul nos esta determinando las zonas en que se va encharcando, por llamarlo de cierta manera, el agua.

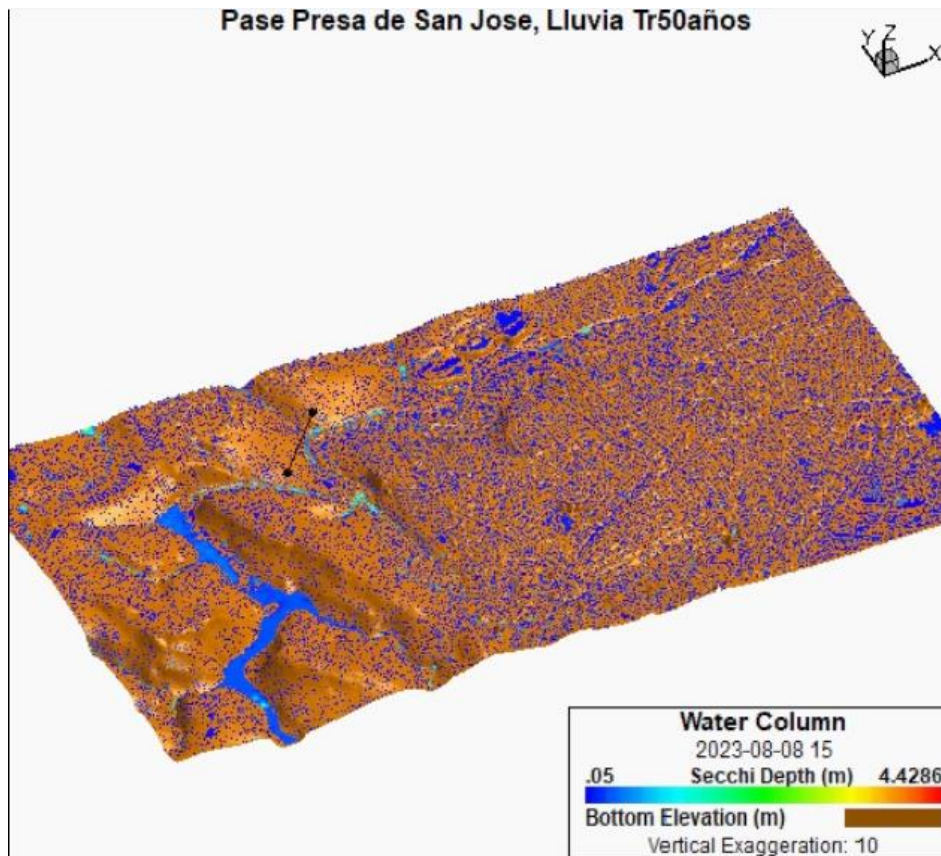


Figura 5. 32. Visualización 3D para una precipitación con un Tr de 50 años en las primeras horas.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Para la Figura 5.32 se observa la precipitación en el mismo período de tiempo que en el anterior, la diferencia es que en esta se puede observar el relieve. Y la concentración del agua en las diferentes zonas.

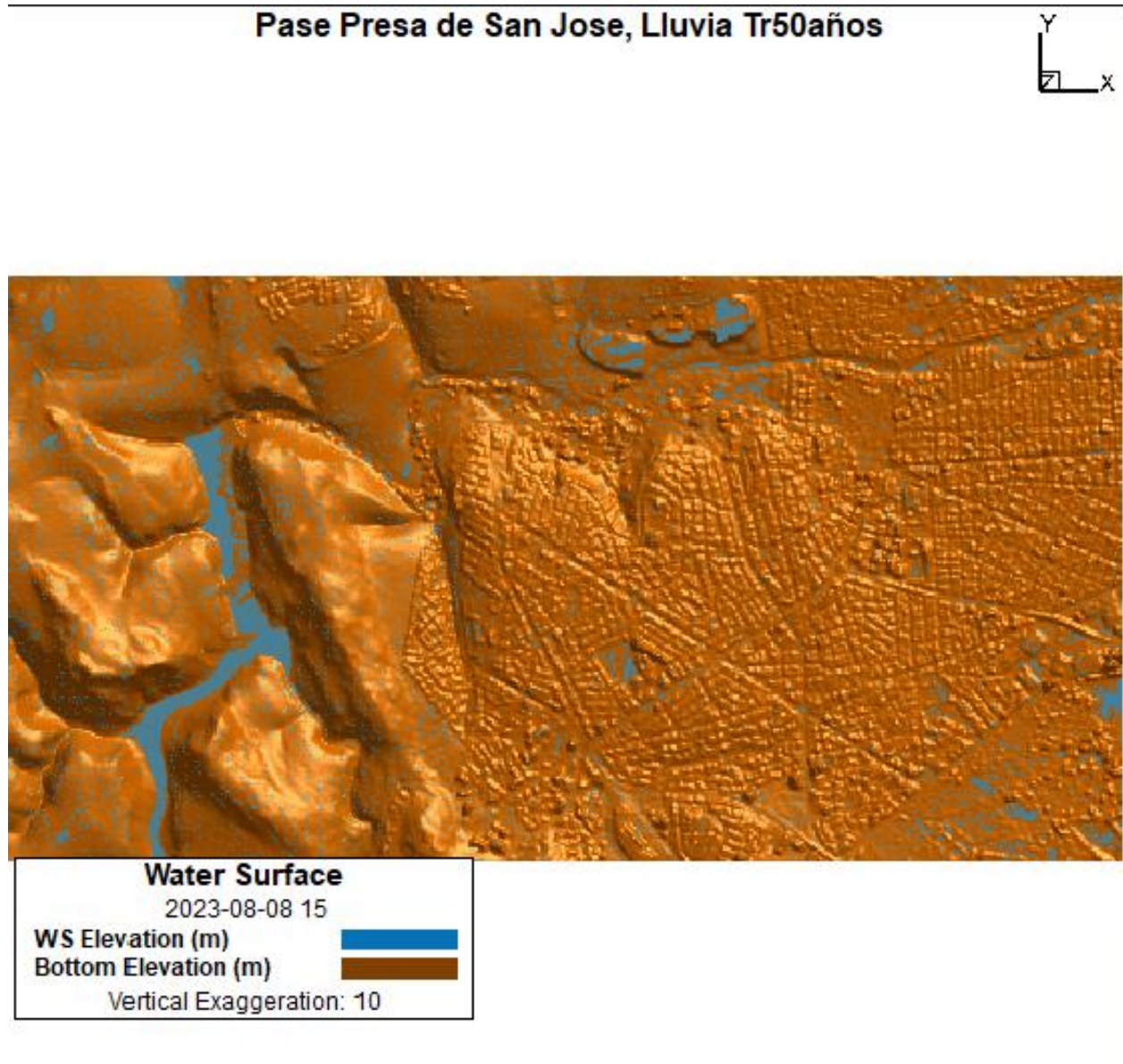


Figura 5. 33. Visualización 3D para una precipitación con un Tr de 50 años en 24hrs.

Finalmente, en la Figura 5.33 observamos el resultado de una precipitación de 24 horas y las zonas que siguen siendo afectadas, en este punto se determinan como zonas de inundación. Algunas de ellas se encuentran dentro del Parque Urbano cerca de las canchas del Atlético de San Luis, y otras en zonas como son Grupo México, el parque Tangamanga 1 y colonias como Morales, lomas, etc.

CONCLUSIONES

Para lograr el objetivo general de esta tesis, fue necesario realizar diferentes análisis, como fue el hidrológico, topo-batimétrico (mediante campañas de medición), hidráulico, entre otros. Que en conjunto permitieron implementar un modelo numérico en el que se simularon los diferentes escenarios en los cuales se observa el comportamiento hidrodinámico del Río Santiago.

Análisis Hidrológico

Esta integrado por la geomorfología de la cuenca, un análisis de información climatológica e hidrométrica obtenida mediante los organismos operadores, cálculos y estimaciones para lluvias máximas probables y los caudales de diseño para los diferentes escenarios planteados. Se tiene que con los métodos utilizados las variaciones son pequeñas es decir que, los valores obtenidos se consideran consistentes, permitiendo caracterizar adecuadamente las condiciones actuales de la Presa de San José.

La información que se requiere para este análisis fue complementada con datos solicitados a la CONAGUA ya que se tenían datos faltantes en las estaciones climatológicas. Permitiendo el análisis y valorar la escurrimiento mediante los registros y obtener los caudales que se podrían tener para los diferentes períodos de retorno y posteriormente introducirlos en los modelos numéricos.

Topo-batimetría

A la zona de estudio se le efectuaron dos campañas de medición de manera satisfactoria, la primera de ellas con el objetivo de obtener la topografía del terreno en alta resolución y las zonas aledañas para caracterizar el terreno y delimitarlo en el modelo numérico mediante un DEM. La segunda de ellas fue con el objetivo de conocer las condiciones hidráulicas tanto de la presa como del río, caracterizando los vertederos y las obras de toma.

Como resulta complejo procesar toda la información generada, para la topografía fue necesario dividir en ocho partes el postprocesamiento y finalmente unificarlos.

Para la batimetría por medio de un análisis de la campaña de medición realizada en años anteriores por Elvia Blanco, se obtuvo el aforo de caudales mediante la batimetría y se dividió en cuatro tramos, de manera que cubriera la mayor superficie del vaso de la presa de San José.

Con dichas campañas se concluye que se determina que la presa se encuentra desde entonces con problemas de azolves ya que su capacidad va disminuyendo con el paso de los años, su topografía ha sido alterada dado que en un inicio este era completamente área verde y en la actualidad se encuentra urbanizado, teniendo un cambio también en el tipo de suelo que afecta directamente al diseño del SUDS.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Gracias a este análisis se obtuvieron los datos necesarios para la caracterización de la zona de estudio, que fueron datos requeridos por el modelo numérico para hacerlo lo más real posible.

Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

Actualmente la disponibilidad de agua en las zonas urbanas representa un desafío importante y se requiere tomar medidas y decisiones en su manejo. Dado esto, se requiere realizar una investigación hacia las nuevas alternativas que el mundo este no solo proponiendo sino ya implementando en base a sus necesidades.

Los SUDS entre sus funciones, tienen la de captar el agua de lluvia para poder reutilizarla. De esta manera se concluye que la captación de agua de lluvia en parques inundables o lineales es una opción real y viable que prueve el aprovechamiento sustentable del agua y a su vez genera una mejora paisajística para el ambiente y la sociedad, áreas recreativas, entre otras.

Permitirán el inicio de una transformación en la zona de estudio a una más respetuosa con el ciclo natural del agua. Donde se da la oportunidad de reutilizar dicho recurso para otras actividades. El proyecto no implica una alteración al área natural protegida, sino una mejora mediante estos sistemas que ya están comprobados en diferentes partes del mundo.

Modelación numérica

Este tipo de modelaciones son herramientas utilizadas para la predicción de la respuesta hidrodinámica del flujo a superficie libre, bajo la validación y calibración del modelo para obtener los resultados alcanzados en los diferentes escenarios.

En esta tesis se trabajó con dos modelos diferentes, el Hec-Ras el cual presentó un ajuste adecuado ante la representación de los resultados, un menor tiempo para la calibración de este y la facilidad de introducir las condiciones de iniciales y de frontera, personalmente es un modelo muy completo y práctico, resolviendo ecuaciones de manera óptima. Se concluye que a través de la simulación del gasto correspondiente a 10 años se observa que ya ocurre un desbordamiento de la presa de San José, inundando de esta manera la Etapa 1 del proyecto. Con el gasto correspondiente a 50 años se observa que no solo el parque urbano se ve con problemas de inundación, sino que también afecta a gran parte de la capital potosina y podría colapsar la ciudad de cierto modo.

En lo que varía con el EFDC es su interpretación de resultados, es decir, en el primero no se puede observar una visualización 3D sin embargo en el segundo sí. Por otro lado, el EFDC permitió realizar escenarios más complejos como los que son los Escenarios con SUDS mediante una innovación dentro del modelo, ya que como se puede observar en los resultados anteriores para los tres períodos de retorno se pueden ver claramente las zonas de SUDS, con esto comprobamos que estos si están trabajando adecuadamente. Comprobando que las hipótesis que se plantearon en un inicio para el proyecto se están cumpliendo.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Mediante la implementación de un SUDS se permitió llevar a cabo escenarios piloto que demuestren la eficiencia de la captación del agua de lluvia en las dos Etapas. Para los diferentes períodos de retorno de 2, 5 y 10 años se observa una retención aproximada del 10% y 7% que se determina como considerable para la zona de estudio, y sus tiempos en cuanto al pico en sus hidrogramas con y sin SUDS también se ven modificados de una manera positiva para el proyecto.

Con ambos modelos se tiene que la presa de San José en condiciones actuales ya no es capaz de controlar los excedentes de agua y simplemente la presa se comienza a desbordar, por esto es importante ponerle la atención necesaria y aplicar soluciones como las que se proponen en este trabajo de tesis.

Finalmente, al realizar un escenario con una precipitación de 50 años se determina que, en las condiciones actuales de la presa y el parque urbano, el Río Santiago no tendría un desbordamiento, sin embargo, existen zonas de peligro para inundaciones.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

REFERENCIAS

- Batimetría con ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) - WaterTechnology.* (s/f). Watertechnology.cl. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <https://watertechnology.cl/servicios/batimetria-con-adcp.html>
- BATIMETRIAS - IDEAM.* (s/f). Gov.co. Recuperado el 24 de agosto de 2023, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/batimetrias>
- Campillos, M. (2017, septiembre 25). *¿Qué es una batimetría y cuáles son sus aplicaciones?* Comunidad ISM. <https://www.comunidadism.es/que-es-una-batimetria-y-cuales-son-sus-aplicaciones/>
- De calor, E. el C. A. V. Q. el O. E. F. a. T. de F., El flujo, M. y. A.). P. lo Q. el O. N. E. en R. y. E. en C. M. E. M. T. las P. del F. y. a. D. T. en T. las E. E. L. T. P. S. T.). o. M. I.). L. D. de L. T. D. de C. S. L. P., & difundan y eventualmente se diluyan., S. (s/f). 3. *Ecuaciones de conservación.* Edu.uy. Recuperado el 29 de agosto de 2023, de http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/oceanografia_dinamica/cap3_2019.pdf
- El grado de, P. O. (s/f). *Análisis de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible en la Ciudad de Morelia, Michoacán: Caso de Estudio “Villas del Pedregal”*, , Tesis. Umich.mx:8083. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/jspui/bitstream/DGB_UMICH/4757/1/FIQ-M-2017-1564.pdf
- Enrique, J., & Valdes, G. (s/f). *UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL MÉTODOS DE AFORO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA DE ACUIFEROS MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL.* Uchile.cl. Recuperado el 1 de agosto de 2023, de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104656/galecio_j.pdf?sequence=3
- Joya, A. F. J. J. (s/f). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) COMO GESTIÓN INTEGRAL EN LA REGULACIÓN Y CONTROL DE AGUAS LLUVIAS; CASO DE ESTUDIO SECTOR EN LA CUIDAD DE BOGOTÁ.* Core.ac.uk. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de <https://core.ac.uk/download/pdf/71895062.pdf>
- Lang, T. (s/f). *Mejor Práctica de Manejo (BMP): Detención de Agua de Lluvia.* Ufl.edu. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de https://erec.ifas.ufl.edu/media/erecifasufledu/docs/pdf/bmpworkshops/2014/04242014_Lopez_Lang_Detencion-de-Precipitacion.pdf

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

- Noguera, I. B. (2020, diciembre 18). ¿Qué son las ecuaciones de estado? *Ingeniería Química Reviews*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/12/ecuaciones-de-estado.html>
- Operaciones Básicas en el Laboratorio de Química. Filtración.* (s/f). Wwww.ub.edu. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de <https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/filtracio.html>
- ¿Qué es un render en arquitectura? (s/f). Recuperado el 29 de agosto de 2023, de <https://www.lumion.es/que-es-render-arquitectura/>
- (S/f-a). Uib.es. Recuperado el 19 de agosto de 2023, de http://observatoriaigua.uib.es/repositori/suds_colombia_suds.pdf
- (S/f-b). Iaea.org. Recuperado el 29 de agosto de 2023, de <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO%20ISOTOPOS/PDF%20Isotopos-VI/Seccion%20VI-4.pdf>
- Pluvial., A. (s/f). CRITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES. Gob.mx. Recuperado el 20 de septiembre de 2023, de https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_3._alcantarillado_pluvial.pdf
- Agisoft LLC. (2021). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7. https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf
- Alvarado, S. (2016). Levantamientos topográficos multitemporales basados en técnicas de fotogrametría aérea. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Estimación del escurrimiento mensual en climas húmedos con base en modelos de regression. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 6(2), 113–130.
- Campos Aranda, D. F. (1984). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Universidad Autónoma de San Luis Potosí (ed.)).
- Campos Aranda, D. F. (2010). *Introducción a la Hidrología Urbana* (Primera Ed).
- Campos Aranda, D. F., & Gómez de Luna, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas ID-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica En México*, 2, 39–52. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Procedimiento+para+obtener+curvas+I-D-Tr+a+partir+de+registros+pluviométricos#0>
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. In McGRA W-HILL INTERAMERICANA (Ed.), Potencia.
- INEGI. (2018). Marco de referencia ITRF en México y su relación con WGS84 y NAD27 (p. 11). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espan

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

ol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825109226.pdf

INEGI. (2021). Red Geodésica Nacional Activa.

https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/

Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Le risque d'inondation et les perspectives de changement climatique mondial et régional.

Hydrological Sciences Journal, 59(1), 1–28.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>

Laguna Zárate, L. F. (2016). Modelación hidrológica e hidráulica del agua pluvial en una zona urbana de la ciudad de San Luis Potosí. 246.

<http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/177201810287142655.pdf>

SEMARNAT. (2011). México y el Cambio Climático Global (C. Conde (ed.); Cuarta rei).

[https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico y el cambio climatico.pdf](https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Cecadesu/Libros/Mexico_y_el_cambio_climatico.pdf)

Taylor, A. B., & Schwarz, H. E. (1952). Unit-hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. Eos, Transactions American Geophysical Union, 33(2), 235–246.

<https://doi.org/10.1029/TR033i002p00235>

Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria, 32(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>

Trimble. (2008). Guía del usuario, Trimble Business Center. Trimble Navigation Limited.

<https://doi.org/10.1787/9789264287877-3-es>

Übel, M. (2021). Los mejores programas de fotogrametría de 2021.

<https://all3dp.com/es/1/mejores-programas-fotogrametria/>

US Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS, River Analysis System. Institute for Water Resources - US Army Corps.

Actualización del Atlas de Riesgo para el Municipio de San Luis Potosí y su zona conurbada. (s/f).

H. Ayuntamiento de San Luis Potosi, S. L. P. (Ed.). (2021). Plan de San Luis.

Ramos, K. O. (septiembre de 2021). Modelación hirdodinámica para la detección de zonas de desbordamiento en el arroyo Garita, ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. UASLP.

Martínez, E. R. B. (septiembre de 2021). Estudio Geoespacial de la hidrodinámica e hidrogeoquímica de las condiciones actuales del agua de la presa de San José. UASLP.

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Castro Fresno, D., Rodríguez Bayón, J., Rodríguez Hernández, J., & Ballester Muñoz, F. (2005). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (Suds). *Interciencia*, 30(5), 255–260. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000500004

Comisión Estatal del Agua SLP - Dren Central del Río Santiago | Facebook. (s/f).

GlobalMedia. (s/f). Río Santiago, la vialidad que nunca debió ser boulevard. GlobalMedia. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://www.globalmedia.mx/articulos/R%C3%ADo-Santiago-la-vialidad-que-nunca-debi%C3%B3-ser-boulevard>

Potosi, C. S. L. (s/f). 1894 presa de San José. *Cronologías San Luis Potosi*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <http://cronologiasanluispotosi.com/1894-presade-san-jose.html>

Presas San José, Bulevar Río Santiago, Presa San Antonio, Presa San Carlos y Construcción de Presa La Cantera, San Luis Potosí. (s/f).

Ruiz, A. (s/f). Presa San José, muestra de imponente ingeniería. *El Sol de San Luis | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, San Luis Potosí y el Mundo*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://www.elsoldesanluis.com.mx/local/presa-san-jose-muestra-de-imponente-ingenieria-5624915.html>

Sañudo-Fontaneda, L. A., Robleda-Alvarez, F., Fernández Carrio, R., Costales-Campa, C., & Vallina Pita, N. (2018). Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible y el nuevo paradigma del diseño de las calles verdes para la gestión de las aguas pluviales: Una propuesta para la ciudad histórica de Oviedo. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 8(2), 35–44. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2007>

Semana lluviosa rebasa capacidad de presa San José. (s/f). *Pulso Diario San Luis*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://pulsoslp.com.mx/slp/semana-lluviosa-rebasa-capacidad-de-presa-san-jose/1315067>

Tarazona-Tobo, L. V., Bonilla-Granados, C. A., & Rojas-Suárez, J. P. (2021). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS): una alternativa integral para el manejo de las aguas lluvias. *Mundo FESC*, 11(21), 140–155. <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/628>

Torres, J. L. (s/f). La presa de San José, área natural protegida en la modalidad de parque urbano y su integración al crecimiento de la cd. de San Luis Potosí. *Critica.cl*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <http://critica.cl/medio-ambiente/la-presa-de-san-jose-area-natural-protegida-en-la-modalidad-de-parque-urbano-y-su-integracion-al-crecimiento-de-la-cd-de-san-luis-potosi>

Tristán, M. (s/f). Urge proyecto que ayude a aprovechar agua que se desfoga de presa San José. *El Sol de San Luis | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, San Luis Potosí y el Mundo*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

<https://www.elsoldesanluis.com.mx/local/urges-proyecto-que-ayude-a-aprovechar-agua-que-se-desfoga-de-la-presa-san-jose-6916294.html>

You are being redirected. (s/f). Gob.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <http://congresosanluis.gob.mx/content/informaci%C3%B3n-sobre-construcci%C3%B3n-de-dren-central-del-r%C3%ADo-santiago>

(S/f-a). Org.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825224240/702825224240_9.pdf

(S/f-b). Repositorioinstitucional.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://colsan.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1013/341/1/El%20acceso%20al%20agua%20de%20uso%20dom%C3%A9stico%20en%20el%20mpio%20de%20SLP%2C%20el%20caso%20de%20Escalerillas.pdf>

(S/f-c). Gob.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://sic.cultura.gob.mx/documentos/2243.pdf>

(S/f-d). Uaslp.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/cciudadflujos/Proyectos/Rio%20Santiago.pdf>

(S/f-e). Com.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://sanluis.eluniversal.com.mx/tags/dren-central>

(S/f-f). Gob.mx. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/dc-josefranciscomuniz-miginterapas.pdf>

Presa San José: Un gigante de la ingeniería hidráulica en SLP. (2021, septiembre 9). Líder Empresarial. <https://www.liderempresarial.com/presa-san-jose-un-gigante-de-la-ingenieria-hidraulica-en-slp/>

Ruiz, A. (s/f). Presa San José, muestra de imponente ingeniería. El Sol de San Luis | Noticias Locales, Policiacas, sobre México, San Luis Potosí y el Mundo. Recuperado el 12 de enero de 2022, de <https://www.elsoldesanluis.com.mx/local/presa-san-jose-muestra-de-imponente-ingenieria-5624915.html>

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

ANEXOS

Anexo 2.1. Datos del perfil del cauce principal

Perfil del cauce		
Elevación	Distancia	Distancia acumulada
(msnm)	(m)	(m)
2700	0.00	0.00
2690	27.40	27.40
2680	9.00	36.40
2670	30.70	67.10
2660	29.90	97.00
2650	7.60	104.60
2640	31.00	135.60
2630	12.20	147.80
2620	30.40	178.20
2610	54.40	232.60
2600	60.10	292.70
2590	82.70	375.40
2580	67.50	442.90
2570	122.70	565.60
2560	160.90	726.50
2550	119.10	845.60
2540	64.80	910.40
2530	15.30	925.70
2520	32.90	958.60
2510	60.00	1018.60
2500	69.80	1088.40
2490	34.00	1122.40
2480	66.00	1188.40
2470	29.20	1217.60
2460	289.14	1506.74
2450	262.80	1769.54
2440	497.50	2267.04
2430	590.90	2857.94
2420	512.20	3370.14
2410	146.20	3516.34
2400	39.19	3555.53
2390	1352.30	4907.83
2380	586.80	5494.63
2370	333.00	5827.63
2360	734.50	6562.13
2350	214.70	6776.83
2340	259.90	7036.73
2330	298.30	7335.03

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

2320	391.90	7726.93
2310	650.90	8377.83
2300	377.90	8755.73
2290	219.50	8975.23
2280	351.70	9326.93
2270	377.00	9703.93
2260	228.00	9931.93
2250	556.50	10488.43
2240	56.50	10544.93
2230	227.90	10772.83
2220	493.00	11265.83
2210	505.10	11770.93
2200	186.90	11957.83
2190	445.40	12403.23
2180	494.90	12898.13
2170	510.20	13408.33
2160	400.10	13808.43
2150	361.90	14170.33
2140	351.30	14521.63
2130	363.40	14885.03
2120	531.70	15416.73
2110	560.70	15977.43
2100	512.70	16490.13
2090	547.60	17037.73
2080	521.50	17559.23
2070	528.80	18088.03
2060	416.90	18504.93
2050	601.40	19106.33
2040	411.00	19517.33
2030	433.70	19951.03
2020	507.10	20458.13
2010	489.70	20947.83
2000	490.30	21438.13
1990	678.10	22116.23
1980	1116.00	23232.23
1970	1217.60	24449.83
1960	493.40	24943.23
1950	2029.50	26972.73
1940	1230.40	28203.13
1930	1778.10	29981.23
1920	915.80	30897.03
1910	8532.00	39429.03

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Tabla B-4, coeficiente g.

Coef. Asimetría	Período de retorno en años										
	1.01	1.053	1.111	1.25	2	5	10	25	50	100	500
Cs o g	Probabilidad de no excedencia P (X ≤ x), en %										
	1	5	10	20	50	80	90	96	98	99	99.8
3.00	-	-	-	-	-	0.420	1.180	2.278	3.152	4.051	6.205
2.90	-	-	-	-	-	0.440	1.195	2.227	3.152	4.013	6.112
2.80	-	-	-	-	-	0.460	1.210	2.275	3.114	3.973	6.019
2.70	-	-	-	-	-	0.479	1.224	2.272	3.093	3.932	5.923
2.60	-	-	-	-	-	0.499	1.238	2.267	3.071	3.889	5.826
2.50	-	-	-	-	-	0.518	1.250	2.262	3.048	3.845	5.728
2.40	-	-	-	-	-	0.537	1.262	2.256	3.023	3.800	5.628
2.30	-	-	-	-	-	0.555	1.274	2.248	2.997	3.753	5.527
2.20	-	-	-	-	-	0.574	1.284	2.240	2.970	3.705	5.424
2.10	-	-	-	-	-	0.592	1.294	2.230	2.942	3.656	5.320
2.00	-0.99	0.949	0.895	0.777	0.307	0.609	1.302	2.219	2.912	3.605	5.215
1.90	-	-	-	-	-	0.627	1.310	2.207	2.881	3.553	5.108
1.80	-	-	-	-	-	0.643	1.318	2.193	2.848	3.499	4.999
1.70	-1.14	1.056	0.970	0.808	0.268	0.660	1.324	2.179	2.815	3.444	4.890
1.60	-	-	-	-	-	0.675	1.329	2.163	2.780	2.288	4.779
1.50	-	-	-	-	-	0.690	1.333	2.146	2.743	3.330	4.667
1.40	-	-	-	-	-	0.705	1.337	2.128	2.706	3.271	4.553
1.30	-	-	-	-	-	0.719	1.339	2.108	2.666	3.211	4.438
1.20	-	-	-	-	-	0.732	1.340	2.087	2.626	3.149	4.323
1.10	-	-	-	-	-	0.745	1.341	2.066	2.585	3.087	4.206
1.00	-	-	-	-	-	0.758	1.340	2.043	2.542	3.022	4.088

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

0.90	-1.66	-	-	-	-	0.769	1.339	2.018	2.498	2.957	3.969
0.80	-	-	-	-	-	0.780	1.336	1.993	2.453	2.891	3.850
0.70	-	-	-	-	-	0.790	1.333	1.967	2.407	2.824	3.730
0.60	-1.88	-	-	-	-	0.800	1.328	1.939	2.359	2.755	3.609
0.50	-	-	-	-	-	0.808	1.323	1.910	2.311	2.686	3.487
0.40	-	-	-	-	-	0.816	1.317	1.880	2.261	2.615	3.366
0.30	-	-	-	-	-	0.824	1.309	1.849	2.211	2.544	3.244
0.20	-	-	-	-	-	0.830	1.301	1.818	2.159	2.472	3.122
0.10	-	-	-	-	-	0.836	1.292	1.785	2.107	2.400	3.000
-	-	-	-	-	-	0.842	1.282	1.751	2.054	2.326	2.878
0.10	-2.4	-	-	-	-	0.846	1.270	1.716	2.000	2.252	2.757
0.20	-	-	-	-	-	0.850	1.258	1.680	1.945	2.178	2.637
0.30	-	-	-	-	-	0.853	1.245	1.643	1.890	2.104	2.517
0.40	-	-	-	-	-	0.855	1.231	1.606	1.834	2.029	2.399
0.50	-	-	-	-	-	0.856	1.216	1.567	1.777	1.955	2.283
0.60	-	-	-	-	-	0.857	1.200	1.528	1.720	1.880	2.169
0.70	-	-	-	-	-	0.857	1.183	1.488	1.663	1.806	2.057
0.80	-	-	-	-	-	0.856	1.166	1.448	1.606	1.733	1.948
0.90	-	-	-	-	-	0.854	1.147	1.407	1.549	1.660	1.842
1.00	-	-	-	-	-	0.852	1.128	1.366	1.492	1.588	1.740
1.10	-	-	-	-	-	0.848	1.107	1.324	1.435	1.518	1.643
1.20	-	-	-	-	-	0.844	1.086	1.282	1.379	1.449	1.550
1.30	-	-	-	-	-	0.838	1.064	1.240	1.324	1.383	1.462
1.40	-	-	-	-	-	0.832	1.041	1.198	1.270	1.318	1.380

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

-	1.50	-3.33	1.951	1.333	0.690	0.240	0.825	1.018	1.157	1.217	1.256	1.303
-	1.60	3.388	1.962	1.329	0.675	0.254	0.817	0.994	1.116	1.166	1.197	1.231
-	1.70	3.444	1.972	1.324	0.660	0.268	0.808	0.970	1.075	1.116	1.140	1.165
-	1.80	3.499	1.981	1.318	0.643	0.282	0.799	0.945	1.035	1.069	1.087	1.104
-	1.90	3.535	1.989	1.310	0.627	0.294	0.788	0.920	0.996	1.023	1.037	1.049
-	2.00	3.605	1.996	1.302	0.609	0.307	0.777	0.895	0.959	0.980	0.990	0.998
-	2.10	3.656	2.001	1.294	0.592	0.319	0.765	0.869	0.923	0.939	0.946	0.951
-	2.20	3.705	2.006	1.284	0.574	0.330	0.752	0.844	0.888	0.900	0.905	0.908
-	2.30	3.753	2.009	1.274	0.555	0.341	0.739	0.819	0.855	0.864	0.867	0.869
-	2.40	-3.8	2.011	1.262	0.537	0.351	0.725	0.795	0.823	0.830	0.832	0.863
-	2.50	-3.85	2.012	1.250	0.518	0.360	0.711	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800
-	2.60	3.889	2.013	1.238	0.499	0.368	0.696	0.747	0.764	0.768	0.769	0.769
-	2.70	3.932	2.102	1.224	0.479	0.376	0.681	0.724	0.738	0.74	0.740	0.741
-	2.80	3.972	2.010	1.210	0.460	0.384	0.666	0.702	0.712	0.714	0.714	0.714
-	2.90	4.013	2.007	1.195	0.440	0.390	0.651	0.681	0.683	0.689	0.690	0.690
-	3.00	4.051	2.003	-1.18	-0.42	0.396	0.636	0.66	0.666	0.666	0.667	0.667

Anexo 2.2. Distribución de probabilidad Log-Pearson III

LOG-PEARSON TIPO III						
	LLUVIA (mm)	Tr	P(X<=x)	K	log(X)	X
1	81.48	56.00	0.98667	1.6534	1.83026	67.65
2	70.46	28.00	0.97333	1.5249	1.81298	65.01
3	69.40	18.67	0.96000	1.4254	1.79961	63.04
4	67.39	14.00	0.94667	1.3654	1.79155	61.88
5	66.96	11.20	0.93333	1.3055	1.78349	60.74
6	66.75	9.33	0.92000	1.2455	1.77543	59.63
7	63.57	8.00	0.90667	1.1855	1.76737	58.53
8	62.51	7.00	0.89333	1.1355	1.76064	57.63
9	62.51	6.22	0.88000	1.0954	1.75525	56.92

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

10	61.45	5.60	0.86667	1.0553	1.74987	56.22
11	60.61	5.09	0.85333	1.0152	1.74448	55.52
12	60.07	4.67	0.84000	0.9751	1.73909	54.84
13	58.28	4.31	0.82667	0.9351	1.73370	54.16
14	55.61	4.00	0.81333	0.8950	1.72831	53.49
15	55.10	3.73	0.80000	0.8549	1.72292	52.84
16	54.04	3.50	0.78667	0.8232	1.71866	52.32
17	53.93	3.29	0.77333	0.7914	1.71439	51.81
18	51.49	3.11	0.76000	0.7597	1.71013	51.30
19	49.97	2.95	0.74667	0.7280	1.70586	50.80
20	49.57	2.80	0.73333	0.6962	1.70159	50.30
21	49.27	2.67	0.72000	0.6645	1.69733	49.81
22	49.27	2.55	0.70667	0.6327	1.69306	49.32
23	48.85	2.43	0.69333	0.6010	1.68879	48.84
24	48.21	2.33	0.68000	0.5693	1.68453	48.36
25	48.00	2.24	0.66667	0.5375	1.68026	47.89
26	47.26	2.15	0.65333	0.5058	1.67599	47.42
27	47.15	2.07	0.64000	0.4741	1.67173	46.96
28	46.62	2.00	0.62667	0.4423	1.66746	46.50
29	45.88	1.93	0.61333	0.4106	1.66320	46.05
30	45.46	1.87	0.60000	0.3788	1.65893	45.60
31	45.35	1.81	0.58667	0.3471	1.65466	45.15
32	45.24	1.75	0.57333	0.3154	1.65040	44.71
33	45.03	1.70	0.56000	0.2836	1.64613	44.27
34	44.40	1.65	0.54667	0.2519	1.64186	43.84
35	43.97	1.60	0.53333	0.2202	1.63760	43.41
36	43.44	1.56	0.52000	0.1884	1.63333	42.99
37	42.91	1.51	0.50667	0.1567	1.62907	42.57
38	42.59	1.47	0.49333	0.1205	1.62420	42.09
39	42.59	1.44	0.48000	0.0798	1.61874	41.57
40	42.38	1.40	0.46667	0.0392	1.61327	41.05
41	41.75	1.37	0.45333	-0.0015	1.60780	40.53
42	39.73	1.33	0.44000	-0.0421	1.60234	40.03
43	38.04	1.30	0.42667	-0.0828	1.59687	39.53
44	37.61	1.27	0.41333	-0.1234	1.59141	39.03
45	37.61	1.24	0.40000	-0.1641	1.58594	38.54
46	37.25	1.22	0.38667	-0.2048	1.58048	38.06
47	37.08	1.19	0.37333	-0.2454	1.57501	37.58
48	36.24	1.17	0.36000	-0.2861	1.56955	37.11
49	35.50	1.14	0.34667	-0.3267	1.56408	36.65
50	33.91	1.12	0.33333	-0.3674	1.55862	36.19
51	33.51	1.10	0.32000	-0.4080	1.55315	35.74
52	33.38	1.08	0.30667	-0.4487	1.54769	35.29
53	33.38	1.06	0.29333	-0.4893	1.54222	34.85
54	33.38	1.04	0.28000	-0.5300	1.53676	34.42
55	33.16	1.02	0.26667	-0.5707	1.53129	33.99
56	31.79	1.00	0.25333	-0.6113	1.52583	33.56
57	31.57	0.98	0.24000	-0.6520	1.52036	33.14
58	30.50	0.97	0.22667	-0.6926	1.51490	32.73
59	30.20	0.95	0.21333	-0.7333	1.50943	32.32

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

60	30.09	0.93	0.20000	-0.7739	1.50397	31.91
61	29.40	0.92	0.18667	-0.6523	1.52032	33.14
62	28.82	0.90	0.17333	-0.5306	1.53667	34.41
63	27.97	0.89	0.16000	-0.4090	1.55302	35.73
64	27.55	0.88	0.14667	-0.2873	1.56938	37.10
65	27.44	0.86	0.13333	-0.1657	1.58573	38.52
66	26.91	0.85	0.12000	-0.0440	1.60208	40.00
67	23.73	0.84	0.10667	0.0776	1.61843	41.54
68	23.31	0.82	0.09333	-0.1266	1.59098	38.99
69	22.87	0.81	0.08000	-0.6567	1.51972	33.09
70	22.78	0.80	0.06667	-1.1868	1.44846	28.08
71	21.93	0.79	0.05333	-1.7169	1.37720	23.83
72	21.83	0.78	0.04000	-2.1189	1.32316	21.05
73	20.83	0.77	0.02667	-2.4783	1.27486	18.83
74	16.85	0.76	0.01333	-2.8376	1.22656	16.85

Tabla B-5, Factor de forma a.

Parámetro de Forma a	Probabilidad (P(X≤x))								
	0.001	0.01	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.95	0.995
0.5	0	0	0	0.11	0.32	1.16	1.91	2.7	5.57
0.6	0	0	0	0.13	0.41	1.28	2.02	2.79	5.48
0.7	0	0	0	0.21	0.49	1.38	2.1	2.85	5.41
0.8	0	0	0	0.26	0.56	1.46	2.17	2.9	5.37
0.9	0	0	0	0.31	0.66	1.54	2.24	2.95	5.33
1.0	0	0	0.11	0.36	0.69	1.61	2.3	3	5.3
1.5	0	0	0.24	0.58	0.97	1.9	2.55	3.19	5.24
2.0	0	0.1	0.37	0.78	1.19	2.12	2.75	3.36	5.26
2.5	0	0.17	0.51	0.95	1.38	2.31	2.92	3.5	5.3
3.0	0.11	0.24	0.63	1.1	1.54	2.47	3.07	3.64	5.36
3.5	0.14	0.3	0.75	1.25	1.7	2.62	3.21	3.76	5.41
4.0	0.21	0.41	0.87	1.38	1.84	2.76	3.34	3.88	5.49
4.5	0.26	0.49	0.98	1.51	1.97	2.89	3.46	3.99	5.56
5.0	0.32	0.57	1.09	1.62	2.09	3.01	3.58	4.09	5.63
6.0	0.41	0.72	1.29	1.84	2.31	3.23	3.79	4.29	5.78
7.0	0.57	0.88	1.47	2.04	2.52	3.43	3.98	4.48	5.92
8.0	0.69	1.02	1.64	2.23	2.71	3.62	4.16	4.65	6.06
9.0	0.81	1.16	1.81	2.47	2.89	3.79	4.33	4.81	6.19
10.0	0.93	1.31	1.97	2.57	3.06	3.96	4.49	4.97	6.34
11.0	1.04	1.43	2.12	2.73	3.22	4.12	4.46	5.12	6.45
12.0	1.16	1.56	2.26	2.88	3.37	4.27	4.79	5.26	6.58
13.0	1.27	1.69	2.4	3.02	3.51	4.39	4.83	5.4	6.7
14.0	1.39	1.81	2.53	3.16	3.65	4.55	5.07	5.53	6.82
15.0	1.49	1.93	2.66	3.29	3.79	4.68	5.2	5.65	6.93

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

Anexos 2.3. Distribución de probabilidad Gamma Incompleta

GAMMA INCOMPLETA					
	LLUVIA (mm)	Tr	P(X<=x)	u	X
1	81.48	56.00	0.98667	6.234	80.49
2	70.46	28.00	0.97333	5.924	76.48
3	69.40	18.67	0.96000	5.613	72.47
4	67.39	14.00	0.94667	5.343	68.99
5	66.96	11.20	0.93333	5.195	67.07
6	66.75	9.33	0.92000	5.047	65.16
7	63.57	8.00	0.90667	4.899	63.24
8	62.51	7.00	0.89333	4.794	61.90
9	62.51	6.22	0.88000	4.734	61.12
10	61.45	5.60	0.86667	4.674	60.34
11	60.61	5.09	0.85333	4.614	59.57
12	60.07	4.67	0.84000	4.554	58.79
13	58.28	4.31	0.82667	4.494	58.02
14	55.61	4.00	0.81333	4.433	57.24
15	55.10	3.73	0.80000	4.373	56.46
16	54.04	3.50	0.78667	4.334	55.96
17	53.93	3.29	0.77333	4.295	55.45
18	51.49	3.11	0.76000	4.256	54.94
19	49.97	2.95	0.74667	4.216	54.44
20	49.57	2.80	0.73333	4.177	53.93
21	49.27	2.67	0.72000	4.138	53.42
22	49.27	2.55	0.70667	4.099	52.92
23	48.85	2.43	0.69333	4.059	52.41
24	48.21	2.33	0.68000	4.020	51.90
25	48.00	2.24	0.66667	3.981	51.40
26	47.26	2.15	0.65333	3.942	50.89
27	47.15	2.07	0.64000	3.902	50.38
28	46.62	2.00	0.62667	3.863	49.88
29	45.88	1.93	0.61333	3.824	49.37
30	45.46	1.87	0.60000	3.785	48.86
31	45.35	1.81	0.58667	3.746	48.36
32	45.24	1.75	0.57333	3.706	47.85
33	45.03	1.70	0.56000	3.667	47.34
34	44.40	1.65	0.54667	3.628	46.84
35	43.97	1.60	0.53333	3.589	46.33
36	43.44	1.56	0.52000	3.549	45.82
37	42.91	1.51	0.50667	3.510	45.32
38	42.59	1.47	0.49333	3.474	44.85
39	42.59	1.44	0.48000	3.442	44.43

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

40	42.38	1.40	0.46667	3.409	44.01
41	41.75	1.37	0.45333	3.376	43.59
42	39.73	1.33	0.44000	3.344	43.17
43	38.04	1.30	0.42667	3.311	42.75
44	37.61	1.27	0.41333	3.278	42.32
45	37.61	1.24	0.40000	3.246	41.90
46	37.25	1.22	0.38667	3.213	41.48
47	37.08	1.19	0.37333	3.180	41.06
48	36.24	1.17	0.36000	3.148	40.64
49	35.50	1.14	0.34667	3.115	40.21
50	33.91	1.12	0.33333	3.082	39.79
51	33.51	1.10	0.32000	3.050	39.37
52	33.38	1.08	0.30667	3.017	38.95
53	33.38	1.06	0.29333	2.980	38.47
54	33.38	1.04	0.28000	2.939	37.94
55	33.16	1.02	0.26667	2.897	37.40
56	31.79	1.00	0.25333	2.856	36.87
57	31.57	0.98	0.24000	2.815	36.34
58	30.50	0.97	0.22667	2.773	35.80
59	30.20	0.95	0.21333	2.732	35.27
60	30.09	0.93	0.20000	2.691	34.74
61	29.40	0.92	0.18667	2.649	34.20
62	28.82	0.90	0.17333	2.608	33.67
63	27.97	0.89	0.16000	2.567	33.14
64	27.55	0.88	0.14667	2.525	32.60
65	27.44	0.86	0.13333	2.484	32.07
66	26.91	0.85	0.12000	2.443	31.53
67	23.73	0.84	0.10667	2.401	31.00
68	23.31	0.82	0.09333	2.328	30.06
69	22.87	0.81	0.08000	2.223	28.70
70	22.78	0.80	0.06667	2.118	27.35
71	21.93	0.79	0.05333	2.013	25.99
72	21.83	0.78	0.04000	1.908	24.63
73	20.83	0.77	0.02667	1.803	23.28
74	16.85	0.76	0.01333	1.698	21.92

Tabla B-8, Constantes en función del tamaño de la muestra n.

n	\bar{Y}_n	σ_n	n	\bar{Y}_n	σ_n	n	\bar{Y}_n	σ_n	n	\bar{Y}_n	σ_n
8	0.4843	0.9043	28	0.5343	1.1047	48	0.5477	1.1574	76	0.5561	1.1906
9	0.4902	0.9288	29	0.5353	1.1086	49	0.5481	1.159	78	0.5565	1.1923
10	0.4952	0.9497	30	0.5362	1.1124	50	0.5485	1.1607	80	0.5569	1.1938

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

11	0.5996	0.9676	31	0.5371	1.1159	51	0.5489	1.1623	82	0.5572	1.1953
12	0.5035	0.9833	32	0.538	1.1193	52	0.5493	1.1638	84	0.5576	1.1967
13	0.507	0.9972	33	0.5388	1.1226	53	0.5497	1.1653	86	0.558	1.198
14	0.51	1.0095	34	0.5396	1.1255	54	0.5501	1.1667	88	0.5583	1.1994
15	0.5128	1.0206	35	0.5403	1.1285	55	0.5504	1.1681	90	0.5586	1.2007
16	0.5157	1.0316	36	0.541	1.1313	56	0.5508	1.1696	92	0.5589	1.202
17	0.5181	1.0411	37	0.5418	1.1339	57	0.5511	1.1708	94	0.5592	1.2032
18	0.5202	1.0493	38	0.5424	1.1363	58	0.5515	1.1721	96	0.5595	1.2044
19	0.522	1.0566	39	0.543	1.1388	59	0.5518	1.1734	98	0.5598	1.2055
20	0.5236	1.0628	40	0.5436	1.1413	60	0.5521	1.1747	100	0.56	1.2065
21	0.5252	1.0696	41	0.5442	1.1436	62	0.5527	1.177	150	0.5646	1.2253
22	0.5268	1.0754	42	0.5448	1.1458	64	0.5533	1.1793	200	0.5672	1.236
23	0.5283	1.0811	43	0.5453	1.148	66	0.5538	1.1814	250	0.5688	1.2429
24	0.5296	1.0864	44	0.5458	1.1499	68	0.5543	1.1834	300	0.5699	1.2479
25	0.5309	1.0915	45	0.5463	1.1519	70	0.5548	1.1854	500	0.5724	1.2588
26	0.532	1.0961	46	0.5468	1.1538	72	0.5552	1.1873	1000	0.5745	1.2685
27	0.5332	1.1004	47	0.5473	1.1557	74	0.5557	1.189	∞	0.5772	1.2826

Anexo 2.4. Distribución de probabilidad Gumbel Simple.

GUMBEL SIMPLE					
	LLUVIA (mm)	Tr	P(X<=x)	y	X
1	81.48	56.00	0.98667	4.31078	87.86
2	70.46	28.00	0.97333	3.61086	80.13
3	69.40	18.67	0.96000	3.19853	75.57
4	67.39	14.00	0.94667	2.90391	72.31
5	66.96	11.20	0.93333	2.67375	69.77
6	66.75	9.33	0.92000	2.48433	67.68
7	63.57	8.00	0.90667	2.32299	65.89
8	62.51	7.00	0.89333	2.18218	64.34
9	62.51	6.22	0.88000	2.05703	62.95
10	61.45	5.60	0.86667	1.94421	61.71
11	60.61	5.09	0.85333	1.84134	60.57
12	60.07	4.67	0.84000	1.74667	59.52
13	58.28	4.31	0.82667	1.65887	58.55
14	55.61	4.00	0.81333	1.57690	57.65
15	55.10	3.73	0.80000	1.49994	56.79
16	54.04	3.50	0.78667	1.42732	55.99
17	53.93	3.29	0.77333	1.35850	55.23
18	51.49	3.11	0.76000	1.29303	54.51
19	49.97	2.95	0.74667	1.23053	53.82
20	49.57	2.80	0.73333	1.17068	53.16
21	49.27	2.67	0.72000	1.11321	52.52
22	49.27	2.55	0.70667	1.05787	51.91
23	48.85	2.43	0.69333	1.00445	51.32
24	48.21	2.33	0.68000	0.95279	50.75

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”

25	48.00	2.24	0.66667	0.90272	50.19
26	47.26	2.15	0.65333	0.85410	49.66
27	47.15	2.07	0.64000	0.80679	49.13
28	46.62	2.00	0.62667	0.76070	48.62
29	45.88	1.93	0.61333	0.71571	48.13
30	45.46	1.87	0.60000	0.67173	47.64
31	45.35	1.81	0.58667	0.62867	47.17
32	45.24	1.75	0.57333	0.58647	46.70
33	45.03	1.70	0.56000	0.54504	46.24
34	44.40	1.65	0.54667	0.50432	45.79
35	43.97	1.60	0.53333	0.46425	45.35
36	43.44	1.56	0.52000	0.42476	44.91
37	42.91	1.51	0.50667	0.38581	44.48
38	42.59	1.47	0.49333	0.34733	44.06
39	42.59	1.44	0.48000	0.30929	43.64
40	42.38	1.40	0.46667	0.27162	43.22
41	41.75	1.37	0.45333	0.23430	42.81
42	39.73	1.33	0.44000	0.19726	42.40
43	38.04	1.30	0.42667	0.16046	41.99
44	37.61	1.27	0.41333	0.12386	41.59
45	37.61	1.24	0.40000	0.08742	41.18
46	37.25	1.22	0.38667	0.05109	40.78
47	37.08	1.19	0.37333	0.01483	40.38
48	36.24	1.17	0.36000	-0.02142	39.98
49	35.50	1.14	0.34667	-0.05769	39.58
50	33.91	1.12	0.33333	-0.09405	39.18
51	33.51	1.10	0.32000	-0.13053	38.77
52	33.38	1.08	0.30667	-0.16720	38.37
53	33.38	1.06	0.29333	-0.20412	37.96
54	33.38	1.04	0.28000	-0.24135	37.55
55	33.16	1.02	0.26667	-0.27896	37.13
56	31.79	1.00	0.25333	0.00000	40.22
57	31.57	0.98	0.24000	0.00000	40.22
58	30.50	0.97	0.22667	0.00000	40.22
59	30.20	0.95	0.21333	0.00000	40.22
60	30.09	0.93	0.20000	0.00000	40.22
61	29.40	0.92	0.18667	0.00000	40.22
62	28.82	0.90	0.17333	0.00000	40.22
63	27.97	0.89	0.16000	0.00000	40.22
64	27.55	0.88	0.14667	0.00000	40.22
65	27.44	0.86	0.13333	0.00000	40.22
66	26.91	0.85	0.12000	0.00000	40.22
67	23.73	0.84	0.10667	0.00000	40.22
68	23.31	0.82	0.09333	0.00000	40.22
69	22.87	0.81	0.08000	0.00000	40.22
70	22.78	0.80	0.06667	0.00000	40.22
71	21.93	0.79	0.05333	0.00000	40.22
72	21.83	0.78	0.04000	0.00000	40.22
73	20.83	0.77	0.02667	0.00000	40.22
74	16.85	0.76	0.01333	0.00000	40.22

“Diseño de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible para el paseo de la presa de San José, San Luis Potosí”