"ESTUDIO QUE SIRVA COMO HERRAMIENTA BASE PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL HÍDRICO DE LARGO PLAZO"

INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DEL DRENAJE PLUVIAL

INFORME X

CHIHUAHUA, CHIHUAHUA

ELABORÓ:

DAVID HUMBERTO SÁNCHEZ NAVARRO

AGOSTO 2024

ESTUDIO PARA LA ELABORACIÓN DEL PLAN MUNICIPAL HÍDRICO DE LARGO PLAZO QUE INCLUYA POLÍTICAS Y ACCIONES EN MATERIA DE AGUA SUPERFICIAL, AGUA SUBTERRÁNEA, DRENAJE PLUVIAL Y NUEVAS FUENTES E INFRAESTRUCTURA PARA LA SOSTENIBILIDAD DEL MUNICIPIO.

ÍNDICE

CAPÍTULO DÉCIMO: INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DEL DRENAJE PLUVIAL

1.	Introducción	12
1.1.	Antecedentes	13
1.2.	Objetivo, Procedimiento y Estructura del Informe	14
1.3.	Metodología	14
2.	Análisis de Vulnerabilidad ante Inundaciones	15
2.1.	Marco Teórico sobre Vulnerabilidad ante Inundaciones	15
2.2.	Información Disponible	17
2.3.	Índice de Población Vulnerable (IPV)	17
2.4.	Vulnerabilidad de Viviendas ante Inundaciones (IVNS)	20
2.5.	Estudios Previos sobre Vulnerabilidad	30
2.6.	Análisis de la Vulnerabilidad ante Inundaciones	35
2.7.	Definición de Zonas Críticas de Vulnerabilidad ante Inundaciones	43
3.	Análisis de Drenajes Pluviales	44
3.1.	Análisis para Gastos Máximos por Periodo de Retorno	44
3.2.	Análisis del Funcionamiento Hidráulico de los Arroyos y Canales Urbanos	49
3.3.	Análisis de los Drenajes Pluviales Existentes	60
3.4.	Alteraciones Hidrológicas en Cuencas de Ríos y Arroyos por Urbanización	95
4.	Zonas Críticas de Inundación	112
5.	Conclusiones	135
6.	Recomendaciones	138
6.1.	Acciones Estructurales	138
6.2.	Acciones No Estructurales	141
7.	Referencias	147

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa: Índice de Personas Vulnerables. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020) (14). 19
Figura 2. Ejemplo de nivel socioeconómico Muy Alto (A/B). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 21
Figura 3. Ejemplo de nivel socioeconómico Alto (C+). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 22
Figura 4. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio Alto (C). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 22
Figura 4. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio (C-). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 23
Figura 6. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio Bajo (D+). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 23
Figura 7. Ejemplo de nivel socioeconómico Bajo (D-). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 24
Figura 8. Ejemplo de nivel socioeconómico Muy Bajo (E). Fuente: (AMAI, 2022) (15). 24
Figura 9. Distribución porcentual de niveles socioeconómicos AMAI y calculados. Fuente: elaboración propia. 26
Figura 10. Mapa de Índice de Nivel Socioeconómico. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020). 27
Figura 11. Mapa de distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad por nivel socioeconómico (IVNS) para la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020). 29
Figura 12. Vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para viviendas (VAISP). Fuente: Hernández-Samaniego (2018) (5). 30
Figura 13. Mapa Índice de Vulnerabilidad Física. Fuente: Atlas de Riesgo (2014) (6). 31
Figura 14. Mapa de la distribución por AGEBs de población con más de 65 años. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (16). 32
Figura 15. Mapa de la distribución por AGEBs de viviendas con un solo cuarto. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (16). 33
Figura 16. Mapa de la población urbana con rezago social. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (16). 34
Figura 17. Mapa 1 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 36
Figura 18. Mapa 2 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 37

Figura 19. Mapa 3 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 38
Figura 20. Mapa 4 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 39
Figura 21. Mapa 5 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 40
Figura 22. Mapa 6 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 41
Figura 23. Mapa 7 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020). 42
Figura 24. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico en el Municipio de Chihuahua. Fuente: elaboración propia. 45
Figura 25. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico con desbordamiento, por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia..... 53
Figura 26. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico con velocidad alta, por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia. 58
Figura 27. Factor de convectividad en la República Mexicana. Fuente: Baeza Ramírez (2007) (20).60
Figura 28. Mapa de la infraestructura de drenaje pluvial urbano de la ciudad de Chihuahua, que incluye ríos, arroyos y canales pluviales. Fuente: elaboración propia..... 67
Figura 29. Estructuras de detención pluvia (regulación) en la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia. 68
Figura 30. Ubicación de mapas de flujo sobre vialidades. Fuente: elaboración propia. 70
Figura 31. Flujo pluvial sobre vialidades (1/23). Fuente: elaboración propia. 71
Figura 32. Flujo pluvial sobre vialidades (2/23). Fuente: elaboración propia. 72
Figura 33. Flujo pluvial sobre vialidades (3/23). Fuente: elaboración propia. 73
Figura 34. Flujo pluvial sobre vialidades (4/23). Fuente: elaboración propia. 74
Figura 35. Flujo pluvial sobre vialidades (5/23). Fuente: elaboración propia. 75
Figura 36. Flujo pluvial sobre vialidades (6/23). Fuente: elaboración propia. 76
Figura 37. Flujo pluvial sobre vialidades (7/23). Fuente: elaboración propia. 77
Figura 38. Flujo pluvial sobre vialidades (8/23). Fuente: elaboración propia. 78

Figura 39. Flujo pluvial sobre vialidades (9/23). Fuente: elaboración propia. 79
Figura 40. Flujo pluvial sobre vialidades (10/23). Fuente: elaboración propia. 80
Figura 41. Flujo pluvial sobre vialidades (11/23). Fuente: elaboración propia. 81
Figura 42. Flujo pluvial sobre vialidades (12/23). Fuente: elaboración propia. 82
Figura 43. Flujo pluvial sobre vialidades (13/23). Fuente: elaboración propia. 83
Figura 44. Flujo pluvial sobre vialidades (14/23). Fuente: elaboración propia. 84
Figura 45. Flujo pluvial sobre vialidades (15/23). Fuente: elaboración propia. 85
Figura 46. Flujo pluvial sobre vialidades (16/23). Fuente: elaboración propia. 86
Figura 47. Flujo pluvial sobre vialidades (17/23). Fuente: elaboración propia. 87
Figura 48. Flujo pluvial sobre vialidades (18/23). Fuente: elaboración propia. 88
Figura 49. Flujo pluvial sobre vialidades (19/23). Fuente: elaboración propia. 89
Figura 50. Flujo pluvial sobre vialidades (20/23). Fuente: elaboración propia. 90
Figura 51. Flujo pluvial sobre vialidades (21/23). Fuente: elaboración propia. 91
Figura 52. Flujo pluvial sobre vialidades (22/23). Fuente: elaboración propia. 92
Figura 53. Flujo pluvial sobre vialidades (23/23). Fuente: elaboración propia. 93
Figura 54. Causa del incremento de afectaciones por inundaciones. Fuente: Hernández-Samaniego, (2018) (30). 96
Figura 55. Variación del coeficiente de escurrimiento a diversos periodos de retorno en zona urbana y no urbana de la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia con datos de Hernández-Samaniego, (2018) (30). 97
Figura 56. Ejemplo esquemático del aumento de caudal de escurrimiento en una cuenca tras urbanización. Fuente: elaboración propia. 98
Figura 57. Aumento de superficie urbanizada de cuencas de cauces urbanos de la ciudad de Chihuahua: Fuente: elaboración propia con información del IMPLAN. 99
Figura 58. Super posición de mapa antiguo sobre orto imagen actual de la ciudad de Chihuahua-1. Fuente: elaboración propia con información de Mediateca INAH (2024) (31). 100
Figura 59. Super posición de mapa antiguo sobre orto imagen actual de la ciudad de Chihuahua-2. Fuente: elaboración propia con información de Evangelista (2024) (32). 101
Figura 60. Crecimiento urbano en la cuenca del arroyo La Cantera. Fuente: elaboración propia con información del IMPLAN. 102

Figura 61. Variación del área urbanizada y no urbanizada en la cuenca del arroyo La Cantera del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia. 103
Figura 62. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-1. Fuente: elaboración propia. 106
Figura 63. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-2. Fuente: elaboración propia. 107
Figura 64. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-3. Fuente: elaboración propia. 108
Figura 65. Urbanización de cuencas de presas El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua-a. Fuente: elaboración propia. 110
Figura 66. Urbanización de cuencas de presas El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua-b. Fuente: elaboración propia. 111
Figura 67. Zonas de inundación de Río Chuvíscar y arroyo la Cantera-1. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2014) (6)..... 113
Figura 68. Zonas de inundación de Río Chuvíscar y arroyo la Cantera-2. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2014) (6)..... 114
Figura 69. Zonas de inundación. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (34)..... 115
Figura 70. Zonas de riesgo ante inundaciones a partir de indicadores de vulnerabilidad. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 116
Figura 71. Localización en la ciudad de Chihuahua de sectores de riesgo. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35). 117
Figura 72. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 118
Figura 73. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 119

Figura 74. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.2. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 120
Figura 75. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.3. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 121
Figura 76. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 3. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 122
Figura 77. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 4. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 123
Figura 78. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 5.1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 124
Figura 79. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 5.2. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) (35)..... 125
Figura 80. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 1/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 126
Figura 81. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 2/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 126
Figura 82. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 3/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 127
Figura 83. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 4/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 127
Figura 84. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 5/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 128
Figura 85. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 6/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 128
Figura 86. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 7/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 129
Figura 87. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 8/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 129
Figura 88. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 9/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30)..... 130

Figura 89. Índice Pérdida-Posesión Anual Esperado, promedio por vivienda afectada por cuenca sector. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) (30). 131

Figura 90. Arroyo en colonias San Felipe I y II, San Felipe Viejo y Santo Niño. Fuente: elaboración propia. 133

Figura 91. Arroyo en colonias San Martín, Inalámbrica, Francisco I. Madero, Zarco, Guadalupe, Residencial Zarco y Jardines del Santuario. Fuente: elaboración propia. 134

Figura 92. Ubicación de las propuestas de obras de regulación pluvial en el municipio de Chihuahua: Fuente: elaboración propia. 139

Figura 93. Hidrogramas de entrada y salida de una estructura de disminución de impacto hidrológico. Fuente: elaboración propia (30) 143

Figura 94. Hidrogramas típicos de escenarios pre-urbanizado, urbanizado y regulado, ejemplo de impacto de estructuras de reducción de impacto hidrológico. Fuente: elaboración propia con información de Hernández-Samaniego (2018) (30). 144

Índice de Tablas

Tabla 1. Rangos de vulnerabilidad de personas ante inundaciones con base en el Índice de Población Vulnerable. Fuente: adaptada con base en IMTA (2015) (4). 18
Tabla 2. Distribución porcentual de la población mexicana según AMAI. Fuente: recreación de (AMAI, 2022) (15). 24
Tabla 3. Condicionantes para asignación de nivel socioeconómico por manzana, para el área metropolitana de Chihuahua. Fuente: elaboración propia. 25
Tabla 4. Relación entre nivel socioeconómico y vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para vivienda. Fuente: adaptación de por Hernández-Samaniego (2018) (5). 28
Tabla 5. Variables geométricas de secciones transversales, características hidráulicas y caudales de análisis a 9 periodos de retorno de los puntos de análisis hidráulico. Fuente: elaboración propia. 47
Tabla 6. Tirante y velocidad de cada punto de análisis hidráulico a nueves periodos de retorno. Fuente: elaboración propia. 48
Tabla 7. Puntos de análisis hidráulico con desbordamiento a cada periodo de retorno analizado a. Fuente: elaboración propia. 52
Tabla 8. Puntos de análisis hidráulico con problemas por velocidad a cada periodo de retorno analizado. Fuente: elaboración propia..... 57
Tabla 9. Puntos de análisis hidráulico con problemas por velocidad a cada periodo de retorno analizado. Fuente: elaboración propia..... 94
Tabla 10. Variación del área urbanizada y no urbanizada en la cuenca del arroyo La Cantera del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia. 103
Tabla 11. Coeficientes de escurrimiento de la cuenca del arroyo La Cantera a diversos periodos de retorno del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia. 104
Tabla 12. Caudales de escurrimiento del arroyo La Cantera a 9 periodos de retorno desde el año 1969 hasta el año 2040. Fuente: elaboración propia. 105
Tabla 13. Acciones estructurales de manejo de agua de lluvia propuestas en el Atlas de Riesgo Municipal de Chihuahua (2022). Fuente: Atlas de Riesgos (2022) (35). 140

Acrónimos

Acrónimo	Significado
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
AMAI	Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión
SIAPA	Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado
Tr	Periodo de retorno
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
SIATL	Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
Hm3	Hectómetro cúbico
Mm3	Millón de metro cúbico
NAMO	Nivel de Aguas Máximas Ordinarias
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias
CEM	Continuo Mexicano de Elevaciones
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
MAPAS	Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de la Conagua
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GIARUR	Gestión Integrada del Agua Urbana y Rural

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Acrónimo	Significado
LFD	Ley Federal de Derechos
lps	Litros por segundo
SIGMUN	Sistema de Información Geográfica Municipal
SEECH	Servicios Educativos del Estado de Chihuahua
SEP	Secretaría de Educación Pública
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
JMAS	Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
REPDA	Registro Público de Derechos de Agua
CONAPO	Comisión Nacional de Población
IMCO	Instituto Mexicano para la Competitividad
EF	Eficiencia Física
l/hab/día	Litro habitante día
DMA	Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea
POELMCH	Programa de Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Chihuahua
IMPLAN	Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
CONABIO	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
LAN	Ley de Aguas Nacionales
DOF	Diario Oficial de la Federación

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Acrónimo	Significado
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
NOM	Norma Oficial Mexicana
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
PEA	Población Económicamente Activa
ENOE	Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
CANACINTRA	Cámara Nacional de la Industria de la Transformación
MDP	Millones de pesos
IMPI	Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial
UE	Unidad Económica
VAB	Valor Agregado Bruto
CONEVAL	Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

CAPITULO DÉCIMO: INTEGRACIÓN DEL ANÁLISIS DEL DRENAJE PLUVIAL

El presente capítulo se centra en la integración del análisis del drenaje pluvial, analizando las zonas de inundación, drenajes pluviales, el funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos, así como las propuestas necesarias para minimizar los riesgos a la población por inundaciones.

1. Introducción

El agua, elemento vital para la vida y el desarrollo, se encuentra en el centro de las dinámicas sociales, económicas y ambientales de nuestro municipio. La gestión eficiente y sostenible del agua es un desafío crucial para asegurar el bienestar de las presentes y futuras generaciones. Este capítulo se centra en la Integración del análisis del drenaje pluvial. Analizando las zonas de inundación, drenajes pluviales, funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos, alcantarillado y saneamiento, así como las propuestas necesarias para minimizar los riesgos a la población por inundaciones.

La gestión efectiva del drenaje pluvial en el municipio de Chihuahua es crucial para mitigar los riesgos asociados a las inundaciones y promover un desarrollo urbano sostenible. El análisis detallado de este sistema hidráulico permite identificar las áreas más vulnerables a inundaciones, lo que es fundamental para la planificación urbana y la implementación de medidas de mitigación y adaptación.

El conocimiento de la infraestructura de drenaje pluvial existente y su capacidad para manejar los caudales de agua de lluvia es esencial para planificar el crecimiento urbano de manera sostenible. El análisis del drenaje pluvial también proporciona información valiosa sobre el impacto de la urbanización en el ciclo hidrológico y en los ecosistemas acuáticos.

Además, el análisis del drenaje pluvial es fundamental para la prevención de desastres naturales. Conocer las áreas propensas a inundaciones y la capacidad de la infraestructura de drenaje existente ayuda a planificar y ejecutar acciones de prevención y mitigación de desastres, lo que puede salvar vidas y reducir pérdidas económicas.

En términos de gestión del agua, el análisis del drenaje pluvial permite optimizar el aprovechamiento del agua de lluvia. Esto es especialmente importante en regiones como Chihuahua, donde la disponibilidad de agua es un factor crítico para el desarrollo económico y social.

El análisis del drenaje pluvial en el municipio de Chihuahua es una herramienta fundamental para la gestión integral y sostenible del agua. Proporciona información clave para la planificación urbana, la prevención de desastres y la gestión eficiente del agua, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la región.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

1.1. Antecedentes

Uno de los objetivos primordiales de la planificación y gestión hidrológica es alcanzar un estado óptimo en las masas de agua, lo cual asegura la calidad del agua, la biodiversidad de los ecosistemas acuáticos, la prevención de la contaminación y la protección de los recursos [(1)]. La evaluación precisa del estado de las aguas superficiales es crucial, ya que determina las medidas necesarias durante un ciclo de planificación, como las condiciones de concesiones, límites de vertido, sanciones por deterioro y acciones de recuperación [(2)].

En el municipio de Chihuahua, la disponibilidad de agua se basa en una combinación de recursos superficiales y subterráneos. Los recursos superficiales incluyen ríos, arroyos y lagos, mientras que los subterráneos están constituidos por acuíferos. Los principales ríos en el municipio son el Chuvíscar y el Sacramento, los cuales son vitales para el consumo humano, la agricultura y la industria.

El municipio de Chihuahua revela una situación compleja y desafiante en términos de gestión hídrica y prevención de inundaciones. La ciudad de Chihuahua, como centro urbano importante y capital del estado, enfrenta problemas de inundaciones que han sido exacerbados por el crecimiento urbano y el cambio climático.

Históricamente, el municipio ha experimentado inundaciones en diversas zonas, especialmente en el núcleo urbano, debido a factores como la falta de infraestructura adecuada de drenaje pluvial, el aumento de superficies impermeables debido a la urbanización y la falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje existentes. Estas inundaciones han causado daños materiales, interrupción de servicios básicos y riesgos para la población.

El crecimiento acelerado de la ciudad ha generado una mayor demanda de infraestructura de drenaje pluvial, pero el desarrollo no siempre se ha acompañado de un plan integral de gestión hídrica. Además, el cambio climático ha intensificado las lluvias en la región, lo que ha aumentado la presión sobre el sistema de drenaje pluvial existente.

Ante esta situación, es crucial implementar una gestión hídrica integral y sostenible que considere tanto la infraestructura física como las políticas y regulaciones necesarias para prevenir inundaciones y garantizar la seguridad y el bienestar de la población.

1.2. Objetivo, Procedimiento y Estructura del Informe

El propósito fundamental consiste en desarrollar un Plan que articule un conjunto de acciones clave para alcanzar una gestión sostenible del agua en el Municipio de Chihuahua. En el presente capítulo, se conforma un análisis del drenaje pluvial.

El análisis se realiza a nivel de cuenca y subcuenca en función de las precipitaciones y escurrimientos obtenidos en el **informe 9 Integración del análisis de aguas superficiales** permitiendo analizar cuáles son las condiciones del drenaje pluvial. Se analiza las zonas de inundación, drenajes pluviales, funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos para poder establecer propuestas que permitan minimizar los riesgos a la población por inundaciones, con el objetivo de desarrollar un plan de gestión sostenible de las aguas superficiales.

1.3. Metodología

La metodología se ejecutó conforme al siguiente procedimiento: se inició con la recopilación y exhaustivo de información preexistente, análisis previos estudios y datos específicos del municipio de Chihuahua, los cuales fueron elaborados por diversas entidades gubernamentales, académicas y particulares. Es crucial resaltar que el alcance del análisis de información no abarcó la validación o verificación de los datos proporcionados. En consecuencia, se hace referencia a la fuente de cada estudio, dato o información presentada en este documento para cualquier duda o aclaración.

Se realizó la integración del análisis del drenaje pluvial utilizando las propuestas de diversos estudios e información relevante disponible en la zona de estudio. Se empleó el análisis de precipitación a partir de la delimitación de las cuencas y subcuencas, así como el estudio detallado de la precipitación y los escurrimientos previstos en cada subcuenca hidrológica del **informe 9 Integración del análisis de aguas superficiales**.

Se desarrolló una integración de la vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio de Chihuahua, con un enfoque prioritario en el núcleo urbano, fundamentado en información disponible y estudios previos realizados en la zona para identificar las áreas más susceptibles a sufrir los efectos de inundaciones. Se definieron las zonas críticas de vulnerabilidad ante inundaciones por nivel socioeconómico y en función de los Atlas de Riesgo del Municipio. Se realizó un análisis de los gastos máximos basado en los caudales determinados en el análisis superficial del **informe 9 Integración del análisis de aguas superficiales**. Asimismo, se llevó a cabo un análisis del funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos de la ciudad de Chihuahua, utilizando las profundidades de escurrimiento y velocidades máximas obtenidas del análisis de caudales máximos. En función de estos resultados, se recomendaron obras y acciones para minimizar los riesgos por inundación y las afectaciones.

2. Análisis de Vulnerabilidad ante Inundaciones

Se llevó a cabo un análisis de la vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio de Chihuahua, con un enfoque prioritario en el núcleo urbano. Este análisis se fundamentó en información disponible y estudios previos realizados en la zona, con el fin de identificar las áreas más susceptibles a sufrir los efectos de inundaciones.

Se utilizaron dos criterios para el análisis de la vulnerabilidad ante inundaciones. Uno de ellos se centró en determinar la vulnerabilidad de las personas ante este fenómeno, como se propuso en el estudio del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizado en 2016, titulado “Estudio de Riesgo de Inundaciones en Zonas Urbanas de la República Mexicana” [(4)]. El otro criterio se enfocó en determinar la vulnerabilidad de las viviendas o familias ante inundaciones, considerando los niveles socioeconómicos, según se propuso en el trabajo "Índice Pérdida-Posesión para la Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas" [(5)].

2.1. Marco Teórico sobre Vulnerabilidad ante Inundaciones

La vulnerabilidad, incluida la ante inundaciones, es una variable compleja que depende de diversos factores y se desarrolla con el tiempo en los centros urbanos, influenciada por prácticas tanto intencionales como inintencionales, como la vivienda informal o la autoconstrucción, así como la desinformación, entre otras. Estas prácticas suelen llevar a que las personas con menos recursos económicos o de niveles socioeconómicos más bajos se ubiquen gradualmente en zonas más expuestas a fenómenos naturales o causados por el ser humano, y a que adquieran características que los hacen menos capaces de resistir y recuperarse de estos fenómenos, como las inundaciones.

Por lo tanto, la dimensión social es crucial para determinar la vulnerabilidad de viviendas o personas ante inundaciones en áreas urbanas, y está vinculada con su nivel socioeconómico. Según se menciona en el Atlas de Riesgo del Municipio de Chihuahua de 2014 [(6)], la vulnerabilidad social se define como el potencial de pérdida en relación con la capacidad de recuperación después de un desastre, por lo que no se limita a momentos de emergencia. Además, la vulnerabilidad puede asociarse con la pobreza, aunque algunos autores la analicen de manera independiente, ya que la pobreza no es el único factor que contribuye a la vulnerabilidad, aunque sí es un componente crítico.

Dependiendo el contexto y el autor, se pueden hallar diversas definiciones de vulnerabilidad, específicamente ante inundaciones específicamente. En su definición más simple la vulnerabilidad se describe como la “susceptibilidad a ser afectado” [(7)]. A continuación, se mencionan algunas de las descripciones encontradas en la literatura:

- De acuerdo con CENAPRED (2007) [8] la vulnerabilidad es la susceptibilidad o propensión de un sistema expuesto a ser afectado o dañado por el efecto de un fenómeno externo perturbador (amenaza); es decir, la magnitud de afectación que puede presentar un ente por el efecto de un fenómeno externo.
- Según CEPAL (2007) [9] la vulnerabilidad es la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas.
- Según Piers y colaboradores (2003) [10], es la característica de una persona o grupo y su situación que influencia su capacidad de anticiparse, poder resistir y recuperarse del impacto de una amenaza natural.

Dentro de diversas definiciones se identifican características en común, importantes a tomar en cuenta:

La magnitud de la acción externa perturbadora no está relacionada con la magnitud de la vulnerabilidad; esta última no cambia en función de la magnitud del peligro [11]. Por ejemplo, la vulnerabilidad de una vivienda será la misma sin importar la magnitud de la inundación. Aunque la vulnerabilidad no depende de la magnitud del peligro, sí depende de la naturaleza de este. Por ejemplo, una misma vivienda puede tener una vulnerabilidad diferente ante inundaciones que ante un sismo. Por lo tanto, la vulnerabilidad debe asociarse a una acción externa perturbadora específica [11]. En el caso específico de este estudio, la vulnerabilidad se relaciona directamente con el evento perturbador y peligroso: las inundaciones.

Para efectos del presente análisis, se entenderá la vulnerabilidad como el conjunto de características intrínsecas de un ente que lo hacen propenso a ser afectado por una acción externa específica, como las inundaciones.

En referencia a la vulnerabilidad ante inundaciones, se entenderá como la vulnerabilidad ante inundaciones de personas (ya sea individualmente o como grupo), ciudades, bienes inmuebles (edificios, viviendas e infraestructura en general) y bienes muebles (cualquier posesión que pueda ser movida por su dueño; menaje) [10]. Se tendrán en cuenta características intrínsecas como la edad (en el caso de las personas), los materiales de construcción (en el caso de las viviendas) y el nivel socioeconómico de la familia (en el caso de las viviendas). Esto se debe a que la vulnerabilidad de personas y viviendas depende fuertemente de la sociedad, incluyendo su economía, cultura, desinformación, educación e incluso creencias religiosas [12].

En cuanto a la exposición, no se considera simplemente otro componente del riesgo, como la vulnerabilidad y el peligro, sino una condición que indica si existe o no interacción entre estas características. Es una condición binaria, es decir, o existe o no existe interacción entre el evento peligroso y la entidad vulnerable.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Por ende, para efectos del presente análisis se entenderá la vulnerabilidad como el conjunto de características intrínsecas de un ente que lo hacen propenso a ser afectado por una acción externa específica; las inundaciones.

2.2. Información Disponible

Como insumos para la generación de los mapas de vulnerabilidad ante inundaciones, se utilizó la información de libre acceso del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). La cual se encuentra en formato de manejo de información geográfica en formato tipo *shape* (.shp) en AGEBs (Área Geoestadística Básica) o manzanas.

Según la definición de INEGI, una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por un conjunto de manzanas perfectamente delimitadas por calles, avenidas, andadores o cualquier otro rasgo de fácil identificación en el terreno y cuyo uso del suelo es principalmente habitacional, industrial, de servicios, comercial, etcétera, y sólo son asignadas al interior de las zonas urbanas que son aquellas con población mayor o igual a 2,500 habitantes y en las cabeceras municipales [(13)].

Para la determinación de la vulnerabilidad ante inundaciones en el municipio de Chihuahua, se descargaron las manzanas el estado de Chihuahua en la página del INEGI SCINCE 2020 [(14)].

2.3. Índice de Población Vulnerable (IPV)

Para la generación del mapa de vulnerabilidad de personas ante inundaciones, el IMTA propone utilizar el **Índice de Población Vulnerables (IPV)**, en el cual se consideran como vulnerable a las personas menores de 5 años y mayores 60 años, al ser estos quienes ante un evento de inundación serían más propensos a no poder cruzar una vialidad por donde escurre el agua, o inclusive, pudieran ser arrastrados por el agua al tratar de cruzar una vialidad inundada [(4)]. Considerando lo anterior se calcula el índice de Población Vulnerable (IPV) mediante la ***Ec. 1***.:

$$Índice\ población\ Vulnerable = \frac{Población > a\ 60\ años + población < a\ 5\ años}{Población\ Total} \qquad \textbf{Ec. 1}$$

Asimismo, cabe resaltar que en las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs) del INEGI se encuentra discretizada a nivel de manzana (cuadra) para las diversas ciudades del país con la información respecto a cantidad de población menor de 5 años y mayor de 60 años. Con base en ello, se la aplica la ***Ec. 1***.

Con base en el IPV se determinó la vulnerabilidad de una manzana o cuadra, de acuerdo con lo presentado en la Tabla 1, la cual es una adaptación de la escala presentada por el IMTA (2015) [4].
En la Figura 1 se muestra el mapa de vulnerabilidad de personas ante inundaciones por población vulnerable en la ciudad de Chihuahua; resultado de haber aplicado mediante un programa de manejo de información geográfica la ***Ec. 1*** y lo presentado en la Tabla 1 con respecto a la información contenida en las AGEBs de INEGI.

Tabla 1. Rangos de vulnerabilidad de personas ante inundaciones con base en el Índice de Población Vulnerable. Fuente: adaptada con base en IMTA (2015) [4].

Nivel de vulnerabilidad de la manzana	Índice de Población Vulnerable
Muy baja	0.00 - 0.01
Baja	0.10 - 0.20
Media	0.20 - 0.25
Alta	0.25 - 0.30
Muy alta	> 0.30

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

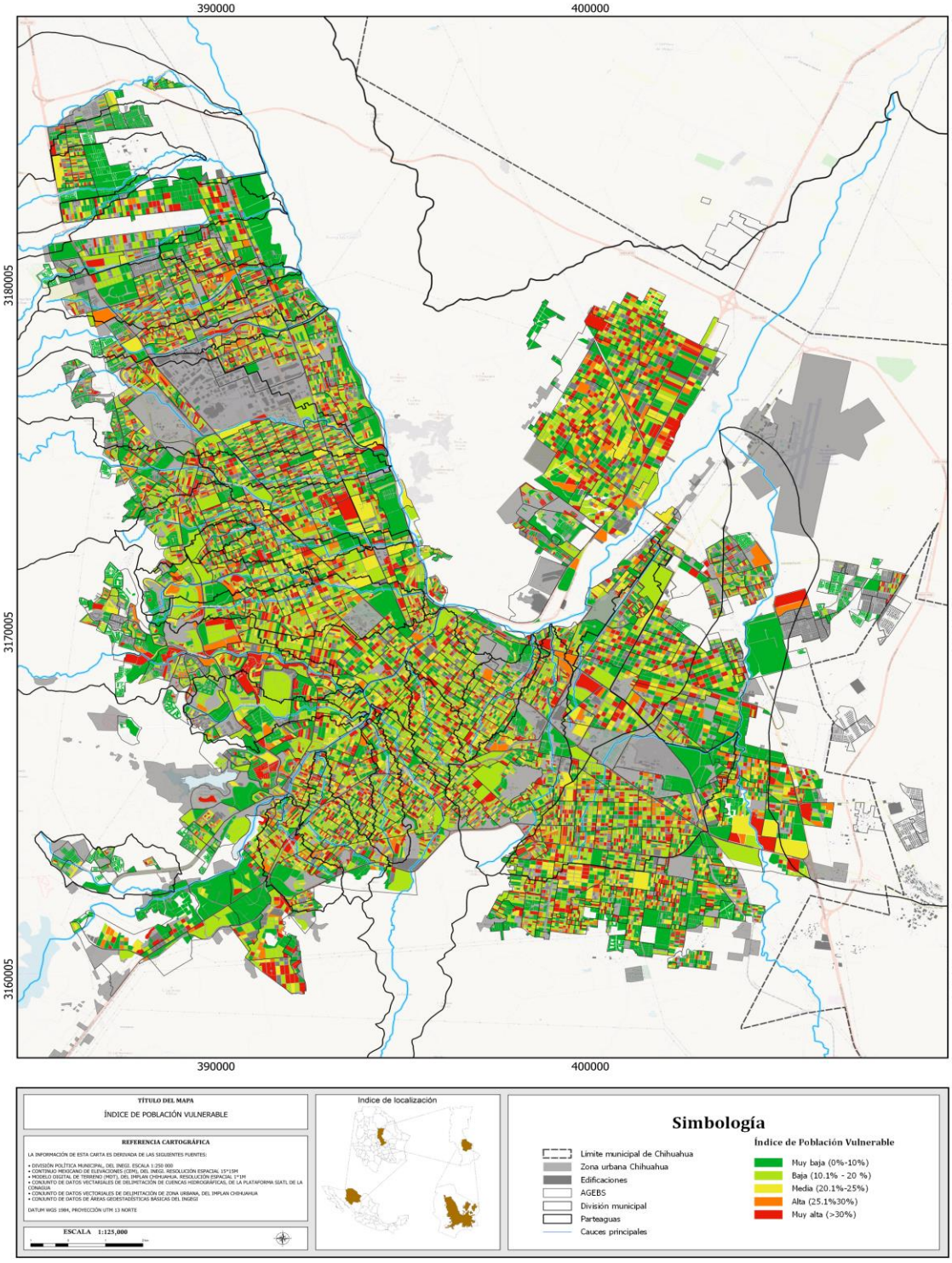


Figura 1. Mapa: Índice de Personas Vulnerables. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020) [14].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | **https://implanchihuahua.org/**

2.4. Vulnerabilidad de Viviendas ante Inundaciones (IVNS)

De acuerdo con el segundo criterio utilizado para la generación el cálculo de la vulnerabilidad ante inundaciones fue el propuesto en el trabajo "Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas" [(5)] con base en el Índice de Vulnerabilidad por Nivel Socioeconómico (IVNS), mencionado como "Vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para viviendas".

Este criterio se basa en el cálculo de niveles socioeconómicos para cada una de las manzanas de INEGI, considerando una relación inversa entre el nivel socioeconómico de una familia o persona y su vulnerabilidad ante una inundación; tomando como premisa que "a mayor nivel socioeconómico menor será la vulnerabilidad ante inundaciones", pues la capacidad de respuesta y recuperación de una familia o persona ante un evento perturbador de inundaciones se ve influenciado por la educación y capacidad económica de las mismas. Asimismo, los materiales de construcción de una vivienda mejoran conforme la capacidad económica de la familia o persona.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.4.1. Estimación de niveles socioeconómicos para viviendas

Para desarrollar el cálculo de la vulnerabilidad ante inundaciones se obtuvo el nivel socioeconómico de cada manzana de INEGI, tomando como base los 7 niveles socioeconómicos mencionados por la Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión (AMAI) [15]. A continuación, se muestra la descripción de AMAI de cada nivel socioeconómico [15]:

1. **Muy alto (A/B):** Está conformado en su mayoría por hogares en los que el jefe de familia tiene estudios profesionales o posgrado (80%). Siete de cada diez viviendas (72.5%) tienen al menos 3 dormitorios y un 67% cuentan con al menos dos automóviles. Prácticamente todos cuentan con internet (99%) (Figura 2);

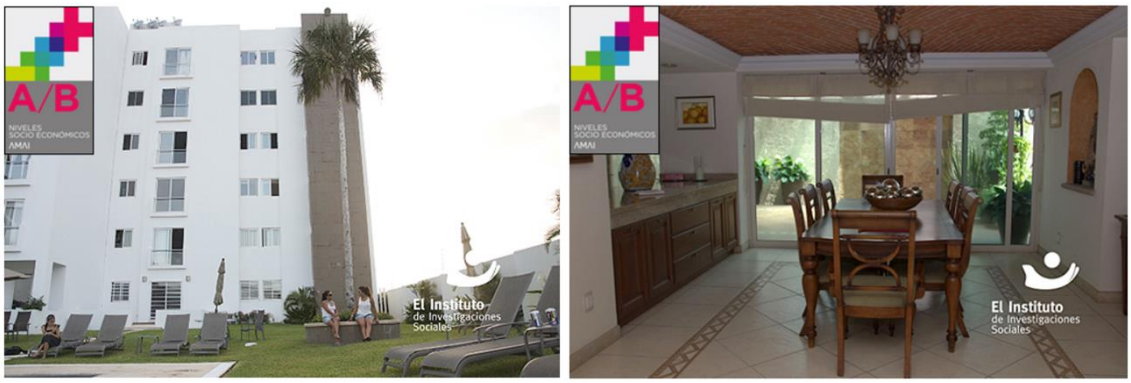


Figura 2. Ejemplo de nivel socioeconómico Muy Alto (A/B). Fuente: (AMAI, 2022) (15).

2. **Alto (C+):** El 72% de los jefes de hogar tiene al menos estudios de preparatoria. El 54% de las viviendas cuentan con al menos 3 dormitorios, el 30% tienen al menos dos automóviles y el 97% tiene internet fijo en la vivienda. Poco más de la tercera parte del ingreso lo utiliza en alimentación (34%) (Figura 3);

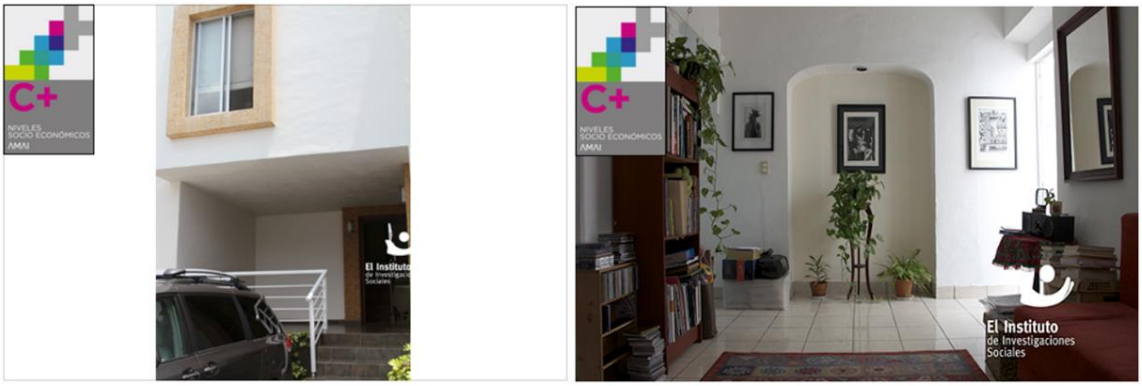


Figura 3. Ejemplo de nivel socioeconómico Alto (C+). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

3. **Medio Alto (C):** Un 82% de los hogares tienen un jefe con estudios de secundaria o más. El 40% tienen viviendas con al menos 3 dormitorios. El 91% cuentan con internet fijo en la vivienda y un 37% del gasto se usa en alimentación. El 14% tiene al menos dos automóviles (Figura 4);



Figura 4. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio Alto (C). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

4. **Medio (C-):** El 63% de los hogares están encabezados por un jefe con estudios máximos de secundaria. El 68% habitan en viviendas con uno o dos dormitorios. Ocho de cada 10 hogares (78%) cuenta con internet fijo en la vivienda. Cerca del 40% del gasto se asigna a alimentación y 18% a transporte (Figura 5);



Figura 5. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio (C-). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

5. **Medio Bajo (D+):** El 74% de los hogares está encabezado por un jefe con estudios hasta secundaria. Ocho de cada 10 hogares habitan en viviendas con a los más 2 dormitorios. El 55% cuenta con conexión fija a internet y destinan el 42% del gasto a la alimentación (Figura 6);



Figura 6. Ejemplo de nivel socioeconómico Medio Bajo (D+). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

6. **Bajo (D-):** En el 53% de los hogares el jefe tiene estudios hasta primaria. El 86% de las viviendas en donde habitan, tienen uno o dos dormitorios. Solamente el 14% tiene internet fijo en la vivienda. Poco menos de la mitad de su gasto se destina a la alimentación (48%) (Figura 7);



Figura 7. Ejemplo de nivel socioeconómico Bajo (D-). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

7. **Muy bajo o marginal (E):** La mayoría de los hogares (82%) tienen un jefe con estudios no mayores a primaria. Siete de cada diez viviendas tienen solamente un dormitorio y 83% no cuentan con baño completo. La tenencia de internet en la vivienda es muy bajo (0.3%) Más de la mitad del gasto se asigna a alimentos (52%) y solo el 1% a educación (Figura 8).



Figura 8. Ejemplo de nivel socioeconómico Muy Bajo (E). Fuente: (AMAI, 2022) [15].

Según la misma AMAI, la población mexicana se distribuye porcentualmente entre sus niveles socioeconómica según lo mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2. Distribución porcentual de la población mexicana según AMAI. Fuente: recreación de (AMAI, 2022) [15].

	A/B	C+	C	C-	D+	D	E
Nacional	6.80%	10.80%	14.00%	15.40%	15.20%	27.80%	10.00%
Chihuahua	4.70%	22.20%	15.20%	17.60%	17.60%	13.30%	9.30%

En congruencia con la definición nivel socioeconómico, se utilizaron las 6 siguientes variables contenidas en la tabla de atributos del archivo tipo .shp de las manzanas de INEGI:

- **Grado promedio de escolaridad** (GRAPROES): Número de años promedio de estudio de las personas que viven en cada vivienda de la manzana;
- **Viviendas habitadas** (VIV_HAB): Cantidad de viviendas en la manzana que son habitadas; es decir, que no están desalojadas o todavía sin habitar;
- **Viviendas con un dormitorio** (VIV_1D): Cantidad de viviendas de la manzana con un único dormitorio;
- **Viviendas con dos o más dormitorios** (VIV_2D): Cantidad de viviendas de la manzana con al menos dos dormitorios;
- **Viviendas con internet** (VIV_INTER): Cantidad de viviendas de la manzana que cuentan con una conexión fija a un servicio de internet;
- **Viviendas con automóvil o camioneta** (VIV_AUTOM): Cantidad de viviendas de la manzana que cuentan con al menos un vehículo automotor propio, ya sea automóvil o camioneta.

Estas variables se eligieron para el cálculo de los niveles socioeconómicos, al ser algunas de las que se mencionan en la descripción de los niveles socioeconómicos de la AMAI. Posteriormente se le asignó a cada una de las manzanas un nivel socioeconómico, con base en la aplicación de los condicionantes mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Condicionantes para asignación de nivel socioeconómico por manzana, para el área metropolitana de Chihuahua. Fuente: elaboración propia.

Nivel socioeconómico		Muy bajo	Bajo	Medio bajo	Medio	Medio alto	Alto	Muy alto
		E	D	D+	C-	C	C+	A/B
Variable	Indicador y clave Inegi	<	>	>	>	>	>	>
Grado promedio de estudios	GRAPROES	8.00	8.00	9.80	10.50	11.00	12.30	14.20
Vviendas con 2 dormitorios	VIV_2D/(VIV_1D + VIV_2D)	42.5%	42.5%	69.0%	75.0%	78.0%	84.5%	92.0%
Viviendas con Internet	VIV_INTER/VIV_HAB	N/A	N/A	58.0%	67.0%	72.0%	82.0%	94.0%
Viviendas con automóvil	VIV_AUTOM/VIV_HAB	N/A	N/A	N/A	N/A	73.5%	83.5%	95.0%
Viviendas con piso de tierra	VIV_PS_TR/VIV_HAB	< 10%	> 10%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Condicionante		Si no es D es E	Si se cumplen 3 cirterios	Si se cumplen 2 cirterios	Si se cumplen 2 cirterios	Si se cumplen 3 cirterios	Si se cumplen 3 cirterios	Si se cumplen 3 cirterios

Cabe destacar que, los valores de los condicionantes se asignaron de manera tal que la distribución porcentual de los niveles socioeconómicos fuera similar a la distribución calculada por la AMAI. En la Figura 9se muestra una comparación entre la distribución de la AMAI para la entidad de Chihuahua y la obtenida mediante la aplicación de los condicionantes de la Tabla 3.

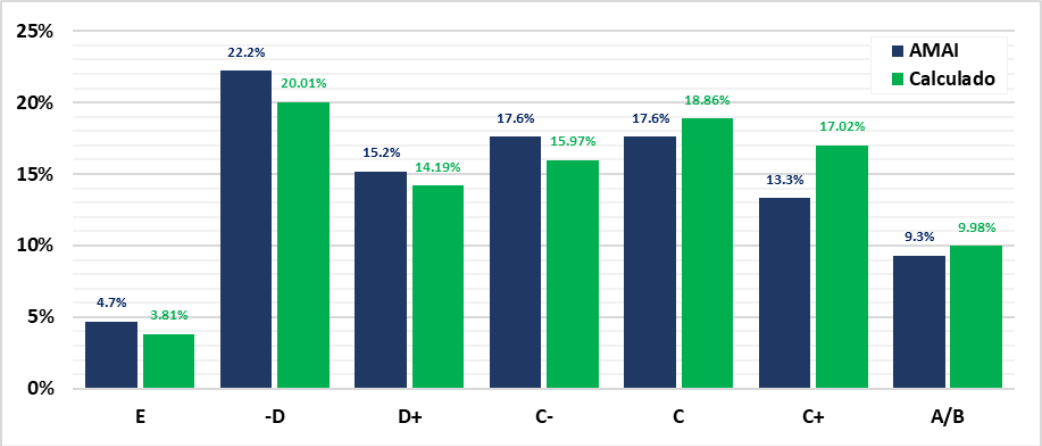


Figura 9. Distribución porcentual de niveles socioeconómicos AMAI y calculados. Fuente: elaboración propia.

Cabe destacar que, en el caso de este último criterio de cálculo de vulnerabilidad, se descartaron aquellas manzanas en las que no se contara con viviendas habitadas (VIV_HAB=0) al ser manzanas enteramente destinadas a actividades comerciales, industriales u otra, quedando fuera del objetivo de análisis, al ser un criterio de vulnerabilidad simplificado para viviendas.

Asimismo, se clasificaron como "indeterminadas" aquellas manzanas en las que la suma de las viviendas con un dormitorio (VIV_1D) y las viviendas con dos dormitorios (VIV_2D) fuera diferente a las viviendas habitadas de la manzana (VIV_HAB), al considerar que dicha incongruencia reflejó datos no confiables de la manzana.

En la Figura 10 se muestra el mapa con la distribución espacial de los diversos niveles socioeconómicos calculados para cada manzana de la ciudad de Chihuahua.

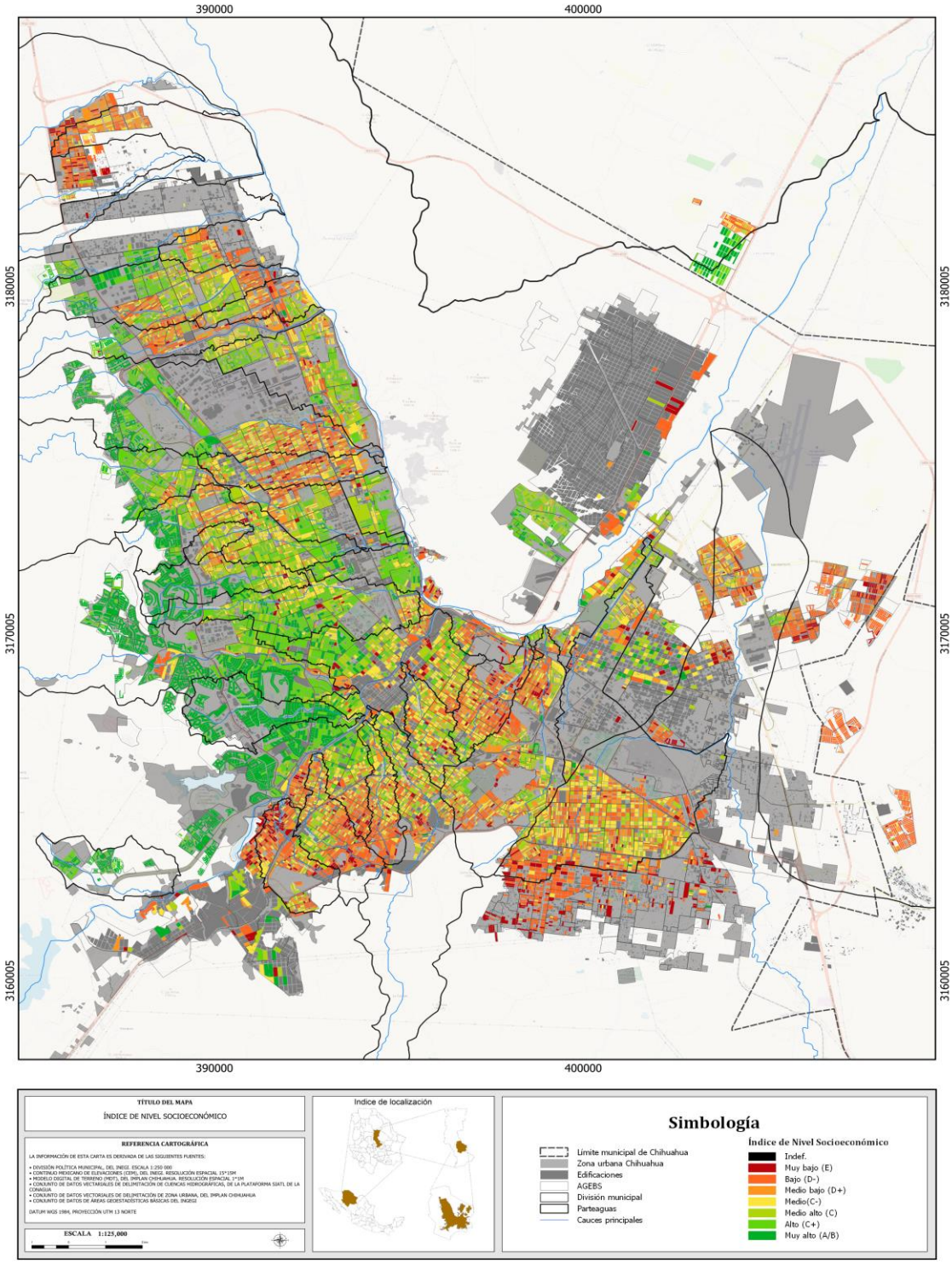


Figura 10. Mapa de Índice de Nivel Socioeconómico. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020).

2.4.2. Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico

Se calculó para cada manzana de INEGI su nivel de vulnerabilidad ante inundaciones por nivel socioeconómico o índice de vulnerabilidad socioeconómica, con base en el cálculo previo de los niveles socioeconómicos de cada manzana de INEGI, considerando una relación inversa entre el nivel socioeconómico y el nivel de vulnerabilidad; es decir, a mayor nivel socioeconómico, menor vulnerabilidad. Se agruparon los niveles socioeconómicos a manera de generar 5 niveles de vulnerabilidad, según lo propuesto por Hernández-Samaniego (2018) [5] como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Relación entre nivel socioeconómico y vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para vivienda. Fuente: adaptación de por Hernández-Samaniego (2018) [5].

Nivel socioeconómico	Vulnerabilidad (IVNS)
Muy bajo (E)	Muy alta (I)
Bajo (D+)	Alta (II)
Medio Bajo (D+)	Media (II)
Medio (C-)	
Medio alto (C)	Baja (IV)
Alto (C+)	
Muy alto (A/B)	Muy baja (V)

En la Figura 11 se muestra el mapa con la distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad por nivel socioeconómico (IVNS) para la ciudad de Chihuahua.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

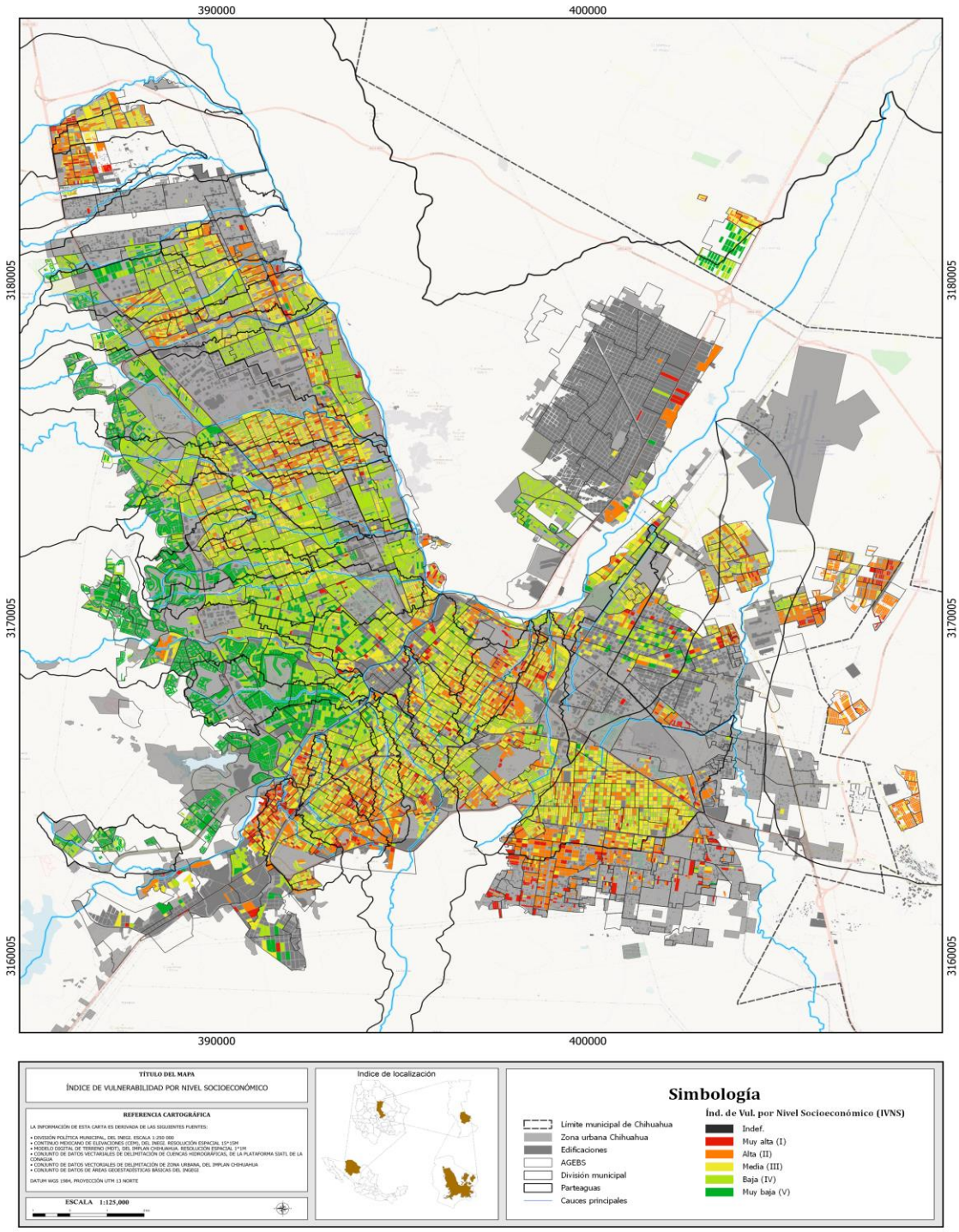


Figura 11. Mapa de distribución espacial de los niveles de vulnerabilidad por nivel socioeconómico (IVNS) para la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia con base en análisis de datos de INEGI (2020).

2.5. Estudios Previos sobre Vulnerabilidad

En el estudio "Índice Pérdida-Posesión para la Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas", se calculó la vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para viviendas (VAISPV) utilizando la metodología descrita en este estudio. La Figura 12 muestra el mapa con la distribución espacial de la VAISPV [5].

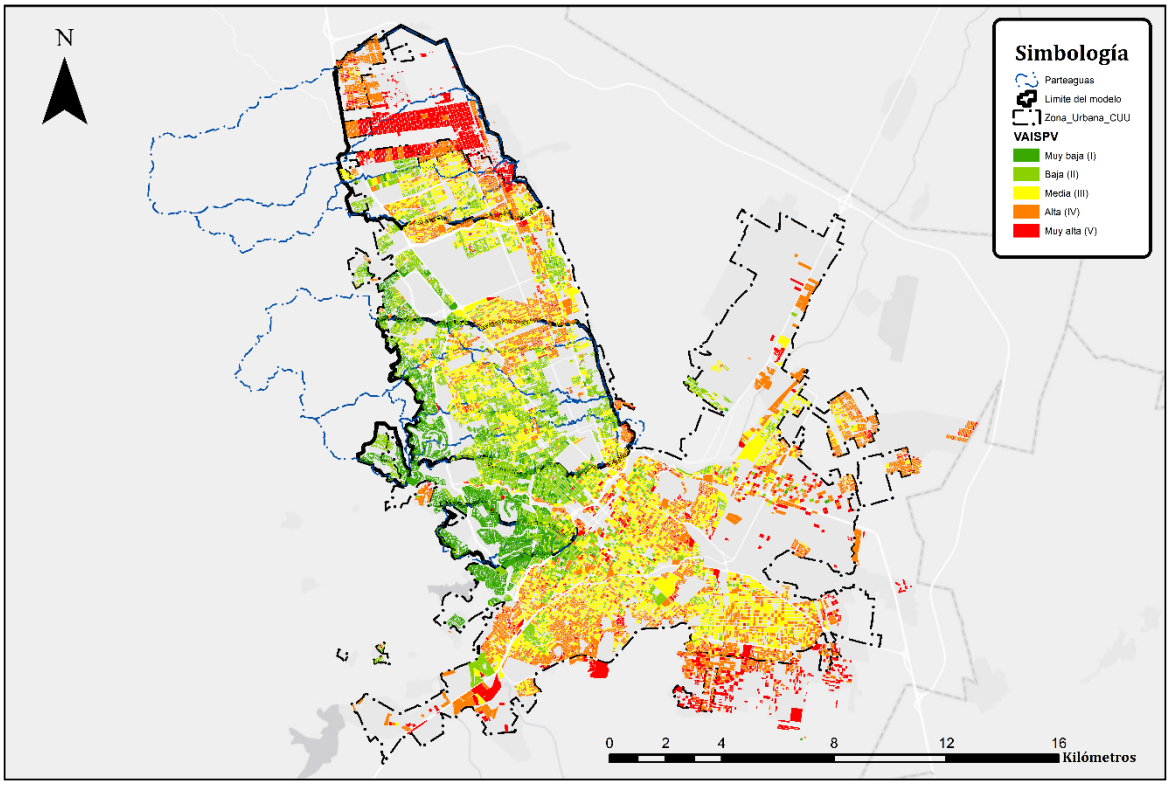


Figura 12. Vulnerabilidad ante inundaciones simplificada para viviendas (VAISP). Fuente: Hernández-Samaniego (2018) [5].

Por otra parte, en el año 2014 y como parte del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua [6], se calculó la "vulnerabilidad física", describiéndola como a la localización de los asentamientos humanos en zonas de riesgo (exposición) combinada con deficiencias físicas de las edificaciones para "absorber" los efectos de los riesgos (vulnerabilidad de edificaciones). Aun cuando, por definición la exposición y la vulnerabilidad deben ser calculadas como variables aisladas, en la Figura 13 se muestra el mapa con la distribución espacial de dicha vulnerabilidad [6].

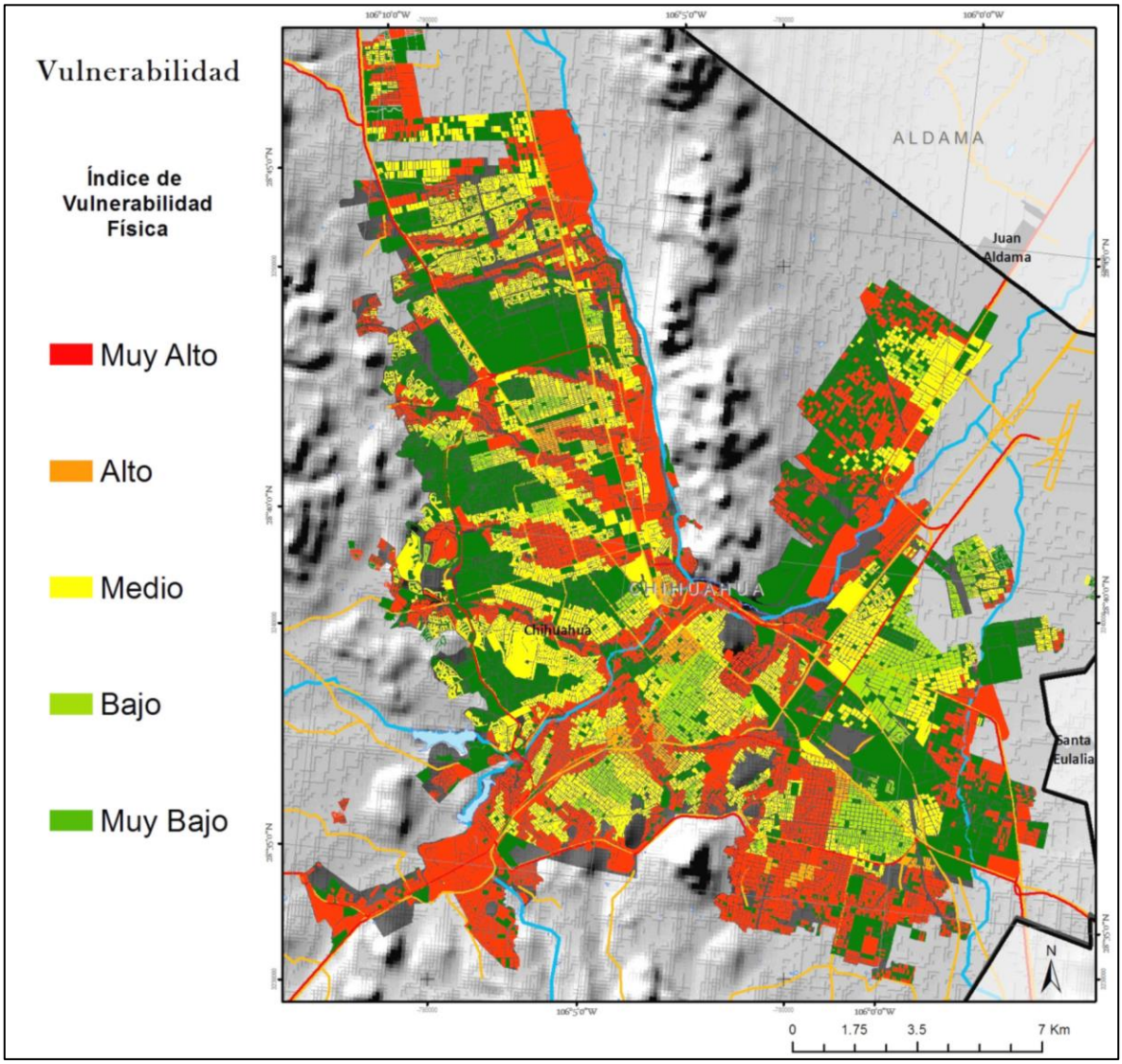


Figura 13. Mapa Índice de Vulnerabilidad Física. Fuente: Atlas de Riesgo (2014) [6].

Asimismo, en dicho estudio se mencionan algunas colonias en las que se ha identificado mayor vulnerabilidad física ante inundaciones respecto a otras, como son colonias Rubén Jaramillo, sobre el cerro Coronel; Ampliación R. Almada, cercano al cerro Grande; Ampliación Valle de la Madrid, Ladrilleras, Los Llanos, Las Flores, Las Torres, Tres Castillos, Rancho de En medio, Rigoberto Orozco, zona Granjas del Valle, La Marina, Diamante, Batalla de Sacramento y La Haciendita y la zona sur de la ciudad en general (6).

De igual manera se utilizó los análisis realizados con los datos de las AGEBs de la ciudad de Chihuahua y los hallazgos encontrados en el Atlas de Riesgos para el municipio de Chihuahua del año 2022 [16]. Específicamente se tomó en consideración los mapas de población con más de 65 años (Figura 14) y de viviendas con un solo cuarto (Figura 15), al ser variables similares a las utilizadas para el cálculo de los índices de población vulnerable y de vulnerabilidad por nivel socioeconómico, respectivamente. Asimismo, se consideró el mapa de población urbana con rezago social para compararlo con el mapa de niveles socioeconómicos calculados (Figura 16).

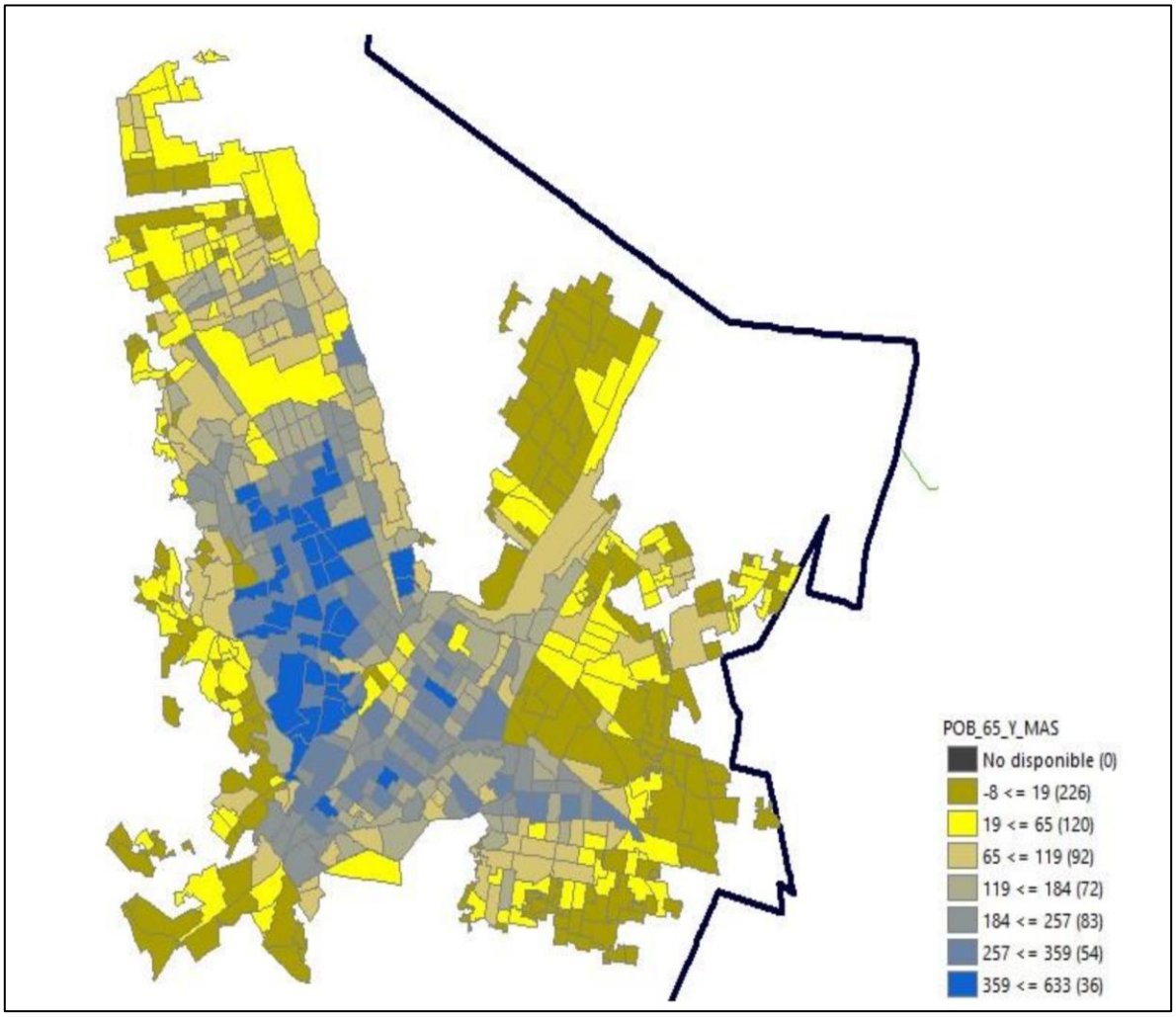


Figura 14. Mapa de la distribución por AGEBs de población con más de 65 años. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [16].

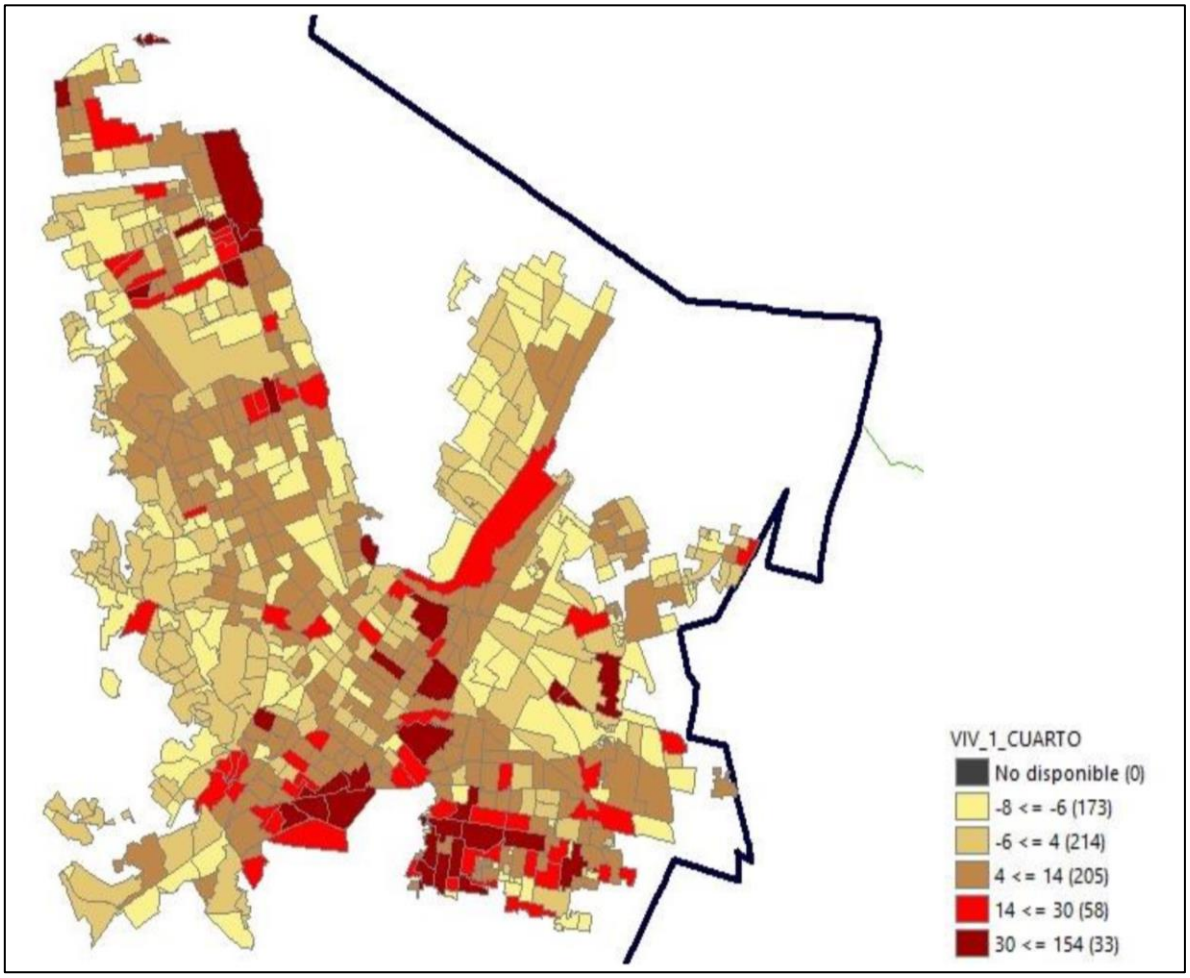


Figura 15. Mapa de la distribución por AGEBs de viviendas con un solo cuarto. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [(16)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

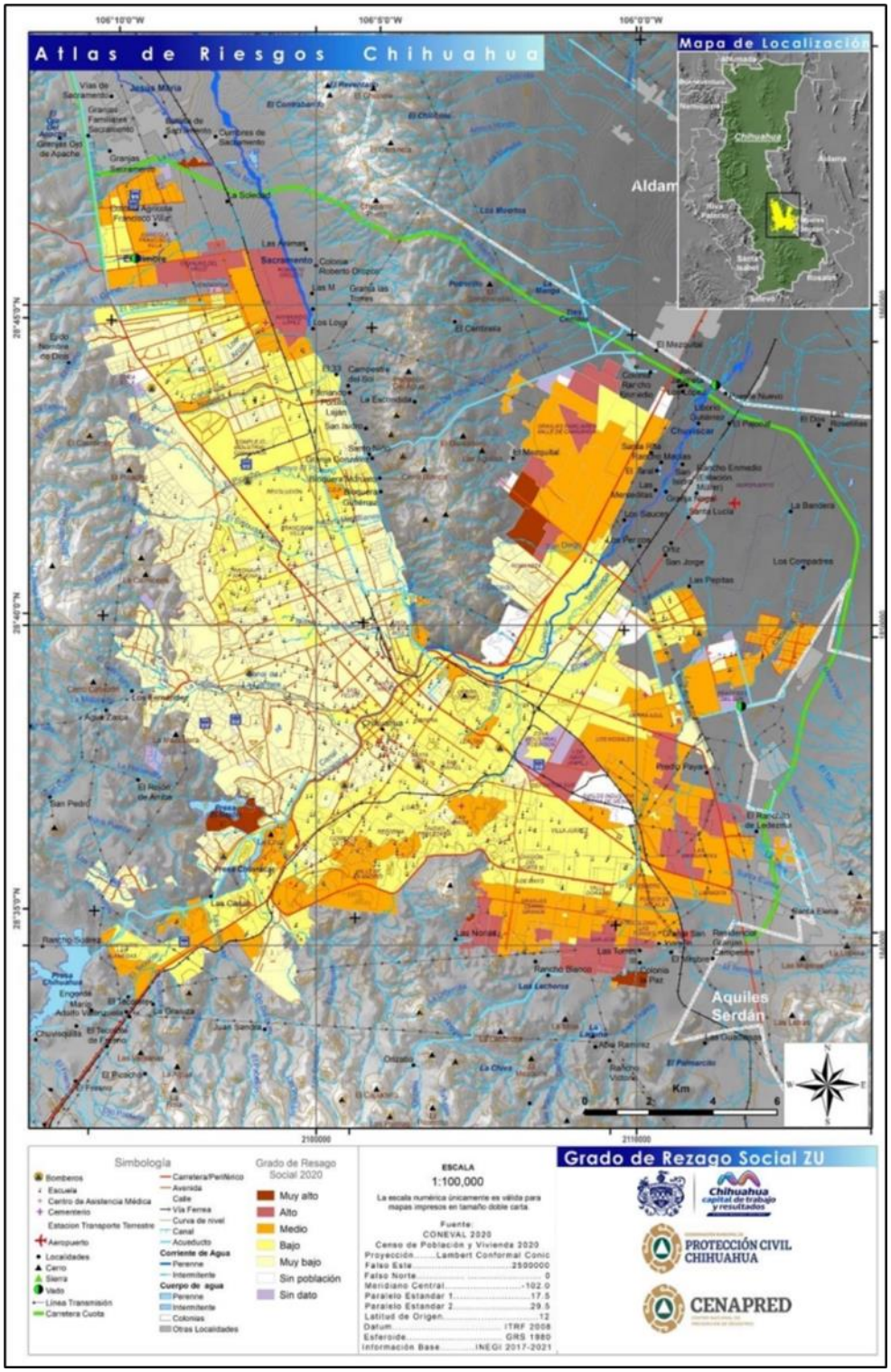


Figura 16. Mapa de la población urbana con rezago social. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [(16)].

2.6. Análisis de la Vulnerabilidad ante Inundaciones

Población vulnerable ante inundaciones (IPV)

Según el cálculo de la población vulnerable basado en información del INEGI y los criterios recomendados por el IMTA (4), donde se considera como población vulnerable aquella con menos de 5 años o mayor de 60 años para el cálculo del Índice de Población Vulnerable (IPV), no se observan zonas con una clara concentración de población vulnerable en la Figura 1. Prácticamente toda la ciudad muestra manzanas contiguas con un índice de población vulnerable alto y bajo. Este resultado contrasta con los cálculos realizados a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB) en el Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua del año 2022, donde se calculó la concentración de población mayor de 65 años por AGEB. En este caso, se observa una clara concentración en zonas contiguas al Boulevard Ortiz Mena, la colonia Granjas y entre las avenidas Vallarta y Tecnológico (Figura 14).

Esta discrepancia puede atribuirse a la diferencia en el cálculo, donde para el IPV se consideran personas mayores de 60 años en lugar de 65 años, y también se incluyen personas menores de 5 años como vulnerables. Además, en el mapa del Atlas se muestra la concentración total de personas mayores de 65 años, en lugar de hacerlo de manera porcentual.

Vulnerabilidad de viviendas por nivel socioeconómico

Como se muestra de la Figura 17 a la Figura 23, la distribución de los niveles socioeconómicos y los niveles de vulnerabilidad ante inundaciones por nivel socioeconómico, guardan una clara relación con la definición de las AGEBs de INEGI; es decir, dentro de una AGEB es poca la variación de niveles socioeconómico entre las manzanas que la componen. Por lo mismo, tanto para los niveles socioeconómicos como para el IVNS, se aprecia claramente la influencia de límites urbanos como avenidas principales o arroyos en la variación de sus niveles (Figura 17).
Por otro lado, el IVNS calculado (Figura 12) muestra una menor vulnerabilidad generalizada y mayor nivel socioeconómico en la zona centro-poniente de la ciudad y a lo largo de la Av. de la Juventud, y un aumento paulatino de la vulnerabilidad, o disminución del nivel socioeconómico, hacia la periferia de la ciudad. Teniendo las zonas más vulnerables al norte de la ciudad, junto a la vialidad Sacramento, y en el sur y sur oriente de la ciudad.
Esto guarda ciertas similitudes con el mapa de población urbana con rezago social y mapa de viviendas con un solo cuarto del Atlas de Riesgo del Municipio de Chihuahua (2022) (Figura 15 y 16) y la vulnerabilidad física mostrada en la Figura 13 calculada para el Atlas de Riesgo de la Ciudad de Chihuahua (2014), siempre y cuando excluyamos aquellas zonas a las que se les asignó una vulnerabilidad física alta a causa de su cercanía con algún escurrimiento.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

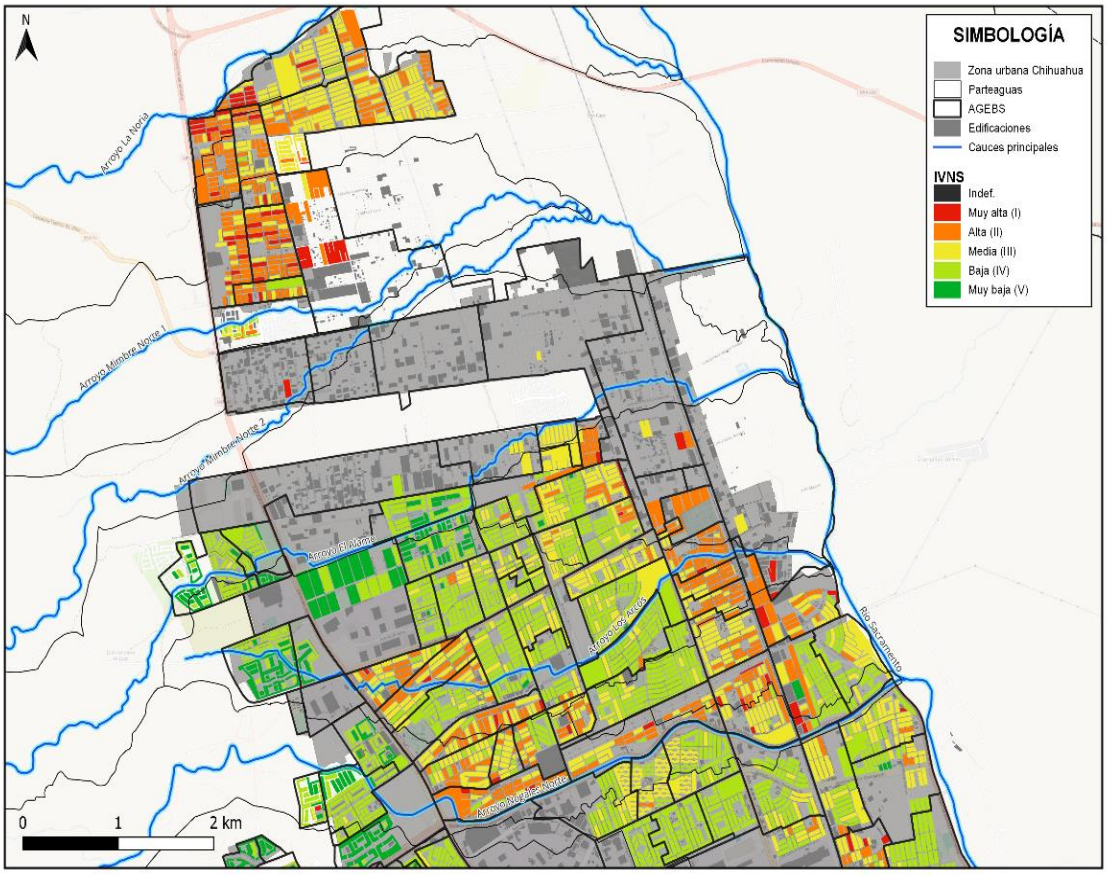


Figura 17. Mapa 1 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

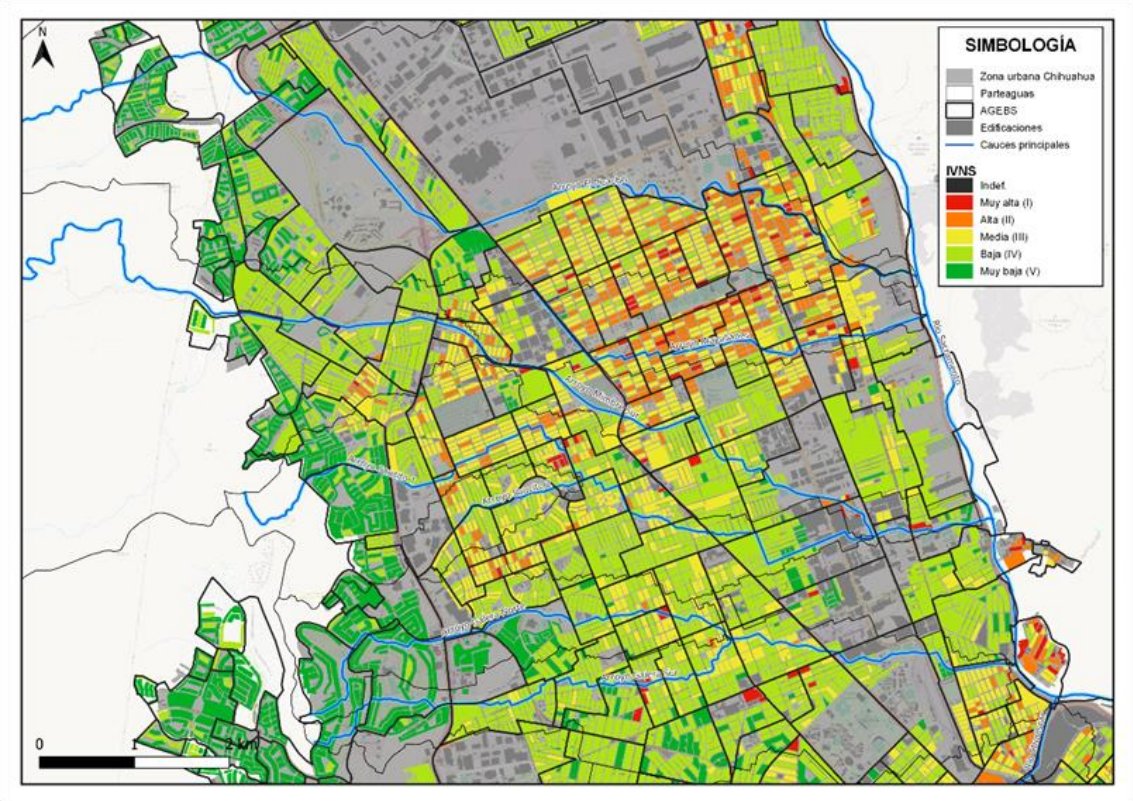


Figura 18. Mapa 2 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

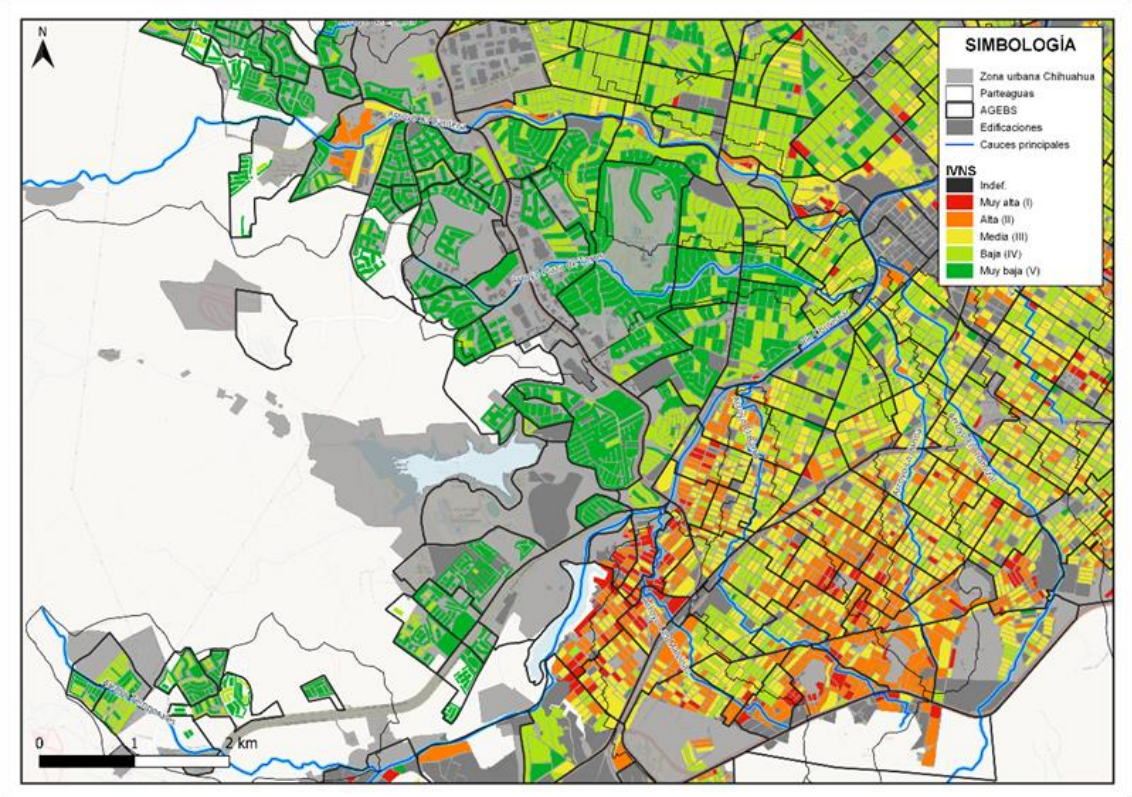


Figura 19. Mapa 3 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua

Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820

https://implanchihuahua.org/

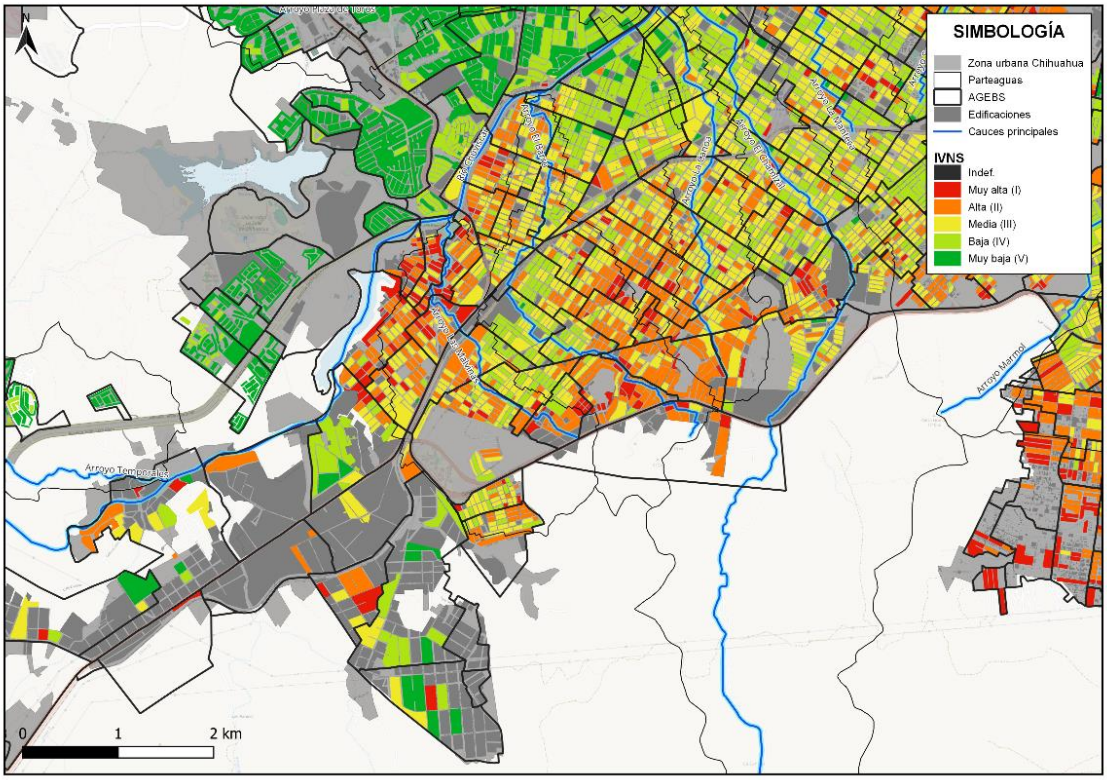


Figura 20. Mapa 4 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

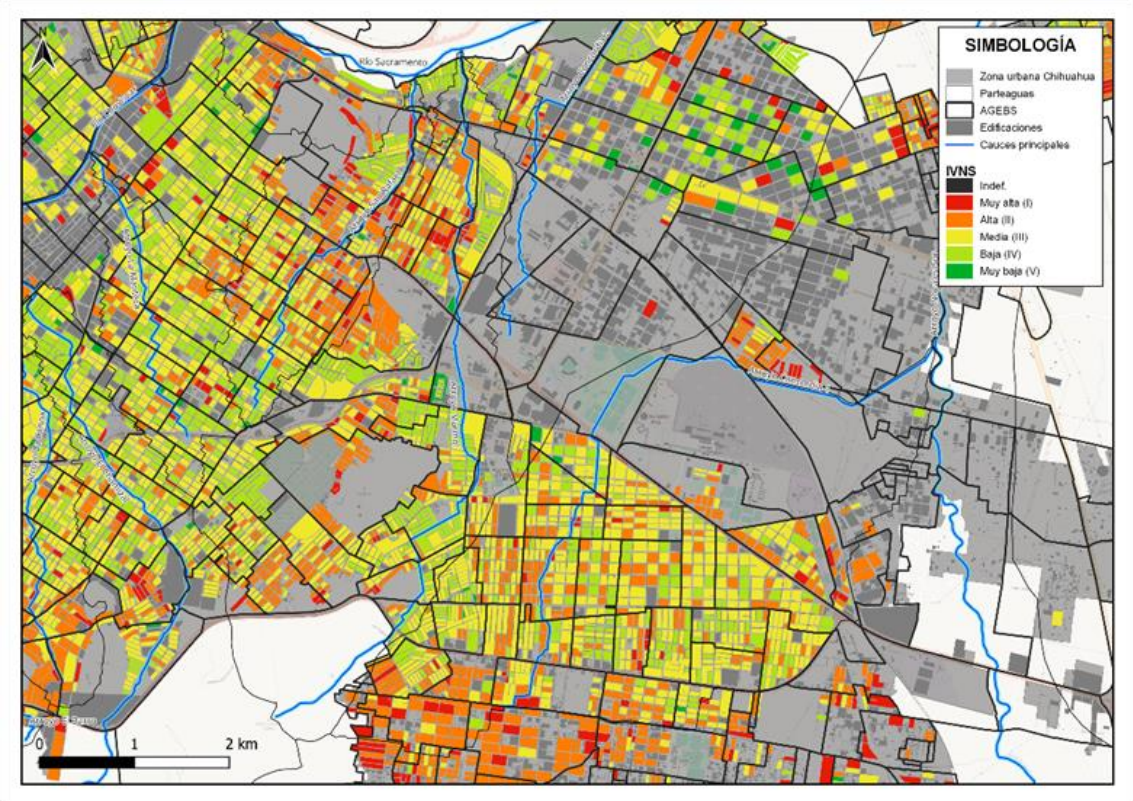


Figura 21. Mapa 5 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua

Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820

https://implanchihuahua.org/

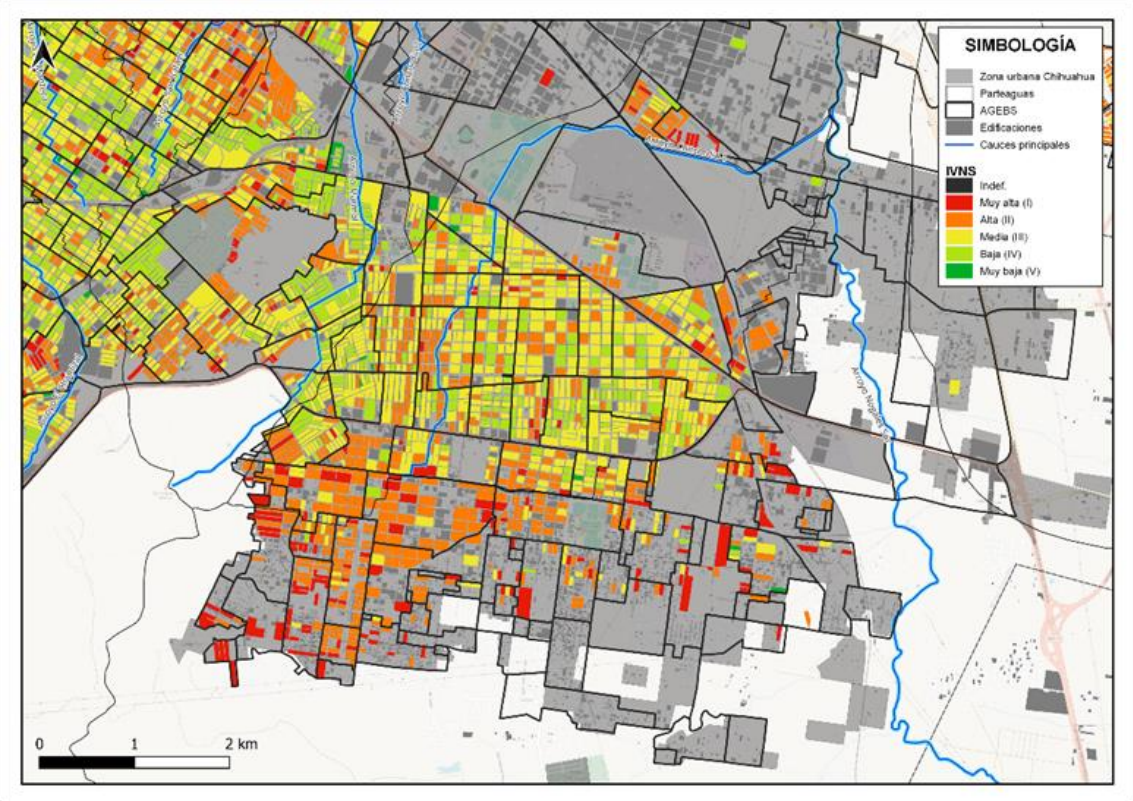


Figura 22. Mapa 6 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

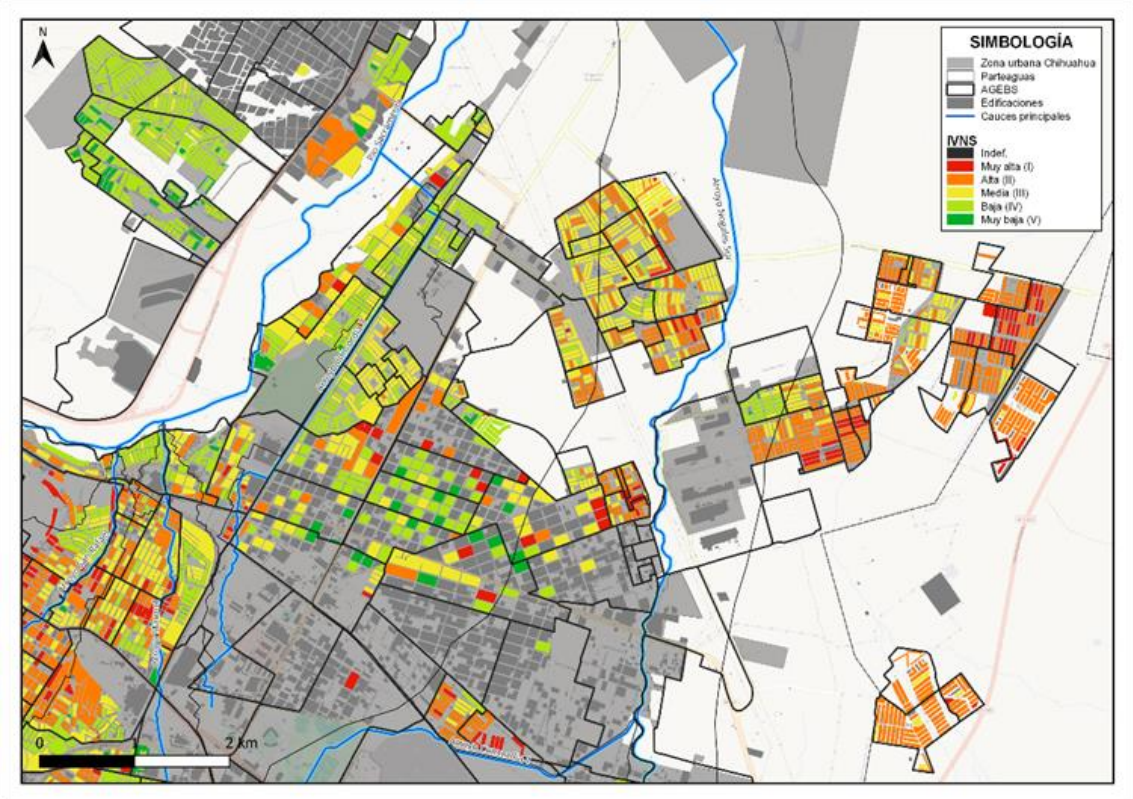


Figura 23. Mapa 7 de la Ciudad de Chihuahua, Índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico. Fuente: Elaboración propia con análisis de datos del INEGI (2020).

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

2.7. Definición de Zonas Críticas de Vulnerabilidad ante Inundaciones

Con base en el análisis previo, se determinó que el índice de población vulnerable no reveló zonas claramente más propensas a sufrir vulnerabilidad significativa. Por lo tanto, se consideró de manera primordial el índice de vulnerabilidad por nivel socioeconómico, el cual mostró consistencia con los cálculos anteriores realizados en los Atlas de riesgo del municipio de Chihuahua de los años 2014 y 2022.

Las áreas identificadas como más vulnerables están distribuidas principalmente en el norte, sur y sureste de la ciudad. En el norte, se destacan zonas como Riberas del Sacramento y Vistas del Norte, junto con las colonias Porvenir y Nuevo Triunfo (Figura 17), y parcialmente las colonias Revolución, Francisco Villa y C.D.P (Figura 18).

En la zona suroeste de la ciudad, se identificaron como vulnerables las colonias Esperanza, Miguel Hidalgo, Martín López, Ramón Reyes, Alfredo Chávez, Campesina Nueva, Valle de la Madrid, Pinos y Peña Blanca (ver Figura 19).

En el área central, se encontraron como vulnerables la colonia Paso del Norte, Cerro Prieto (ver Figura 18), 2 de octubre y Lealtad (ver Figura 21).

Por último, al sur y sureste de la ciudad se identificaron principalmente las colonias adyacentes al Periférico R. Almada, como Cerro Grande, Vistas Cerro Grande, 3 de mayo, La Soledad, División del Norte y Villa Juárez (ver Figura 22), así como las colonias Camino Real, Jardines de Oriente, Praderas del Sur, Portal del Real, Punta Oriente y Jardines de San Agustín, entre otras (ver Figura 23).

Esta distribución de la vulnerabilidad está fundamentada en análisis detallados de datos socioeconómicos y demográficos, lo que proporciona una visión técnica y precisa de las áreas más susceptibles en el municipio de Chihuahua.

3. Análisis de Drenajes Pluviales

3.1. Análisis para Gastos Máximos por Periodo de Retorno

Con base en los caudales determinados en el análisis superficial de este estudio en el **"informe 9 Integración del análisis de aguas superficiales"** se realizó el análisis para gastos máximos a nueve periodos de retorno. Para el estudio de los gastos máximos se consideraron 41 puntos de análisis en lo que se incluye mínimo un punto de análisis por cada uno de los 26 arroyos y 2 ríos incluidos en el análisis superficial (Figura 24).

En este análisis se calcularon la profundidad máxima de escurrimiento (tirante hidráulico) y velocidad máxima de escurrimiento, con base en simulaciones computacionales-hidráulicas simplificadas mediante el uso el programa computacional Hidra_Bas. Este programa realiza simulaciones hidráulicas a superficie libre de flujo permanente con base en la ecuación de Manning [17].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

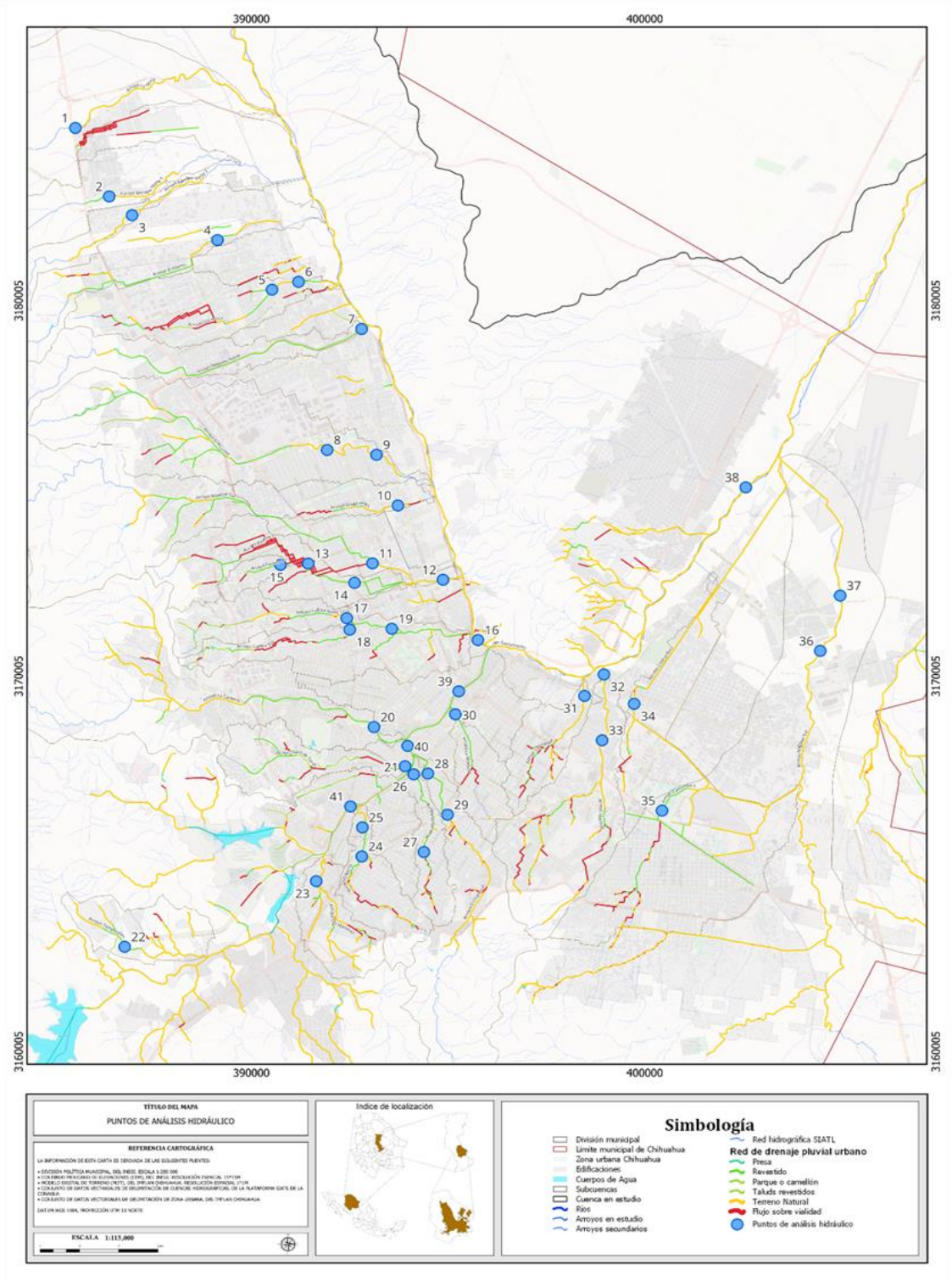


Figura 24. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico en el Municipio de Chihuahua. Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | **https://implanchihuahua.org/**

Para el uso del programa Hidra_Bas, fue necesario determinar algunas características geométricas e hidráulicas de los 41 puntos de análisis hidráulico. En la Tabla 5 y 6 se muestran las variables de cada cauce consideradas. Específicamente, respecto a su geometría se muestran los valores de su base, talud y altura, los cuales fueron considerados con base en lo descrito por el modelo digital de terreno (MDT) del IMPLAN, mismo archivo del que se obtuvieron valores para el cálculo de la pendiente descendiente media de cada cacuse.

Respecto a su altura, en una gran cantidad de cauces, especialmente en lo que se encuentran actualmente en sección de terreno natural, uno de los lados de la sección cuenta con mayor altura que el otro, por lo que para efectos del presente análisis se consideró la menor altura, con el fin de analizar el escenario más crítico y poder determinar el desbordamiento.

Por otro lado, respecto a los valores del coeficiente de resistencia al flujo “n de Manning” se consideraron valores de 0.035 para cauces en terreno natural, de 0.026 para el punto 41 en el que el río Chuvíscar cuenta con una sección con taludes revestidos y el fondo se encuentra en terreno natural, 0.025 para cauces con revestimiento de mampostería y 0.016 para canales revestidos con concreto.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 5. Variables geométricas de secciones transversales, características hidráulicas y caudales de análisis a 9 periodos de retorno de los puntos de análisis hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Punto de análisis	Cauce	Tipo de revestimiento	*n* de Manning	Base (m)	Talud i (1/k)	Talud d (1/k)	Pendiente (m/m)	Altura (m)	Caudal a cada Tr (m^3/s)								
									2	5	10	20	50	100	200	500	1,000
1	Arroyo La Noria	Terreno Natural	0.035	42.93	4.11	1.50	0.0101	1.45	14.66	26.97	38.65	51.49	71.63	88.64	107.42	127.16	143.46
2	Arroyo Mimbre Norte 1	Terreno Natural	0.035	20.42	3.03	3.27	0.0200	1.56	11.42	19.36	26.76	34.75	47.13	57.53	68.94	81.10	91.06
3	Arroyo Mimbre Norte 2	Terreno Natural	0.035	9.83	4.25	4.47	0.0200	0.83	12.52	19.62	26.09	32.95	43.38	52.09	61.57	72.08	80.59
4	Arroyo El Alamo	Terreno Natural	0.035	12.04	5.97	9.60	0.0165	1.00	20.42	29.30	37.00	44.89	56.38	65.85	76.06	88.07	97.63
5	Arroyo Los Arcos	Terreno Natural	0.035	8.71	4.16	4.71	0.0233	2.36	27.28	36.22	43.44	50.24	59.34	66.57	73.92	83.88	91.37
6	Arroyo Los Arcos	Terreno Natural	0.035	14.07	9.29	5.39	0.0092	1.28	27.28	36.22	43.44	50.24	59.34	66.57	73.92	83.88	91.37
7	Arroyo Nogales Norte	Concreto	0.016	6.33	1.40	1.49	0.0191	3.39	18.66	29.84	40.06	50.93	67.55	81.42	96.56	112.76	125.96
8	Arroyo El Picacho	Terreno Natural	0.035	25.64	2.03	4.72	0.0101	2.36	42.83	56.52	67.76	78.48	93.12	104.87	116.97	132.74	144.75
9	Arroyo El Picacho	Terreno Natural	0.035	15.14	1.78	1.17	0.0093	2.42	42.83	56.52	67.76	78.48	93.12	104.87	116.97	132.74	144.75
10	Arroyo Magallanes	Terreno Natural	0.035	6.82	2.38	0.92	0.0090	1.91	16.80	22.19	26.51	30.55	35.88	40.08	44.33	50.21	54.60
11	Arroyo Mimbre Sur	Terreno Natural	0.035	3.20	0.79	0.76	0.0104	2.68	41.96	57.01	69.82	82.51	100.65	115.45	131.08	149.82	164.48
12	Arroyo Mimbre Sur	Terreno Natural	0.035	8.97	2.49	1.45	0.0066	2.33	41.96	57.01	69.82	82.51	100.65	115.45	131.08	149.82	164.48
13	Arroyo Saucito 1	Concreto	0.016	1.80	0.00	0.00	0.0079	0.80	30.46	38.87	45.66	51.98	60.44	67.18	74.04	83.26	90.19
14	Arroyo Saucito 1	Terreno Natural	0.035	2.07	1.16	1.05	0.0101	1.80	30.46	38.87	45.66	51.98	60.44	67.18	74.04	83.26	90.19
15	Arroyo Saucito 2	Concreto	0.016	1.19	1.76	3.81	0.0113	1.24	9.78	12.28	14.27	16.10	18.49	20.39	22.30	24.95	26.92
16	Río Sacramento	Terreno Natural	0.035	55.22	3.35	6.69	0.0036	2.81	100.83	225.51	349.66	491.58	717.99	913.04	1,130.98	1,374.12	1,574.86
17	Arroyo Galera Norte	Terreno Natural	0.035	5.84	0.88	1.64	0.0112	1.43	14.35	18.11	21.14	23.92	27.62	30.56	33.53	37.59	40.62
18	Arroyo Galera Sur	Mampostería	0.025	5.29	1.52	1.79	0.0134	1.48	23.02	29.47	34.63	39.40	45.69	50.67	55.69	62.63	67.81
19	Arroyo Galera Sur	Mampostería	0.025	5.21	1.29	1.25	0.0107	1.62	60.40	77.06	90.40	102.72	119.00	131.89	144.92	162.85	176.23
20	Arroyo La Cantera	Concreto	0.016	6.60	0.00	0.00	0.0058	2.90	32.63	45.99	57.65	69.50	86.89	101.20	116.51	133.96	147.84
21	Arroyo Plaza de Toros	Mampostería	0.025	4.27	1.70	1.07	0.0171	1.80	15.44	25.43	33.53	41.43	52.02	60.38	68.88	80.51	89.29
22	Arroyo Los Temporales	Mampostería	0.025	8.62	1.00	1.00	0.0099	2.00	7.82	13.39	18.40	23.71	31.61	38.20	45.31	53.91	60.77
23	Arroyo Las Malvinas	Terreno Natural	0.035	3.20	2.41	2.99	0.0196	6.19	24.02	30.45	35.64	40.44	46.87	51.99	57.19	64.19	69.45
24	Arroyo El Barro	Mampostería	0.025	4.15	1.13	3.00	0.0085	0.46	17.62	22.40	26.27	29.88	34.73	38.59	42.54	47.79	51.75
25	Arroyo El Barro	Concreto	0.016	3.86	1.40	1.38	0.0131	1.84	17.62	22.40	26.27	29.88	34.73	38.59	42.54	47.79	51.75
26	Arroyo La Canoa	Concreto	0.016	2.60	0.00	0.00	0.0165	2.50	16.00	20.08	23.34	26.32	30.24	33.35	36.47	40.80	44.03
27	Arroyo La Canoa	Terreno Natural	0.035	6.30	4.42	1.76	0.0243	0.96	16.00	20.08	23.34	26.32	30.24	33.35	36.47	40.80	44.03
28	Arroyo El Chamizal	Concreto	0.016	3.60	0.00	0.00	0.0175	2.20	18.78	27.75	35.73	44.00	56.35	66.58	77.62	90.06	100.04
29	Arroyo El Chamizal	Terreno Natural	0.035	6.57	2.27	1.83	0.0120	1.79	18.78	27.75	35.73	44.00	56.35	66.58	77.62	90.06	100.04
30	Arroyo La Manteca	Concreto	0.016	2.80	0.00	0.00	0.0119	2.20	15.03	19.34	22.79	25.98	30.19	33.51	36.86	41.50	44.96
31	Arroyo San Rafael	Terreno Natural	0.035	4.13	2.62	2.82	0.0220	1.09	16.23	21.73	26.14	30.27	35.74	40.05	44.41	50.43	54.93
32	Arroyo Marmol	Terreno Natural	0.035	4.51	3.62	2.81	0.0121	2.41	45.22	60.01	72.02	83.38	98.66	110.82	123.25	139.91	152.49
33	Arroyo Marmol	Terreno Natural	0.035	7.31	2.85	1.65	0.0147	1.83	45.22	60.01	72.02	83.38	98.66	110.82	123.25	139.91	152.49
34	Arroyo Concordia 2	Terreno Natural	0.035	6.06	1.38	3.14	0.0118	0.97	9.78	12.28	14.27	16.10	18.49	20.39	22.30	24.95	26.92
35	Arroyo Concordia 1	Concreto	0.016	3.57	1.95	1.92	0.0145	1.24	57.80	77.09	92.55	107.02	126.15	141.26	156.51	177.60	193.36
36	Arroyo Nogales Sur	Terreno Natural	0.035	9.34	2.02	1.90	0.0039	4.91	73.75	121.73	166.12	214.04	287.32	349.04	416.67	493.17	555.26
37	Arroyo Nogales Sur	Terreno Natural	0.035	12.08	1.67	1.85	0.0060	3.82	73.75	121.73	166.12	214.04	287.32	349.04	416.67	493.17	555.26
38	Río Sacramento	Terreno Natural	0.035	439.90	21.73	8.72	0.0054	3.10	212.06	420.03	624.18	854.71	1,219.02	1,531.93	1,879.98	2,273.88	2,597.25
39	Río Chuvíscar	Concreto	0.016	14.26	1.00	1.00	0.0042	5.42	128.11	254.59	379.37	520.60	744.29	936.72	1,150.81	1,393.36	1,592.47
40	Río Chuvíscar	Concreto	0.016	16.32	1.00	1.00	0.0088	4.88	97.13	212.12	327.08	458.53	668.19	849.16	1,051.12	1,279.30	1,467.14
41	Río Chuvíscar	Taludes revestidos	0.026	31.58	1.63	1.33	0.0059	3.96	53.04	149.94	249.81	366.47	555.52	719.88	904.54	1,110.85	1,281.83

Tabla 6. Tirante y velocidad de cada punto de análisis hidráulico a nueves periodos de retorno. Fuente: elaboración propia.

Punto de análisis	Cauce	Periodo de retorno (años)																	
		2		5		10		20		50		100		200		500		1,000	
		Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)
1	Arroyo La Noria	0.28	1.26	0.40	1.53	0.49	1.75	0.59	1.96	0.72	2.23	0.81	2.40	0.91	2.59	1.01	2.75	1.08	2.88
2	Arroyo Mimbre Norte 1	0.30	1.76	0.41	2.15	0.50	2.42	0.58	2.66	0.70	2.97	0.79	3.19	0.87	3.40	0.96	3.60	1.02	3.74
3	Arroyo Mimbre Norte 2	0.47	1.11	0.61	2.55	0.72	2.79	0.81	3.00	0.95	3.26	1.04	3.44	1.15	3.61	1.24	3.78	1.32	3.90
4	Arroyo El Alamo	0.57	2.15	0.70	2.40	0.79	2.57	0.87	2.72	0.99	2.91	1.07	3.03	1.15	3.16	1.24	3.29	1.30	3.39
5	Arroyo Los Arcos	0.75	3.03	0.87	3.30	0.96	3.48	1.03	3.63	1.13	3.81	1.20	3.94	1.26	4.06	1.35	4.20	1.41	4.30
6	Arroyo Los Arcos	0.74	1.89	0.86	2.06	0.95	2.18	1.02	2.27	1.11	2.39	1.18	2.46	1.25	2.53	1.33	2.63	1.39	2.69
7	Arroyo Nogales Norte	0.51	5.02	0.67	5.89	0.80	6.50	0.92	7.03	1.08	7.70	1.20	8.10	1.32	8.59	1.45	9.00	1.53	9.30
8	Arroyo El Picacho	0.71	2.15	0.83	2.38	0.93	2.54	1.01	2.67	1.12	2.83	1.20	2.95	1.28	3.06	1.37	3.20	1.44	3.30
9	Arroyo El Picacho	1.00	2.55	1.18	2.81	1.32	3.00	1.44	3.15	1.59	3.34	1.70	3.47	1.81	3.61	1.96	3.76	2.05	3.87
10	Arroyo Magallanes	0.91	2.20	1.07	2.40	1.19	2.54	1.29	2.66	1.41	2.79	1.50	2.88	1.59	2.97	1.70	3.07	1.78	3.15
11	Arroyo Mimbre Sur	2.38	3.47	2.81	3.76	3.13	3.96	3.41	4.12	3.78	4.33	4.06	4.49	4.33	4.62	4.61	4.78	4.83	4.89
12	Arroyo Mimbre Sur	0.75	5.40	0.89	5.99	1.00	6.40	1.10	6.76	1.23	7.20	1.32	7.50	1.42	7.80	1.54	8.10	1.61	8.37
13	Arroyo Saucito 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Arroyo Saucito 1	2.18	3.13	2.45	3.33	2.64	3.46	2.80	3.58	3.01	3.71	3.17	3.82	3.30	3.90	3.49	4.02	3.62	4.10
15	Arroyo Saucito 2	0.77	3.85	0.85	4.09	0.91	4.25	0.96	3.38	1.02	4.54	1.07	4.65	1.10	4.75	1.16	4.88	1.19	4.99
16	Río Sacramento	1.02	1.64	1.63	2.18	2.10	2.54	2.54	2.83	3.15	3.20	3.60	3.45	4.05	3.69	4.51	3.92	4.85	4.08
17	Arroyo Galera Norte	0.88	2.38	1.00	2.56	1.10	2.69	1.18	2.80	1.28	2.92	1.35	3.01	1.42	3.10	1.51	3.20	1.58	3.27
18	Arroyo Galera Sur	0.92	3.68	1.05	3.97	1.16	4.17	1.25	4.32	1.34	4.52	1.43	4.65	1.50	4.78	1.60	4.94	1.67	5.06
19	Arroyo Galera Sur	1.75	4.65	1.99	4.99	2.18	5.22	2.33	5.40	2.51	5.63	2.66	5.79	2.79	5.93	2.96	6.12	3.00	6.25
20	Arroyo La Cantera	1.14	4.34	1.43	4.84	1.68	5.20	1.92	5.50	2.24	5.80	2.50	6.12	2.77	6.36	3.07	6.60	3.31	6.67
21	Arroyo Plaza de Toros	0.76	3.64	1.01	4.23	1.17	4.60	1.31	4.88	1.48	5.20	1.60	5.42	1.70	5.61	1.85	5.86	1.96	6.02
22	Arroyo Los Temporales	0.42	2.03	0.59	2.48	0.72	2.78	0.83	3.03	0.99	3.35	1.10	3.57	1.22	3.78	1.36	4.00	1.46	4.17
23	Arroyo Las Malvinas	1.16	3.28	1.30	3.50	1.40	3.64	1.49	3.77	1.59	3.91	1.67	4.01	1.75	4.11	1.84	4.25	1.91	4.34
24	Arroyo El Barro	0.98	2.89	1.12	3.10	1.22	3.25	1.30	3.36	1.40	3.50	1.48	3.60	1.55	3.70	1.66	3.82	1.73	3.91
25	Arroyo El Barro	0.74	4.89	0.85	5.26	0.92	5.52	0.99	5.73	1.08	5.99	1.15	6.17	1.20	6.35	1.28	6.57	1.34	6.71
26	Arroyo La Canoa	1.08	5.66	1.29	6.00	1.45	6.23	1.58	6.40	1.76	6.61	1.90	6.75	2.04	6.89	2.23	7.04	2.37	7.15
27	Arroyo La Canoa	0.67	2.89	0.76	3.10	0.82	3.24	0.88	3.36	0.95	3.50	0.99	3.59	1.04	3.69	1.11	3.82	1.15	3.90
28	Arroyo El Chamizal	0.90	5.86	1.18	6.58	1.40	7.06	1.63	7.47	1.98	7.94	2.24	8.26	2.52	8.54	2.84	8.81	3.08	9.01
29	Arroyo El Chamizal	0.90	2.48	1.18	2.80	1.29	3.03	1.45	3.22	1.65	3.46	1.80	3.63	1.95	3.79	2.10	3.94	2.23	4.07
30	Arroyo La Manteca	1.09	4.92	1.31	5.26	1.49	5.49	1.65	5.66	1.85	5.86	2.00	5.99	2.16	6.11	2.36	6.26	2.52	6.35
31	Arroyo San Rafael	0.84	3.01	0.98	3.27	1.08	3.45	1.16	3.59	1.26	3.76	1.34	3.86	1.41	3.98	1.50	4.12	1.56	4.22
32	Arroyo Marmol	1.55	3.10	1.76	3.34	1.93	3.50	2.05	3.64	2.23	3.80	2.34	3.92	2.47	4.03	2.61	4.17	2.72	4.26
33	Arroyo Marmol	1.30	3.40	1.51	3.69	1.67	3.89	1.81	4.06	1.97	4.25	2.10	4.39	2.22	4.53	2.37	4.69	2.47	4.80
34	Arroyo Concordia 2	0.65	2.01	0.74	2.17	0.80	2.27	0.86	2.36	0.93	2.46	0.98	2.53	1.03	2.61	1.09	2.69	1.13	2.76
35	Arroyo Concordia 1	1.28	6.62	1.48	7.14	1.61	7.50	1.73	7.80	1.87	8.14	1.97	8.38	2.07	8.61	2.29	8.85	2.28	9.09
36	Arroyo Nogales Sur	2.22	2.42	2.90	2.80	3.40	3.05	3.86	3.27	4.48	3.54	4.93	3.72	5.38	3.90	5.83	4.08	6.17	4.20
37	Arroyo Nogales Sur	1.77	2.76	2.33	3.22	2.78	3.54	3.19	3.81	3.72	4.14	4.13	4.37	4.53	4.59	4.95	4.81	3.25	4.97
38	Río Sacramento	0.42	1.16	0.62	1.50	0.79	1.76	0.95	1.99	1.18	2.28	1.35	2.49	1.52	2.69	1.70	2.88	1.83	3.01
39	Río Chuvíscar	1.62	4.99	2.44	6.27	3.07	7.11	3.70	7.40	4.55	8.70	5.17	9.31	5.82	9.86	6.46	10.40	6.96	10.80
40	Río Chuvíscar	1.02	5.52	1.62	7.30	2.10	8.47	2.57	9.48	3.20	10.70	3.69	11.53	4.18	12.31	4.68	13.05	5.06	13.59
41	Río Chuvíscar	0.72	2.29	1.33	3.38	1.80	4.08	2.26	4.67	2.88	5.40	3.35	5.89	3.83	3.35	4.32	6.80	4.69	7.12

3.2. Análisis del Funcionamiento Hidráulico de los Arroyos y Canales Urbanos

Con base en las profundidades máximas de escurrimiento y las velocidades máximas (Tabla 5 y 6) obtenidas del análisis de caudales máximos, se llevó a cabo un análisis del funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos de la ciudad de Chihuahua. En este análisis, se identificaron, en cada uno de los 41 puntos de análisis hidráulico sobre arroyos y ríos, la presencia de problemas por desbordamiento o por alta velocidad.

3.2.1. Análisis por desbordamiento de cauces

En el análisis de desbordamiento de cauces realizado en los 41 puntos seleccionados (Figura 24), se determinó el caudal a partir del cual se produce un desbordamiento en cada ubicación, considerando diferentes periodos de retorno. Es importante destacar que los casos en los que el nivel del agua cae por debajo de 0.00m ("inferior" en los registros), indican un desbordamiento del cauce que no fue objeto de este análisis.

Los resultados se detallan en la Tabla 7 y en la Figura 25, donde se muestra el periodo de retorno asociado con el desbordamiento en cada punto analizado.

De los 41 puntos analizados por desbordamiento, destaca primeramente el punto de análisis 13, del arroyo Saucito, correspondiente a una conducción pluvial subterránea que inicia en la intersección de la Av. Juan Escutia y c. González Cossío, con revestimiento de concreto y sección rectangular 1.80m de base y 0.80m de altura. La cual no pudo ser analizada, ya que tiene capacidad de conducción inferior al caudal con periodo de retorno de 2 años, por lo que, prácticamente cada año se ve rebasada su capacidad de conducción.

Posteriormente, destacan 4 puntos de análisis que desde el caudal correspondiente al periodo de retorno de 2 años presentan desbordamientos, 1 presenta desbordamientos a partir del caudal de periodo de retorno de 5 años, otro al periodo de retorno de 20 años, 3 al periodo de retorno de 50 años, 7 al periodo de retorno de 100 años, tres al periodo de retorno de 200 años, 5 al periodo de retorno de 500 años, uno al periodo de retorno de 1,000 años y, por último, 14 puntos de análisis no presentan desbordamiento aun con el caudal de periodo de retorno de 1,000 años, por lo que su desbordamiento sería, teóricamente, causado por un caudal superior a 1,000 años.

A continuación, se enlistan cada uno de los puntos de análisis con respecto al periodo de retorno en el cual el caudal correspondiente provoca desbordamiento:

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **2 años** o inferior:

- 14-Arroyo Saucito
- 19-Arroyo Galera sur
- 24-Arroyo el Barro
- 35-Arroyo Concordia 1

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **5 años**:

- 11-Arroyo Mimbre sur.

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **20 años**:

- 31-Arroyo San Rafael.

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **50 años**:

- 3-Arroyo Mimbre Norte 1
- 16-Río Sacramento
- 33-Arroyo Mármol

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **100 años**:

- 4-Arroyo El Álamo
- 27-Arroyo La Canoa
- 28-Arroyo el Chamizal
- 29-Arroyo El Chamizal

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **200 años**:

- 18-Arroyo Galera Sur
- 39-Río Chuvíscar

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **500 años**:

- 6-Arroyo Los Arcos
- 17-Arroyo Galera Norte
- 20-Arroyo La Cantera
- 21-Arroyo Plaza de Toros
- 30-Arroyo La Manteca
- 41-Río Chuvíscar

Puntos con desbordamiento al caudal de periodo de retorno de **1,000 años**:

- 40-Río Chuvíscar

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Puntos con desbordamiento al caudal superior al del periodo de retorno de **1,000 años**:

- 1-Arroyo La Noria
- 2-Arroyo Mimbre Norte 1
- 5-Arroyo Los Arcos
- 7-Arroyo Nogales Norte
- 8-Arroyo El Pichacho
- 9-Arroyo El Pichacho
- 10-Arroyo Magallanes
- 12-Arroyo Mimbre Sur
- 15-Arroyo Saucito 2
- 22-Arroyo Los Temporales
- 23-Arroyo Las Malvinas
- 25-Arroyo El Barro
- 26-Arroyo La Canoa
- 38-Río Sacramento

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 7. Puntos de análisis hidráulico con desbordamiento a cada periodo de retorno analizado a. Fuente: elaboración propia.

Punto de análisis	Cauce	Bordo libre (m) a cada periodo de retorno								
		2	5	10	20	50	100	200	500	1000
1	Arroyo La Noria	1.17	1.05	0.96	0.86	0.73	0.64	0.54	0.44	0.37
2	Arroyo Mimbre Norte 1	1.26	1.15	1.06	0.98	0.86	0.77	0.69	0.60	0.54
3	Arroyo Mimbre Norte 2	0.36	0.22	0.11	0.02	-0.12	-0.21	-0.32	-0.41	-0.49
4	Arroyo El Alamo	0.43	0.30	0.21	0.13	0.01	-0.07	-0.15	-0.24	-0.30
5	Arroyo Los Arcos	1.61	1.49	1.40	1.33	1.23	1.16	1.10	1.01	0.95
6	Arroyo Los Arcos	0.54	0.42	0.33	0.26	0.17	0.10	0.03	-0.05	-0.11
7	Arroyo Nogales Norte	2.88	2.72	2.59	2.47	2.31	2.19	2.07	1.94	1.86
8	Arroyo El Picacho	1.65	1.53	1.43	1.35	1.24	1.16	1.08	0.99	0.92
9	Arroyo El Picacho	1.42	1.24	1.10	0.98	0.83	0.72	0.61	0.46	0.37
10	Arroyo Magallanes	1.00	0.84	0.72	0.62	0.50	0.41	0.32	0.21	0.13
11	Arroyo Mimbre Sur	0.30	-0.13	-0.45	-0.73	-1.10	-1.38	-1.65	-1.93	-2.15
12	Arroyo Mimbre Sur	1.58	1.44	1.33	1.23	1.10	1.01	0.91	0.79	0.72
13	Arroyo Saucito 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Arroyo Saucito 1	-0.38	-0.65	-0.84	-1.00	-1.21	-1.37	-1.50	-1.69	-1.82
15	Arroyo Saucito 2	0.47	0.39	0.33	0.28	0.22	0.17	0.14	0.08	0.05
16	Río Sacramento	1.79	1.18	0.71	0.27	-0.34	-0.79	-1.24	-1.70	-2.04
17	Arroyo Galera Norte	0.55	0.43	0.33	0.25	0.15	0.08	0.01	-0.08	-0.15
18	Arroyo Galera Sur	0.56	0.43	0.32	0.23	0.14	0.05	-0.02	-0.12	-0.19
19	Arroyo Galera Sur	-0.13	-0.37	-0.56	-0.71	-0.89	-1.04	-1.17	-1.34	-1.38
20	Arroyo La Cantera	1.76	1.47	1.22	0.98	0.66	0.40	0.13	-0.17	-0.41
21	Arroyo Plaza de Toros	1.04	0.79	0.63	0.49	0.32	0.20	0.10	-0.05	-0.16
22	Arroyo Los Temporales	1.58	1.41	1.28	1.17	1.01	0.90	0.78	0.64	0.54
23	Arroyo Las Malvinas	5.03	4.89	4.79	4.70	4.60	4.52	4.44	4.35	4.28
24	Arroyo El Barro	-0.52	-0.66	-0.76	-0.84	-0.94	-1.02	-1.09	-1.20	-1.27
25	Arroyo El Barro	1.10	0.99	0.92	0.85	0.76	0.69	0.64	0.56	0.50
26	Arroyo La Canoa	1.42	1.21	1.05	0.92	0.74	0.60	0.46	0.27	0.13
27	Arroyo La Canoa	0.29	0.20	0.14	0.08	0.01	-0.03	-0.08	-0.15	-0.19
28	Arroyo El Chamizal	1.30	1.02	0.80	0.57	0.22	-0.04	-0.32	-0.64	-0.88
29	Arroyo El Chamizal	0.89	0.61	0.50	0.34	0.14	-0.01	-0.16	-0.31	-0.44
30	Arroyo La Manteca	1.11	0.89	0.71	0.55	0.35	0.20	0.04	-0.16	-0.32
31	Arroyo San Rafael	0.25	0.11	0.01	-0.07	-0.17	-0.25	-0.32	-0.41	-0.47
32	Arroyo Marmol	0.86	0.65	0.48	0.36	0.18	0.07	-0.06	-0.20	-0.31
33	Arroyo Marmol	0.53	0.32	0.16	0.02	-0.14	-0.27	-0.39	-0.54	-0.64
34	Arroyo Concordia 2	0.32	0.23	0.17	0.11	0.04	-0.01	-0.06	-0.12	-0.16
35	Arroyo Concordia 1	-0.04	-0.24	-0.37	-0.49	-0.63	-0.73	-0.83	-1.05	-1.04
36	Arroyo Nogales Sur	2.69	2.01	1.51	1.05	0.43	-0.02	-0.47	-0.92	-1.26
37	Arroyo Nogales Sur	2.05	1.49	1.04	0.63	0.10	-0.31	-0.71	-1.13	0.57
38	Río Sacramento	2.68	2.48	2.31	2.15	1.92	1.75	1.58	1.40	1.27
39	Río Chuvíscar	3.80	2.98	2.35	1.72	0.87	0.25	-0.40	-1.04	-1.54
40	Río Chuvíscar	3.86	3.26	2.78	2.31	1.68	1.19	0.70	0.20	-0.18
41	Río Chuvíscar	3.24	2.63	2.16	1.70	1.08	0.61	0.13	-0.36	-0.73

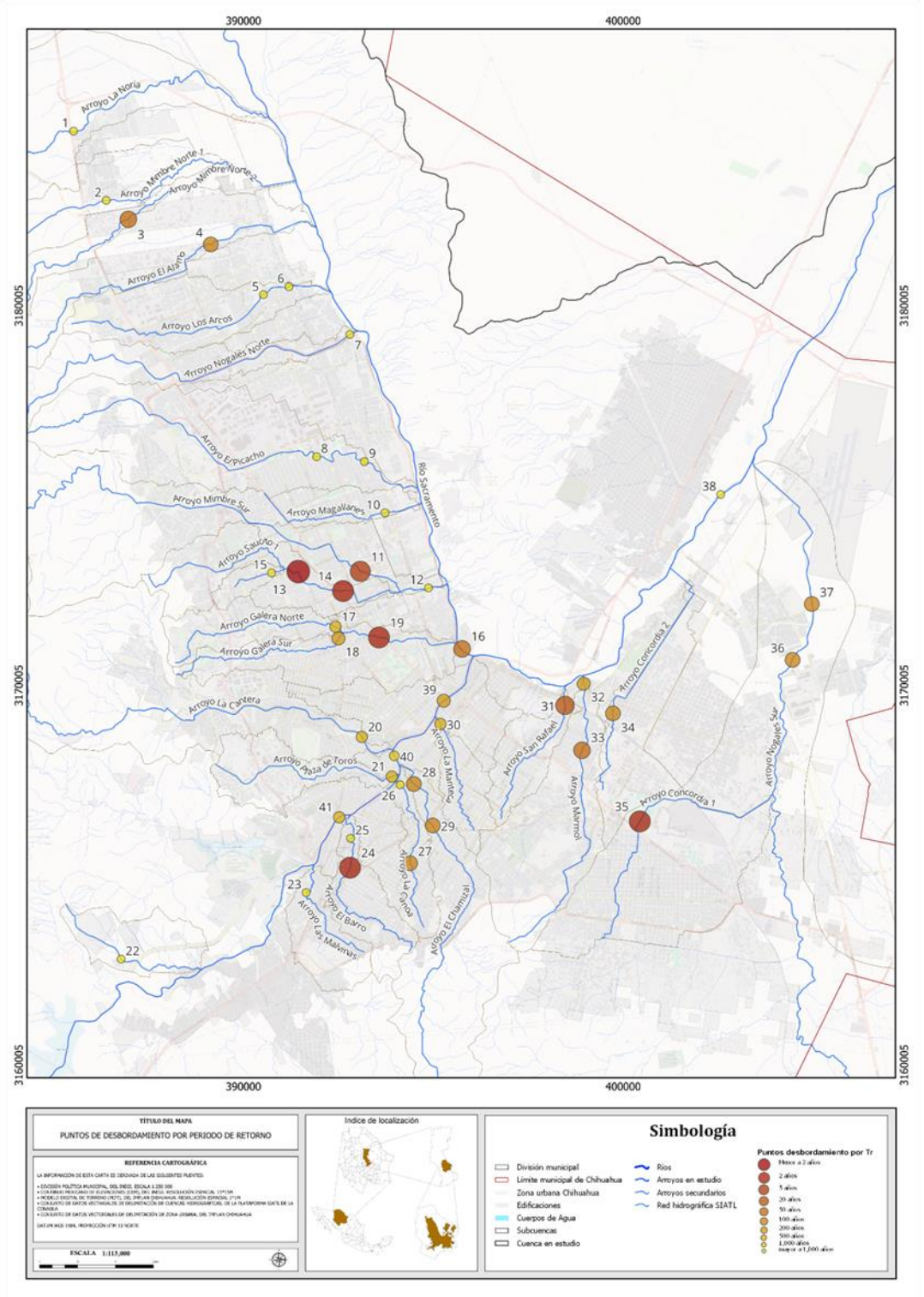


Figura 25. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico con desbordamiento, por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Análisis por altas velocidades en cauces

Al igual que en el análisis por desbordamiento, se identificaron en cada uno de los puntos de análisis a partir del caudal de que periodo de retorno se presentaban problemas por alta velocidades de escurrimiento.

Para este análisis se establecieron las velocidades máximas permisibles de escurrimiento para cada tipo de revestimiento, siguiendo las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias de la CONAGUA [(18)] y al manual de diseño "Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades-Alcantarillado Pluvial" de SIAPA (2014) [(19)]. Se consideraron velocidades máximas permisibles de 3.00 m/s para cauces sin revestimiento o con taludes revestidos, pero fondo en terreno natural, 5.50 m/s para cauces con revestimiento de mampostería y 7.00 m/s para cauces con revestimiento de concreto.

Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 8, donde se muestra, para cada punto, el periodo de retorno a partir del cual la velocidad de escurrimiento supera la máxima permisible. Este análisis también se presenta gráficamente en la Figura 26, donde se ilustra la velocidad en cada punto para los 9 periodos de retorno analizados, resaltando aquellos puntos donde la velocidad excede la máxima permisible según su tipo de revestimiento.

De los 41 puntos analizados, se identificó que 9 de ellos presentaron problemas por alta velocidad a partir del periodo de retorno de 2 años, 5 de ellos a partir del periodo de retorno de 5 años, otros 5 a partir del periodo de retorno de 10 años, 2 a partir del periodo de retorno de 20 años, 2 a partir del periodo de retorno de 50 años, 3 a partir del periodo de retorno de 100 años, 1 a partir del periodo de retorno de 200 años, 2 a partir del periodo de retorno de 500 años, 1 a partir del periodo de retorno de 1,000 años y, finalmente, 10 de ellos no mostraron una velocidad superior a la máxima permisible incluso en el periodo de retorno de 1,000 años.

A continuación, se enlistan cada uno de los puntos de análisis con respecto al periodo de retorno en el cual su caudal provoca velocidad de escurrimiento superior a la máxima permisible:

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal de periodo del retorno de **2 años** o inferior:

- 5-Arroyo Los Arcos
- 11-Arroyo Mimbre Sur
- 12-Arroyyo Mimbre Sur
- 13-Arroyo Saucito 1*
- 14-Arroyo Saucito 1
- 23-Arroyo Las Malvinas
- 31-Arroyo San Rafael
- 32-Arroyo Mármol

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

- 33-Arroyo Mármol

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **5 años**:

- 27-Arroyo La Canoa
- 35-Arroyo Concordia 1
- 37-Arroyo Nogales Sur
- 40-Río Chuvíscar
- 41-Río Chuvíscar

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **10 años**:

- 9-Arroyo El Picacho
- 28-Arroyo El Chamizal
- 29-Arroyo El Chamizal
- 36-Arroyo Nogales Sur
- 39-Río Chuvíscar

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **20 años**:

- 3-Arroyo Mimbre Norte 2
- 7-Arroyo Nogales Norte

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **50 años**:

- 16- Río Sacramento
- 19-Arroyo Galera Sur

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **100 años**:

- 2- Arroyo Mimbre16- Río Sacramento
- 4-Arroyo El Álamo
- 17-Arroyo Galera Norte.

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **200 años**:

- 21-Plaza de Toros.

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal de periodo del retorno de **500 años**:

- 10-Arroyo Magallanes
- 26-Arroyo La Canoa.

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible al caudal del periodo de retorno de **1,000 años**:

- 38-Río Sacramento

Puntos con velocidad superior a la máxima permisible a caudal superior al del periodo de retorno de **1,000 años**:

- 6-Arroyo Los Arcos
- 8-Arroyo El Picacho
- 15-Arroyo Saucito 2
- 18-Arroyo Galera Sur
- 20-Arroyo La Cantera
- 22-Arroyo Los Temporales
- 24-Arroyo El Barro
- 25-Arroyo El Barro
- 30-Arroyo La Manteca
- 34-Arroyo Concordia 2.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 8. Puntos de análisis hidráulico con problemas por velocidad a cada periodo de retorno analizado. Fuente: elaboración propia.

Punto de análisis	Cauce	Velocidad a cada periodo de retorno (m/s)								
		2	5	10	20	50	100	200	500	1,000
1	Arroyo La Noria	1.26	1.53	1.75	1.96	2.23	2.40	2.59	2.75	2.88
2	Arroyo Mimbre Norte 1	1.76	2.15	2.42	2.66	2.97	3.19	3.40	3.60	3.74
3	Arroyo Mimbre Norte 2	1.11	2.55	2.79	3.00	3.26	3.44	3.61	3.78	3.90
4	Arroyo El Alamo	2.15	2.40	2.57	2.72	2.91	3.03	3.16	3.29	3.39
5	Arroyo Los Arcos	3.03	3.30	3.48	3.63	3.81	3.94	4.06	4.20	4.30
6	Arroyo Los Arcos	1.89	2.06	2.18	2.27	2.39	2.46	2.53	2.63	2.69
7	Arroyo Nogales Norte	5.02	5.89	6.50	7.03	7.70	8.10	8.59	9.00	9.30
8	Arroyo El Picacho	2.15	2.38	2.54	2.67	2.83	2.95	3.06	3.20	3.30
9	Arroyo El Picacho	2.55	2.81	3.00	3.15	3.34	3.47	3.61	3.76	3.87
10	Arroyo Magallanes	2.20	2.40	2.54	2.66	2.79	2.88	2.97	3.07	3.15
11	Arroyo Mimbre Sur	3.47	3.76	3.96	4.12	4.33	4.49	4.62	4.78	4.89
12	Arroyo Mimbre Sur	5.40	5.99	6.40	6.76	7.20	7.50	7.80	8.10	8.37
13	Arroyo Saucito 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Arroyo Saucito 1	3.13	3.33	3.46	3.58	3.71	3.82	3.90	4.02	4.10
15	Arroyo Saucito 2	3.85	4.09	4.25	3.38	4.54	4.65	4.75	4.88	4.99
16	Río Sacramento	1.64	2.18	2.54	2.83	3.20	3.45	3.69	3.92	4.08
17	Arroyo Galera Norte	2.38	2.56	2.69	2.80	2.92	3.01	3.10	3.20	3.27
18	Arroyo Galera Sur	3.68	3.97	4.17	4.32	4.52	4.65	4.78	4.94	5.06
19	Arroyo Galera Sur	4.65	4.99	5.22	5.40	5.63	5.79	5.93	6.12	6.25
20	Arroyo La Cantera	4.34	4.84	5.20	5.50	5.80	6.12	6.36	6.60	6.67
21	Arroyo Plaza de Toros	3.64	4.23	4.60	4.88	5.20	5.42	5.61	5.86	6.02
22	Arroyo Los Temporales	2.03	2.48	2.78	3.03	3.35	3.57	3.78	4.00	4.17
23	Arroyo Las Malvinas	3.28	3.50	3.64	3.77	3.91	4.01	4.11	4.25	4.34
24	Arroyo El Barro	2.89	3.10	3.25	3.36	3.50	3.60	3.70	3.82	3.91
25	Arroyo El Barro	4.89	5.26	5.52	5.73	5.99	6.17	6.35	6.57	6.71
26	Arroyo La Canoa	5.66	6.00	6.23	6.40	6.61	6.75	6.89	7.04	7.15
27	Arroyo La Canoa	2.89	3.10	3.24	3.36	3.50	3.59	3.69	3.82	3.90
28	Arroyo El Chamizal	5.86	6.58	7.06	7.47	7.94	8.26	8.54	8.81	9.01
29	Arroyo El Chamizal	2.48	2.80	3.03	3.22	3.46	3.63	3.79	3.94	4.07
30	Arroyo La Manteca	4.92	5.26	5.49	5.66	5.86	5.99	6.11	6.26	6.35
31	Arroyo San Rafael	3.01	3.27	3.45	3.59	3.76	3.86	3.98	4.12	4.22
32	Arroyo Marmol	3.10	3.34	3.50	3.64	3.80	3.92	4.03	4.17	4.26
33	Arroyo Marmol	3.40	3.69	3.89	4.06	4.25	4.39	4.53	4.69	4.80
34	Arroyo Concordia 2	2.01	2.17	2.27	2.36	2.46	2.53	2.61	2.69	2.76
35	Arroyo Concordia 1	6.62	7.14	7.50	7.80	8.14	8.38	8.61	8.85	9.09
36	Arroyo Nogales Sur	2.42	2.80	3.05	3.27	3.54	3.72	3.90	4.08	4.20
37	Arroyo Nogales Sur	2.76	3.22	3.54	3.81	4.14	4.37	4.59	4.81	4.97
38	Río Sacramento	1.16	1.50	1.76	1.99	2.28	2.49	2.69	2.88	3.01
39	Río Chuvíscar	4.99	6.27	7.11	7.40	8.70	9.31	9.86	10.40	10.80
40	Río Chuvíscar	5.52	7.30	8.47	9.48	10.70	11.53	12.31	13.05	13.59
41	Río Chuvíscar	2.29	3.38	4.08	4.67	5.40	5.89	3.35	6.80	7.12

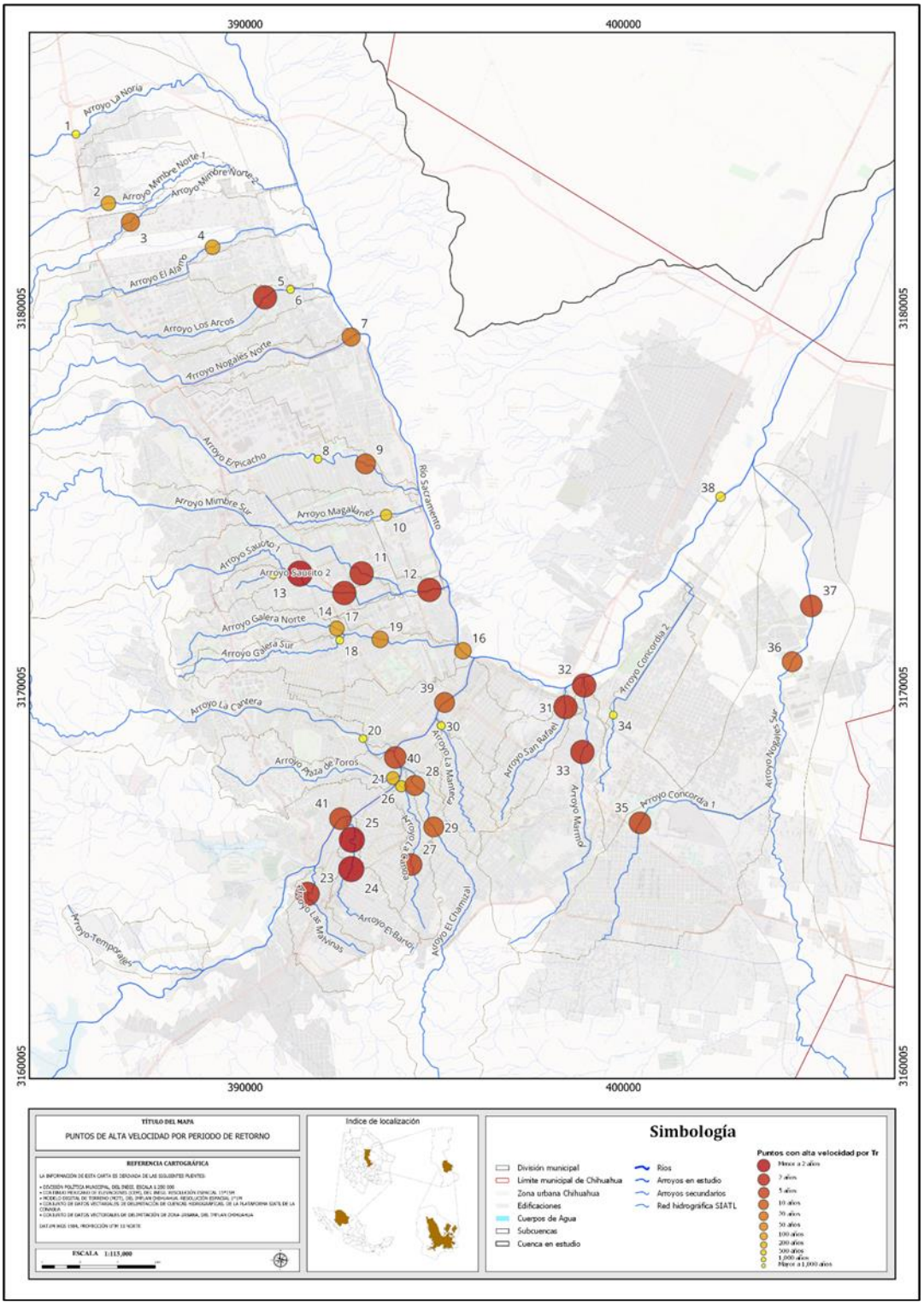


Figura 26. Ubicación de los puntos de análisis hidráulico con velocidad alta, por periodo de retorno. Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | **https://implanchihuahua.org/**

Considerando los análisis de desbordamiento y de altas velocidades de escurrimiento, es importante destacar que algunos puntos no muestran desbordamiento hasta periodos de retorno relativamente altos, pero sí presentan velocidades de escurrimiento altas desde periodos de retorno bajos. Por ejemplo, los puntos 12-Arroyo Mimbre Sur y 23-Arroyo Las Malvinas no presentan desbordamiento incluso hasta el periodo de retorno de 1,000 años, pero tienen velocidades superiores a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 2 años. En contraste, el punto 24-Arroyo El Barro no tiene problemas por alta velocidad, pero muestra desbordamiento desde el periodo de retorno de 2 años. Estos casos plantean dificultades para determinar si existen problemas pluviales debido a los resultados contradictorios entre desbordamiento y altas velocidades.

Por otro lado, es crucial prestar atención a los puntos 13 y 14 en el arroyo Saucito, donde el punto 13 no pudo ser analizado y el punto 14 presenta desbordamiento y velocidades superiores a las máximas permisibles desde el periodo de retorno de 2 años.

Asimismo, los puntos de análisis 35-Arroyo Concordia 1, el cual presenta desbordamientos desde el periodo de retorno de 2 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 5 años, por su parte el punto 11-Arroyo Mimbre Sur presenta desbordamiento desde el periodo de retorno de 5 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 2 años. Por último, el punto de análisis 31-Arroyo San Rafael presenta desbordamientos desde el periodo de retorno de 20 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 2 años.

Es importante mencionar que, debido a las simplificaciones realizadas en este análisis y al alcance de este, se analizaron los 41 puntos más relevantes de los 28 cauces estudiados. Sin embargo, existe la posibilidad de que haya otros puntos en los cauces con problemas de desbordamiento o altas velocidades de escurrimiento que no fueron identificados en este análisis. Asimismo, es necesario tener en cuenta que los puntos donde no se identificaron desbordamientos o altas velocidades no necesariamente están libres de problemas pluviales. Simplemente, estos problemas no fueron identificados en el presente análisis hidráulico. Por lo tanto, no se debe descartar la necesidad de realizar un análisis más detallado en esos puntos, así como acciones de mantenimiento, rediseño o manejo de aguas pluviales. Por esta razón, se recomienda realizar un análisis hidráulico de drenaje pluvial detallado en cada uno de los cauces del municipio de Chihuahua.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

3.3. Análisis de los Drenajes Pluviales Existentes

El aumento de afectaciones por inundaciones tiene una componente climatológica relacionada al cambio climático como se menciona en **el Informe 5 de este estudio Integración del análisis de riesgos y resiliencia hídrica**, así mismo, el municipio de Chihuahua cuenta con un factor que puede llegar a incrementar las afectaciones por inundaciones. Como se aprecia en la Figura 27, la zona de estudio se caracteriza por contar con lluvias de tipo convectivas, en las cuales son lluvias de alta intensidad en las que se precipita una cantidad relativamente grande de agua en relativamente poco tiempo; coloquialmente conocemos este tipo de precipitación como “lluvias torrenciales”, “chubascos” o incluso “trombas”.

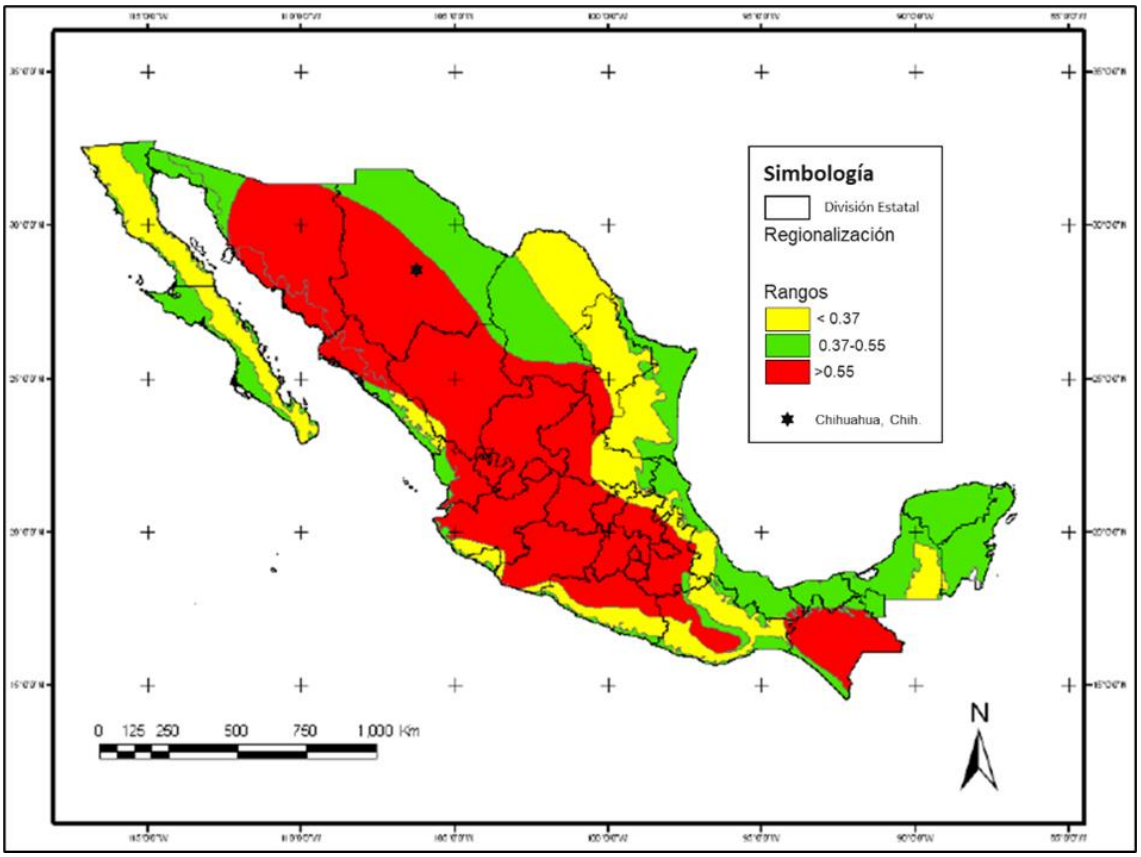


Figura 27. Factor de convectividad en la República Mexicana. Fuente: Baeza Ramírez (2007) [20].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Este tipo de lluvias favorecen la rápida acumulación de agua en ríos, arroyos y corrientes de agua en general, propiciando inundaciones repentinas y de corta duración (horas), en contraste con las inundaciones en ciudades ubicadas en zonas bajas de grandes cuencas, como la ciudad de Tabasco, donde las inundaciones pueden durar días.

Asimismo, el clima semidesértico del municipio de Chihuahua provoca que estas lluvias intensas sean relativamente poco frecuentes a lo largo del año, siendo eventos esporádicos. Esta situación lleva a que la sociedad no esté constantemente consciente de los peligros que pueden representar las lluvias y las inundaciones. Además, no se reconoce plenamente la importancia de la infraestructura pluvial urbana, ya que esta brinda servicio muy pocas veces al año. Aun cuando se presenten eventos de tormenta cada año, es común que la infraestructura funcione por debajo de su capacidad máxima, debido a que está diseñada para eventos extremos. Esto crea una falsa sensación de seguridad en la población.

Por lo anterior, y teniendo en cuenta que en la ciudad de Chihuahua no se cuenta formalmente con un drenaje pluvial entubado, más que unos pocos arroyos que han sido canalizados y posteriormente se les ha colocado una losa generando un ducto. Se consideró como drenaje pluvial a la red de arroyos y ríos de la ciudad, junto con sus diversas obras pluviales como canalizaciones, rectificaciones y estructuras de regulación o retención pluvial.

Tipos de acciones y obras de manejo de agua pluvial

Existen diversas acciones para el manejo de agua de lluvia en zonas urbanas y para la mitigación de afectaciones por inundaciones. Dentro de estas acciones se pueden encontrar acciones de tipo preventivo, correctivo o reactivo, dependiendo del tiempo en el que se generan y el momento en que se perciben sus beneficios. Asimismo, pueden encontrarse obras de tipo estructural y no estructural, dependiendo de si son acciones físicas o en forma de información, leyes o decisiones de tipo de políticas públicas. En general, el drenaje pluvial urbano se considera una acción estructural de manejo de agua de lluvia para mitigación de afectaciones directas e indirectas por inundaciones [21] [22].

Dentro del drenaje pluvial urbano se reconocen una variedad de diferentes tipos de obras o estructuras para el manejo de agua de lluvia, algunas de las principales son [23] [24] [25]:

- **Canalización y/o rectificación de cauces**: Consiste en la modificación de un cauce natural mediante la generación de una sección transversal prismática conocida y diseñada hidráulicamente. Comúnmente con algún tipo de recubrimiento como concreto o mampostería. Asimismo, puede incluir modificaciones en el trazo geométrico en planta de este a rectas y curvas horizontales. Aun cuando no reduce el volumen de escurrimiento, aumentan la capacidad del cauce desalojando el agua más rápido que si no existieran y reduciendo la probabilidad de desbordamientos que generen inundaciones.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Este tipo de obras han recibido críticas al considerarse con un enfoque "únicamente" de desalojo, sin considerar otros aspectos del ciclo hidrológico.

- **Estructuras de detención o regulación pluvial (rompe-picos):** Consisten en una estructura sobre un cauce que detiene el agua de manera temporal en un embalse, tanque o similar, para posteriormente permite su libre flujo, permitiendo al regular su hidrograma, reducir el "pico de caudal" por lo que el caudal máximo del cauce donde se ubiquen es reducido en mayor o menor medida. Ejemplos de estas estructuras son diques y presas "rompe-picos" ubicados a pie de montaña de cauces, así como embalses en las partes más bajas de estacionamientos, techumbres o zonas industriales.

  De sus principales beneficios es que al regular la avenida e incrementar el tiempo en que se presenta el caudal máximo, reduce la probabilidad de inundaciones, por tanto, reduce algunos riesgos ante inundaciones. Siendo comúnmente una acción de tipo preventiva.

  Asimismo, también se reconocen en ellas algunos contra argumentos, como son el hecho de que no reducen el volumen de escurrimiento, aun cuando en ocasiones se les mencione erróneamente como estructuras de "impacto hidrológico cero"; por otro lado, al "alargar" el hidrograma de salida del cauce donde se ubiquen, generan que las altas velocidades se presenten por un tiempo considerablemente mayor, pudiendo provocar erosión en los cauces naturales.

  En el caso específico de la ciudad de Chihuahua, las cuatro presas con las que se tiene interacción hidrológica son en sí estructuras de detención o regulación pluvial, sirviendo como tales para reducir el caudal principalmente del río Chuvíscar (presas Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón) y del río Sacramento (presa San Marcos).
- **Estructuras de retención (infiltración):** A diferencia de las estructuras de detención, retienen el agua sin dejar su flujo libre con el objetivo principal de generar que se infiltre pudiendo llegar a generar recarga del acuífero.

  Si el agua alcanza el volumen máximo de retención esta debe de verter por una obra de excedencias, funcionando a partir de ese momento como una estructura de regulación.

  Ejemplos de infiltración y tanques de retención, en los cuales se identifican los beneficios de que incrementa el tiempo de respuesta de la cuenca, por lo que recude la profundidad del agua dentro del cauce, así como su velocidad de escurrimiento.

  Sin embargo, también se les reconoce algunos puntos en contra, principalmente respecto a la recarga de acuíferos, ya que comúnmente no se tiene certeza si el agua que se infiltra llegará hasta el acuífero o se evaporará antes. Asimismo, al mantener el agua sin movimiento en su embalse o vaso durante periodos prolongados de tiempo puede generar focos de insalubres con agua estancada.
- **Parques lineales o parques hundidos:** Son espacios públicos de recreación, construidos longitudinalmente a uno o dos lados de un río o arroyo que funcionan como corredor de crecidas. Se caracterizan por tener gran cantidad de vegetación e incluyen zonas de

inundación controlada y/o infiltración; es decir, parte de las zonas que se aprovechan como espacio público urbano están destinadas a inundarse temporalmente ante un evento de lluvia ciertos periodos de retorno previamente calculados.

Dentro de sus principales beneficios es que incrementan el tiempo en que se presenta el gasto máximo disminuyendo el mismo, por tanto, reduce los tirantes y velocidades máximas de escurrimiento. Reduce el volumen de escurrimiento. Aporta a la recarga de mantos acuíferos. Genera beneficios sociales. Disminuye asentamientos irregulares a la margen de las corrientes.

- **Bordos de protección**: Consisten en la construcción de terraplenes a los márgenes del cauce que confinan el flujo a cierto caudal de diseño, conteniendo el agua dentro de los límites marginales de arroyos o ríos evitando inundaciones, aun cuando no reducen el volumen de escurrimiento, sí reducen la probabilidad de que el cauce se desborde, por lo tanto, reducen algunos riesgos de inundación.
- **Sistemas de drenaje pluvial urbano**: Consiste en una serie de estructuras de captación, conducción y descarga fuera de la mancha urbana de agua producto de lluvia. Comúnmente la conducción se realiza mediante conductos tubulares subterráneas

Por otro lado, dentro de las acciones no estructurales para manejo de agua de lluvia y reducción de riesgo ante inundaciones podemos mencionar como algunas de las más importantes a las siguiente [23] [24] [25]:

- **Programas de planificación urbana hídricamente sensibles:** Los cuales son generados y aplicados por dependencias gubernamentales, estableciendo o delimitando la forma en que se genera la urbanización, delimitando diferentes usos de suelo y generando restricciones de tipo de edificación especialmente en zonas con un alto impacto hidrológico o condicionando los caudales máximos de desalojo de ciertos tipos de uso de suelo.
- **Reforestación, control y restauración de suelos:** Al generar un aumento en la vegetación de la cuenca, principalmente en las zonas altas de la cuenca, se propicia una reducción en el coeficiente de escurrimiento de esta, reduciendo así el volumen y caudal de escurrimiento pluvial.
- **Programas de inspección y limpieza de arroyos y canales urbanos:** Consiste en periódicamente (una vez al año, por lo menos) inspeccionar físicamente los diferentes cauces y canales urbanos, así como limpieza de estos con el objetivo de mantener su buen funcionamiento hidráulico.
- **Atlas de riesgo y planes de contingencia:** Creados y llevados por entidades gubernamentales, determinan la manera de actuar durante un evento de contingencia, estableciendo el qué, cómo, cuándo, dónde, quién y porqué hacer de cada acción durante la contingencia. A pesar de ser una acción de tipo reactiva es indispensable. Toma como premisa que, a pesar de contar con otro tipo de acciones, eventualmente se presentará una

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

contingencia por lo que se debe estar preparados. En ocasiones es la única acción posible de llevarse a cabo una vez que se tiene la contingencia.

- **Programas de educación sobre cultura del agua:** Consisten en proporcionar información de fácil entendimiento sobre temas hídricos a la sociedad en general. Pueden ser aplicados en escuelas de diferentes niveles o a través de publicidad institucional, pláticas en entidades gubernamentales o en el sector privado.

Niveles de manejo de agua pluvial urbana

Para poder analizar el sistema de drenaje pluvial urbano del municipio de Chihuahua se determinaron los niveles de manejo urbano de agua de lluvia [26] [27] [28] [29]:

1. **Drenaje de agua pluvial urbana mediante cauces naturales sin revestimiento:** En este nivel, el agua de lluvia fluye a través de ríos y arroyos sin ningún tipo de revestimiento o infraestructura de manejo.
2. **Drenaje de agua de lluvia pluvial urbana mediante canales pluviales:** Se canalizan los ríos, arroyos y escurrimientos secundarios, revistiéndolos con materiales como concreto y mampostería, basándose en un diseño hidrológico-hidráulico.
3. **Primer nivel de reducción de impacto hidrológico:** Además de la canalización, se construyen obras de detención (regulación) pluvial que disminuyen el caudal máximo de escurrimiento y retrasan su aparición, sin reducir el volumen de escurrimiento.
4. **Segundo nivel de reducción de impacto hidrológico:** Se complementan las obras de regulación con obras de retención (infiltración) que, además de disminuir el caudal de escurrimiento y retrasarlo, reducen el volumen de escurrimiento.
5. **Tercer nivel de reducción de impacto hidrológico:** Junto con las canalizaciones y las obras de detención y retención, se realizan análisis periódicos de calidad del agua pluvial y se construyen obras para tratamientos primarios y secundarios de las aguas de lluvia, especialmente las primeras escorrentías.

Análisis del tipo de revestimiento o superficie de flujo de arroyos urbanos

Con el objetivo de identificar las principales zonas de inundación en el municipio de Chihuahua, especialmente en su zona urbana, así como los puntos con mayores problemas de inundación, se clasificó la mayoría de los escurrimientos de la ciudad según su tipo de revestimiento o determinando las zonas donde el agua fluye sobre una vialidad.

Los cauces o escurrimientos se clasificaron en seis categorías distintas, descritas a continuación [23] [28] [29]:

- **Presa:** Es la continuidad del río o arroyo sobre el vaso de una presa. Se consideró que en este tipo de escurrimiento el peligro ante inundaciones es prácticamente nulo, ya que dentro del vaso no existen edificaciones ni debe haber en sí actividad humana.
- **Revestido:** Se incluyó en esta categoría a todos los cauces con algún tipo de revestimiento de concreto o mampostería. Se considera que estos escurrimientos, aun cuando pudieran presentar desbordamiento, es menos probable que los que no tienen revestimiento, ya que el revestimiento ayuda a reducir la resistencia al flujo del agua y es muy probable que hayan sido producto de un análisis hidrológico y diseño hidráulico.
- **Parque o camellón:** Se incluyeron en esta categoría a aquellos cauces que fluyen dentro de un parque, como parque hundido o simplemente como parte del mismo parque. Asimismo, se incluye en esta categoría a aquellos escurrimientos que fluyen, sin revestimiento, dentro de un camellón. La distinción de estos cauces a aquellos que fluyen en terreno natural es que se considera que, aun cuando pudieran no reducir el peligro hidráulico ante inundaciones, si pudieran de manera generalizada, reducir el riesgo ante inundaciones, ya que disminuyen la exposición de entes vulnerables (personas, viviendas, vehículos, etc.) mediante la separación física entre agua escurriendo y dichos entes vulnerables.
- **Taludes revestidos**: Se consideró en esta categoría a aquellos cauces que cuentan con sus taludes revestidos, sin embargo, cuentan con el fondo en terreno natural, siendo un punto medio entre un canal revestido y un cauce en sección natural. Asimismo, se consideró que cuentan con un peligro ante inundaciones intermedio entre estos dos tipos de escurrimiento.
- **Terreno o sección naturales:** En esta categoría se incluyeron todos los arroyos en los que no ha habido intervención clara e intencionada para modificar su escurrimiento, permitiendo el flujo relativamente natural del agua pluvial. Su clasificación toma importancia al considerar que, de manera generalizada, es más probable que estos cauces cuenten con mayor probabilidad de desbordarse que aquellos con revestimiento total o parcial, al no contar con una revisión hidrológica ni diseño hidráulico, y que tienen relativamente cerca de ellos elementos vulnerables como viviendas, edificaciones, etc.
- **Flujo sobre vialidad:** Aquí se incluyen aquellos escurrimientos principales o secundarios que fluyen por encima de una vialidad. Y aunque prácticamente sobre todas las vialidades fluye una cierta cantidad de agua, en la mayor parte de ellas son flujos terciarios

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

o de orden superior (que alimentan flujos secundarios o primarios), en los casos identificados en el presente estudio se describen escurrimientos previamente identificados como arroyos que fluyen por vialidad. Su identificación es de suma importancia, ya que, aun sin un análisis hidráulico, se considera que estas zonas cuentan con peligro y riesgo hidráulico ante inundaciones alto, siendo puntos con mayor probabilidad de generar afectaciones a viviendas y edificaciones, arrastre y daños a vehículos y, lo más importante, pérdida de vidas humanas por arrastre del escurrimiento.

Mapa general de las obras de drenaje pluvial de la ciudad de Chihuahua.

A continuación, en la Figura 28, se presenta el mapa general de la red de drenaje pluvial urbano de la ciudad de Chihuahua. En este mapa, se identifican los diversos puntos donde se ha implementado algún tipo de infraestructura para la conducción de agua pluvial, ya sea a través de canales y taludes revestidos, flujos sobre camellones o parques, así como áreas donde el flujo es sobre terreno natural o se presentan puntos de peligro debido al flujo sobre vialidades.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

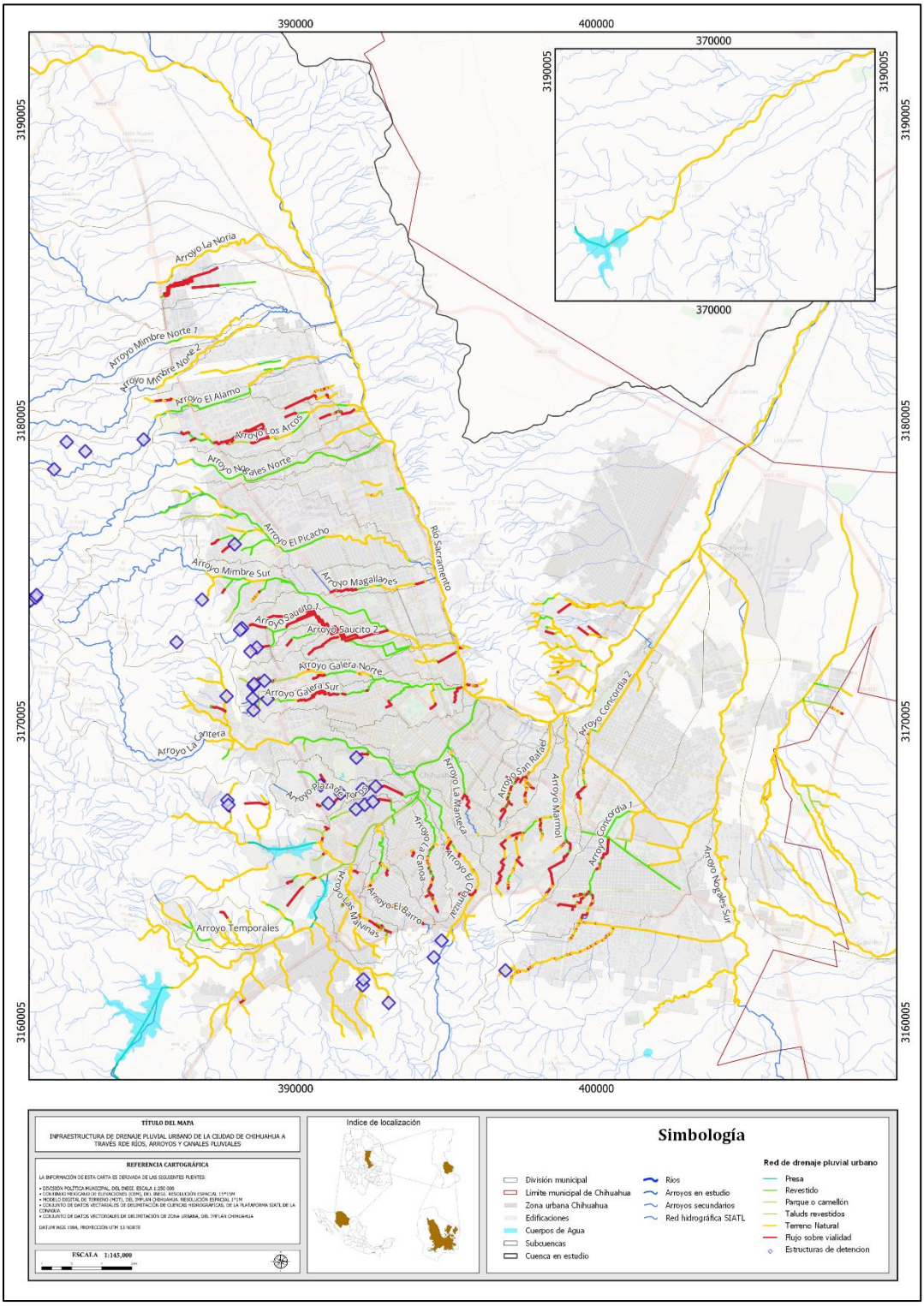


Figura 28. Mapa de la infraestructura de drenaje pluvial urbano de la ciudad de Chihuahua, que incluye ríos, arroyos y canales pluviales. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 29 se presentan otros elementos de manejo de agua de lluvia y reducción de riesgo ante inundaciones. En específico, se muestran 45 obras de detención pluvial identificadas dentro o fuera de la mancha urbana, pero con influencia en la misma (representadas como rombos morados en la Figura 29). Además, se visualizan las cuatro presas con influencia hidrológica sobre la ciudad de Chihuahua, las cuales actúan como estructuras de detención pluvial.

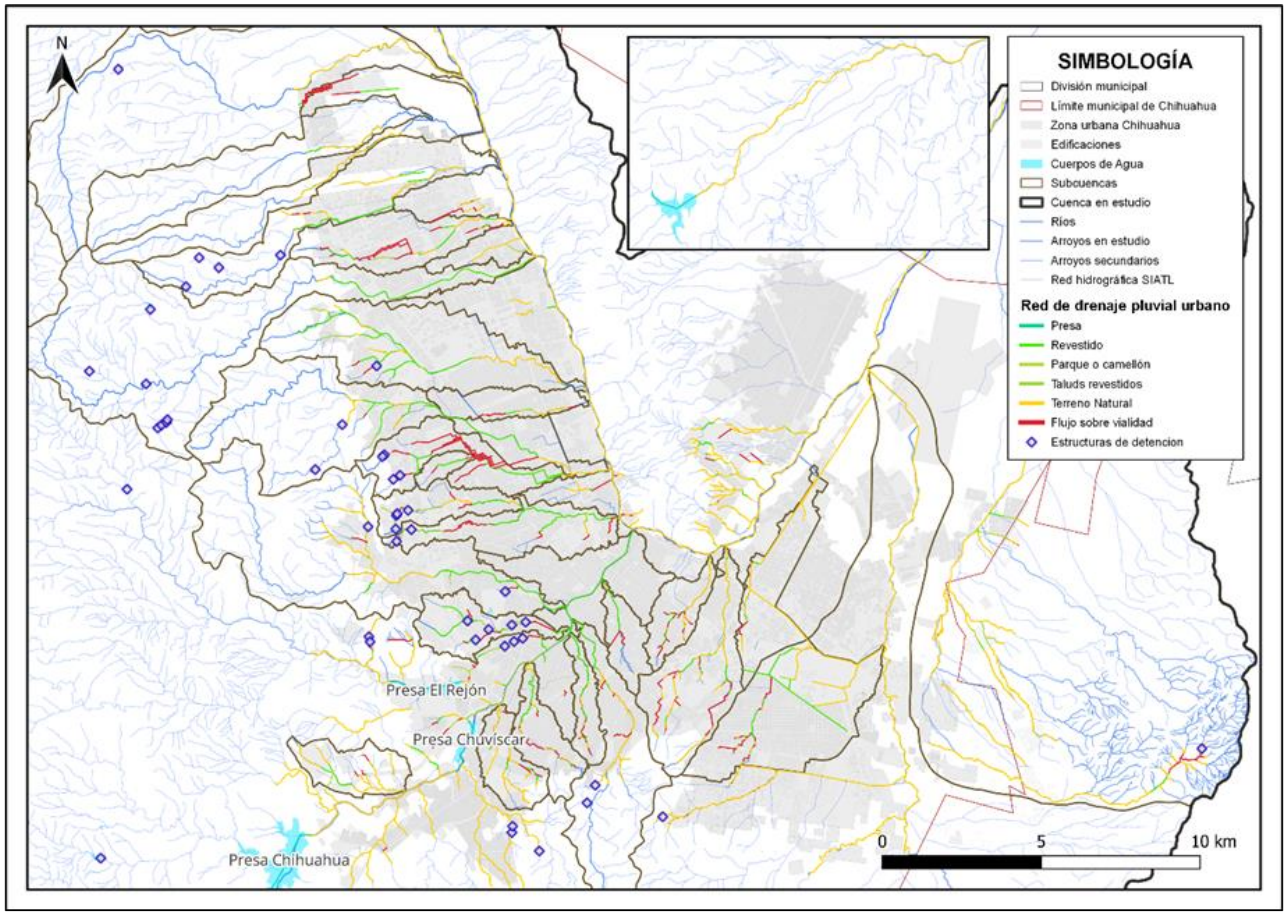


Figura 29. Estructuras de detención pluvia (regulación) en la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Análisis de flujo pluvial sobre vialidades

Como se mencionó anteriormente, aunque no se pueda afirmar que todos los flujos sobre canales revestidos o con taludes revestidos representen un peligro hidráulico bajo, se considera que las zonas con flujos principales o secundarios sobre vialidades presentan un alto riesgo hidráulico ante inundaciones.

Como complemento al análisis del funcionamiento hidráulico de los arroyos y canales urbanos de la ciudad, se identificaron zonas de alto riesgo de inundación donde el agua fluye sobre vialidades. En la Figura 30 se muestra un croquis con la ubicación de los puntos de acceso al mapa de la red de drenaje pluvial para identificar los flujos sobre vialidades, y a continuación se describen dichos puntos.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

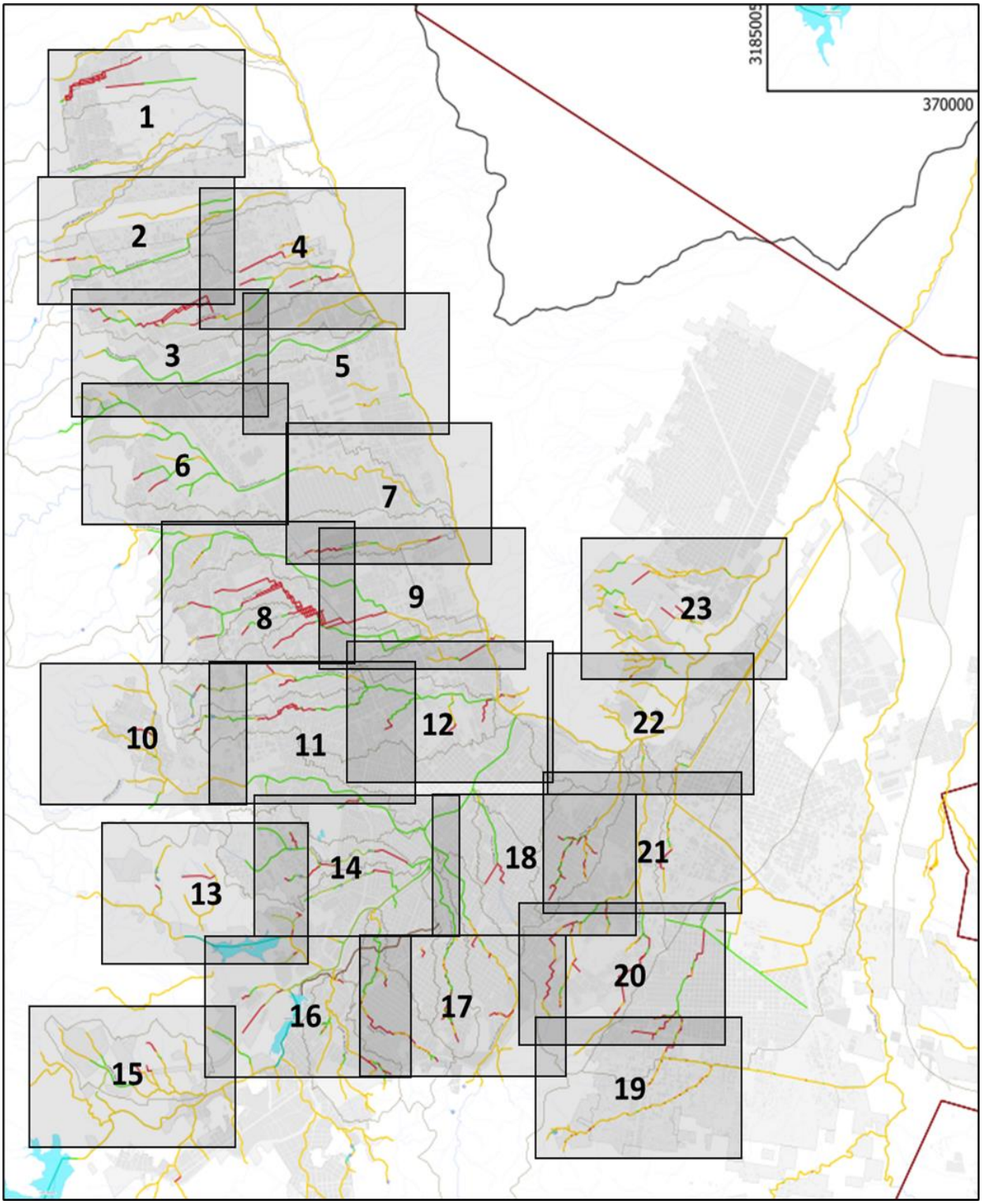


Figura 30. Ubicación de mapas de flujo sobre vialidades. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 31, en la zona de Riberas de Sacramento se identifican diversos flujos sobre las vialidades que corren en sentido oeste-este, principalmente sobre las vialidades Río Mendoza, Río Diamante, Río Salado, Río Vaal y Río Danubio.

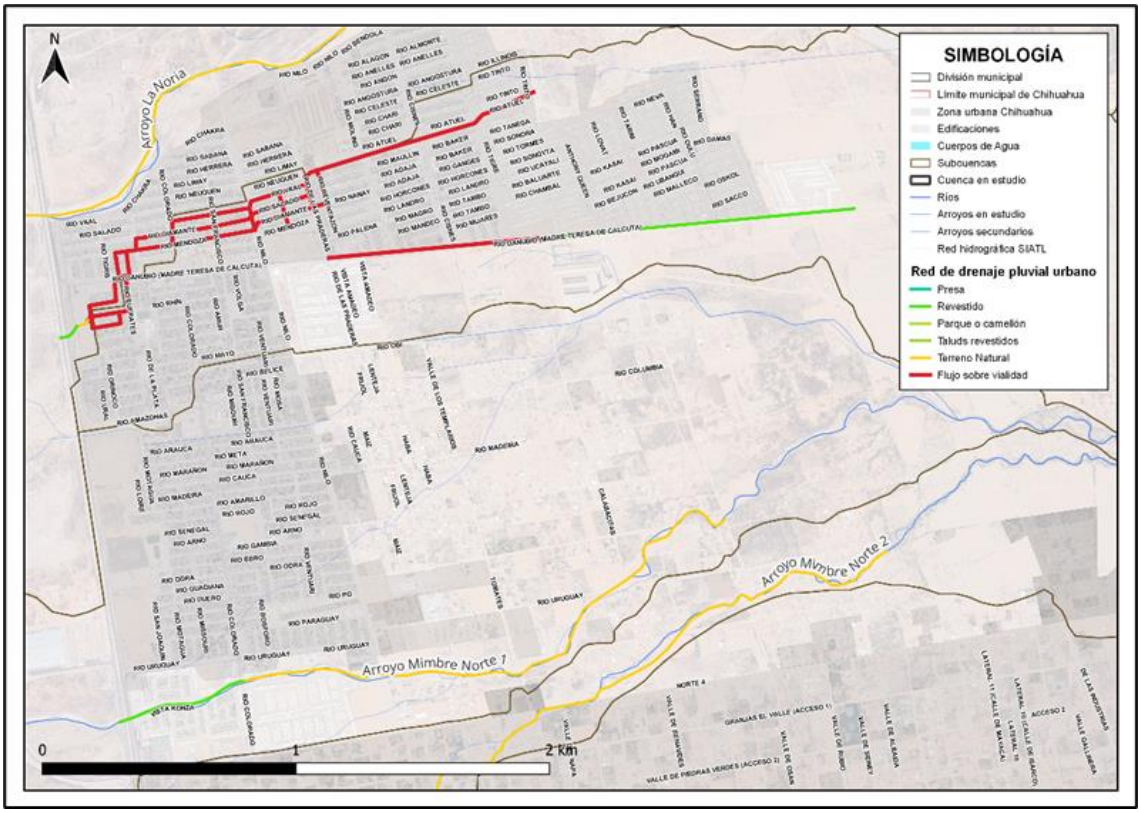


Figura 31. Flujo pluvial sobre vialidades (1/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 32 se aprecia el flujo sobre vialidad en la avenida transformación cerca de los fraccionamientos Palma Real, con intermitencia en el revestimiento entre terreno natura, parque, un tramo corto revestido y nuevamente terreno natural.

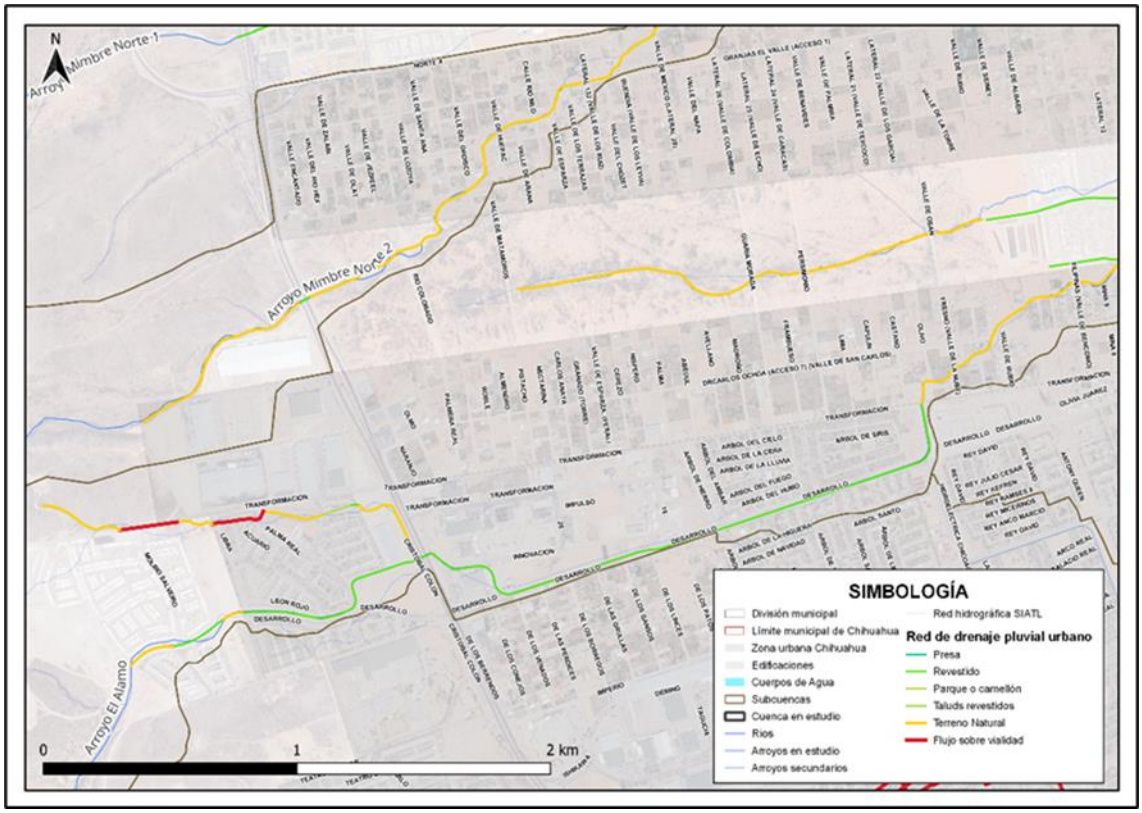


Figura 32. Flujo pluvial sobre vialidades (2/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 33 se aprecia el flujo sobre diversas vialidades, algunas de ellas siendo de los problemas más notorios de la ciudad, especialmente el flujo del arroyo los arcos tras cruzar la Av. Tecnológico (También llamada Av. Colón). A partir de ese punto el agua es parcialmente captada por un flujo sobre parque y posteriormente desemboca nuevamente en una vialidad, mientras otra parte del flujo continua a través de diversas calles hasta volver a ser captada por un flujo en terreo natural en la calle Hidroeléctrica Chicoasén.

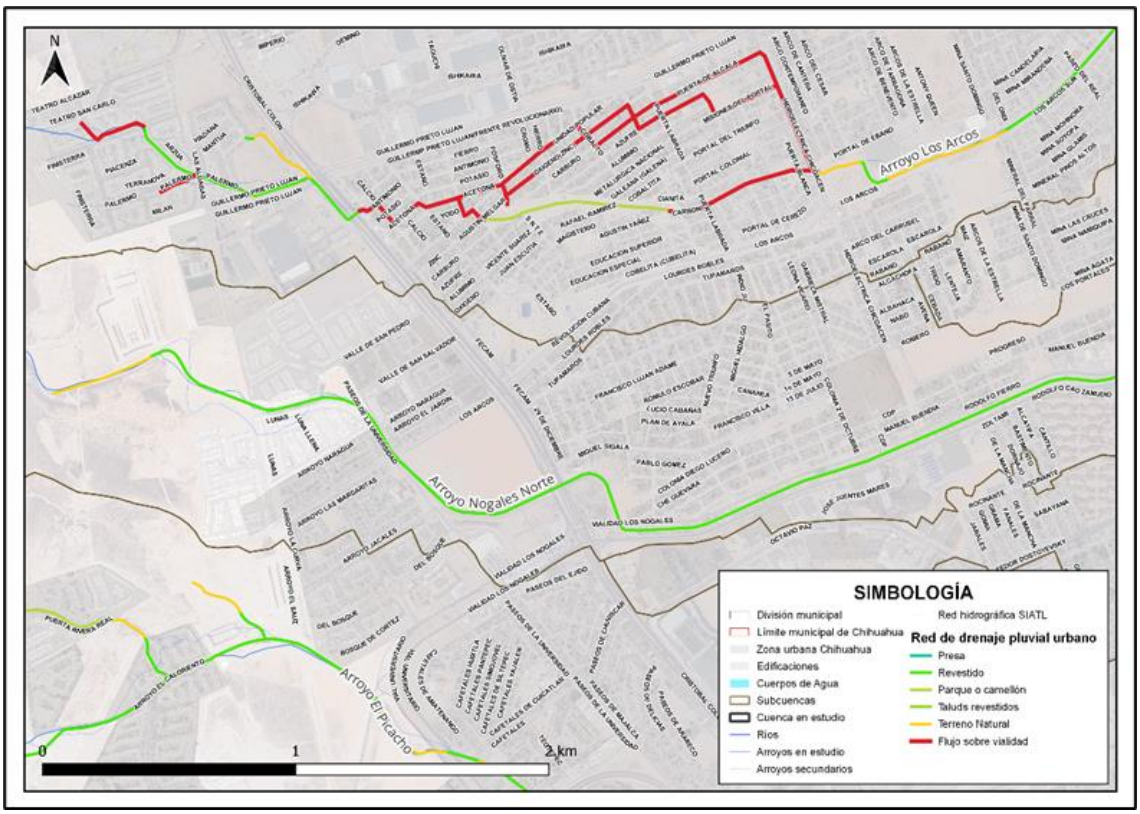


Figura 33. Flujo pluvial sobre vialidades (3/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 34 se muestran diversos escurrimientos sobre vialidades, destacando los de la Av. Guillermo Prieto Luján y posteriormente c. Mina de los Moris, el flujo sobre la C. Desierto del Mojave, e de la c. Mina de Huyapan y c. Santo Domingo el cual fluye con diversos tipos de revestimiento.

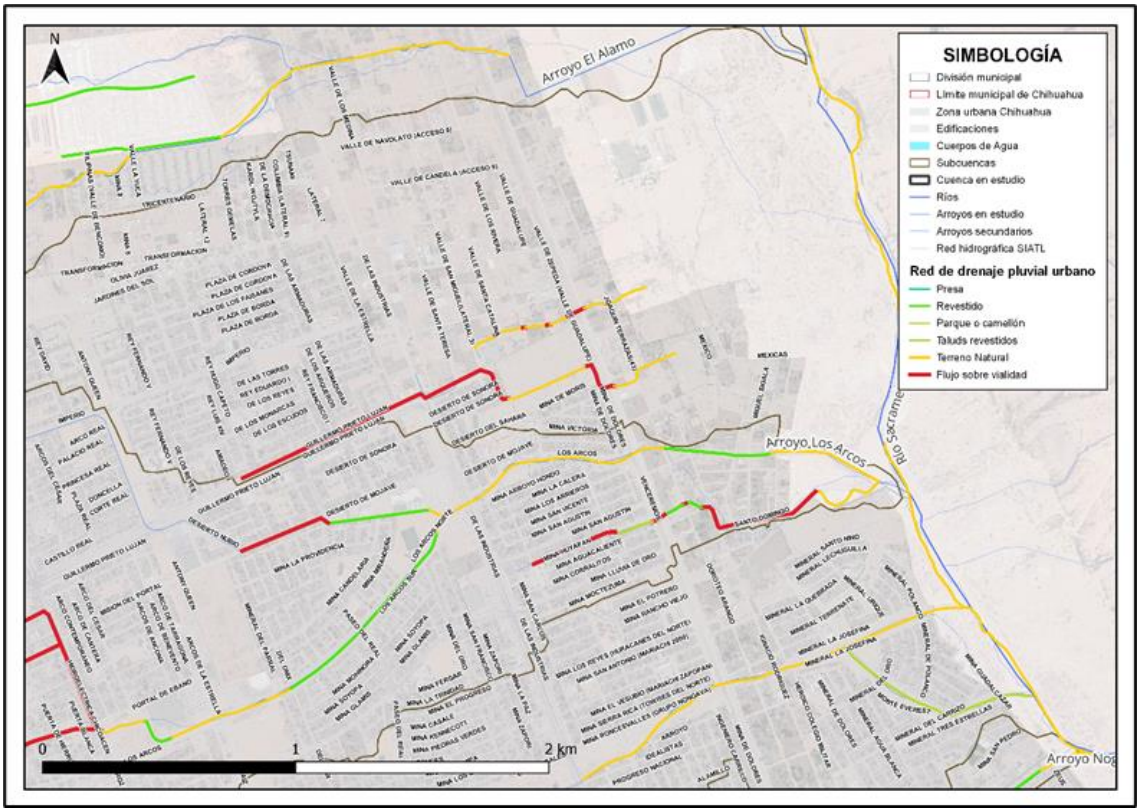


Figura 34. Flujo pluvial sobre vialidades (4/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 35 solo se identifica un crucero con flujo sobre la c. 43 ½ en la colonia Nuevo Triunfo. Asimismo, en la Figura 36 se identifican los flujos sobre las vialidades Colegio de Miraflores y Cordillera Negra.

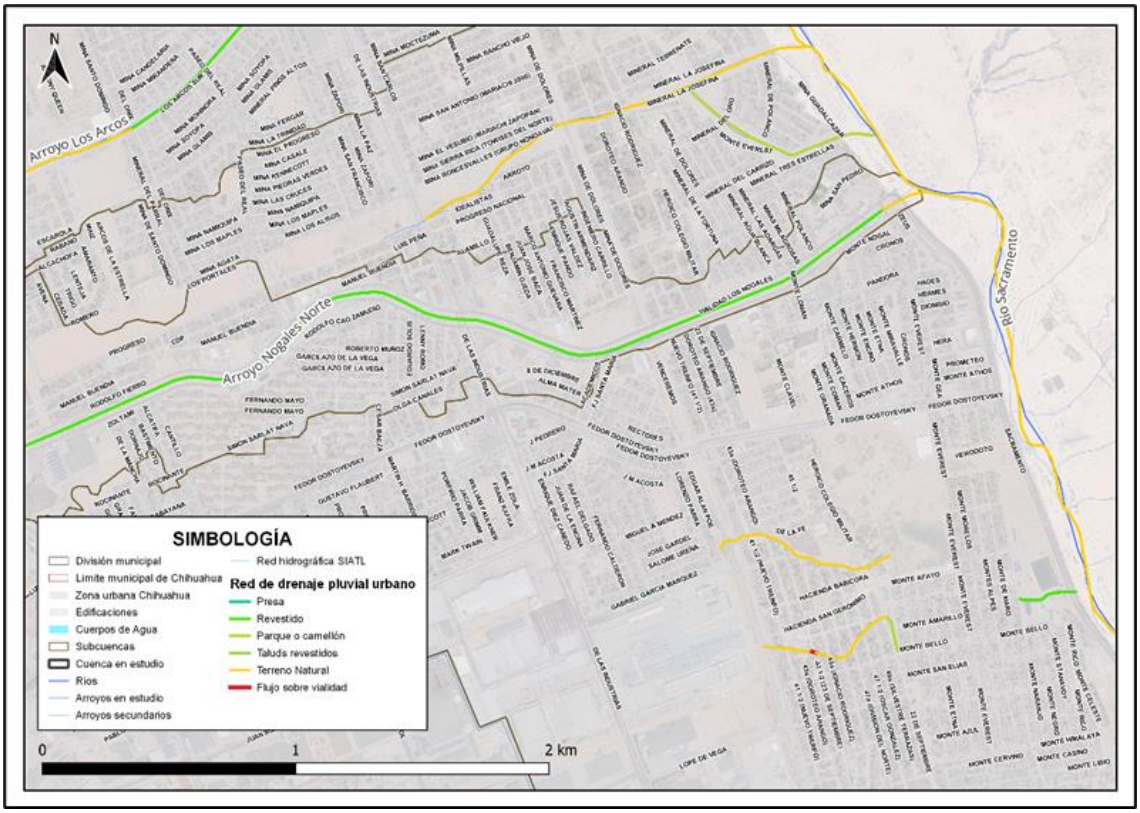


Figura 35. Flujo pluvial sobre vialidades (5/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

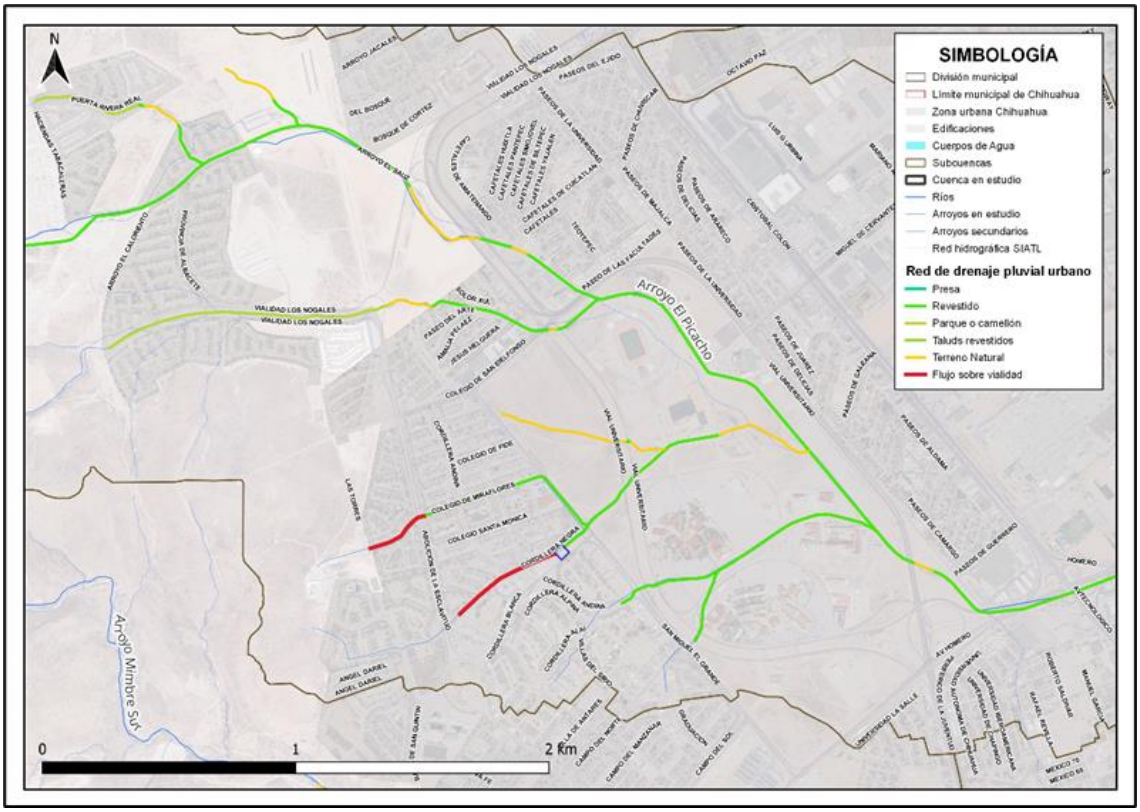


Figura 36. Flujo pluvial sobre vialidades (6/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 37 se aprecian los flujos sobre vialidades del arroyo Magallanes que cruza las colonias Francisco Villa, C.T.M. y Nombre de Dios, especialmente se denota el flujo sobre las vialidades Lázaro Cárdenas, Tarahumaras, 16 de septiembre y Columbus.

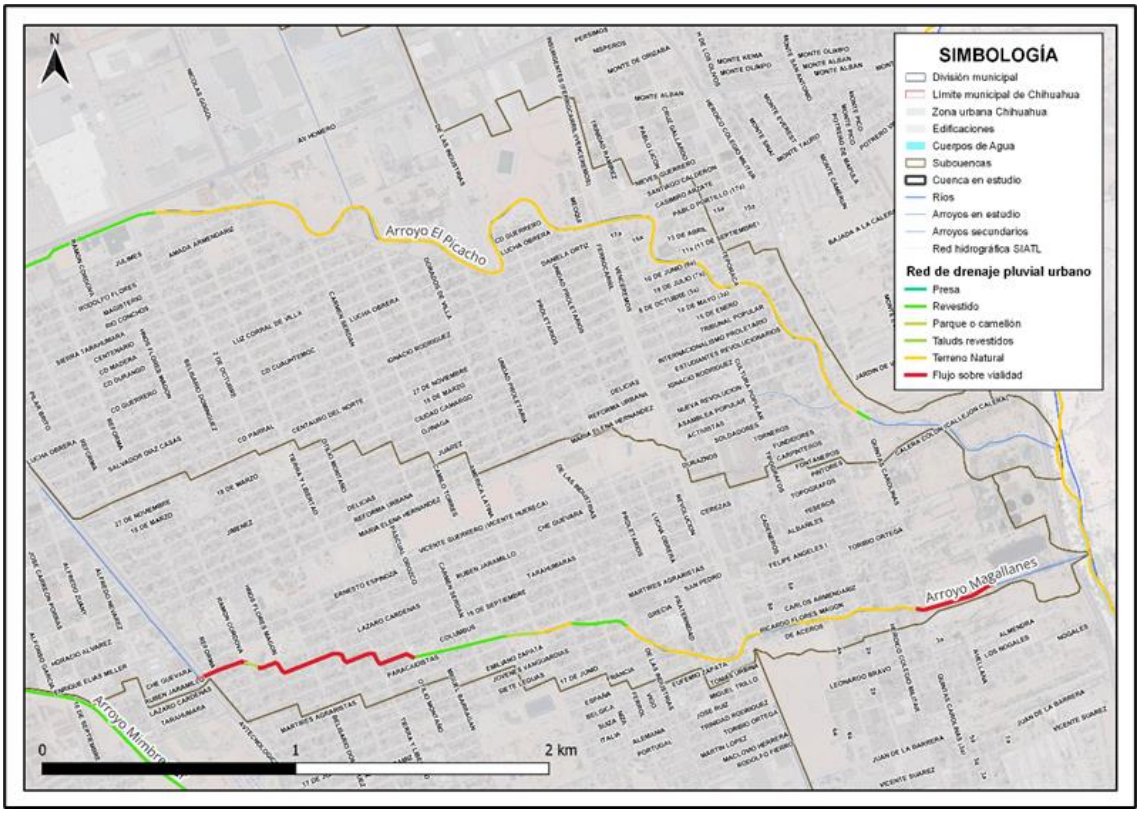


Figura 37. Flujo pluvial sobre vialidades (7/23). Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 38 se muestran varios de los escurrimientos pluviales sobre vialidades más problemáticos de la ciudad, referentes al arroyo Saucito y sus afluentes que cruzan colonias como Tierra y Libertad, Lourdes e Infonavit Vallarta. Se destacan principalmente los flujos sobre vialidad desde la intersección de las vialidades 15 de enero y Antonio Makarenko, hasta la intersección de las vialidades Juan Escutia y González Cossío, donde se ubica una captación pluvial.

Sin embargo, dicha captación no es suficiente para flujos que se presentan aun cada año, por lo que se continúan presentando escurrimientos sobre la colonia Infonavit Vallarta principalmente por la vialidad Río Aros y posteriormente la Av. Broadway. También se destacan los escurrimientos sobre la Av. Quetzalcóatl, 16 de Septiembre (también llamada c. Egipto y c. Vietnam) y sobre la Av. Universidad de la Sorbona y vialidad Liberación.

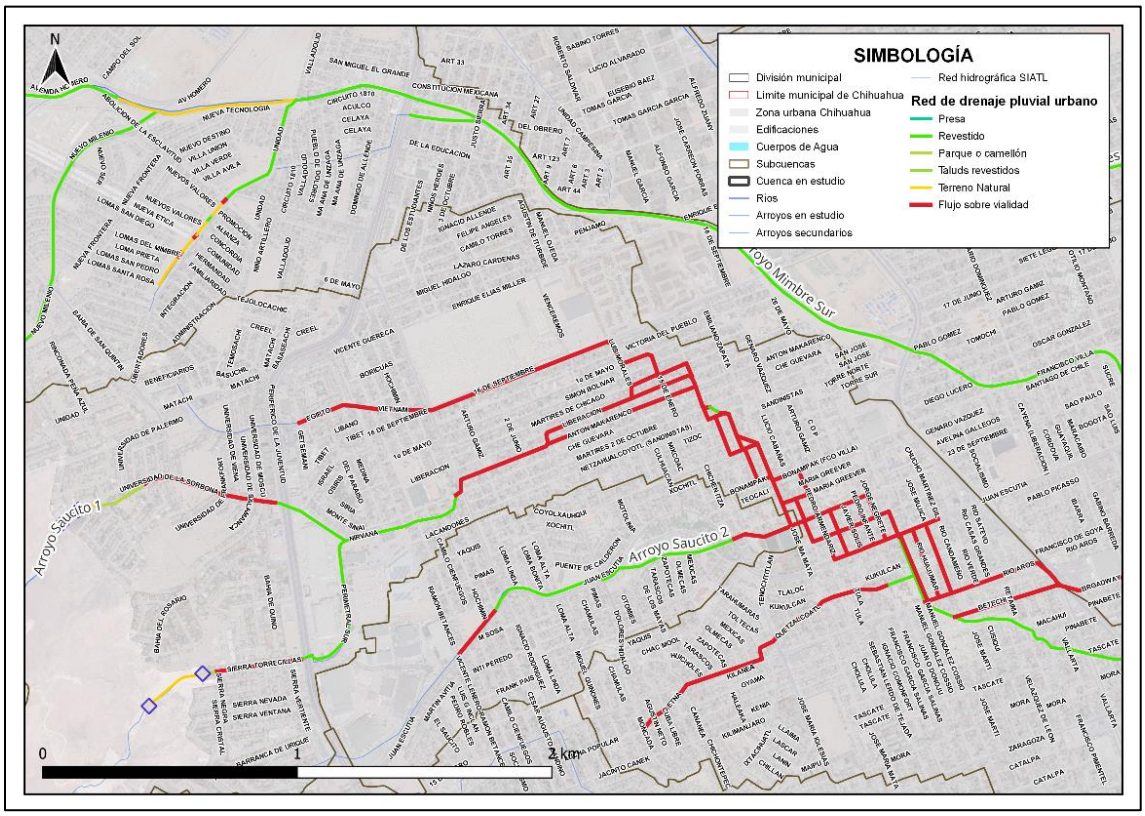


Figura 38. Flujo pluvial sobre vialidades (8/23). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 39 se muestra el flujo sobre la vialidad Ma de los Ángeles en las colonias Lince, Barrio del Norte y San Francisco.

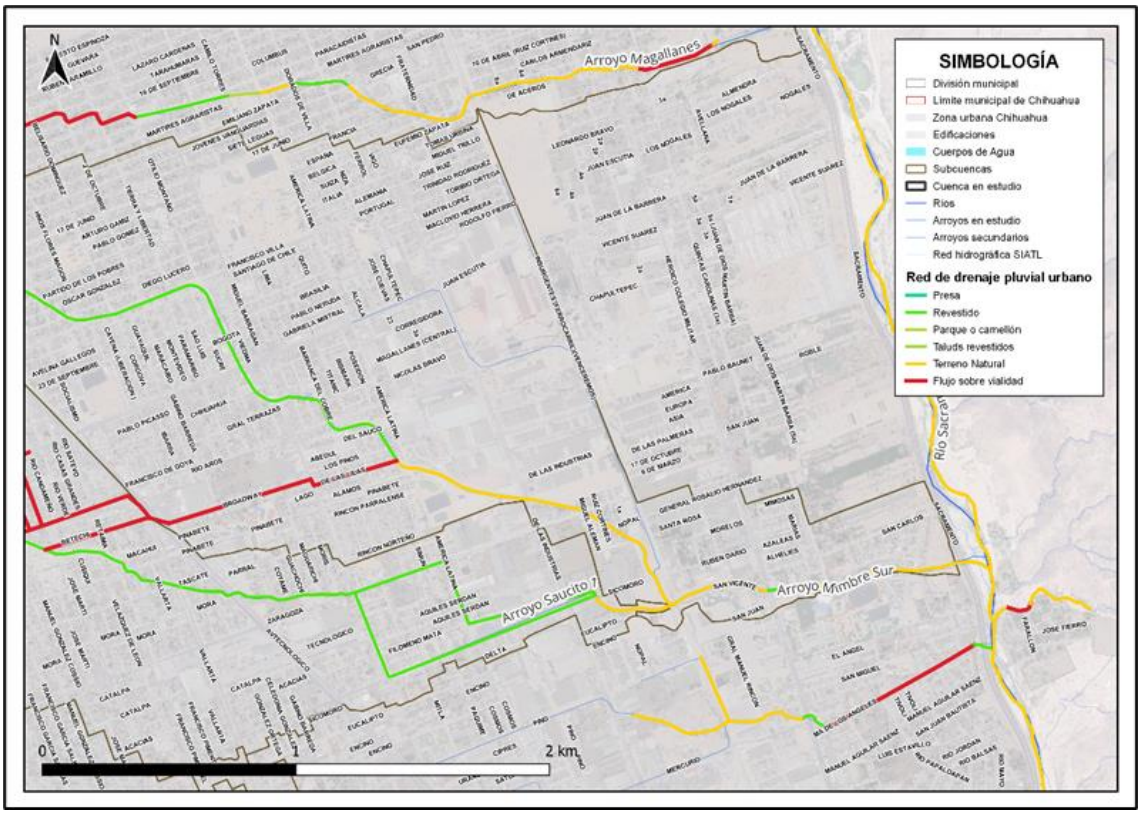


Figura 39. Flujo pluvial sobre vialidades (9/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 40 se muestran los flujos sobre las vialidades Misión del Bosque, del afluente al arroyo La Cantera, sobre la vialidad Bay Hills, dentro del fraccionamiento Bosques de San Francisco y vialidad Paseo del Norte en la colonia Rincón de San Francisco.

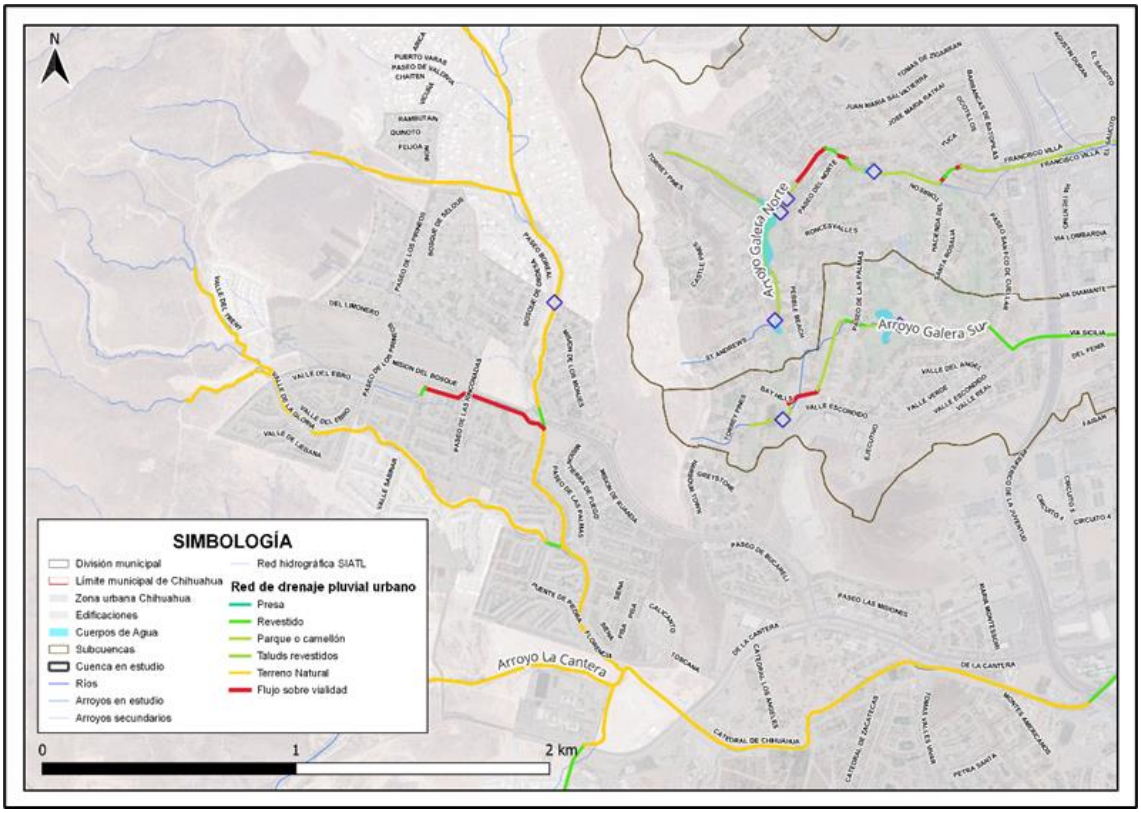


Figura 40. Flujo pluvial sobre vialidades (10/23). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 41 se muestran flujos sobre vialidades de los arroyos Galera, norte y sur. Especialmente los del arroyo Galera sur el cual cruza las colonias Arboledas III etapa y Colinas del Sol sobre las diversas vialidades como c. del Milano, c. Cuervo, Av. de las Águilas, c. del Cisno, c. del Pato entre otras. También se identificaron los escurrimientos de afluentes al arroyo Galera Norte sobre las vialidades circuito del Moral y c. Pelícano. Asimismo, se denota que ambos arroyos cruzan la Av. José María Martí en sobre la vialidad, interrumpiendo el flujo revestido y en terreno natural.

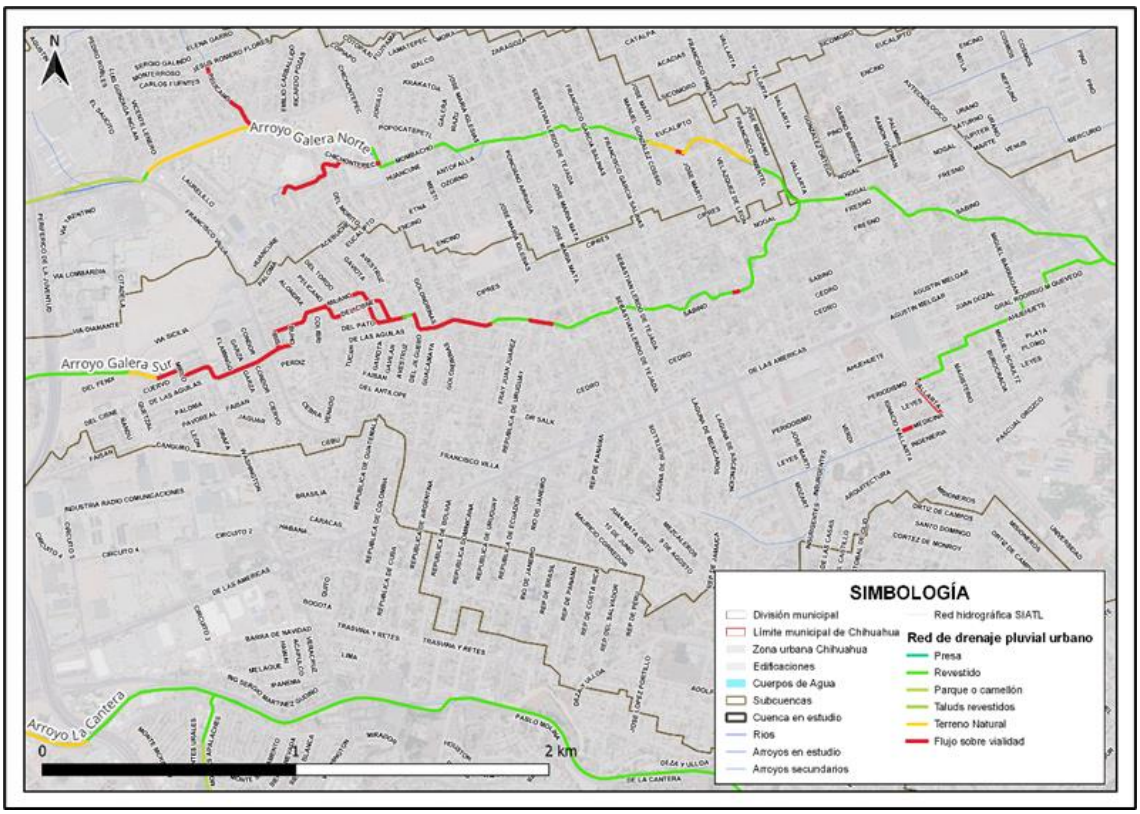


Figura 41. Flujo pluvial sobre vialidades (11/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 42 se muestran algunos escurrimientos sobre vialidades de las colonias Juntas y Cerro Prieto, y en la Figura 43 se muestran escurrimientos sobre la vialidad que conduce a la zona Altozano así como algunos escurrimientos dentro del colegio Bilingüe Madison y ESPABI.

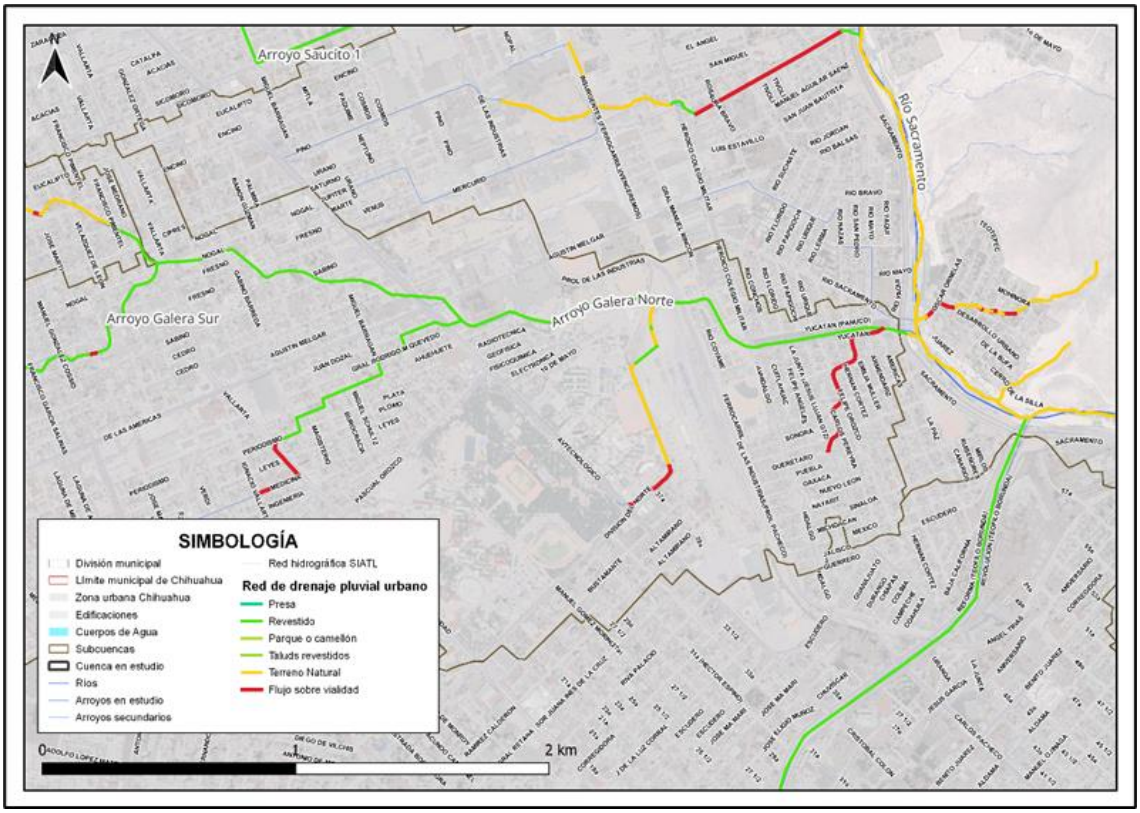


Figura 42. Flujo pluvial sobre vialidades (12/23). Fuente: elaboración propia.

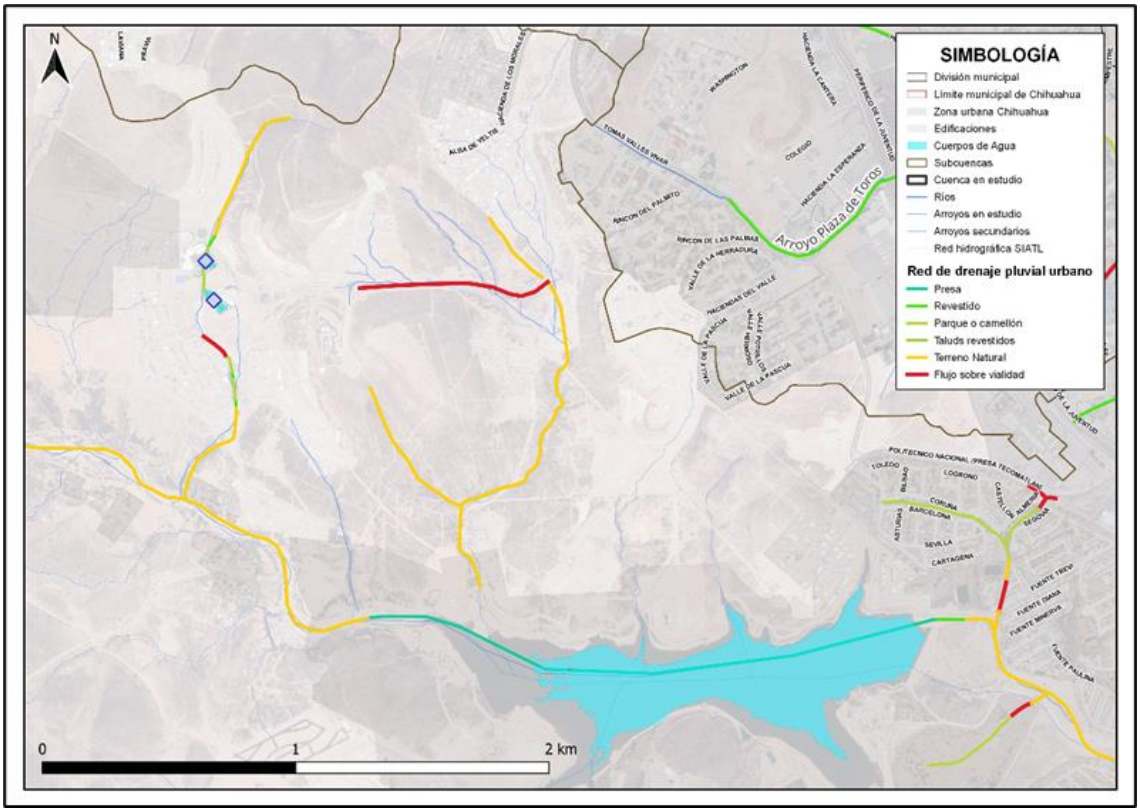


Figura 43. Flujo pluvial sobre vialidades (13/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua

Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820

https://implanchihuahua.org/

En la Figura 44 se muestran principalmente los escurrimientos sobre las vialidades del arroyo Plaza de Toros y sus afluentes, teniendo varios cambios entre tipos de revestimiento como revestido y parque, generando intermitencia en el peligro hidráulico generado. Se denota especialmente la problemática del flujo dentro de los fraccionamientos Hacienda Santa Fe y Encordada Santa Fe, así como sobre la Av. 26ª, en la cual desemboca casi la totalidad de la cuenca. Asimismo, se denota que, sobre dicho cauce, así como el cauce al sur de este, se encuentran diversas estructuras de regulación que ayudan a reducir parcialmente la problemática de inundaciones.

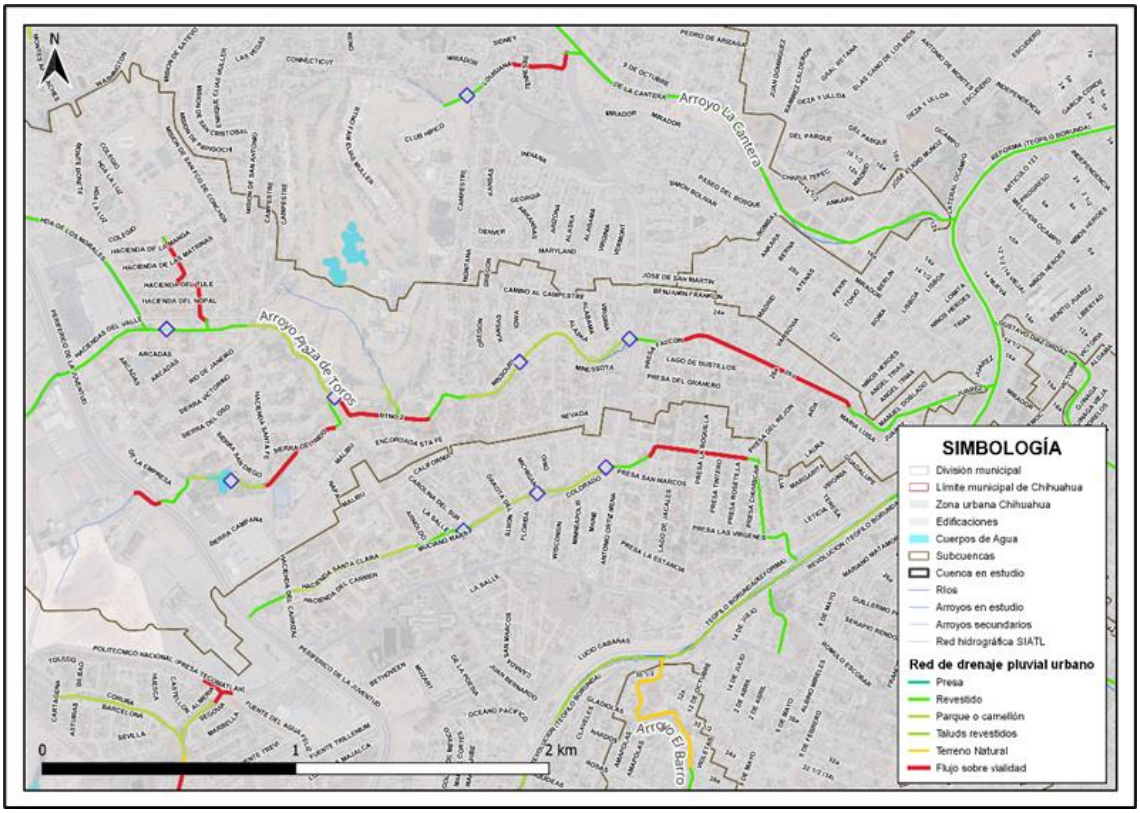


Figura 44. Flujo pluvial sobre vialidades (14/23). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 45 se muestran los escurrimientos sobre vialidades de la zona conocida como Las Haciendas, principalmente los flujos sobre la Av. Hacienda del Real y Vía imperial.

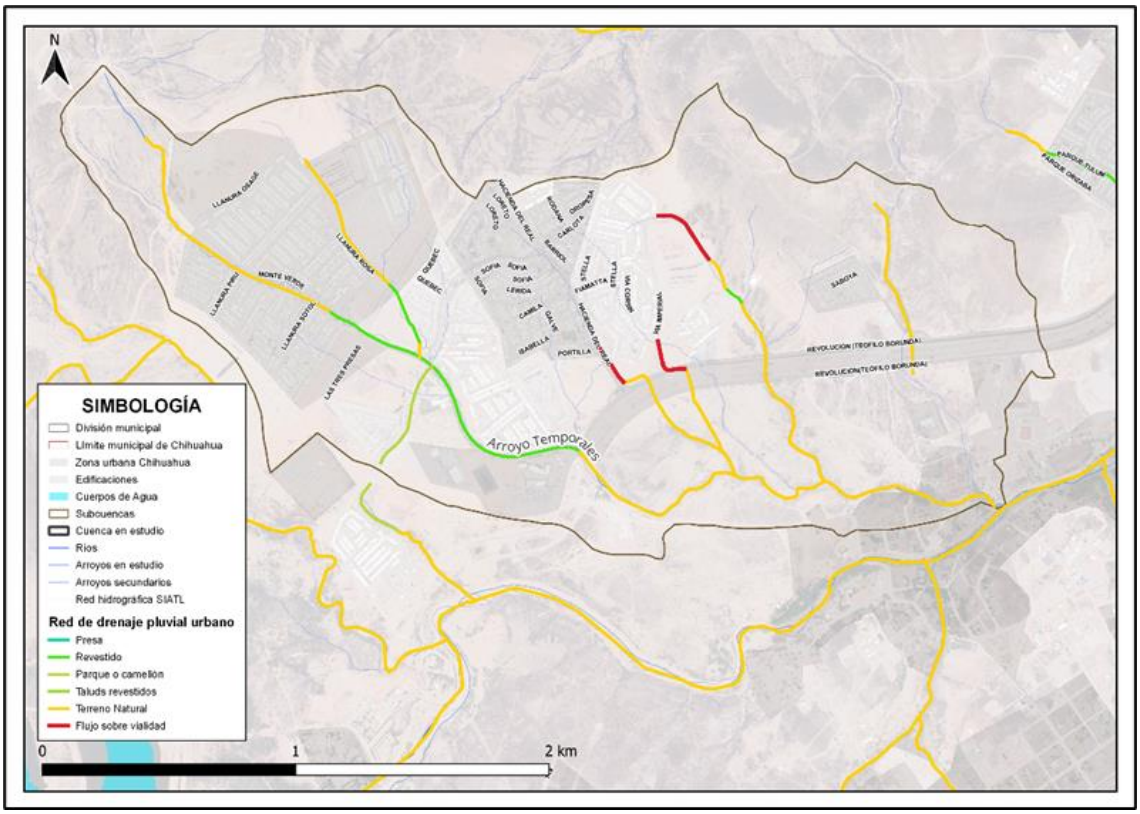


Figura 45. Flujo pluvial sobre vialidades (15/23). Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, en la Figura 46 se aprecian varios escurrimientos sobre vialidades de la zona conocida como “El Reliz” y algunos escurrimientos del arroyo Las Malvinas y arroyo El Barro. En la zona de El Reliz, se destaca el flujo sobre la Av. Teófilo Borunda, el cual fluye sobre la vialidad, luego conducido por el camellón y de nuevo desemboca en la vialidad en la intersección con la vialidad Pedro Zuloaga. En el caso del arroyo Malvina se destaca el flujo sobre la Av. 98 ½ y la vialidad Rubio, y en el caso del arroyo El Barro se destaca el flujo sobre la vialidad Paseo del Norte y la vialidad Batalla de Calupulapan.

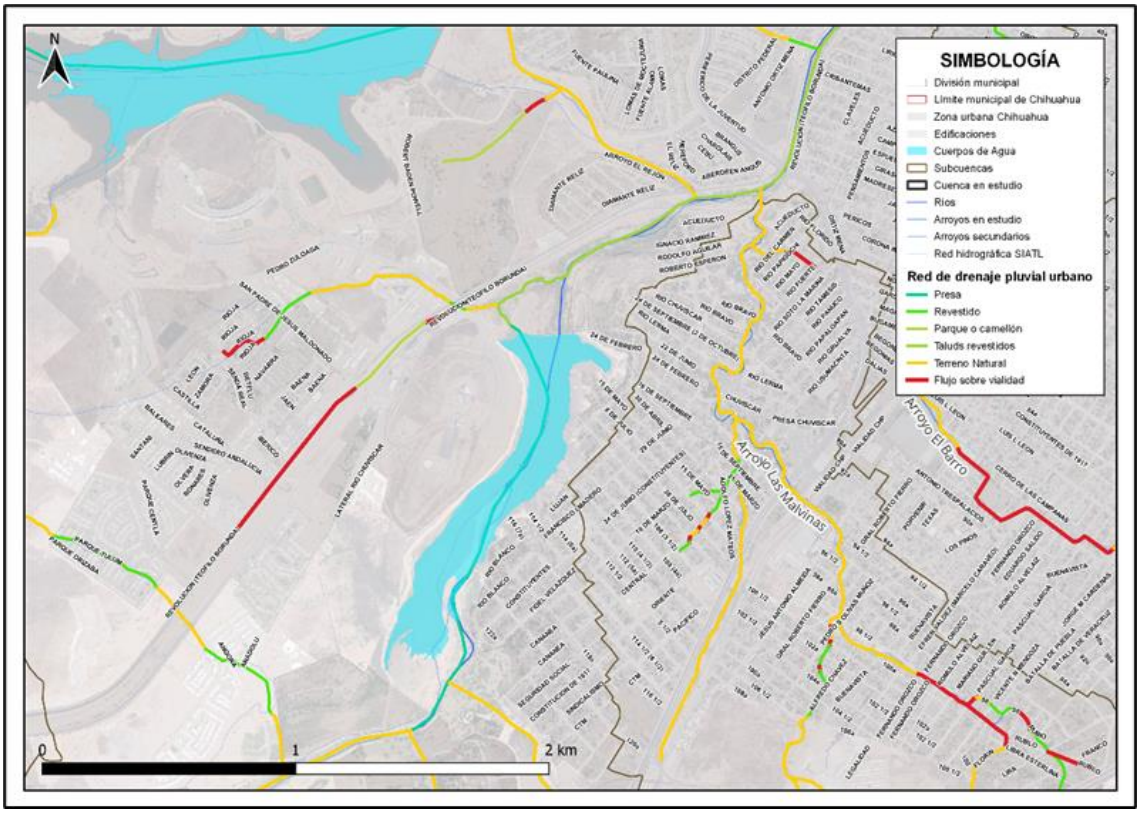


Figura 46. Flujo pluvial sobre vialidades (16/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 47 se muestran una gran cantidad de diversos flujos sobre vialidades, respecto al arroyo El Barri se destacan los flujos intermitentes entre terreno natural y vialidad paralelos a la Av. Buenavista. Asimismo, respecto al arroyo La Canoa, se destacan los flujos intermitentes entre revestido, terreno natural y vialidad que cruzan las colonias Valle de la Madrid, PRIM, Reforma, Ramiro Valles y Rosario. Por último, respecto al arroyo el Chamizal, se denota el escurrimiento de un afluente al mismo que cruza la Av. Díaz Ordaz.

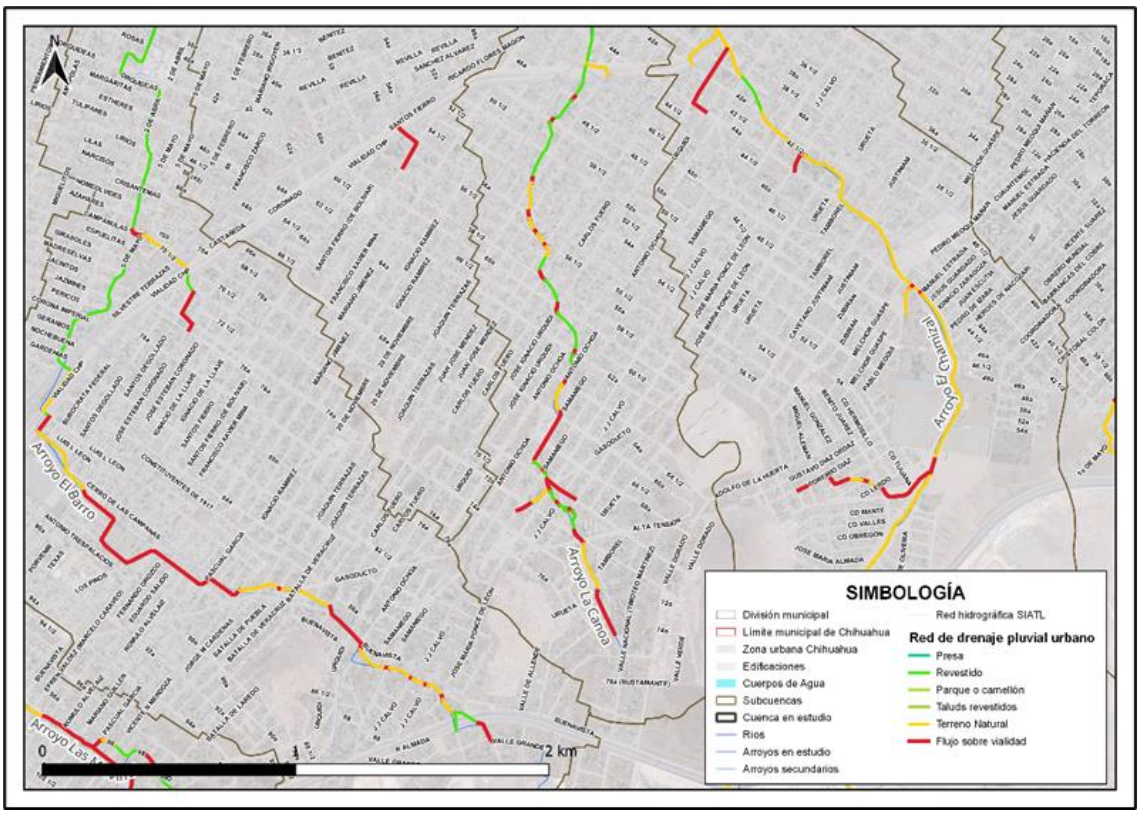


Figura 47. Flujo pluvial sobre vialidades (17/23). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 48 se muestran principalmente los flujos intermitentes entre vialidad, terreno natural y revestido del arroyo San Rafael y sus afluentes, a través de las colonias San Rafael, Lealtad y 2 de octubre.

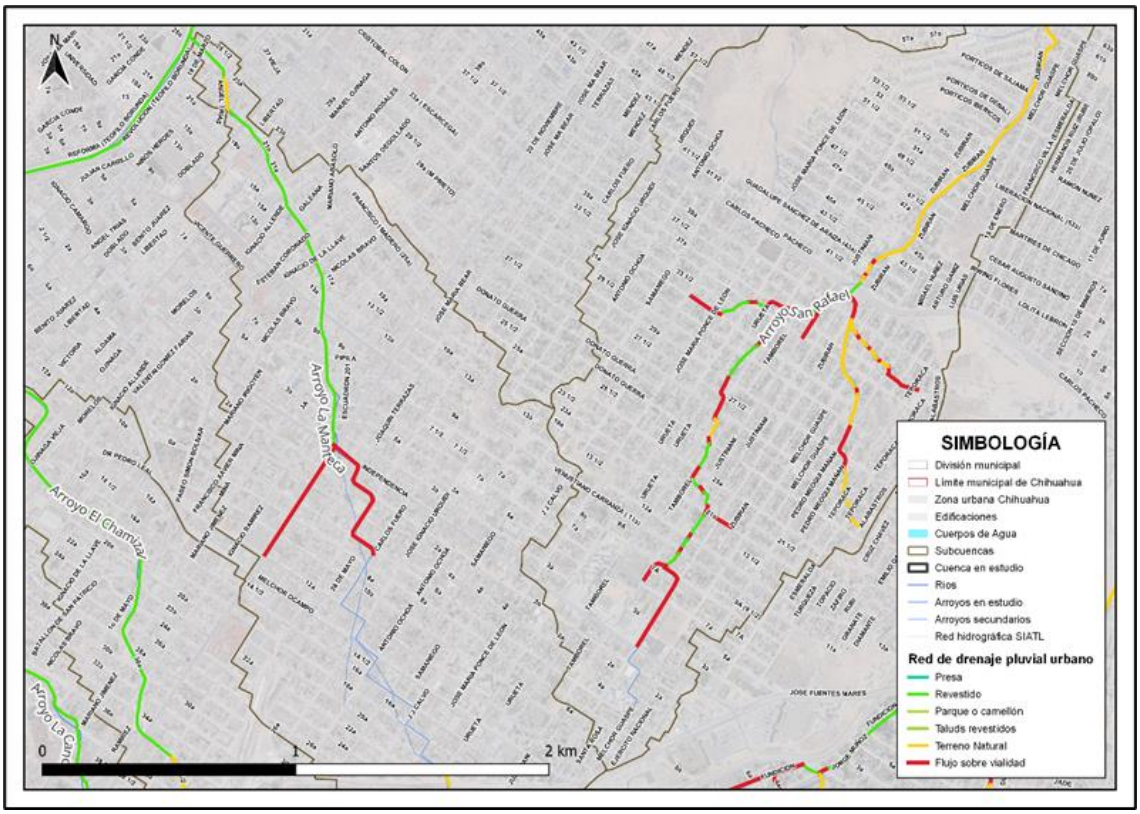


Figura 48. Flujo pluvial sobre vialidades (18/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 49 se muestra principalmente el flujo intermitente entre terreno natural y vialidad del arroyo Concordia 1, previo a su desvío en la colonia Granjas Cerro Grande, y en su continuación a través de las colonias 3 de mayo y División del Norte.

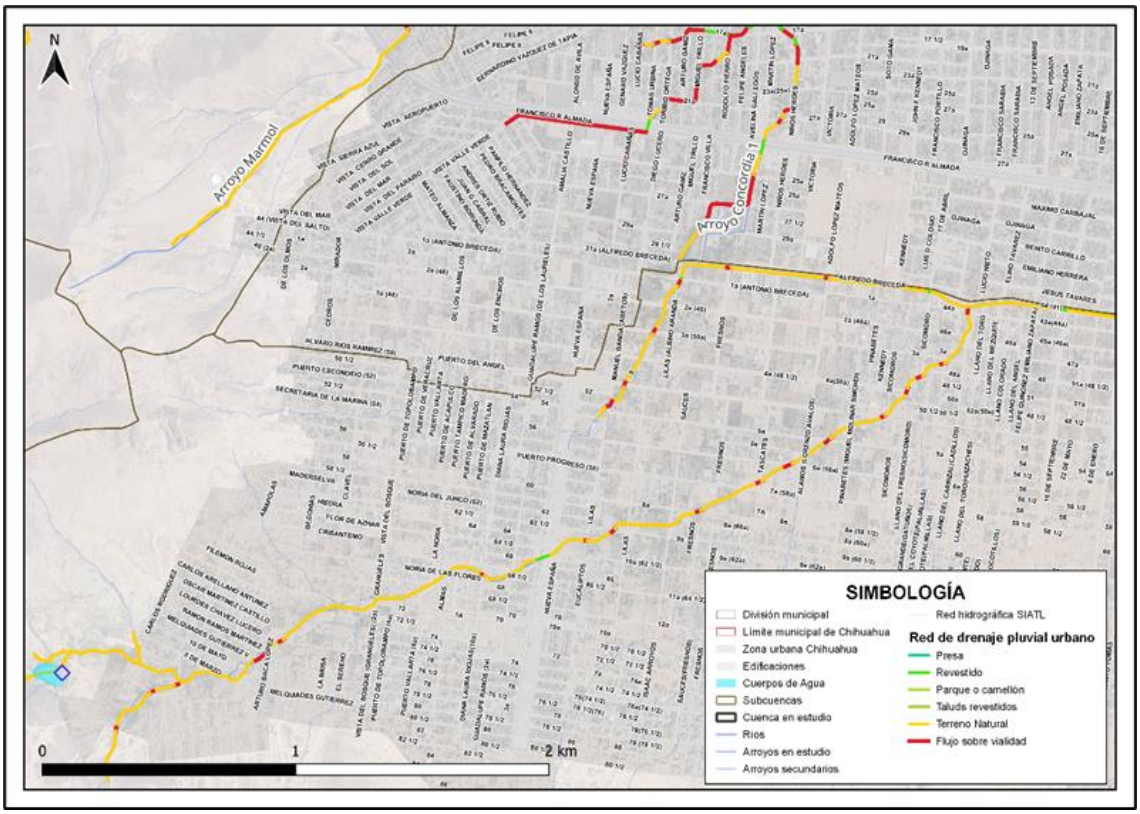


Figura 49. Flujo pluvial sobre vialidades (19/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la Figura 50 se muestran los flujos sobre vialidades del arroyo Mármol y su afluente, especialmente en el cruce de su afluente por las colonias Unidad Proletaria, Villa Dolores, Desarrollo Urbano, Manuel Bernardo Aguirre. Del cauce principal del arroyo Mármol atravesando las colonias Mármol, Lázaro Cárdenas, División del Norte y Misael Núñez. En la Figura 50 se muestran los flujos sobre vialidades del arroyo Concordia 1 en su paso a través de la colonia Villa Juárez, especialmente sobre la vialidad Soto Gama.

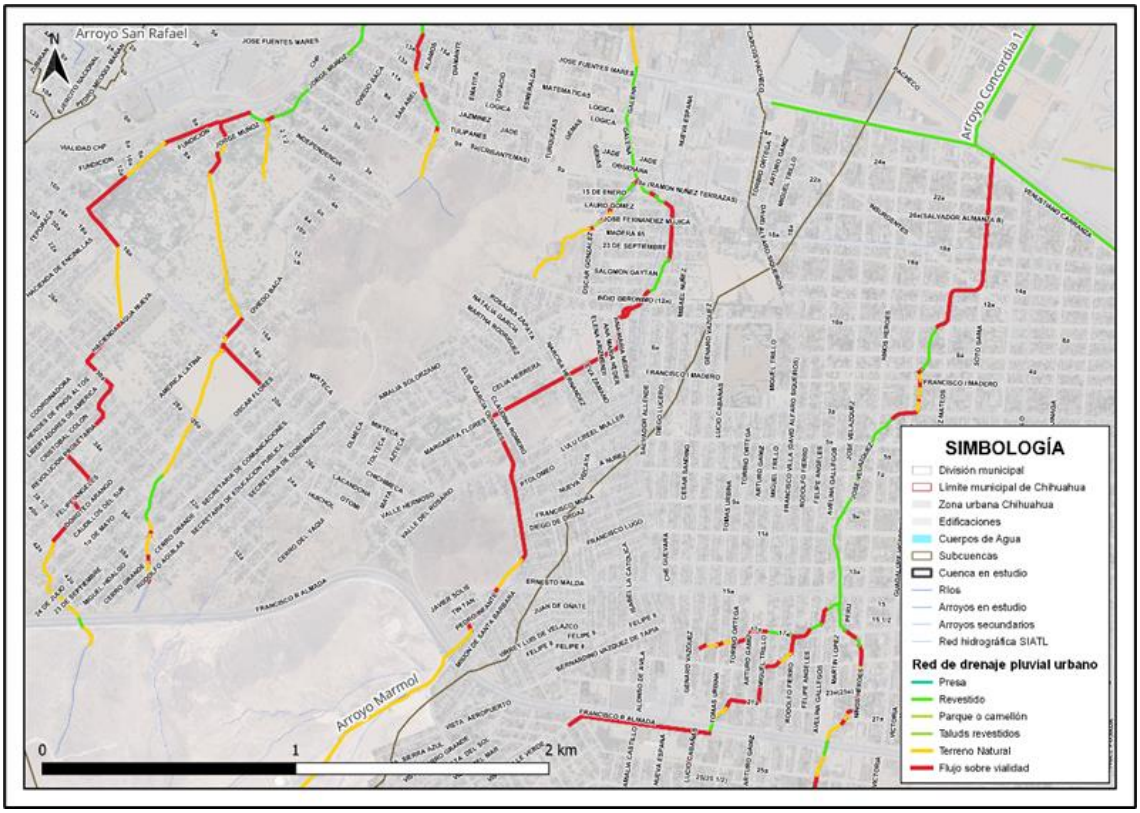


Figura 50. Flujo pluvial sobre vialidades (20/23). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 51 se muestra nuevamente el paso del arroyo San Rafael sobre vialidades de las colonias San Rafael, Lealtad y 2 de octubre, y el flujo del arroyo Concordia 2 en la zona Industrial Robinson y en la Figura 52 se muestran los flujos sobre la vialidad del arroyo Concordia 2 en la colonia Concordia.

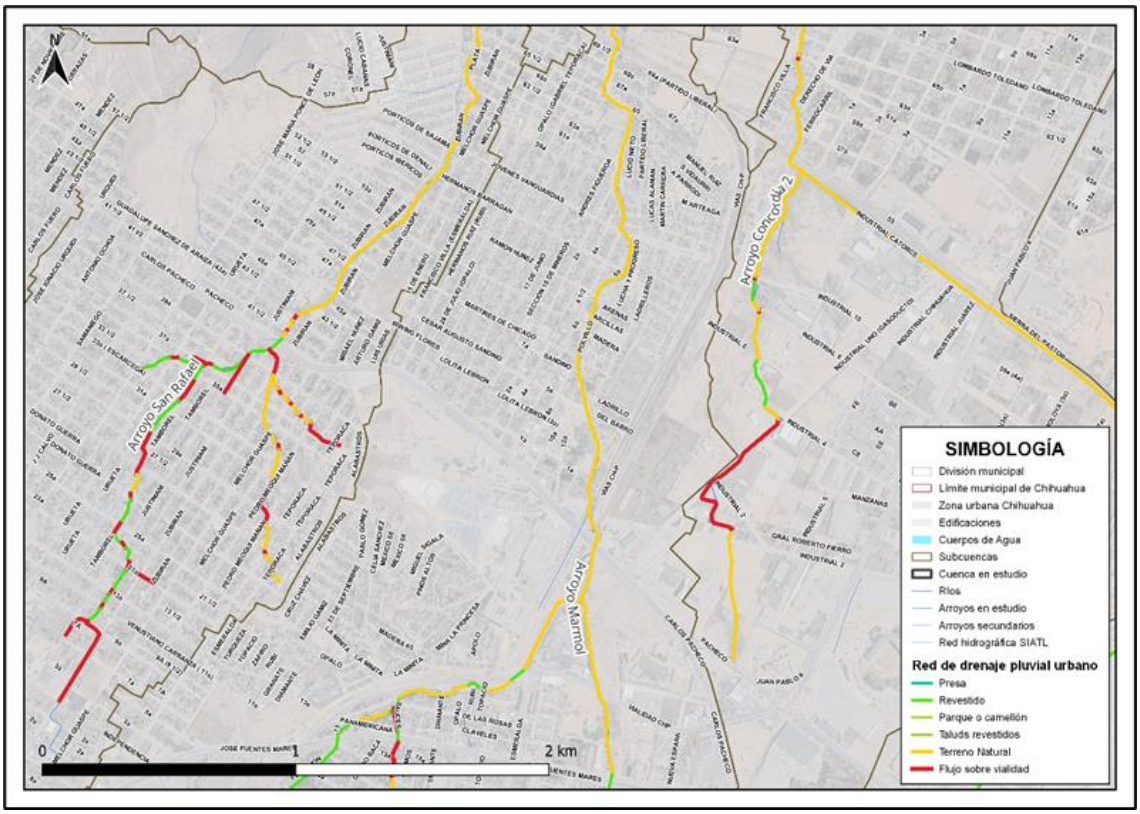


Figura 51. Flujo pluvial sobre vialidades (21/23). Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

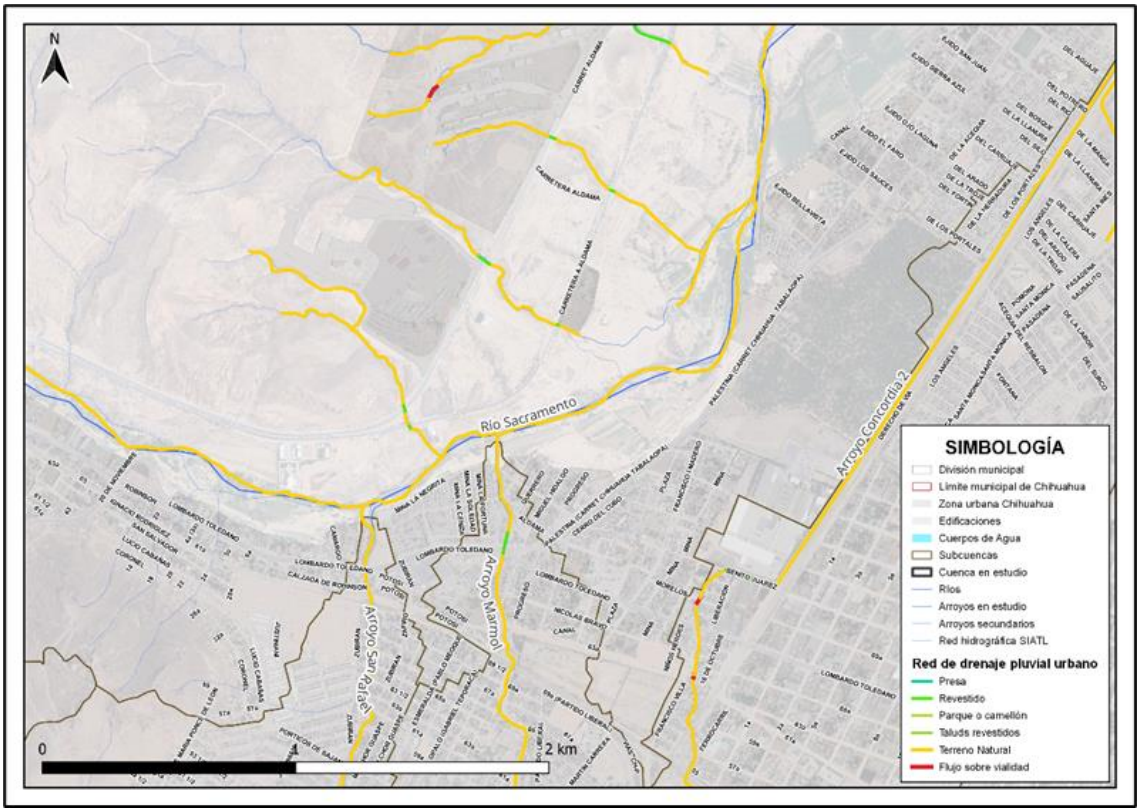


Figura 52. Flujo pluvial sobre vialidades (22/23). Fuente: elaboración propia.

Por último, en la Figura 53 se muestran los flujos sobre las vialidades de las colonias Romanza, Paseo de los Leones y Residencial El León.

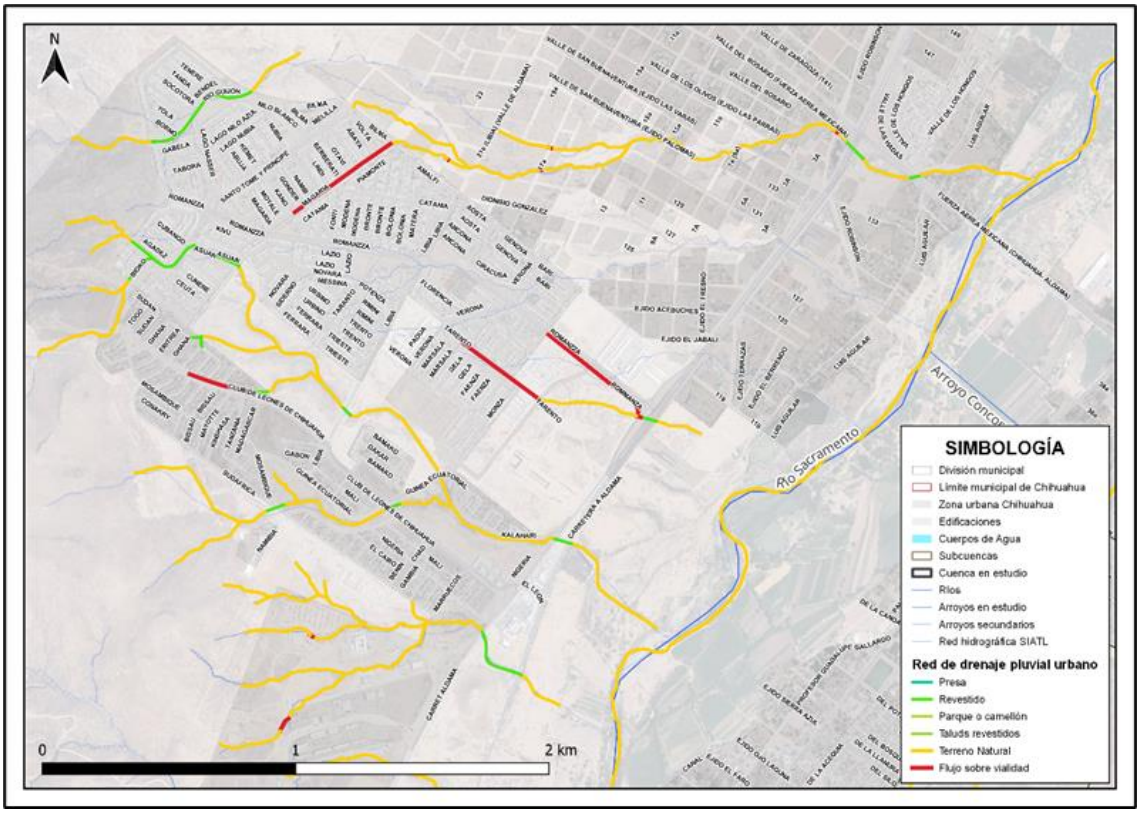


Figura 53. Flujo pluvial sobre vialidades (23/23). Fuente: elaboración propia.

En total, se identificaron 514.30 km de escurrimientos urbanos, de los cuales 62.33 km (12.12%) fluyen sobre una vialidad en por lo menos 310 ubicaciones o cruces, y 323.92 km (62.98%) fluyen en sección natural sin revestimiento, por lo que, si bien algunos de los escurrimientos de mayor importancia se encuentran canalizados, algunos escurrimientos principales y la mayoría de los secundarios aun fluyen en sección natural o por vialidades.

Por otro lado, y de manera generalizada, se destaca la problemática de la variación en tipos de revestimiento a lo largo de muchos cauces. Teniendo algunos de ellos, como ejemplo, cambios de flujo sobre vialidad, después a revestidos, posteriormente terreno natural y siguiendo a vialidad. Lo que genera escenarios de peligro focalizados sobre las vialidades.

En la Tabla 9 se muestran los tipos de flujo y sus condiciones de revestimiento donde se analizó sus condiciones hidráulicas para cada periodo de retorno en función de su velocidad.

Tabla 9. Puntos de análisis hidráulico con problemas por velocidad a cada periodo de retorno analizado. Fuente: elaboración propia.

Tipo de revestimiento o flujo	Longitud (km)	
Presa	9.60	1.87%
Revestido	96.81	18.82%
Parque o camellón	17.51	3.41%
Taludes revestidos	4.12	0.80%
Terreno natural	323.92	62.98%
Vialidad	62.33	12.12%
Total	514.30	

3.4. Alteraciones Hidrológicas en Cuencas de Ríos y Arroyos por Urbanización

Aumento de afectaciones por inundaciones a causa de la urbanización

El proceso en que una ciudad va creciendo (urbanización), es altamente complejo, ya que involucra una gran cantidad de factores sociales, económicos, geográficos, políticos, etc., por lo que tanto en la ciudad de Chihuahua como en gran parte de Latinoamérica y otras regiones de países en vías de desarrollo, la urbanización se ha llevado en la gran mayor parte de los casos sin un orden adecuado, o por lo menos, con menos orden y planeación de la deseada para que el proceso de urbanización no genere indirecta e inintencionadamente afectaciones a los propios habitantes de la ciudad, e incluso, a los habitantes de otras ciudades.

Esto es de importancia en el análisis de manejo de agua de lluvia ya que, las inundaciones en zonas urbanas y sus afectaciones, se relacionan directamente con la forma en que se ha ido urbanizando una zona, por lo que son igualmente complejas y dependientes de una gran cantidad de factores ambientales y de origen humano.

Según Hernández-Samaniego (2018) [(30)] el aumento en las afectaciones por inundaciones en zonas urbanas, pudiera atribuirse a una serie de factores que se agrupan en dos grandes categorías: crecimiento urbano no planificado, el cual es de origen antropogénico; y al cambio climático, que a su vez se relaciona a un origen humano; por lo que, en resumen, las afectaciones por inundaciones en zonas urbanas y su propio aumento, tienen un origen antropogénico (Figura 54).

Dentro de la categoría de urbanización no planificada, o falta de planeación, se reconocen algunas de las siguientes como causas de las afectaciones por inundaciones en zonas urbanas y su aumento:

- Cambio de uso de suelo no controlado
- Asentamientos irregulares
- Falta de planeación a nivel de cuenca o unidad hidrológica

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/



Figura 54. Causa del incremento de afectaciones por inundaciones. Fuente: Hernández-Samaniego, (2018) [30].

Especialmente, el cambio de uso de suelo de una cuenca durante su urbanización genera un cambio en las superficies que antes de la ésta eran permeables y ante un evento de lluvia permitían que la mayor parte del agua se infiltrara y solo una parte de del agua de lluvia escurriera, y posterior a la urbanización se conviertan en superficies impermeables (como son calles, banquetas, techos, etc.) por lo que, tras la urbanización, la mayor parte del agua de lluvia escurra en lugar de infiltrarse. Dicho de otra manera, genera un cambio en el régimen hidrológico de las cuencas debido al aumento en el coeficiente de escurrimiento de la cuenca, el cual es la relación entre el agua pluvial que escurre respecto al agua precipitada.

La Figura 55 muestra la magnitud del aumento del coeficiente de escurrimiento al urbanizar una zona. Para lluvias de baja intensidad con un periodo de retorno de 2 años, el coeficiente de escurrimiento aumenta de 0.11 a 0.70 después de la urbanización, lo que representa casi seis veces el valor del coeficiente de escurrimiento no urbanizado. Para tormentas con un periodo de retorno de 10 años los valores del coeficiente de escurrimiento son prácticamente inversos; es decir, en una zona no urbanizada aproximadamente el 78% del agua precipitada en una tormenta con un periodo de retorno de 10 años se infiltra y el 22% escurre, y tras la urbanización, para la misma tormenta de periodo de retorno de 10 años, aproximadamente el 76% del agua precipitada escurre y solo el 24% se infiltra.

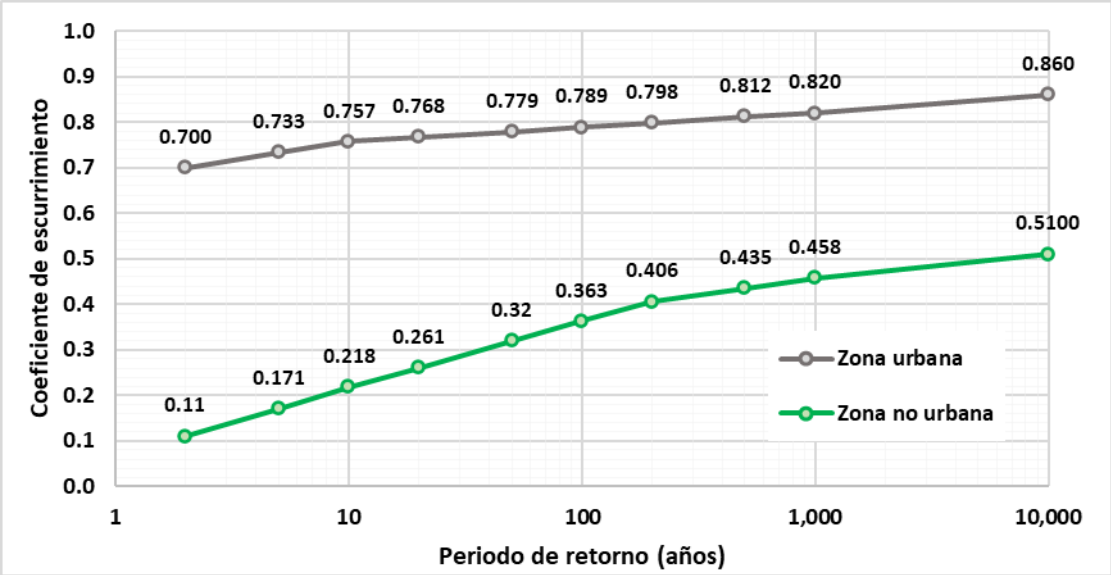


Figura 55. Variación del coeficiente de escurrimiento a diversos periodos de retorno en zona urbana y no urbana de la ciudad de Chihuahua. Fuente: elaboración propia con datos de Hernández-Samaniego, (2018) [30].

En la Figura 56 se ilustra el aumento típico del caudal y caudal máximo de escurrimiento de una cuenca después de ser urbanizada. La línea azul representa la cantidad de agua que normalmente pasa por un punto específico de cauce durante una tormenta, es decir, el flujo en un arroyo o río cuando llueve. Durante la tormenta, el flujo aumenta rápidamente y luego disminuye gradualmente durante horas, días e incluso semanas en algunos ríos de zonas bajas de grandes cuencas, lo que genera un flujo base continuo.

En contraste, la línea roja muestra la cantidad de agua que fluye por el mismo cauce después de que su cuenca ha sido urbanizada. En este caso, la cantidad de agua es significativamente mayor, y el flujo máximo se alcanza en menos tiempo debido a que las superficies urbanas ofrecen menos resistencia al flujo de agua de lluvia al ser menos rugosas.

En resumen, la urbanización de una cuenca resulta en un mayor volumen y flujo de agua pluvial, con el flujo máximo ocurriendo en menos tiempo. Este cambio en el régimen hidrológico se traduce en un aumento en la frecuencia y gravedad de las inundaciones.

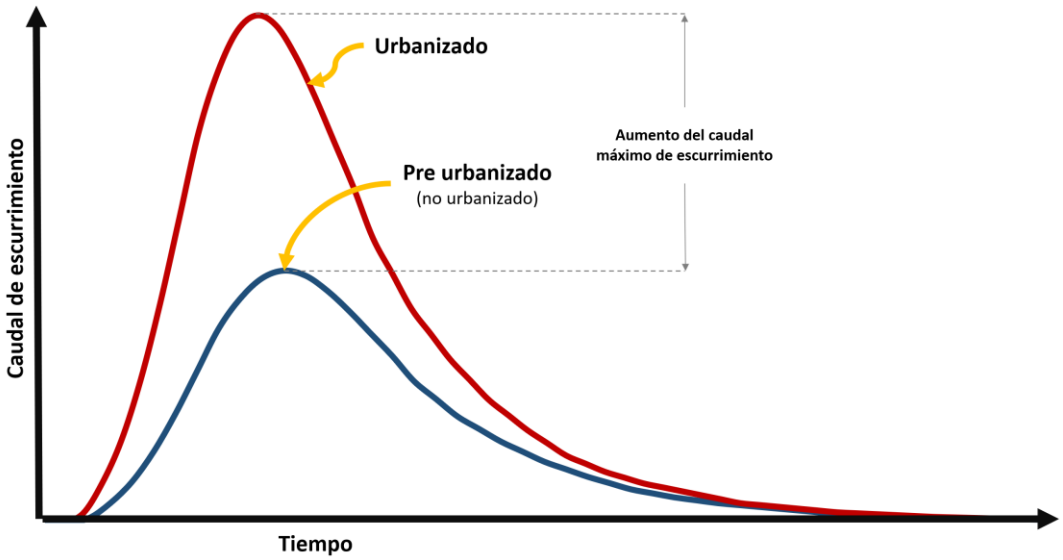


Figura 56. Ejemplo esquemático del aumento de caudal de escurrimiento en una cuenca tras urbanización. Fuente: elaboración propia.

En el contexto específico de la ciudad de Chihuahua, la Figura 57 ilustra cómo el crecimiento de la zona urbana ha conducido a la urbanización de las cuencas de los arroyos de la ciudad, incluyendo las cuencas de los 26 arroyos y dos ríos que se están estudiando. Este crecimiento probablemente ha resultado en un aumento tanto en el caudal como en el volumen de escurrimiento pluvial en estas áreas. Además, la proyección de la expansión urbana hasta el año 2040, también mostrada en la misma figura, indica que la superficie urbanizada de varias cuencas de arroyos de la ciudad seguirá aumentando, lo que resultará en un mayor caudal y volumen de escurrimiento.

Entre los 26 arroyos y dos ríos analizados, destacan los casos de los arroyos Magallanes, Saucito 2, San Rafael, Concordia 2, La Canoa y La Manteca, los cuales tienen todas sus cuencas urbanizadas. De igual manera, los arroyos Los Arcos, Galera Norte y Sur, y Plaza de Toros tienen más del 90% de sus cuencas urbanizadas, lo que prácticamente equivale a una urbanización total. Además, los arroyos Saucito 1, Las Malvinas y El Barro tienen más del 85% de sus cuencas urbanizadas.

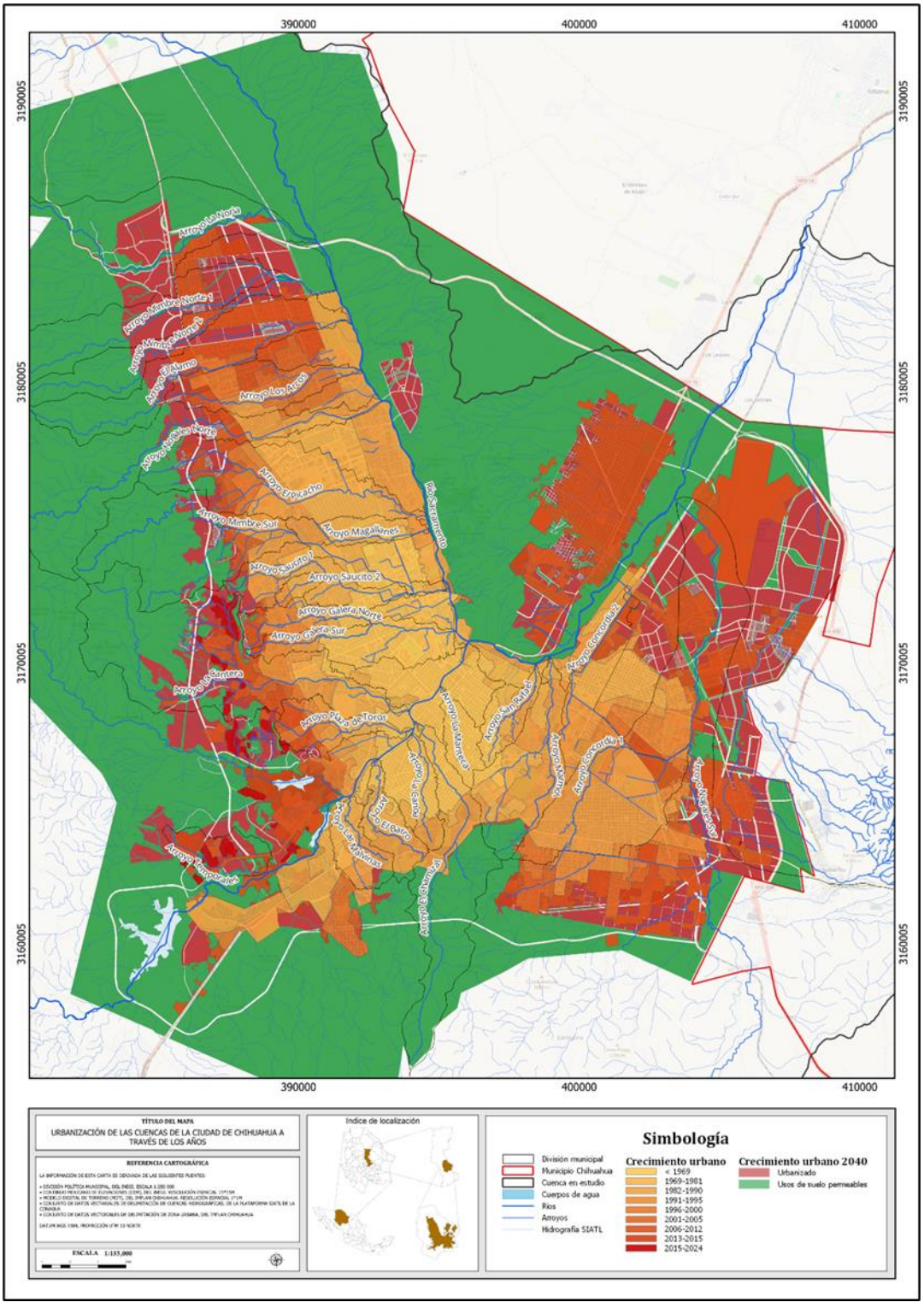


Figura 57. Aumento de superficie urbanizada de cuencas de cauces urbanos de la ciudad de Chihuahua: Fuente: elaboración propia con información del IMPLAN.

Además del aumento de la superficie urbanizada en las cuencas de los arroyos, otro problema relacionado entre la urbanización y las afectaciones por agua de lluvia es el cambio en el curso de esta al construir la traza urbana sobre los escurrimientos naturales. Aunque en muchos casos la traza urbana sigue los cursos naturales del agua a través de ríos y arroyos, en otros casos se modifican estos escurrimientos, creando zonas donde, sin canalizaciones o acciones adecuadas de manejo del agua de lluvia, el agua fluye por la traza urbana hacia las áreas más bajas. Este fenómeno se conoce coloquialmente con frases como "el agua sigue su curso" o "el agua tiene memoria".

Para ilustrar este fenómeno, las Figuras 58 y 59 muestran la superposición de dos mapas antiguos de la ciudad de Chihuahua sobre una imagen satelital de Google Earth del año 2024. Estas imágenes muestran cómo la hidrografía ha influido en la urbanización de la ciudad.

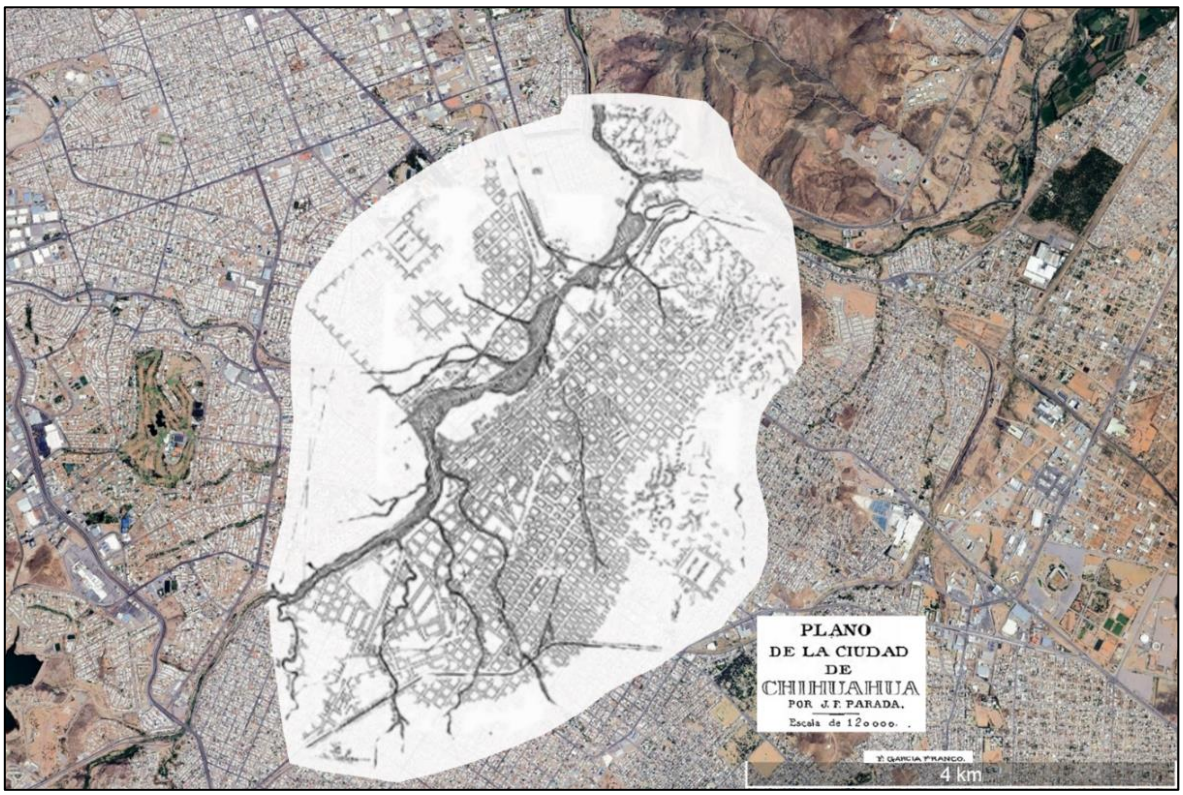


Figura 58. Super posición de mapa antiguo sobre orto imagen actual de la ciudad de Chihuahua-1. Fuente: elaboración propia con información de Mediateca INAH (2024) [31].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

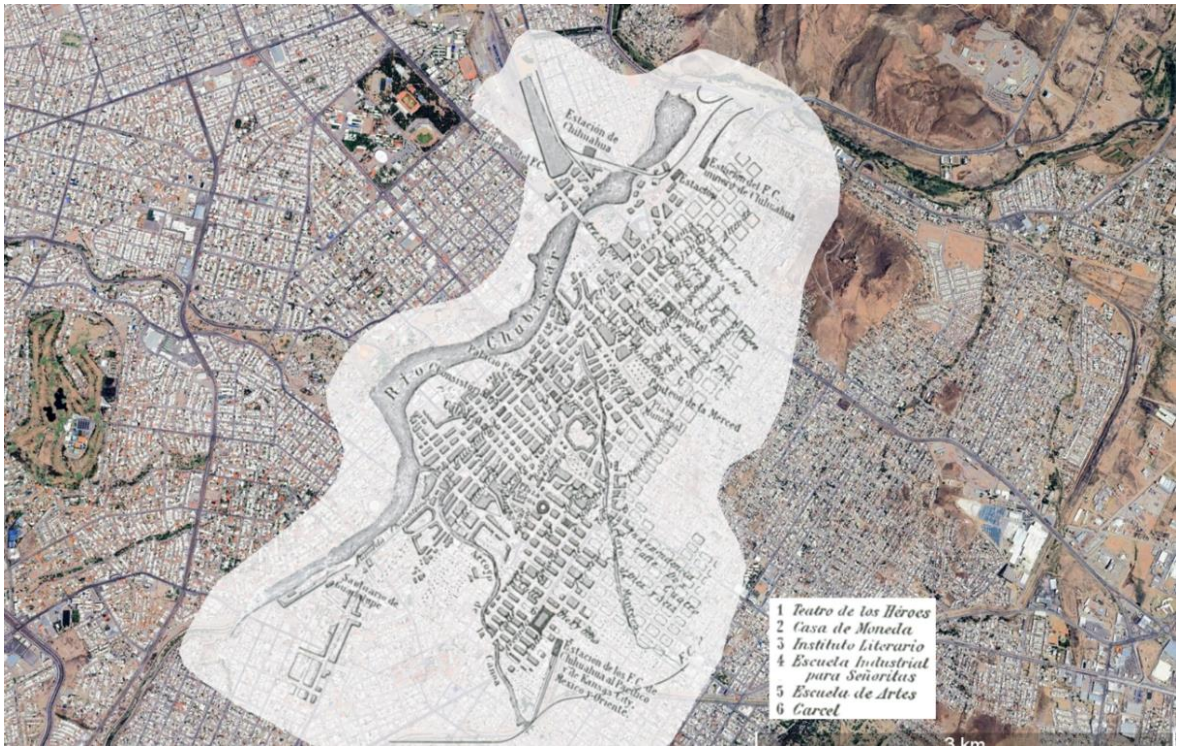


Figura 59. Super posición de mapa antiguo sobre orto imagen actual de la ciudad de Chihuahua-2. Fuente: elaboración propia con información de Evangelista (2024) [32].

Aumento de caudal pluvial en una cuenca por urbanización Arroyo La Cantera

Como se muestra en la Figura 57, prácticamente todos los arroyos que se encuentran aguas arriba de la junta de los ríos Chuvíscar y Sacramento han sido urbanizados, comenzando desde la parte más baja de la cuenca del arroyo y avanzando hacia la parte más alta. Esta forma específica de urbanización, en dirección aguas abajo hacia aguas arriba, genera problemáticas específicas en cuanto al drenaje pluvial urbano y, en general, respecto a las obras de manejo de agua de lluvia en la zona.

Es probable que, debido a esta forma de urbanización, las obras de manejo de agua de lluvia construidas en las primeras décadas de urbanización, como en las décadas de 1970 y 1980, tales como canales y estructuras de detención (regulación), hayan quedado paulatinamente sub-dimensionadas conforme aumenta el caudal de escurrimiento debido al aumento de la superficie urbanizada de la cuenca.

Por ello, se analizó como ejemplo de esta problemática la cuenca del arroyo La Cantera, la cual ha ido urbanizándose aproximadamente desde la década de 1960, para la cual se dispone de información sobre la superficie urbana de la ciudad desde ese año. Para dicho análisis, se calculó el

aumento del coeficiente de escurrimiento de la cuenca, basándose en el cambio de superficie no urbana a urbana debido al crecimiento urbano de la ciudad, desde 1969 hasta 2024, y se proyectó al 2040 con base en la zonificación secundaria del plan de desarrollo urbano 2040 (Figura 60).

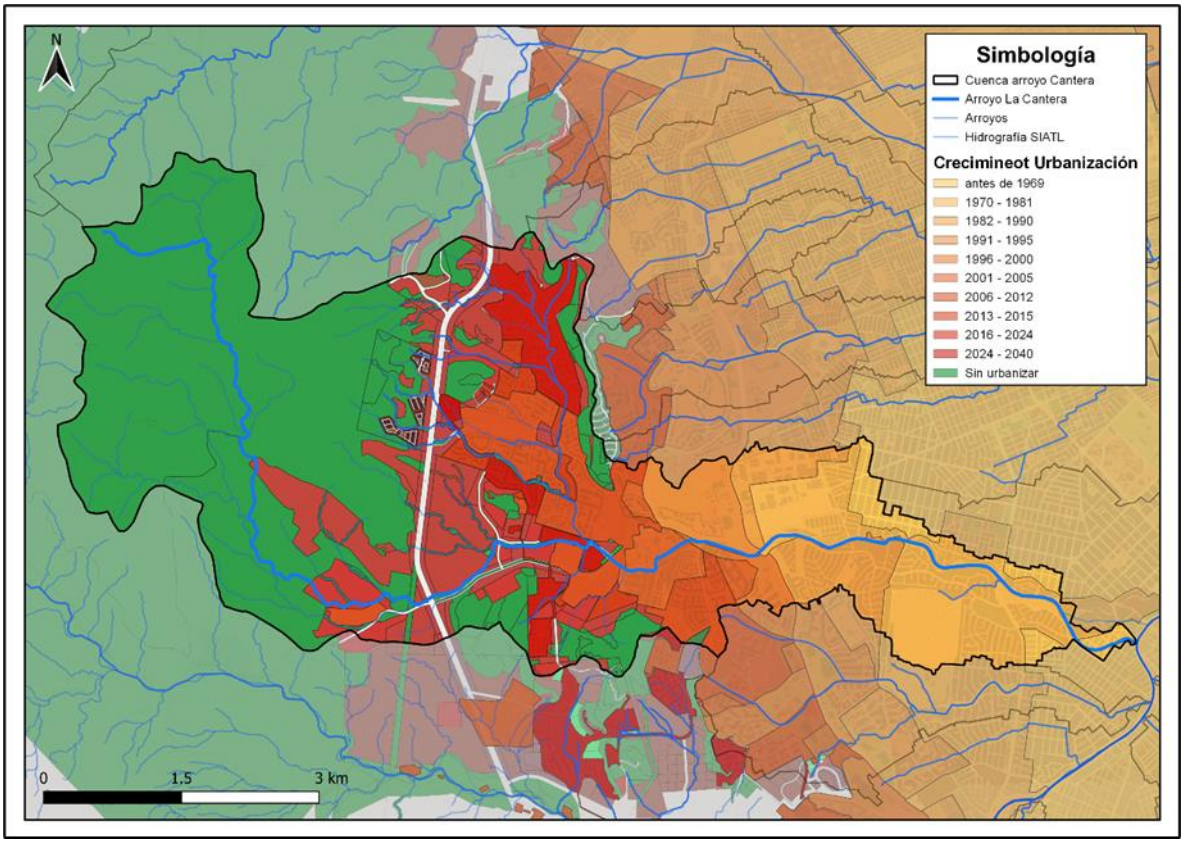


Figura 60. Crecimiento urbano en la cuenca del arroyo La Cantera. Fuente: elaboración propia con información del IMPLAN.

En la Tabla 10 se muestran los valores de superficie urbana de la cuenca a diversos años y en Figura 61 se observa gráficamente como ha ido cambiando su superficie de no urbana a urbana.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Tabla 10. Variación del área urbanizada y no urbanizada en la cuenca del arroyo La Cantera del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia.

Año	No urbana		Urbana	
1969	29.825	97.85%	0.655	2.15%
1981	26.801	87.93%	3.679	12.07%
1990	25.494	83.64%	4.986	16.36%
1995	24.694	81.02%	5.786	18.98%
2000	24.428	80.15%	6.052	19.85%
2005	23.666	77.64%	6.814	22.36%
2012	21.248	69.71%	9.232	30.29%
2015	20.780	68.18%	9.700	31.82%
2024	19.397	63.64%	11.083	36.36%
2040	14.711	48.26%	15.769	51.74%

En la Figura 61 se muestra especialmente como aproximadamente entre los años 2038 a 2042 la cantidad de superficie urbana será mayor que la no urbana.

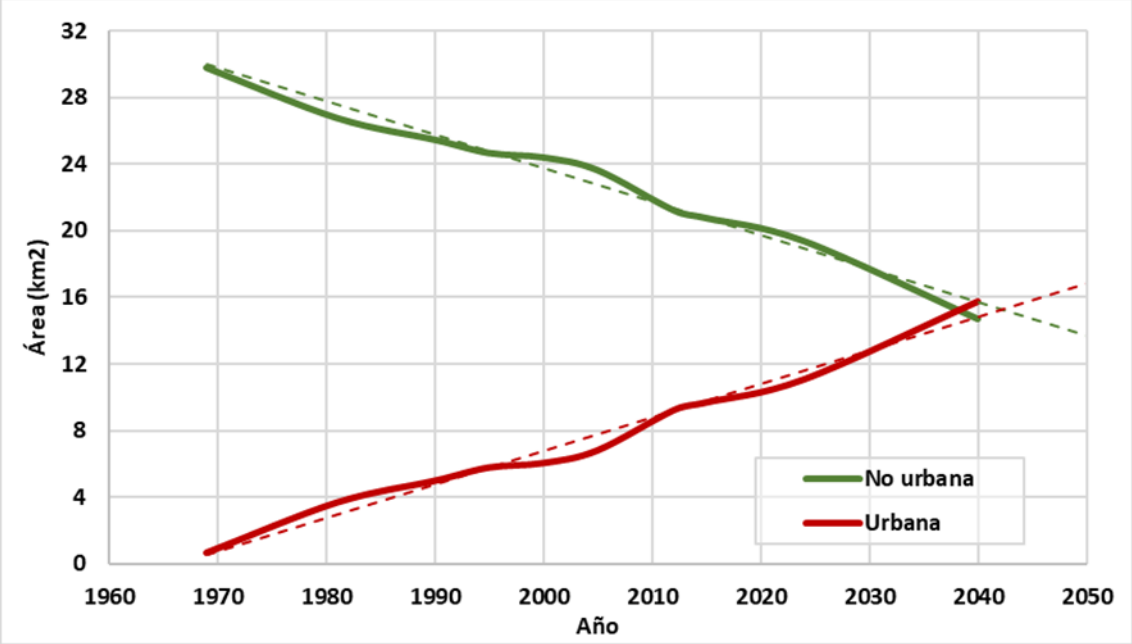


Figura 61. Variación del área urbanizada y no urbanizada en la cuenca del arroyo La Cantera del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 11, es notable que los valores de escurrimiento para el año 2040 son significativamente mayores que los registrados en 1969, el año más antiguo del que se tiene registro en el área de la cuenca. En el periodo de retorno de 2 años, el valor del coeficiente de escurrimiento para el año 2040 (0.42) es más de cuatro veces mayor que el valor registrado en 1969 (0.12).

Tabla 11. Coeficientes de escurrimiento de la cuenca del arroyo La Cantera a diversos periodos de retorno del año 1969 al año 2040. Fuente: elaboración propia.

Año	CE por Periodo de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1,000
1969	0.12	0.18	0.23	0.27	0.33	0.37	0.41	0.44	0.47
1981	0.18	0.24	0.28	0.32	0.38	0.41	0.45	0.48	0.50
1990	0.21	0.26	0.31	0.34	0.40	0.43	0.47	0.50	0.52
1995	0.22	0.28	0.32	0.36	0.41	0.44	0.48	0.51	0.53
2000	0.23	0.28	0.33	0.36	0.41	0.45	0.48	0.51	0.53
2005	0.24	0.30	0.34	0.37	0.42	0.46	0.49	0.52	0.54
2012	0.29	0.34	0.38	0.41	0.46	0.49	0.52	0.55	0.57
2015	0.30	0.35	0.39	0.42	0.47	0.50	0.53	0.55	0.57
2024	0.32	0.38	0.41	0.45	0.49	0.52	0.55	0.57	0.59
2040	0.42	0.46	0.50	0.52	0.56	0.58	0.61	0.63	0.65

Se calcularon los caudales a 9 periodos de retorno de cada uno de los años en los que se encontró información sobre la superficie urbana o no urbana de la cuenca, aplicando la fórmula del método Racional:

$$Q_{máx} = \text{FRA} * 0.278 * Ce * i * A \qquad \textbf{Ec. 2}$$

Donde:

- $Q_{máx}$= Caudal máximo de desalojo de la cuenca (m^3/s)
- FRA= Factor de reducción por área (adimensional)
- *Ce*= Coeficiente de escurrimiento (adimensional)
- *i*= Intensidad de lluvia para una duración igual al tiempo de concentración (mm/h)
- *A*= Área de la cuenca (km^2)

El valor *0.278* es un factor de conversión de unidades.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Para esto se consideraron los valores de coeficiente de escurrimiento de la Tabla 11 y los valores previamente calculados para la cuenca en el análisis hidrológico: área de la cuenca 30.48 km^2, factor de reducción por área de 0.9625, longitud del cauce principal de 17.002 km, máxima elevación de 1920 msnm, mínima elevación de 1419 msnm; ΔH= 501 m, tiempo de concentración de 134.29 min; 2.24 h (calculado con la fórmula del SCS) y las intensidades de lluvia mostradas en la Tabla 12.

$$FRA = 1.0 - 0.3549 * (e^{-0.42723})\ (1.0 - \ e^{-0.005794*A}) \qquad \textbf{Ec. 3}$$

Donde:

- FRA: Factor de reducción por área (adimensional)
- A: Área de la cuenca en (km^2);

$$Tc = \frac{L^{1.15}}{3085 * \Delta H^{0.38}} \qquad \textbf{Ec. 4}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración (horas);

L: Longitud del cauce principal (metros);

ΔH: Desnivel entre el inicio y el final del cauce principal (metros);

Tabla 12. Caudales de escurrimiento del arroyo La Cantera a 9 periodos de retorno desde el año 1969 hasta el año 2040. Fuente: elaboración propia.

Intensidad de lluvia por Periodo de retorno (mm/h)									
-	13.47	16.15	18.18	20.21	22.89	24.92	26.94	29.62	31.65
Año	Caudal (m^3/s) por Periodo de retorno								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1,000
1969	13.48	24.12	34.04	44.81	61.58	75.63	91.07	107.06	120.25
1981	19.91	31.46	41.97	53.10	70.08	84.21	99.62	116.10	129.51
1990	22.69	34.64	45.40	56.68	73.75	87.93	103.31	120.01	133.52
1995	24.39	36.58	47.50	58.88	76.00	90.20	105.57	122.40	135.98
2000	24.96	37.23	48.19	59.61	76.75	90.95	106.32	123.19	136.79
2005	26.58	39.08	50.19	61.70	78.89	93.12	108.48	125.47	139.13
2012	31.72	44.95	56.53	68.32	85.69	99.99	115.31	132.69	146.54
2015	32.71	46.09	57.76	69.61	87.00	101.32	116.63	134.09	147.98
2024	35.66	49.45	61.38	73.40	90.89	105.25	120.54	138.23	152.22
2040	45.62	60.83	73.67	86.25	104.06	118.55	133.79	152.23	166.58

En la Tabla 12 se muestran los caudales máximos de escurrimiento del arroyo la Cantera considerando el cambio de superficie no urbana a urbana en los años analizados y una proyección al año 2040. Estos mismos valores se muestran de manera gráfica en las Figuras 62 a 64.

.

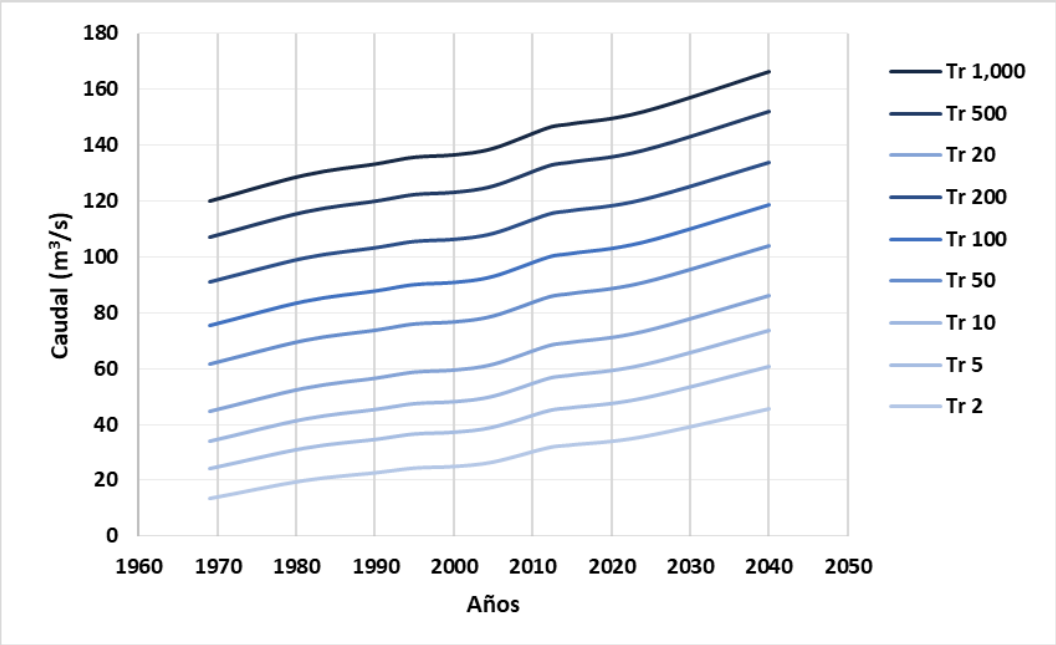


Figura 62. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-1. Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

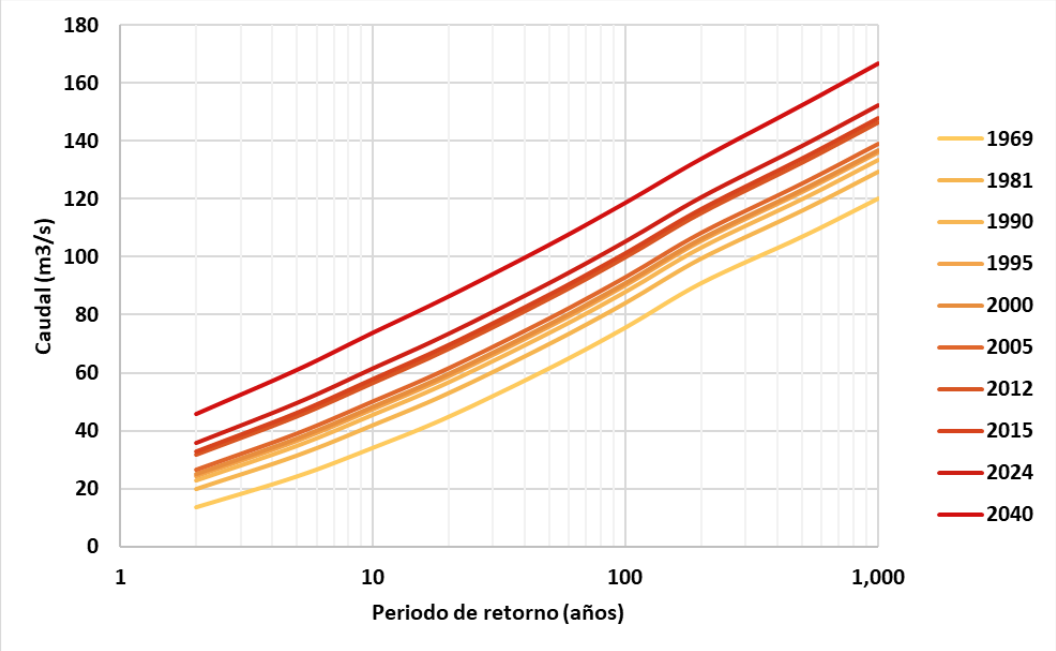


Figura 63. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-2. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 64, el aumento del caudal debido a la urbanización en la cuenca del arroyo La Cantera es significativo. El caudal máximo registrado en 1969 durante una tormenta con un periodo de retorno de 10 años (34.04 m3/s) es prácticamente igual al caudal máximo registrado en 2024 durante una tormenta con un periodo de retorno de 2 años. Incluso, para el año 2040, se proyecta que una tormenta con periodo de retorno de 2 años provocará un escurrimiento superior al registrado durante una tormenta con periodo de retorno de 10 años en 1969. En otras palabras, y simplificando algunos conceptos estadísticos, el escurrimiento causado por la "peor tormenta en 10 años" en 1969 ocurría cada 10 años, mientras que hoy en día ese mismo nivel de escurrimiento se presenta cada 2 años y se proyecta que en 2040 ocurra prácticamente cada año.

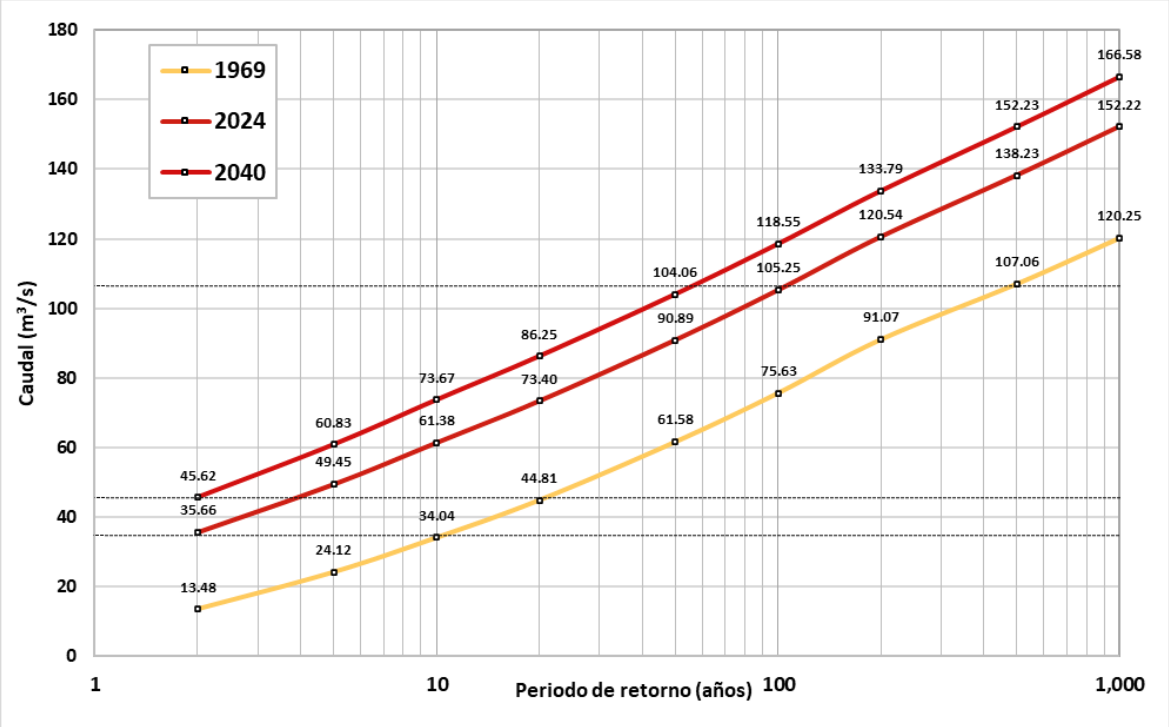


Figura 64. Aumento de los caudales del arroyo La Cantera, a diferentes periodos de retorno desde el año 1969 al año 2040, a causa del aumento del área urbanizada-3. Fuente: elaboración propia.

Asimismo, al año 2040, el escurrimiento provocado por la tormenta con periodo de retorno de 2 años (45.62 m^3/s) es prácticamente el mismo que el que se presentaba en el año 1969 con la tormenta de periodo de retorno de 20 años (44.81 m^3/s), es decir, ese escurrimiento de orden de 45 m^3/s, en el 2040 se presentará cada 2 años en lugar de cada 20 años.

Respecto al diseño y sub dimensionamiento de obras de manejo de agua de lluvia, la gran mayoría de los canales sobre arroyos principales de la ciudad de Chihuahua, son considerados por la CONAGUA como cauces de propiedad nacional, o zona federal, al cumplir con las características para ello: serán cauces propiedad de la nación "ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional" que cuenten con un cauce definido en el que su depresión topográfica (cárcava) resultado del escurrimiento pluvial que cuente con por lo menos 2.00 m de ancho y una profundidad de 0.75 m del tirante del nivel de aguas máximo ordinario (NAMO) [(33)].

Para dichos cauces se solicita que su diseño hidráulico se realice considerando el caudal correspondiente al periodo de retorno de 500 años [(34)]. Para el caso del arroyo La

Cantera, claramente cumple con las características para ser considerado de propiedad nacional, por lo que analizando la información de la Figura 64 se aprecia que el caudal de diseño del canal de este arroyo (Tr=500 años) ha ido en aumento; es decir, si el canal se hubiera diseñado en los años 1960, su caudal de diseño hubiera sido 107.6 m^3/s y al año 2024 ese caudal correspondería a un periodo de retorno de solo un poco superior a 100 años, y para el 2040 el caudal corresponderá a un periodo de retorno entre 50 y 60 años únicamente.

Considerando que el canal tiene una sección rectangular de concreto (n=0.016), con ancho de aproximadamente 8.00 m y altura de 3.25 m, con pendiente descendiente de 0.005 m/m. Se estima con base en simulaciones hidráulicas a superficie libre con el programa computacional Hidra_Bas [(17)], que tiene una capacidad de conducción de diseño de aproximadamente 128 m^3/s; con dicho caudal tendría un tirante de 2.65 m y bordo libre de 0.60 m según recomendaciones de SIAPA (19), dicho caudal de diseño se encuentra entre los valores de periodo de retorno de 500 años de los años 2000 y 2005.

Asimismo, se estima cuenta con una capacidad extraordinaria conducción a tope (sin bordo libre) de aproximadamente 169 m^3/s, superior a los caudales de Tr= 1,000 años de los años 2000 y 2005. Por tanto, el canal se contaba correctamente diseñado hidráulicamente hasta aproximadamente el año 2005. Sin embargo, en años posteriores fue quedando sub dimensionado, ya que su capacidad de conducción de aproximadamente 128 m^3/s, corresponde actualmente a un periodo de retorno de casi exactamente 300 años menor al debido.

Por último, al año 2040 quedará todavía más sub dimensionado, ya que se estima que para ese año su capacidad de conducción de 128 m^3/s, sea correspondiente al periodo de retorno de entre 200 y 100 años.

Urbanización de cuencas de Presas Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón

De las cuatro presas con las que interactúa hidrológicamente la ciudad de Chihuahua, tres se encuentran al poniente: El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua. Como se puede apreciar en la Figura 65, desde el siglo pasado la ciudad ha ido expandiéndose dentro de las cuencas de aportación de estas presas. Hasta aproximadamente la década de 1990, la cuenca de la presa Chuvíscar fue la más urbanizada. Sin embargo, la construcción de la prolongación de la Avenida Teófilo Borunda detonó la urbanización de la zona poniente de la ciudad, conocida como zona El Reliz, lo que generó un aumento significativo en la urbanización de la cuenca de la presa Chuvíscar y el inicio de la urbanización de la cuenca de la Presa El Rejón.

Por otro lado, en otra zona del poniente de la ciudad, la construcción de colonias y fraccionamientos como Altozano, Pedregal de San Ángel, Pedregal de Alba y Jardines del Pedregal, entre otras, ha contribuido a la urbanización de la cuenca de la Presa El Rejón.

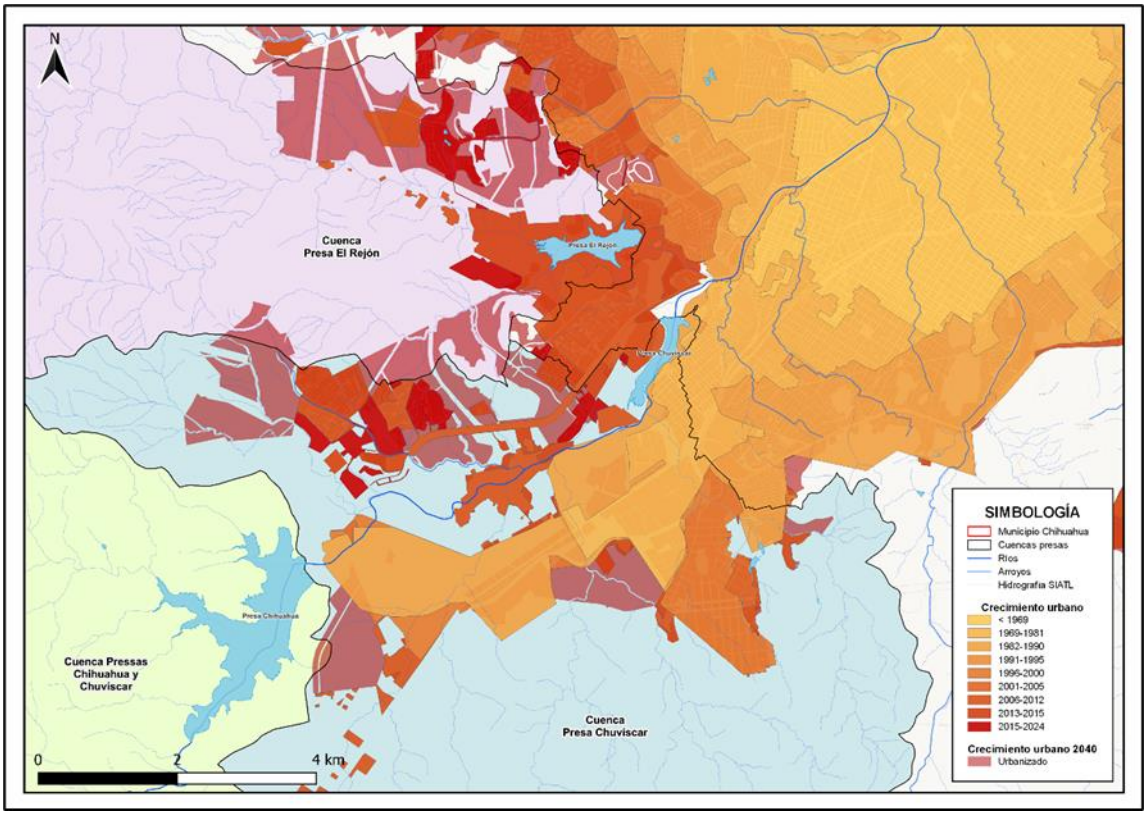


Figura 65. Urbanización de cuencas de presas El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua-a. Fuente: elaboración propia.

Como se menciona en secciones anteriores de este informe, la urbanización de las cuencas de los arroyos, especialmente en el caso de las tres presas mencionadas, es de suma importancia en lo que respecta al drenaje pluvial urbano y a las obras de manejo de agua de lluvia, como las presas que tienen como objetivo principal la regulación pluvial mediante obras de detención. El diseño hidráulico de estas estructuras incluye una componente hidrológica que considera el coeficiente de escurrimiento del suelo de las cuencas de aportación. Originalmente, al momento de su diseño, estas cuencas eran zonas no urbanizadas, y al urbanizarse, se altera dicho coeficiente de escurrimiento, pudiendo incluso invertirlo.

Esta situación provoca que, a medida que avanza la urbanización de las cuencas de las presas, cada una de ellas reciba progresivamente más agua pluvial durante cada evento de tormenta. Además, la estructura de excedencias (vertedor) de estas presas se ve comprometida en su diseño, quedando subdimensionada y aumentando el riesgo de fallo.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Aunque, como se puede observar en la Figura 66, la zona urbanizada no representa una gran proporción del tamaño total de las cuencas de las presas, es fundamental que cada proyecto de urbanización en esta área considere la alteración que causa en el régimen hidrológico y en el coeficiente de escurrimiento, así como las implicaciones que esto conlleva para las estructuras de excedencias de las presas.

Es especialmente importante revisar estos aspectos en la cuenca de la Presa El Rejón, ya que no cuenta con otras estructuras de regulación aguas arriba. En el caso específico de la Presa Chuvíscar, cuenta con un factor que juega a su favor en términos de seguridad: la presa Chihuahua. Al estar ubicada aguas arriba de la Chuvíscar, la presa Chihuahua regula parcialmente el caudal que llega a esta última, reduciendo así el riesgo de falla. Sin embargo, la presa Chuvíscar es la más antigua de las tres y actualmente se encuentra prácticamente azolvada en su totalidad, lo que aumenta su riesgo de falla. Por lo tanto, también se debe tener precaución en la urbanización de su cuenca de aportación.

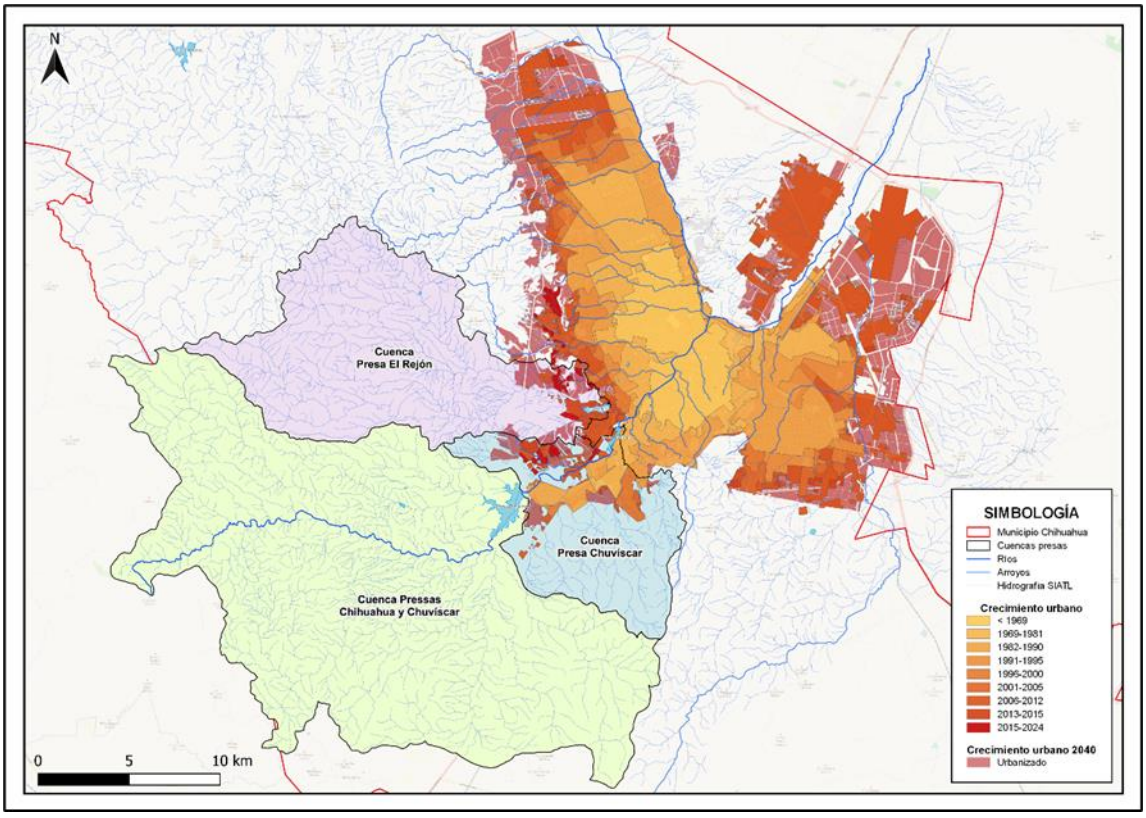


Figura 66. Urbanización de cuencas de presas El Rejón, Chuvíscar y Chihuahua-b. Fuente: elaboración propia.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

4. Zonas Críticas de Inundación

Se define a las inundaciones como “la ocupación temporal sobre superficies donde comúnmente no lo está” [(4)], las cuales, además de ser una componente natural y normal del ciclo del agua, pueden o no conllevar afectaciones.

Dependiendo de su naturaleza pueden ser pluviales (por precipitación local), fluviales (por escurrimiento), lacustres (desbordamiento de lagos y/o lagunas), costeras (por mareas altas y/o viento), por rotura de cortina de una presa, mal funcionamiento u operación de infraestructura hidráulica.

Por lo que pueden o no ser debido a un fenómeno hidrometeorológico, y pueden generar o no, generar afectaciones a la sociedad.

Asimismo, las afectaciones por inundaciones pueden clasificarse dependiendo de si estas se producen por contacto directo con el agua o no (afectaciones directas o indirectas) o de si es posible traducir dichas afectaciones a valor monetario (afectaciones tangibles o intangibles). Dichas afectaciones dependen de las características peligrosas del agua pluvial como son: profundidad (tirante), velocidad, tiempo de ocupación y carga de sedimentos. De las cuales, se considera que en zonas urbanas la más relevante es la profundidad de inundación.

Se identificaron diversas zonas de inundación mediante los análisis realizados en este informe y utilizando los estudios previos realizados en el municipio de Chihuahua. Estos incluyen el Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua de los años 2014 [(6)] y del año 2022 [(35)], así como el estudio "Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo en Zonas Urbanas" del año 2018 [(30)]. Es importante destacar que, como se mencionó anteriormente, se consideraron todos los flujos sobre vialidades mostrados desde la Figura 31 hasta la Figura 53 como zonas críticas de inundación.

De acuerdo con el Atlas Riesgos del Municipio de Chihuahua 2014 se muestran las zonas de inundación identificadas en el municipio de Chihuahua, en el cual mediante simulaciones hidráulicas a superficie libre determinaron profundidades máximas de inundación a diversos periodos de retorno.

En las Figuras 67 y 68 se observan principalmente los flujos del arroyo La Cantera y del río Chuvíscar en su tramo canalizado que atraviesa la zona urbana. En la Figura 69, además de estos dos, se muestran las profundidades de inundación significativas en el arroyo Nogales Norte, Galera Norte y Sur, así como en el arroyo Nogales Sur.

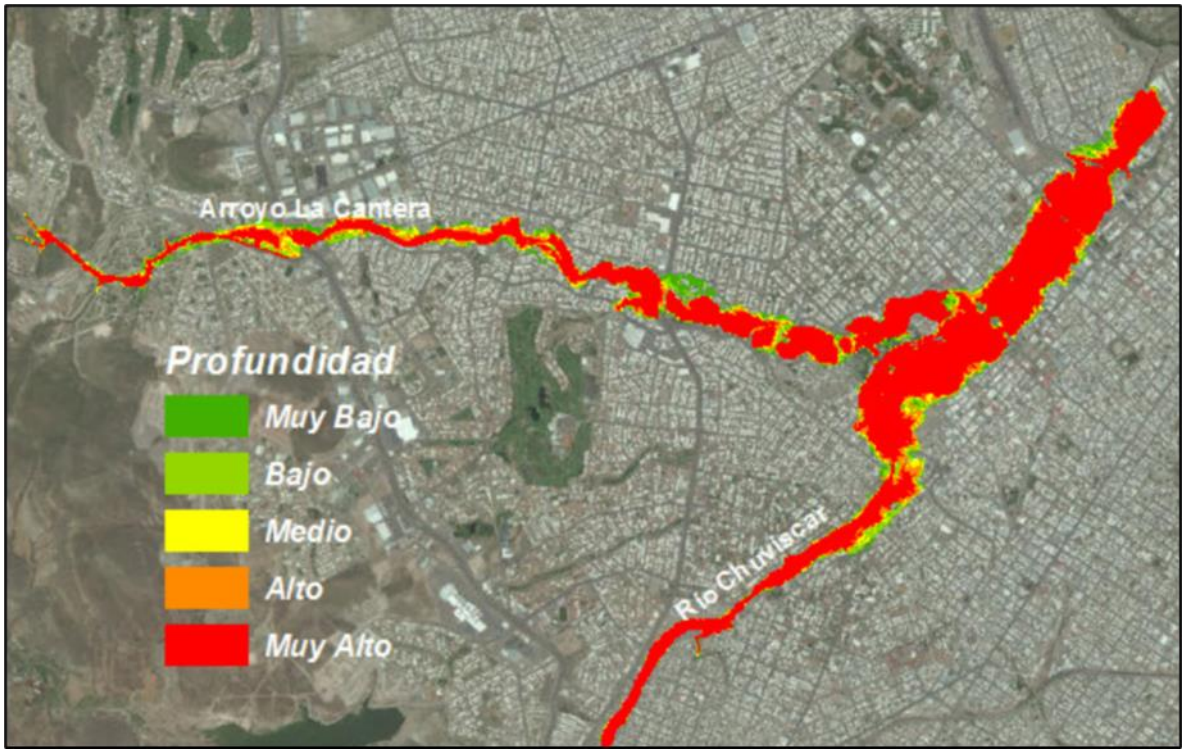


Figura 67. Zonas de inundación de Río Chuvíscar y arroyo la Cantera-1. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2014) [6].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

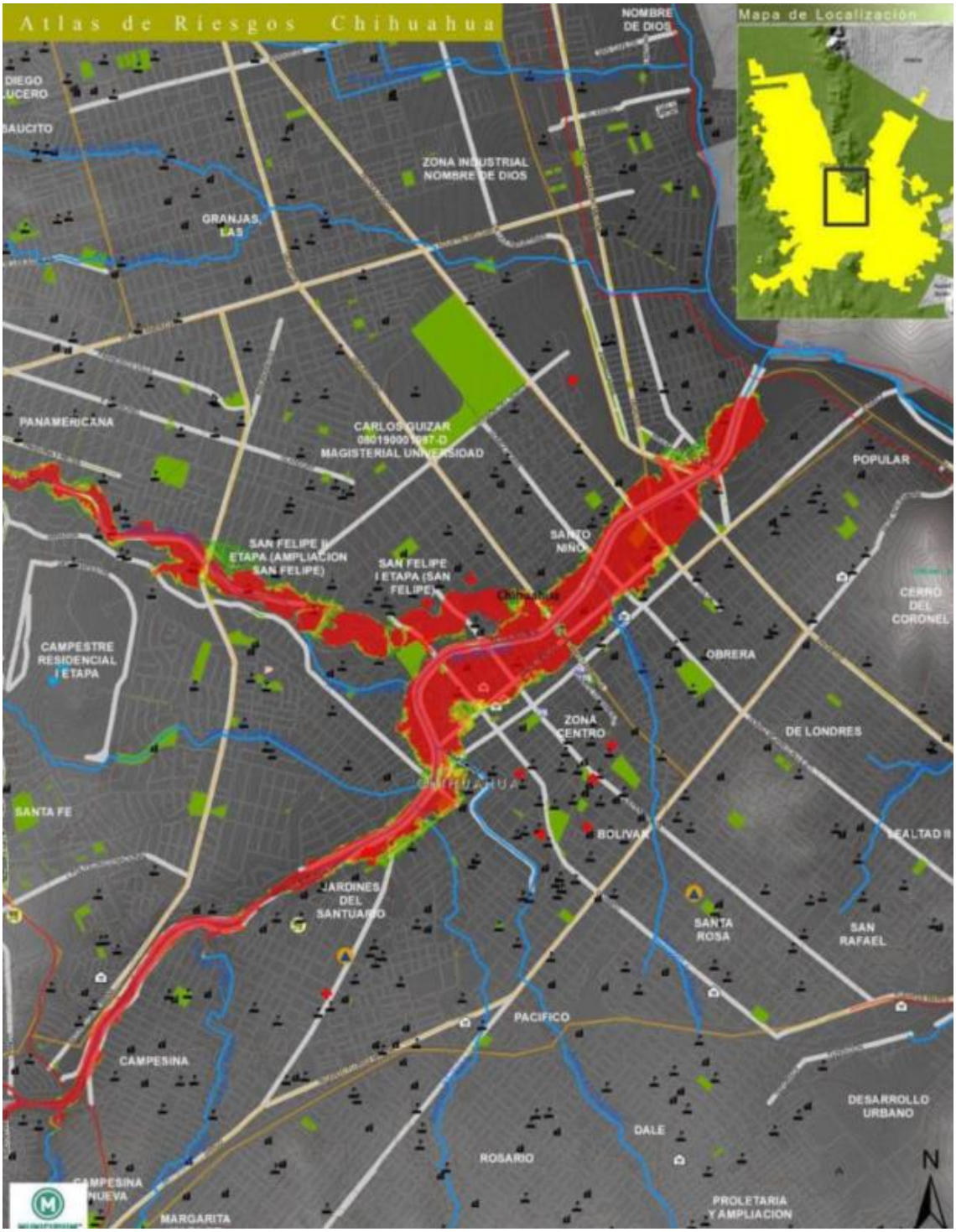


Figura 68. Zonas de inundación de Río Chuvíscar y arroyo la Cantera-2. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2014) [6].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua | Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820 | **https://implanchihuahua.org/**

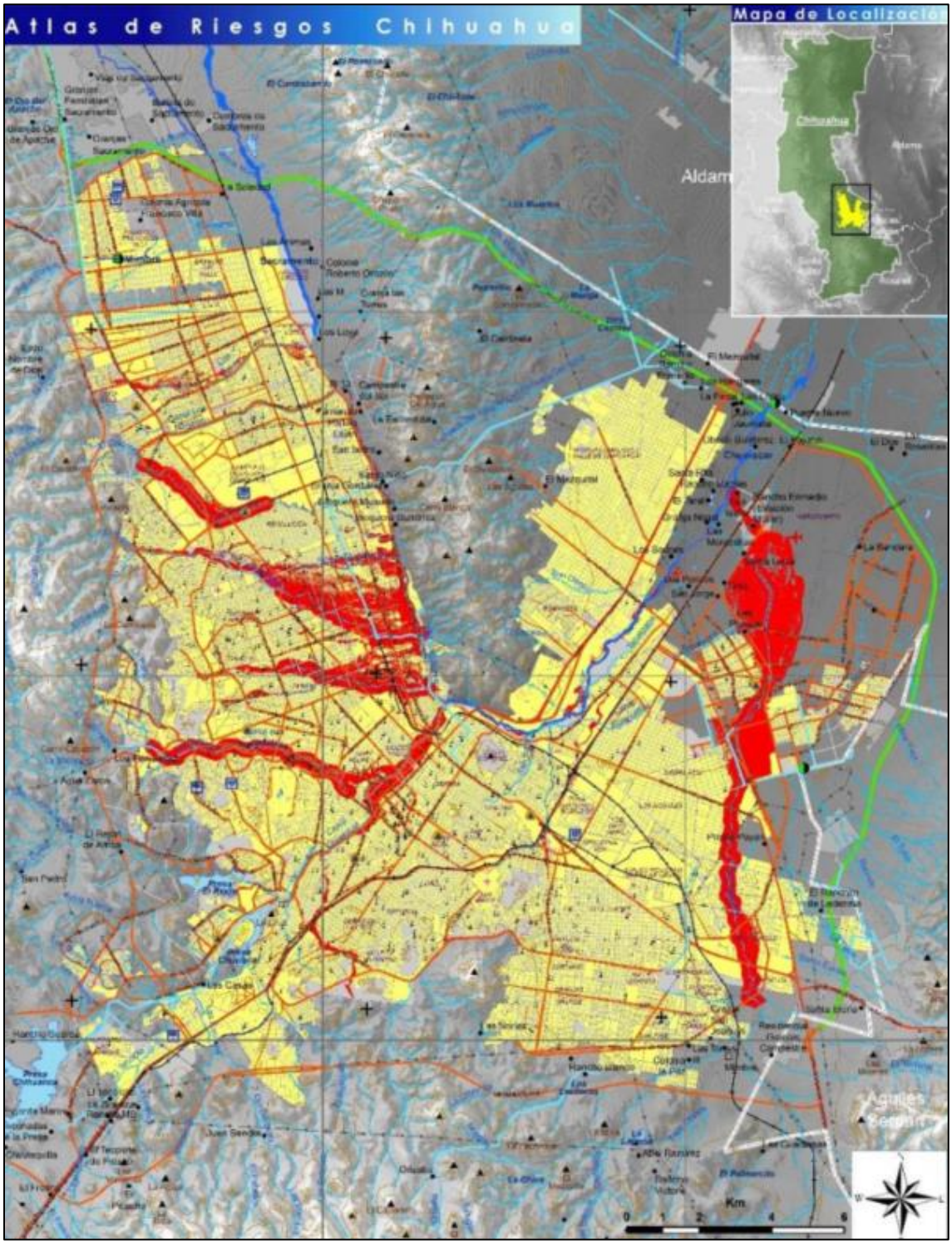


Figura 69. Zonas de inundación. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35]

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

En la actualización de Atlas de riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35], se hace referencia a las zonas de inundación mencionadas en el anterior Atlas del año 2014, enlistando las más críticas del 1 al 5 en la Figura 70. Asimismo, se mencionan como zonas inundaciones severas las siguientes:

1. Arroyo El Picacho: colonias Villas del Sol Universidad, Deportistas y Revolución
2. Arroyo El Mimbre Sur, El Saucito, Galera Norte y Sur
3. Arroyo La Cantera, Malvinas, Av. Universidad, Av. Tecnológico y Zona Centro
4. Arroyo Nogales Sur y su influencia al sur de la ciudad en asentamientos como Laderas Cerro Grande y colonia Villa Juárez
5. Arroyos Nogales Sur y su influencia en el Parque Industrial Ávalos y en el Aeropuerto, zona Industrial y Zona Sur-Oriente de la ciudad

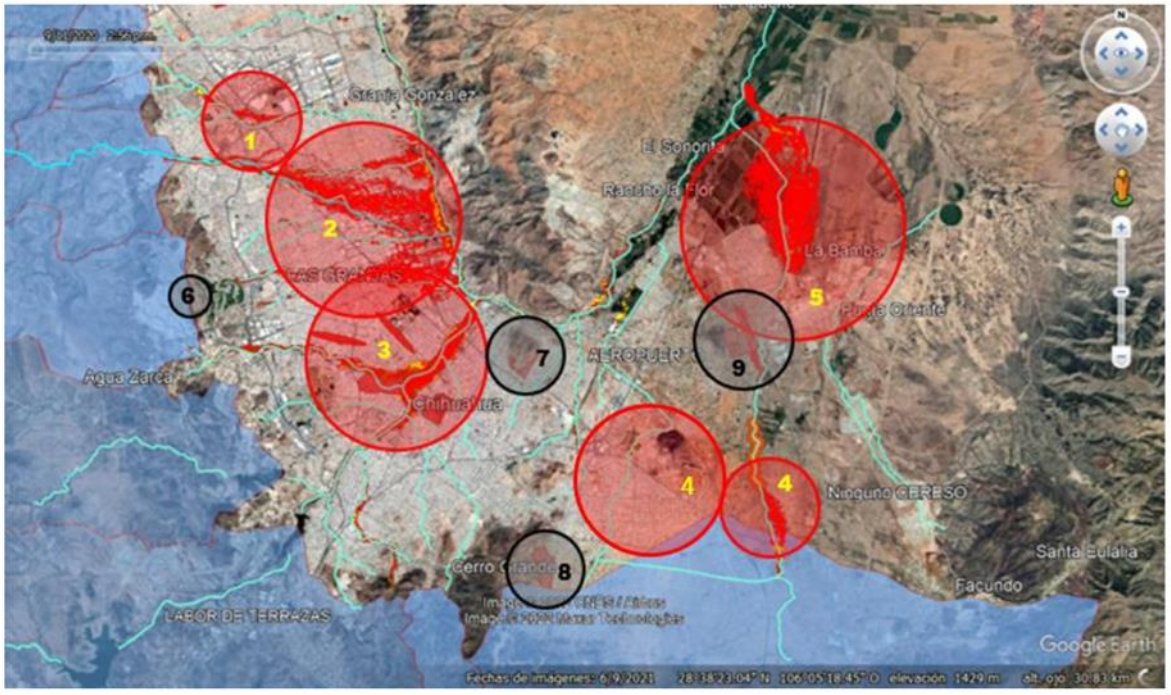


Figura 70. Zonas de riesgo ante inundaciones a partir de indicadores de vulnerabilidad. Fuente: Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Además, se identificaron como zonas de inundación aquellas representadas en la Figura 71, las cuales fueron determinadas con base en el Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua y en la cartografía desarrollada para el Visor de Cuadrantes del Mapa Base del Centro de Población. Las Figuras 72 a 79 detallan estas zonas críticas de inundación.

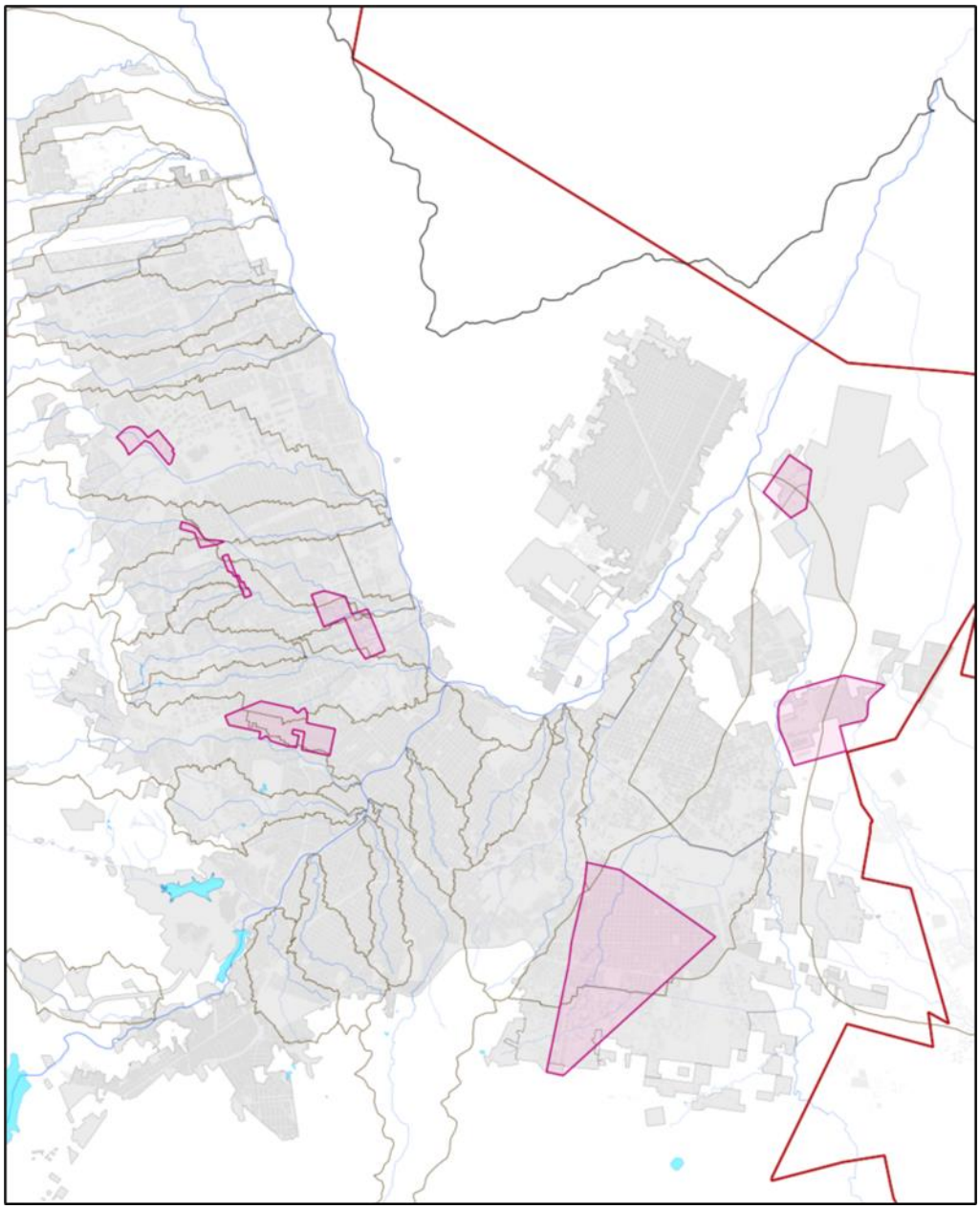


Figura 71. Localización en la ciudad de Chihuahua de sectores de riesgo. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

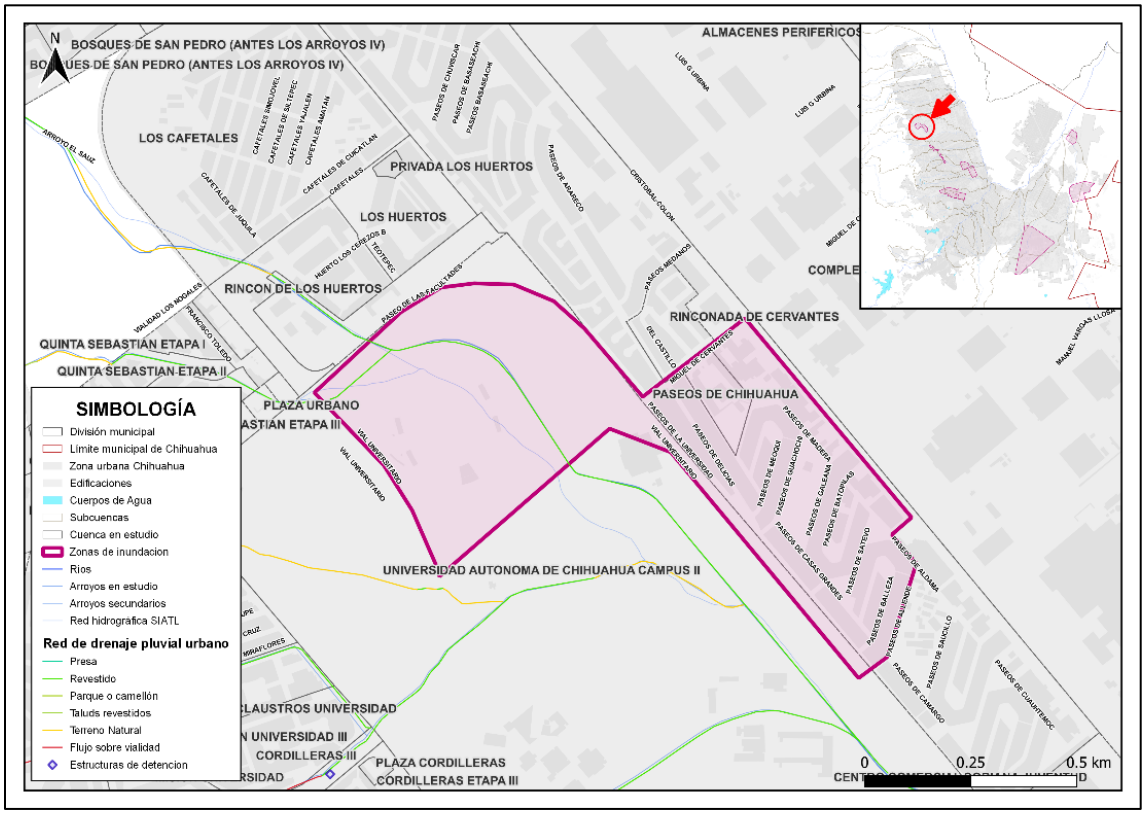


Figura 72. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

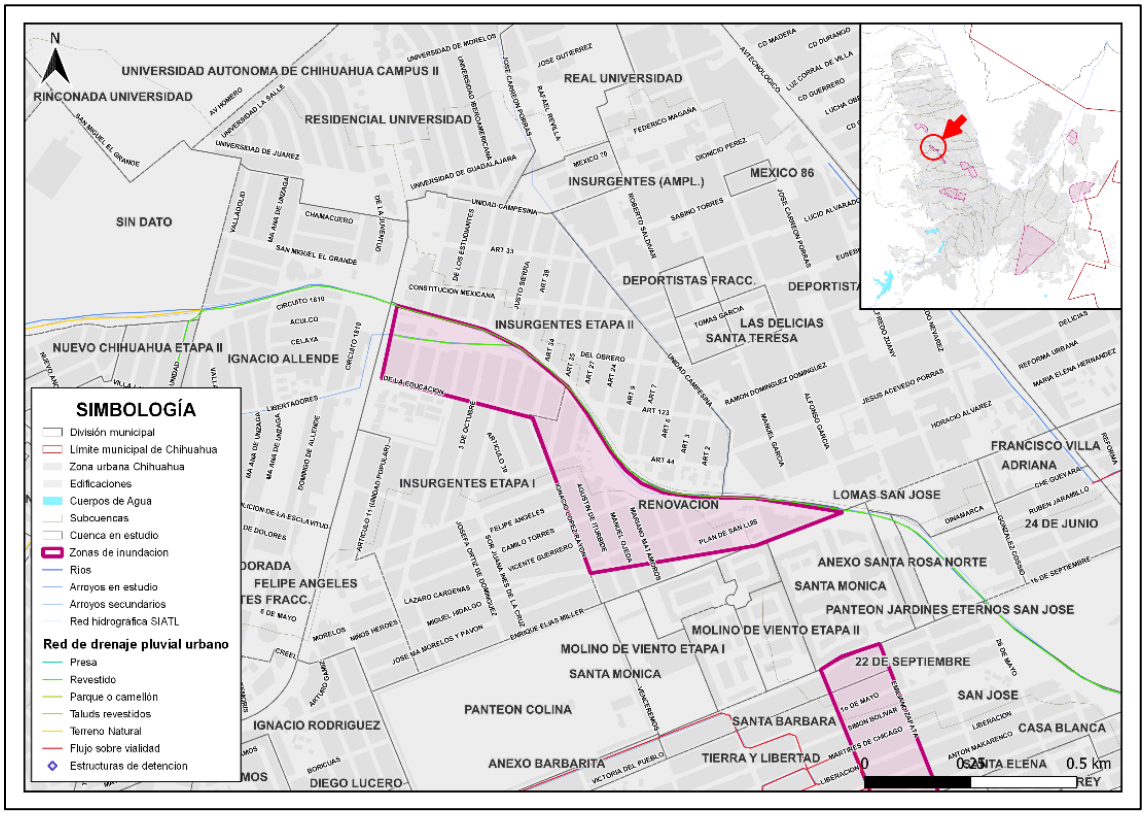


Figura 73. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

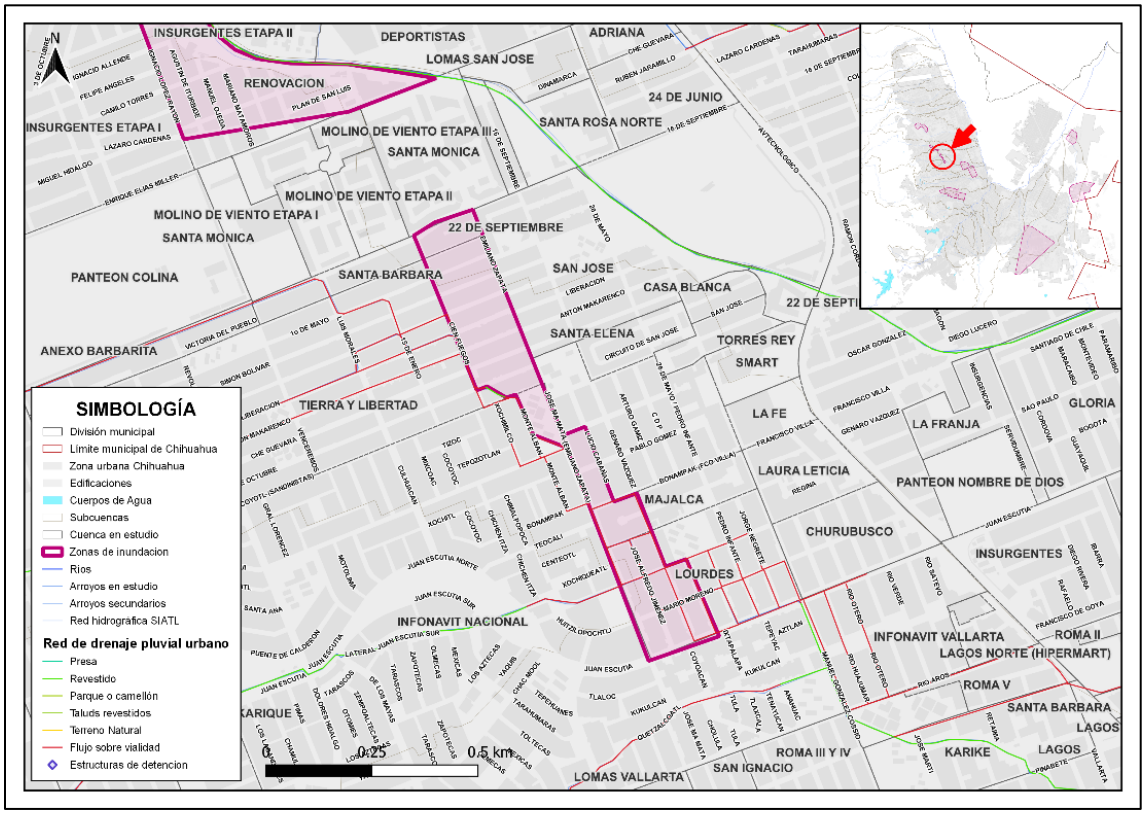


Figura 74. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.2. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

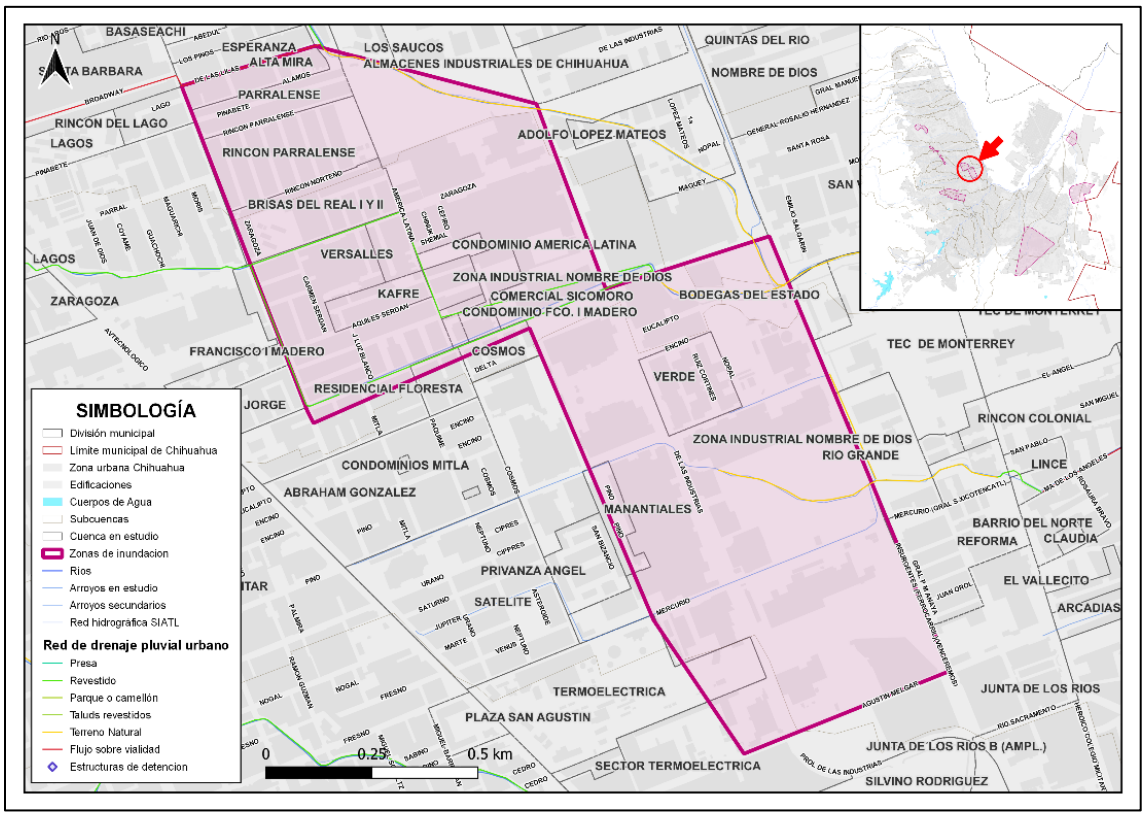


Figura 75. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 2.3. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

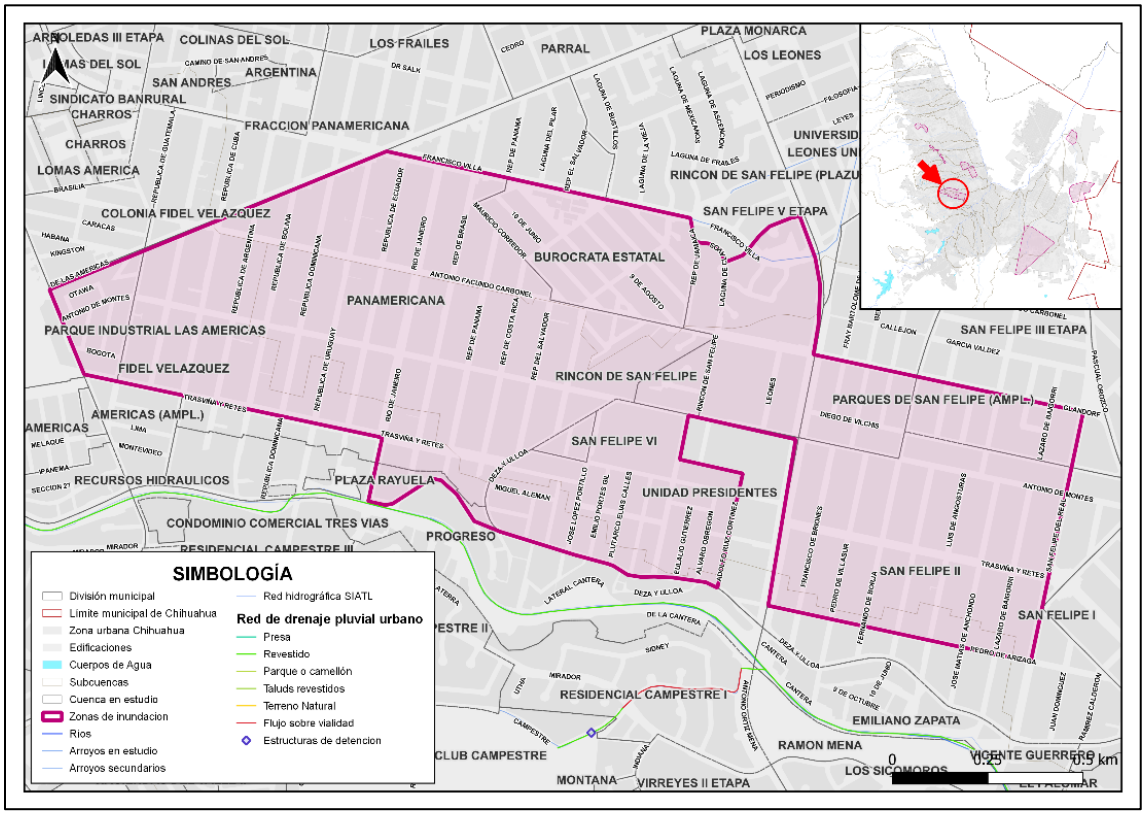


Figura 76. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 3. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

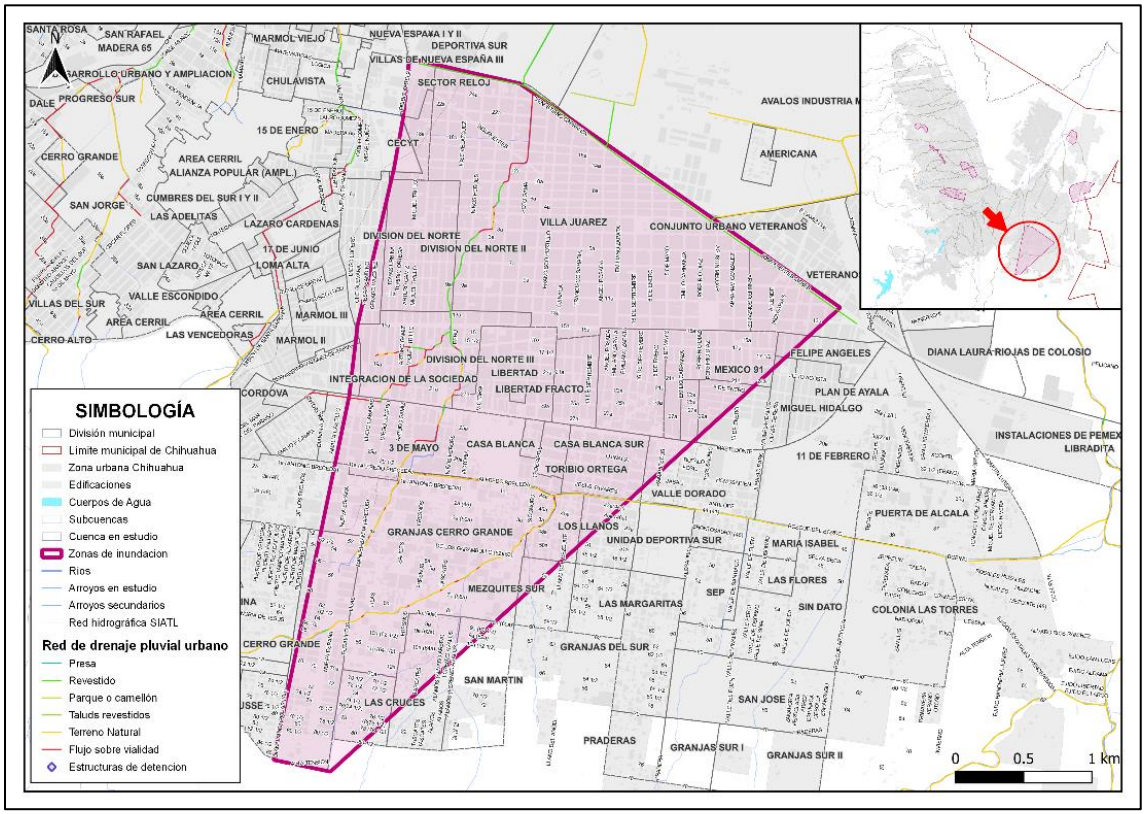


Figura 77. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 4. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua

Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820

https://implanchihuahua.org/

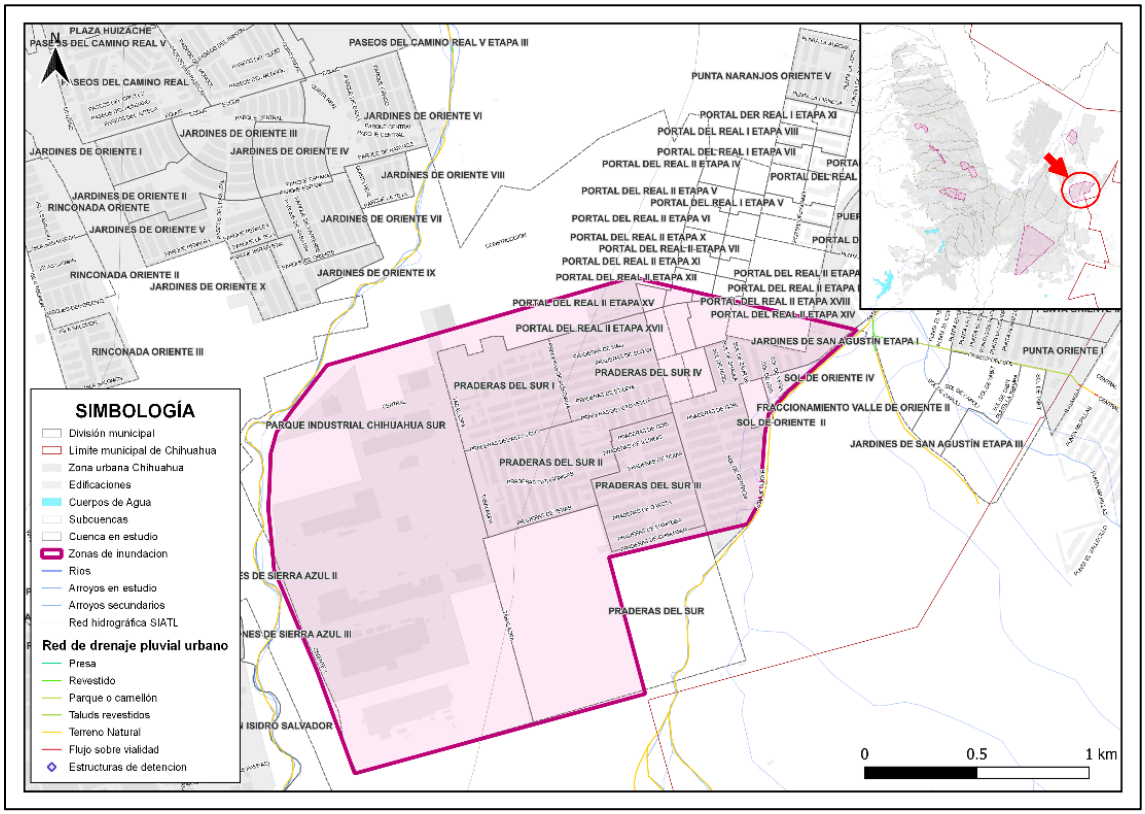


Figura 78. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 5.1. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

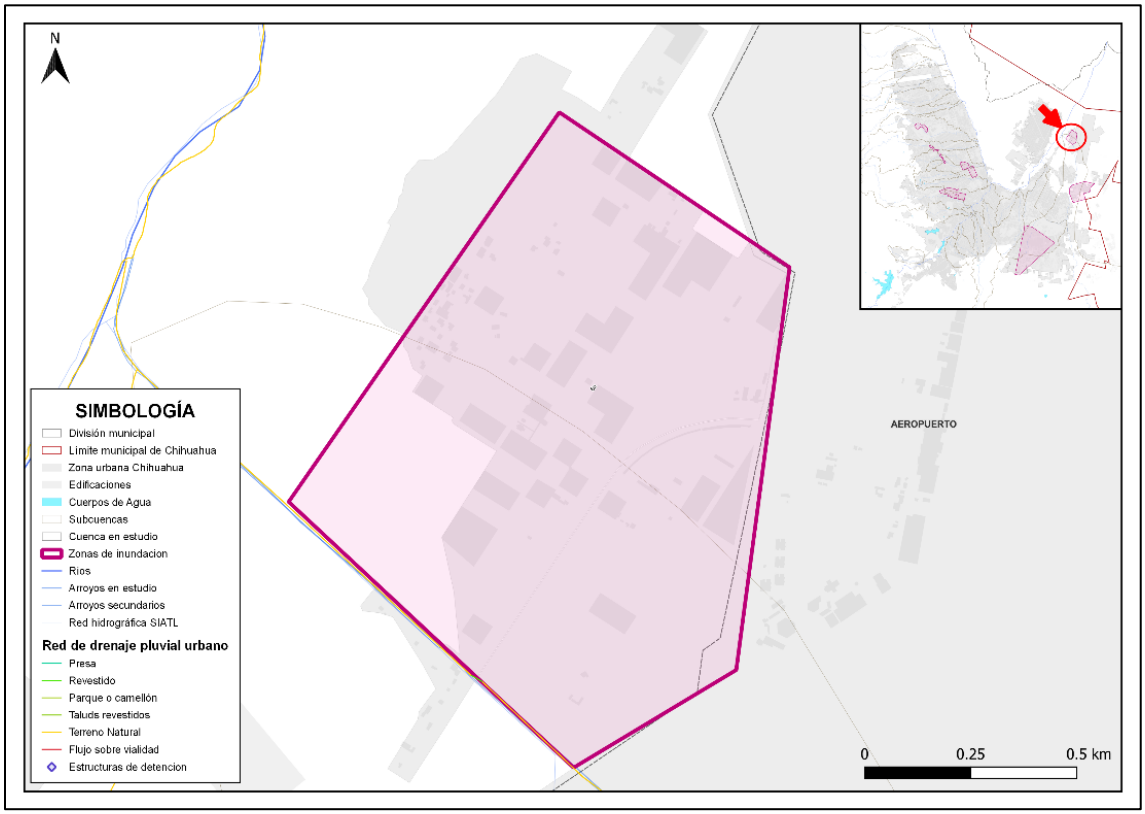


Figura 79. Zonas de inundación de atlas de riesgos del municipio de Chihuahua 2022, Sector 5.2. Fuente: recreación con datos del Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua (2022) [35].

En el año 2018 se realizó un estudio [30] sobre generación de mapas de riesgo ante inundaciones en zonas urbanas, el cual tomó como caso de estudio algunas cuencas parciales al norte de la ciudad de Chihuahua, las cuales se incluyen como subcuencas del presente estudio. En dicho estudio se identificaron profundidades de inundación con base en una simulación hidrológica y una simulación hidráulica cuasi-bidimensional a superficie libre.

De la Figura 80 a la Figura 88 se muestran las profundidades de inundación determinadas en dicho estudio. Cabe destacar que se mencionan como principales puntos o zonas críticas de inundación los escurrimientos del arroyo Saucito y sus afluentes, siendo el que presenta más partes con escurrimientos en vialidad con profundidad superior a 0.15 m (altura promedio de una guarnición), también se destacan los escurrimientos sobre vialidad en la zona de Riberas de Sacramento, los del arroyo Los Arcos, del arroyo María de los Ángeles, Galera Sur, Galera Norte, el arroyo Plaza de Toros, especialmente dentro de los fraccionamientos Encordada Santa Fe, Hacienda Santa Fe; y sobre la Av. 26ª.

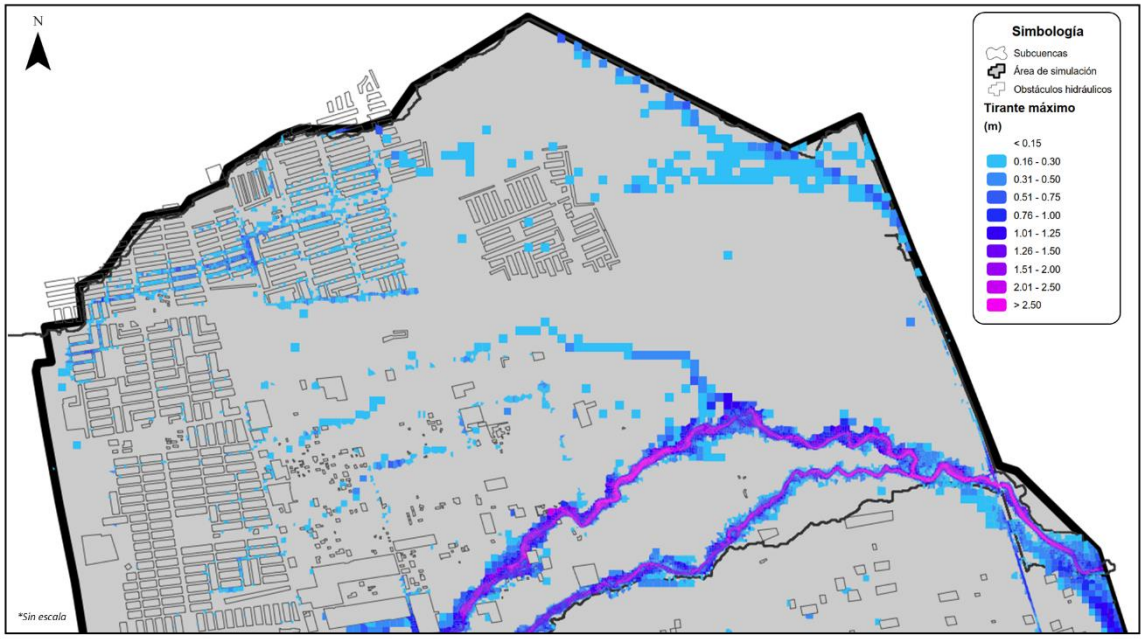


Figura 80. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 1/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].



Figura 81. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 2/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

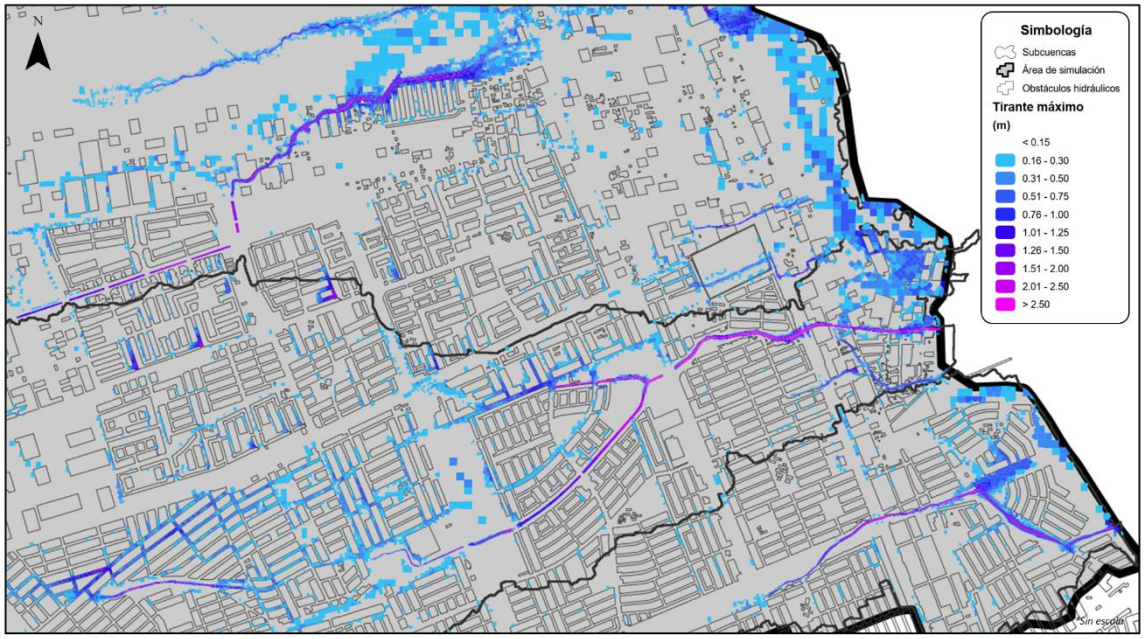


Figura 82. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 3/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

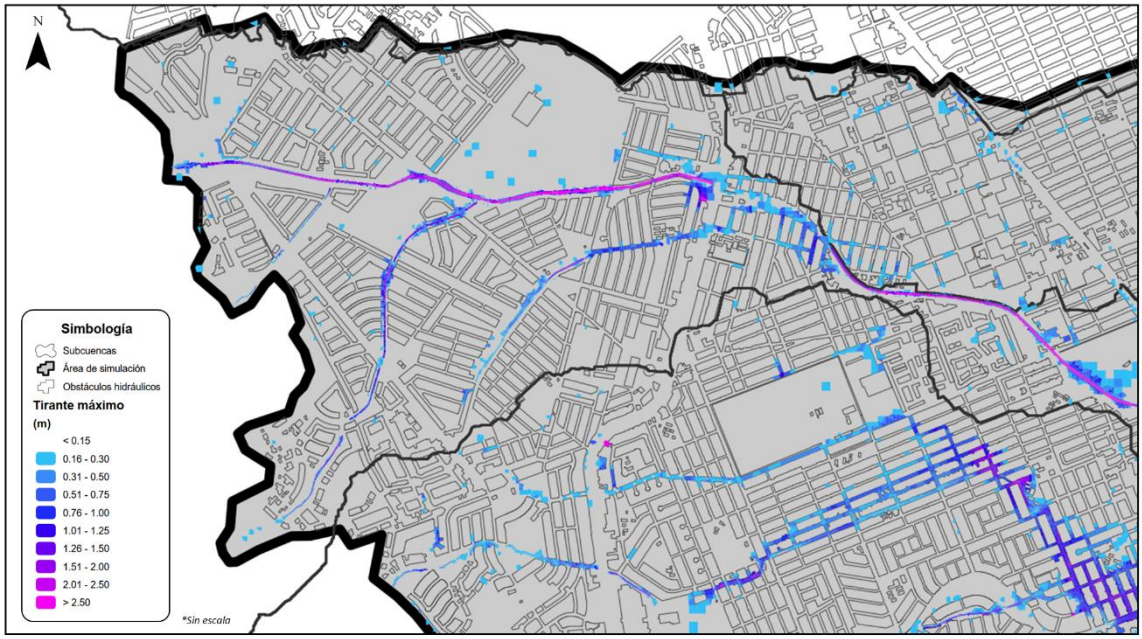


Figura 83. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 4/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

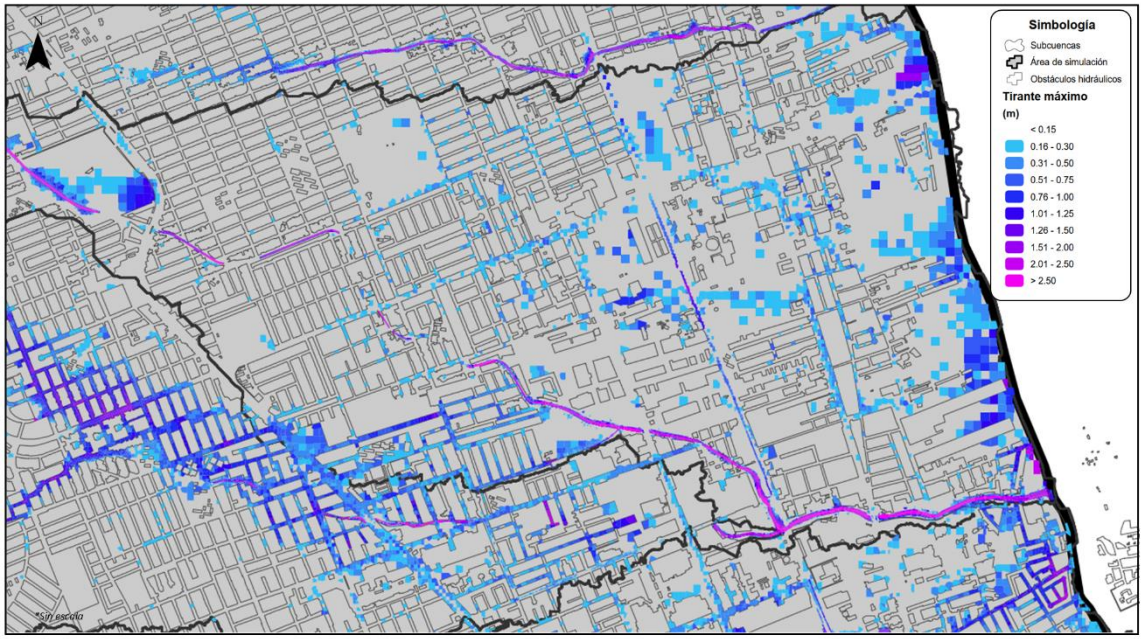


Figura 84. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 5/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

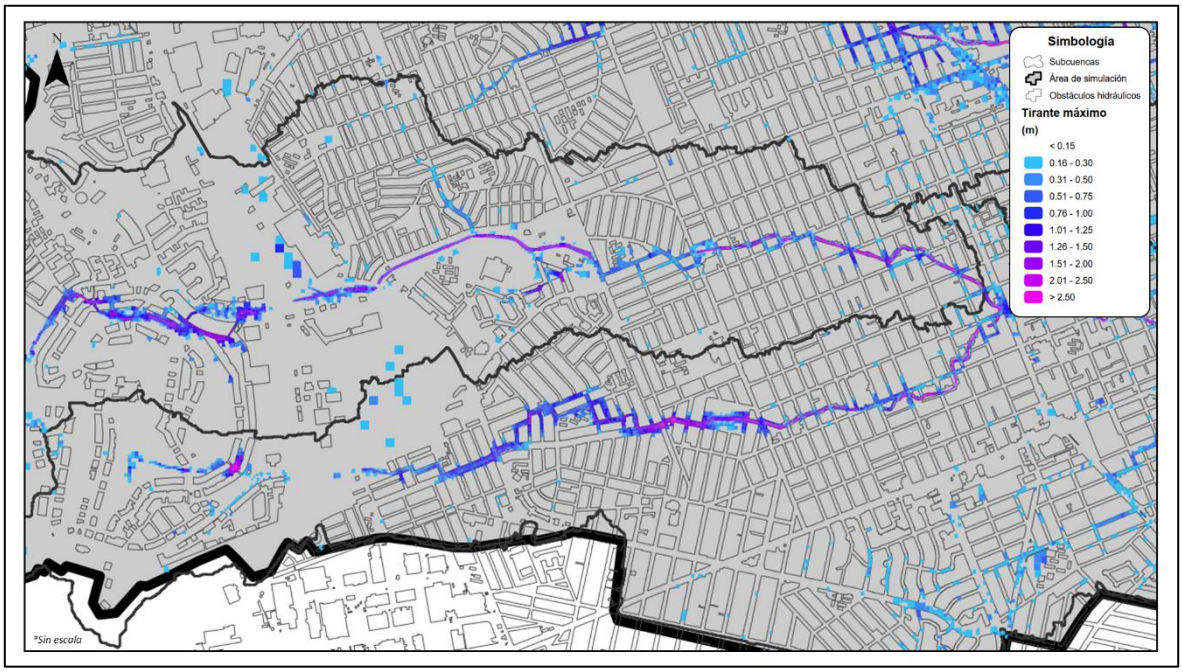


Figura 85. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 6/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

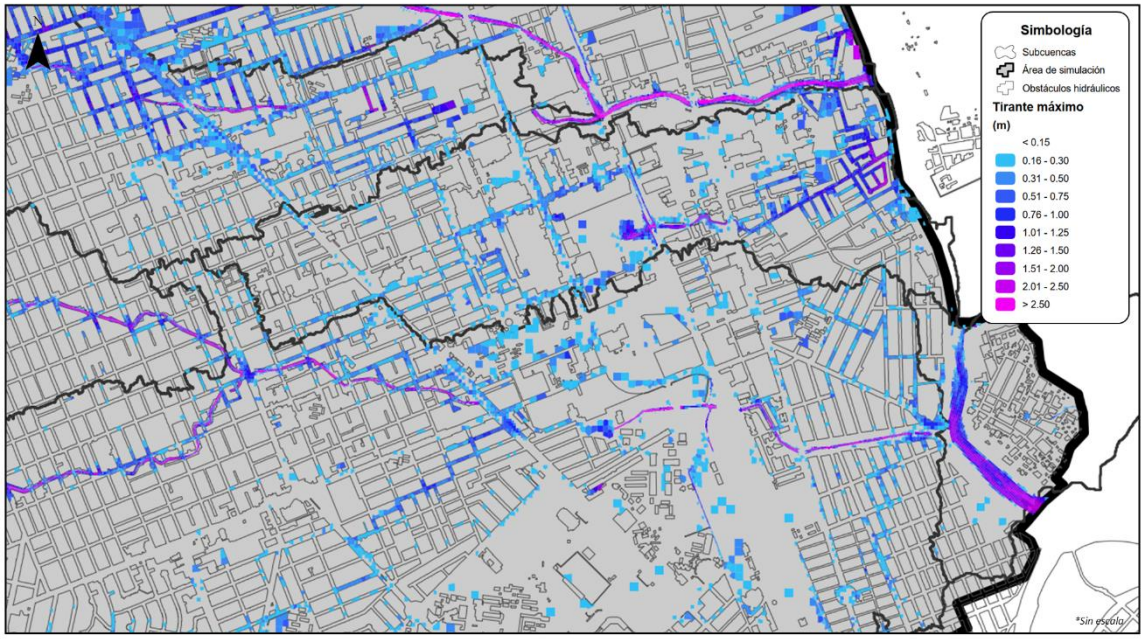


Figura 86. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 7/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

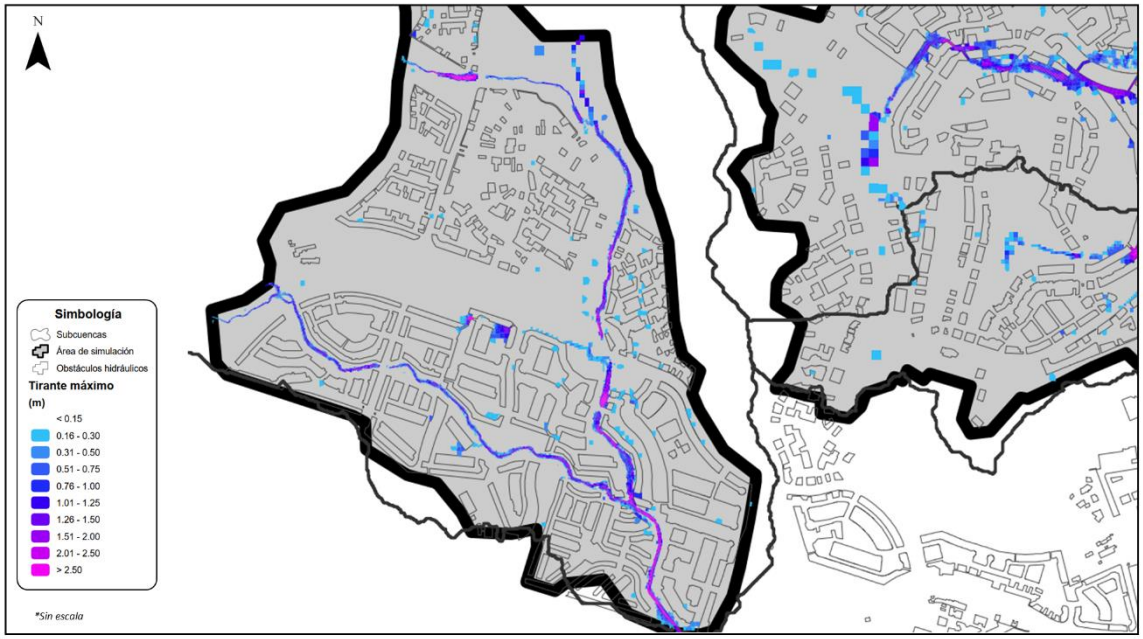


Figura 87. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 8/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

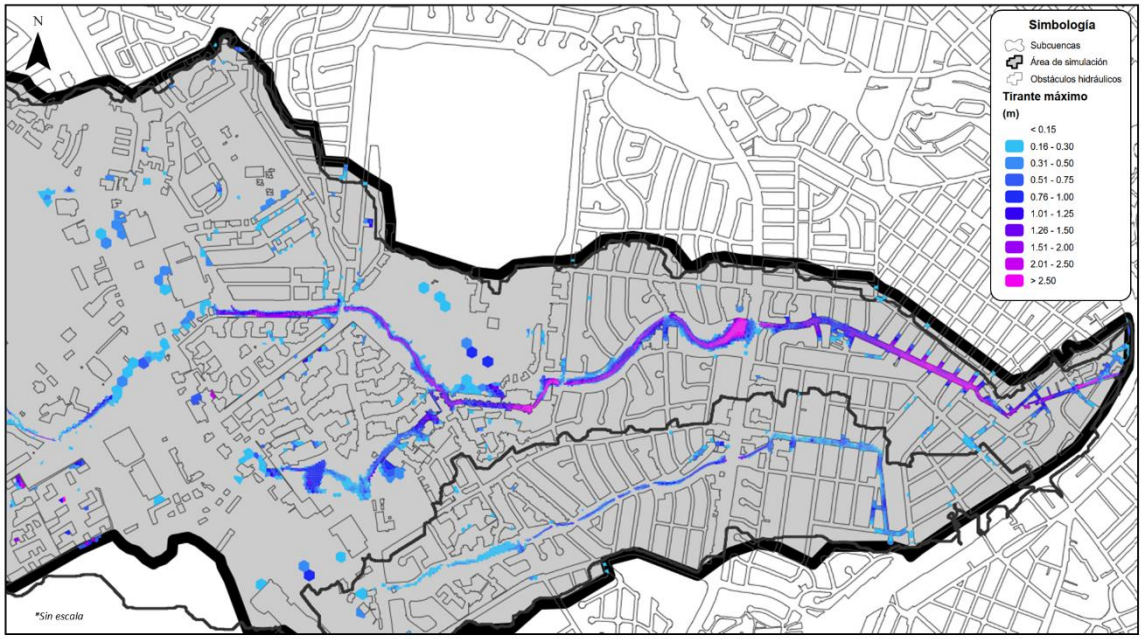


Figura 88. Profundidad de inundación en la ciudad de Chihuahua a un Tr de 500 años 9/9. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

En la Figura 89 se muestra el Índice Pérdida-Posesión Anual Esperado, promedio por vivienda afectada por cuenca por sector.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

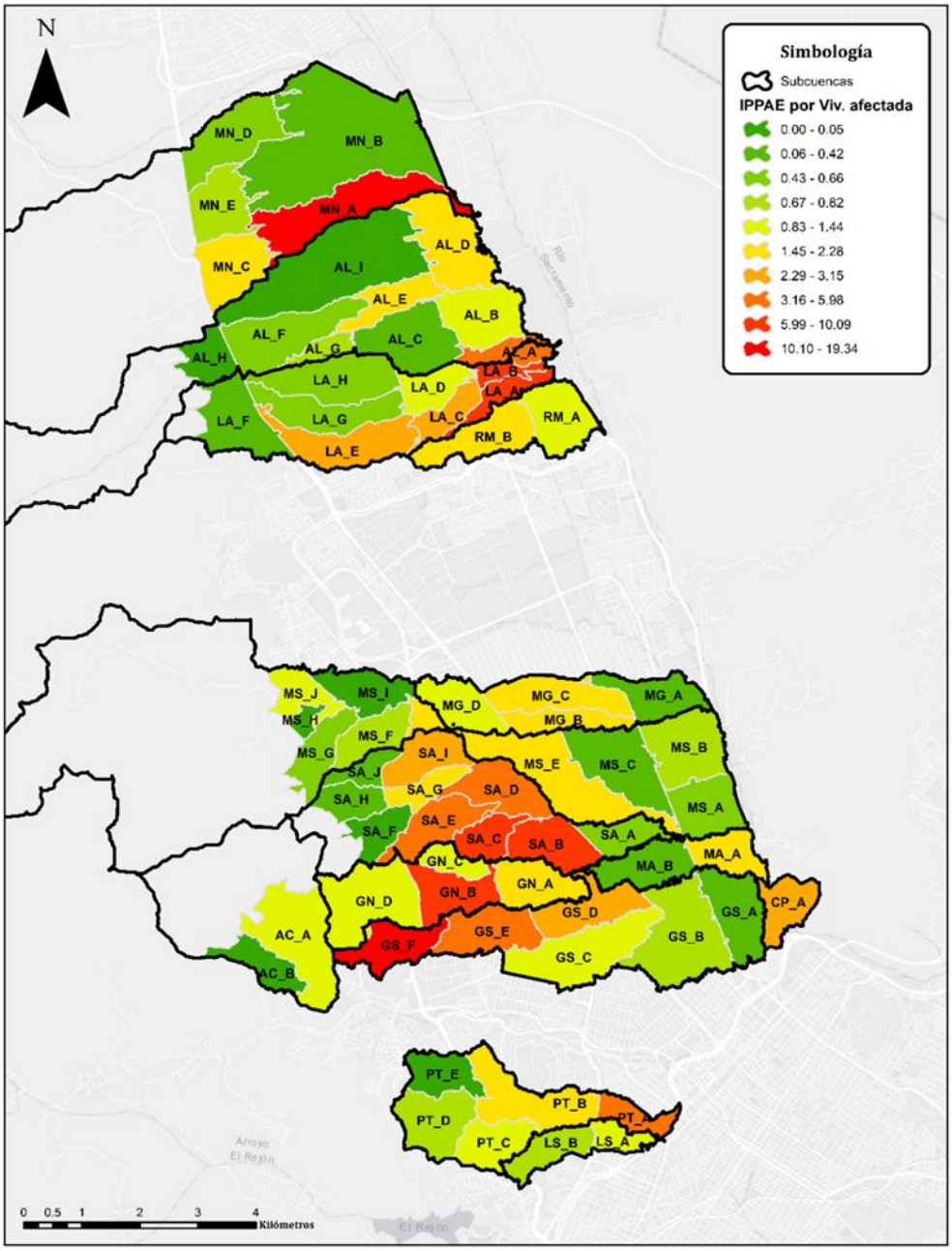


Figura 89. Índice Pérdida-Posesión Anual Esperado, promedio por vivienda afectada por cuenca sector. Fuente: Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas (2018) [30].

Según Hernández-Samaniego (2018), algunas de las zonas más afectadas por inundaciones, identificadas a través del cálculo del índice que considera la profundidad y velocidad de inundación, así como aspectos socioeconómicos de los propietarios de viviendas afectadas, incluyen áreas influenciadas por el arroyo Saucito y sus afluentes, los arroyos Galera Sur y Galera Norte, el arroyo Los Arcos y la parte baja del arroyo Plaza de Toros. Es importante destacar que las afectaciones causadas por el arroyo Saucito son mencionadas como una de las áreas más afectadas por inundaciones en la ciudad, tanto en el Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua de los años 2014 y 2022, como en el estudio Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas, lo que sugiere que esta zona podría considerarse la más crítica y prioritaria para intervenciones de mitigación.

Además, se identificaron dos áreas de la ciudad donde no se identificaron los principales flujos de agua. En primer lugar, en la zona de las colonias San Felipe I y II, San Felipe Viejo, Santo Niño y colonias cercanas (Figura 90). Sin embargo, dado el tamaño de las cuencas analizadas en este estudio, es probable que exista un flujo significativo que antes era un arroyo y que actualmente fluye por las vialidades. Esto se evidencia en Figura 58, donde se muestra un flujo en esa zona antes de su urbanización.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

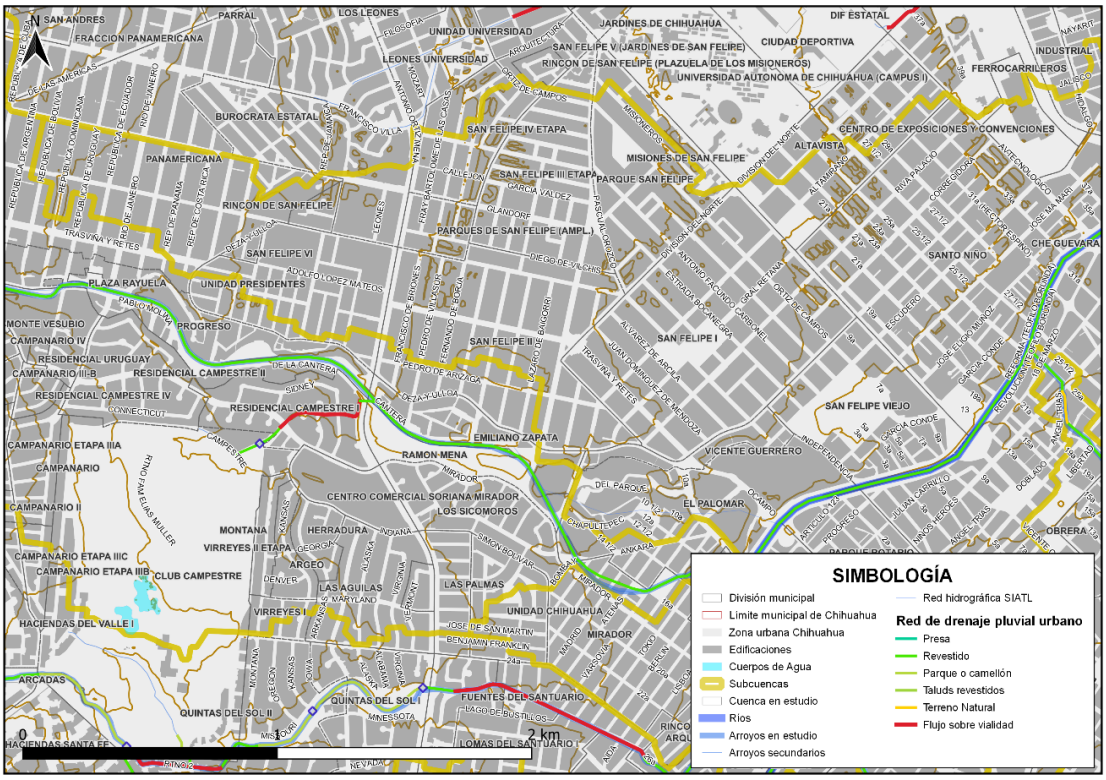


Figura 90. Arroyo en colonias San Felipe I y II, San Felipe Viejo y Santo Niño. Fuente: elaboración propia.

En el caso de las colonias San Martín, Inalámbrica, Francisco I. Madero, Zarco, Guadalupe, Residencial Zarco y Jardines del Santuario (ver Figura 91), se presenta una situación similar con respecto al escurrimiento. En la Figura 58 se muestra su presencia antes de la urbanización de la zona.

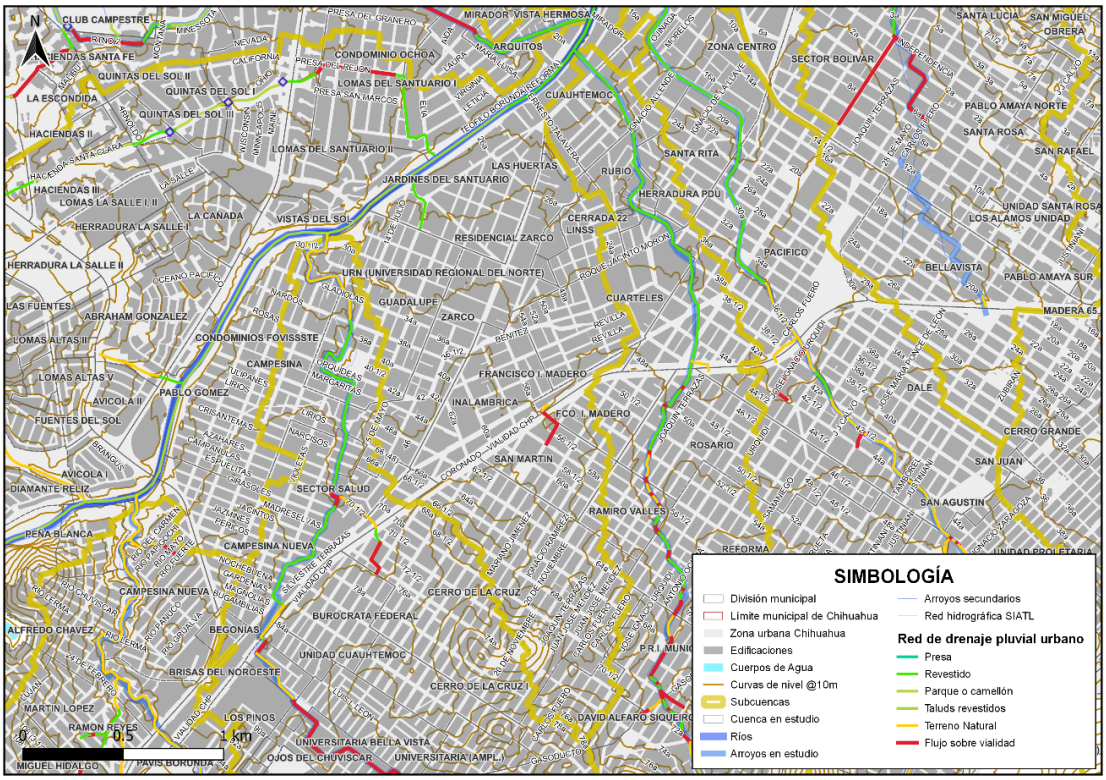


Figura 91. Arroyo en colonias San Martín, Inalámbrica, Francisco I. Madero, Zarco, Guadalupe, Residencial Zarco y Jardines del Santuario. Fuente: elaboración propia.

5. Conclusiones

Con base en el presente estudio, se han generado las siguientes conclusiones respecto a la hidrografía, hidrología y manejo del agua de lluvia en el municipio de Chihuahua, detalladamente en la ciudad de Chihuahua, que es la capital municipal y estatal, así como el centro urbano del municipio.

Respecto al análisis de gastos máximos y funcionamiento hidráulico de arroyos y canales se concluye lo siguiente:

Existen 2 ríos y 26 arroyos de importancia con los que la ciudad de Chihuahua tiene interacción, sobre los cuales se analizaron hidráulicamente puntos determinando peligro por desbordamiento del cauce o canal y por contar con velocidad alta, superior a la máxima permisible (Figura 24, Figura 25, Tabla 7, Tabla 8)

De dichos puntos analizados, se destacaron los puntos de análisis 13-arroyo Saucito, el cual no pudo ser analizado; y el punto 14 en el mismo arroyo, el cual presenta desbordamiento y velocidades superiores a las máximas permisibles desde el periodo de retorno de 2 años.

Asimismo, los puntos de análisis 35-Arroyo Concordia 1, el cual presenta desbordamientos desde el periodo de retorno de 2 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 5 años, por su parte el punto 11-Arroyo Mimbre Sur presenta desbordamiento desde el periodo de retorno de 5 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 2 años; y por último, el punto de análisis 31-Arroyo San Rafael presenta desbordamientos desde el periodo de retorno de 20 años y velocidad superior a la máxima permisible desde el periodo de retorno de 2 años (Figura 24, Figura 25, Tabla 7, Tabla 8).

En cuanto al análisis de los drenajes pluviales existente, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

Se identificaron los principales escurrimientos, incluyendo 2 ríos y 26 arroyos, así como los escurrimientos secundarios, clasificados en 6 categorías según su tipo de revestimiento o superficie: presa, revestido, parque o camellón; taludes revestidos, terreno o sección naturales; y flujo sobre vialidades. En total, se encontraron 514.3 km de escurrimientos, de los cuales 62.33 km (12.12%) discurren sobre vialidades en al menos 310 ubicaciones o cruces, representando un peligro de inundaciones directas (ver Tabla 9, Figura 28 a Figura 53).

Asimismo, 323.92 km (62.98%) fluyen en sección natural sin revestimiento, por lo que, si bien algunos de los escurrimientos de mayor importancia se encuentran canalizados, algunos

escurrimientos principales y la mayoría de los secundarios aun fluyen en sección natural o por vialidades.

Por otro lado, y de manera generalizada, se identificó la problemática de la variación en tipos de revestimiento a lo largo de muchos cauces. Teniendo algunos de ellos, como ejemplo, cambios de flujo sobre vialidad, después a revestidos, posteriormente terreno natural y siguiendo a vialidad. Lo que genera escenarios de peligro focalizados sobre las vialidades.

Por último, se reconoce que existen 4 obras de regulación principales en la ciudad de Chihuahua, las 4 presas: San Marcos al norponiente de la ciudad fuera de la mancha urbana, Chihuahua al poniente de la ciudad fuera de la mancha urbana, Chuvíscar y El Rejón al poniente de la ciudad dentro de la mancha urbana (ver Figura 29). Asimismo, se identificaron por lo menos 45 obras de regulación hidráulica (obras de detención) sobre algún escurrimiento principal o secundario (ver Figura 28).

Respecto a las alteraciones hidrológicas en ríos y arroyos se concluye lo siguiente:

El aumento de afectaciones por inundaciones en Chihuahua, como en muchas partes, se debe a causas multifactoriales dentro de las cuales se pueden clasificar en dos grandes rubros: cambio climático y falta de planeación urbana.

El cambio de uso de suelo generado por la urbanización, en el que se cambia una superficie natural no urbanizada (permeable) a una superficie urbanizada (impermeable), genera un cambio en el régimen hidrológico de una cuenca, aumentando el coeficiente de escurrimiento; por ende, aumentando el volumen de escurrimiento y el caudal máximo de escurrimiento y el tiempo en que este se presenta.

La urbanización de las cuencas del Municipio de Chihuahua, particularmente aquellas ubicadas aguas arriba de la confluencia de los ríos Chuvíscar y Sacramento, ha ocurrido principalmente desde la década de 1960 en un sentido de aguas abajo hacia aguas arriba. Este desarrollo urbano ha llevado a que las antiguas obras de manejo de agua de lluvia hayan quedado subdimensionadas en comparación con su diseño original.

Entre las cuencas analizadas, destacan casos como las cuencas de los arroyos Magallanes, Saucito 2, San Rafael, Concordia 2, La Canoa y La Manteca, las cuales tienen toda su cuenca urbanizada. Asimismo, los arroyos Los Arcos, Galera Norte y Sur, y Plaza de Toros cuentan con más del 90% de su cuenca urbanizada, prácticamente en su totalidad. También son significativos los casos de los arroyos Saucito 1, Las Malvinas y El Barro, que tienen más del 85% de sus cuencas urbanizadas.

Lo anterior se ejemplificó con el caso del canal del arroyo La Cantera, el cual desde el año 1969 hasta el 2024 y proyectado al 2040, ha aumentado su porcentaje de área urbanizada de 0.655 km^2 (2.15%) a 11.083 km^2 (36.36%) y 15.77 km^2 (51.74%), a los años 2024 y 2040, respectivamente. Con dicho aumento de la superficie urbanizada aumento sus caudales máximos de escurrimiento de una

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

tormenta de periodo de retorno de 2 años de 13.48 m^3/s en el año 1969, a 33.66 m^3/s (150% más) en el 2024 y 45.62 m^3/s en el 2040 (238 % más), provocando que el periodo de retorno de diseño del canal baje de poder conducir adecuadamente la el caudal asociado a la tormenta de diseño de 500 años entre los años de 2000 y 2005, ha poder conducir el caudal asociado a la tormenta de 300 años en el año 2024 y de 200 años en el año 2040.

En cuanto a la urbanización de las cuencas de las presas, se destaca como la mayor problemática el subdimensionamiento que esto genera en las obras de excedencia, debido al aumento del caudal causado por el cambio en el régimen hidrológico, provocado por el incremento del coeficiente de escurrimiento debido al aumento de superficies impermeables.

Se identificó que la cuenca con mayor área urbanizada es la de la presa Chuvíscar. Sin embargo, dentro de esta misma cuenca se encuentra la presa Chihuahua, lo que sugiere que el aumento de caudal en el río Chuvíscar, que atraviesa ambas presas, podría no ser problemático, ya que sería regulado por la presa Chihuahua.

Por otro lado, la cuenca de la presa Rejón presenta los mayores problemas debido a su urbanización, especialmente por el desarrollo urbano en la zona poniente de la ciudad conocida como "El Reliz", así como por los planes de urbanización proyectados hasta el año 2040 (ver Figura 65).

En relación con las zonas críticas de inundación, se puede concluir lo siguiente:

Se consideraron como zonas críticas de inundación aquellas zonas en las que se identificaron escurrimientos principales o secundarios sobre vialidades (ver de la Figura 28 a Figura 53).

Se consideraron como zonas críticas aquellas áreas donde se identificaron escurrimientos principales o secundarios sobre vialidades (ver Figuras 28 a 53). Además, se tomaron en cuenta las zonas descritas en los Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua de los años 2014 y 2022, así como las identificadas en el estudio sobre inundaciones en la zona norte de la ciudad.

De las diversas fuentes utilizadas para identificar estas zonas críticas, todas coincidieron en que una de las zonas más vulnerables a inundaciones es la del arroyo Saucito. También se identificaron como áreas de riesgo los arroyos Galera Sur, Galera Norte, Los Arcos y la parte baja del Arroyo Plaza de Toros.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

6. Recomendaciones

Las acciones recomendadas a realizar se dividieron en acciones de tipo estructural (obras civiles) y no estructural (acciones de mantenimiento o generación de estudios), identificando aquellas de tipo preventivo, correctivo y reactivo.

6.1. Acciones Estructurales

Se agruparon las acciones estructurales recomendadas en dos categorías principales: canalizaciones de arroyos que transcurren sobre vialidades o en su configuración natural, y obras de regulación (detención) que podrían construirse, rediseñarse o requerir mantenimiento. Estas medidas tienen como objetivo reducir el caudal máximo de escurrimiento de los arroyos sobre los que se encuentren. En relación con las canalizaciones propuestas, se sugiere realizar un análisis detallado de aquellos arroyos que atraviesan una mayor longitud sobre vialidades y/o en su configuración natural a lo largo de la zona urbana.

En relación con las obras de regulación pluvial (detención), se identificaron 46 posibles obras de este tipo que podrían ser construidas, rehabilitadas o rediseñadas, como se muestra en la Figura 92. Se destaca la presencia de obras existentes sobre el arroyo Plaza de Toros, de las cuales 3 de las 4 existentes podrían ser rehabilitadas, 1 rediseñada y se podrían construir 2 adicionales. Esto posiblemente resultaría en una significativa reducción del escurrimiento en la parte baja de dicha cuenca, especialmente en la calle 26ª.

Además, se incluyen como posibles acciones estructurales para el manejo del agua de lluvia aquellas mencionadas en el Atlas de Riesgos Municipales del año 2022, detalladas en la Tabla 13. Es importante mencionar que la ubicación de estas obras de regulación se propuso con base en la hidrografía de la zona, así como en una evaluación de las imágenes satelitales. Por lo tanto, se recomienda realizar anteproyectos de las ubicaciones propuestas para identificar las características topográficas y urbanas de los puntos seleccionados antes de su análisis.

Es fundamental aclarar que, de acuerdo con el Atlas de Riesgos Municipales de Chihuahua del año 2022, todas las acciones estructurales propuestas deben contar obligatoriamente, antes de su construcción, con un estudio hidrológico e hidráulico específico para su diseño hidráulico-geométrico. Estas acciones deben enfocarse en lograr una mitigación preventiva de afectaciones por inundaciones y deben basarse en un análisis y diagnóstico que justifique cada proyecto ejecutivo en su caso particular [(35)].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

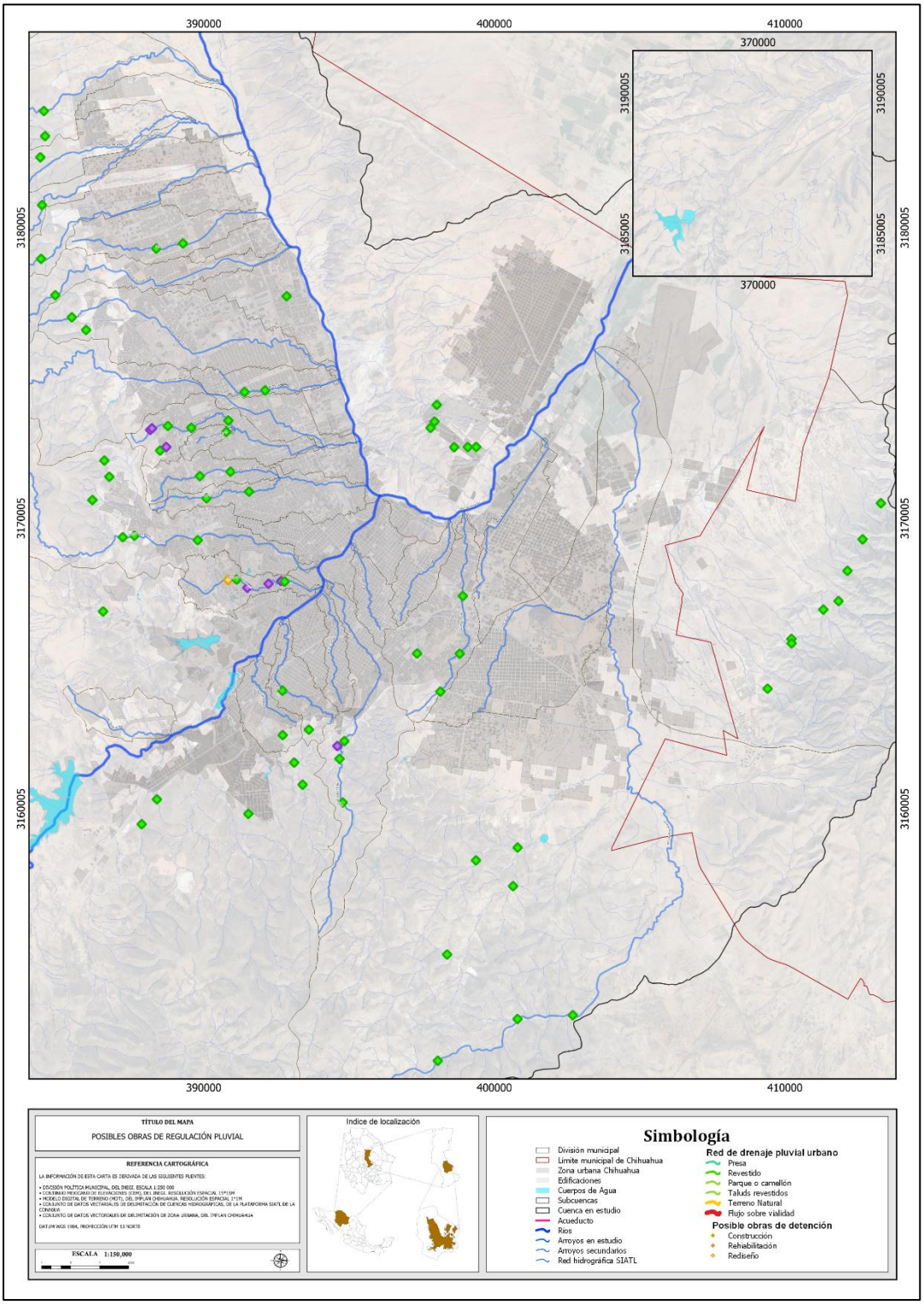


Figura 92. Ubicación de las propuestas de obras de regulación pluvial en el municipio de Chihuahua: Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Acciones estructurales de manejo de agua de lluvia propuestas en el Atlas de Riesgo Municipal de Chihuahua (2022). Fuente: Atlas de Riesgos (2022) [35].

N°	Unidad Hidrográfica	Superficie de Cuenca/Km²	Arroyos con Mayor Fragilidad	Recomendaciones para Generar Obras de Mitigación
1	UH-12	31.80	Nogales Norte	Se requieren intervenciones desde la cuenca alta, a través de obras con gaviones para ralentizar los caudales y propiciar la recarga natural. En las zonas urbanas, precisar los tramos de arroyos para revisar la variación de secciones, taludes y obras de reposición para reforzamiento de márgenes. El primer arroyo descarga al Río Sacramento y los otros dos al Río Chuvíscar. Las principales razones por las cuales se propician inundaciones, es porque las
2	UH-5	147.23	San Pedro	
3	UH-6	21.42	La Cantera	secciones de los arroyos son insuficientes, y es por ello que deben ser analizados de manera específica.
4	UH-9	15.57	El Mimbre Sur	Este es uno de los arroyos de mayor longitud, desde la cuenca alta hasta su descarga al Río Sacramento, con una longitud promedio de 18 Km, de los cuales ocho Km discurren por la zona urbana. Además de aplicar la recomendación anterior, se requiere atender las afectaciones recurrentes de cada año, ocurridas en las colonias Felipe Ángeles, Tierra y Libertad, Unidades de Infonavit, entre otras, además de analizar y proponer soluciones para los tirantes hidráulicos que se presentan de manera grave en las calles José Ma. Mata; Juan Escutia; Manuel González Cossío. La otra zona que se generan complicaciones es en la Zona Industrial, previo a su descarga al Sacramento.
5	UH-2	201.96	Nogales Sur y Concordia	La superficie de cuenca de este arroyo se desprende de la ladera sur oriente del Cerro Grande, y se desplaza con dirección hacia el Río Chuvíscar, pasando a menos de 500 m al poniente del Aeropuerto, sin embargo es un arroyo que presenta desbordamientos de manera recurrente en cada temporada de lluvias. Algunas de las colonias que impacta son: Villa Juárez, Los Nogales, Punta Oriente y el Aeropuerto, estos dos últimos sitios impactados gravemente en la temporada de lluvias 2013. Es necesario realizar un análisis de dicha ladera de esta subcuenca hidrográfica, para determinar las estrategias para implementar los controles hidrológicos más apropiados como podrían ser terraceos y gaviones, entre otras.

Además, es necesario tener en cuenta que, durante el desarrollo de los proyectos ejecutivos y la construcción de las acciones estructurales, se deben implementar medidas preventivas y no estructurales de manera previa.

Es importante destacar que, para la priorización de las acciones a llevar a cabo, se recomienda considerar los niveles de manejo de agua pluvial urbana. Antes de proponer estructuras de regulación o infiltración, puede ser apropiado canalizar los escurrimientos que fluyen en terreno natural o sobre vialidades, con el objetivo de alcanzar el nivel 2 de manejo de agua pluvial urbana antes de realizar obras relacionadas con el nivel 4.

6.2. Acciones No Estructurales

Dentro de las acciones no estructurales se identificaron las de programas de mantenimiento, generación de zonas de desarrollo controlado, generación de estudios y la propuesta de Ley de Responsabilidad de Impacto Hidrológico.

Programas de mantenimiento

Se recomienda mantener y fortalecer el programa de inspección, mantenimiento y limpieza de canales pluviales y arroyos en la ciudad de Chihuahua. Este programa debe incluir la inspección al menos una vez al año durante la época de estiaje (invierno) de todos los 26 arroyos y 2 ríos analizados en el presente estudio. Se debe identificar los canales con afectaciones que puedan ser resueltas antes de la temporada de lluvias (primavera-verano-otoño). En aquellos casos donde las afectaciones no puedan ser corregidas antes de la temporada de lluvias, se debe notificar a Protección Civil municipal sobre los posibles peligros para que se pueda generar un plan de acción. Además, se debe generar una programación de limpieza de cauces antes de la temporada de lluvias basada en las inspecciones realizadas.

A pesar de que esta acción sea de tipo correctiva, se propone considerarla con prioridad superior a todas las demás, ya que omitirla podría generar peligros inmediatos ante cualquier lluvia.

Estudio diagnóstico pluvial detallado a nivel de ciudad

Antes de proceder con la generación y construcción de las acciones estructurales, y considerando las simplificaciones hidrológicas e hidráulicas realizadas en el presente estudio, se recomienda llevar a cabo un estudio diagnóstico de la situación pluvial en la ciudad de Chihuahua.

Este estudio deberá incluir la generación de mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones para personas, vehículos y viviendas con un enfoque en 9 periodos de retorno. Se debe identificar, para toda la ciudad, la velocidad y tirante máximo de escurrimiento del agua pluvial dentro de canales, obras de regulación, ríos y arroyos en sección natural y vialidades. Esto se logrará mediante una simulación hidrológica-hidráulica en dos dimensiones de flujo no permanente a superficie libre.

Además, con base en estos mapas y simulaciones, se deben determinar los costos asociados a las afectaciones por inundaciones y analizar el funcionamiento hidráulico de las 4 presas y 45 obras de detención, así como de la totalidad de los canales pluviales, los dos ríos, los 26 arroyos principales y el resto de los arroyos secundarios, así como el flujo sobre vialidades. Con esta información, se deben generar propuestas de solución a nivel de anteproyecto que incluyan obras para reducir las afectaciones por inundaciones y gestionar el agua de lluvia de manera efectiva.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Para priorizar qué obras de manejo de agua de lluvia se deben construir primero, se sugiere generar mapas de riesgo ante inundaciones basados en el cálculo del Índice Pérdida-Posesión [30].

Control y limitación de la urbanización en las cuencas de las tres presas.

Se sugiere considerar toda el área de las cuencas de las presas Chihuahua, Rejón y Chuvíscar como zonas de desarrollo controlado. Dentro de estas zonas, se deberían limitar los proyectos de urbanización y exigir, antes de autorizarlos, la presentación de proyectos y la construcción de obras de reducción de impacto hidrológico. Específicamente, se deben construir obras de detención y/o retención que permitan restablecer el caudal de escurrimiento previo a la urbanización para un periodo de retorno de al menos 10 años.

Además, se recomienda llevar a cabo un estudio sobre el funcionamiento hidráulico del vertedor de la Presa Chuvíscar y evaluar los beneficios y riesgos asociados con el hecho de que la presa no cuente con volumen útil ni de regulación debido a los niveles de azolve. También se debe considerar su función actual de uso recreativo y estético en el Parque El Encino. Se sugiere evaluar la posibilidad de demoler la presa o de restaurar su capacidad útil mediante el desazolve.

Cálculo de Índice de Resiliencia en ciudades ante Fenómenos Hidrometeorológicos

Se propone calcular el "Índice de Resiliencia en Ciudades ante Fenómenos Hidrometeorológicos" para identificar a nivel urbano, específicamente en el manejo del agua de lluvia, áreas de oportunidad y deficiencias que requieran atención y, de ser necesario, corrección.

Esta propuesta se basa en contribuir a la creación de ciudades seguras que mantengan un nivel aceptable de funcionalidad frente a eventos de desastres relacionados con fenómenos naturales, especialmente aquellos hidrometeorológicos como la lluvia y las inundaciones. Se entiende a una ciudad resiliente como aquella que, ante situaciones críticas, adversas o inusuales, está preparada, resiste, se adapta y, tras el evento, se recupera en mayor o menor medida.

El cálculo del índice técnico de resiliencia en ciudades frente a fenómenos hidrometeorológicos requiere la previa determinación de su herramienta complementaria: el perfil de resiliencia en ciudades. Este perfil consiste en un análisis cualitativo de las características resilientes de la ciudad ante fenómenos hidrometeorológicos. Evalúa aspectos como la cantidad y calidad de la infraestructura pluvial, la existencia de programas de ordenamiento territorial con enfoque ecológico, los códigos normativos de construcción, los estudios de evaluación de riesgos frente a inundaciones, los planes de reducción o mitigación de riesgos (RRD), el presupuesto asignado a actividades preventivas y de atención de emergencias, la fortaleza de las instituciones encargadas de la reducción de desastres (como Protección Civil Municipal y Estatal), la evaluación de daños previos y el tiempo de recuperación, entre otros aspectos.

Ley de Responsabilidad de Impacto Hidrológico

Se propone la creación de la Ley de Responsabilidad de Impacto Hidrológico, en respuesta al aumento de afectaciones por inundaciones derivadas de la urbanización. Tras la urbanización de una zona, como una cuenca, se producen diversos impactos hidrológicos, siendo el principal el cambio en el régimen hidrológico, que se traduce en un aumento del volumen y caudal máximo de escurrimiento debido al aumento de superficies impermeables, así como a la disminución del tiempo en que se presenta dicho caudal máximo.

Aunque es difícil eliminar por completo el impacto hidrológico de la urbanización, existen soluciones para reducir sus efectos mitigando parcialmente sus afectaciones. Una de ellas es la construcción, como parte de la urbanización, de obras de regulación (detención), que reducen el caudal máximo de escurrimiento y retrasan su aparición (ver Figura 93). Estas obras consisten en la creación de un depósito de almacenamiento sobre un cauce (río o arroyo), que detiene temporalmente el volumen de escurrimiento. Esto permite que menos agua pase por la salida del depósito o vaso al mismo tiempo, creando una diferencia entre el caudal de entrada y salida del depósito o vaso.

Estas obras, también conocidas como presas "rompe-picos", disminuyen o "rompen" el pico de caudal del hidrograma de escurrimiento de un cauce durante un evento de tormenta. Las 4 presas con las que tiene interacción hidrológica la ciudad de Chihuahua: San Marcos, Chihuahua, Chuvíscar y El Rejón, funcionan como presas rompe-picos o estructuras de detención/regulación hidráulica.

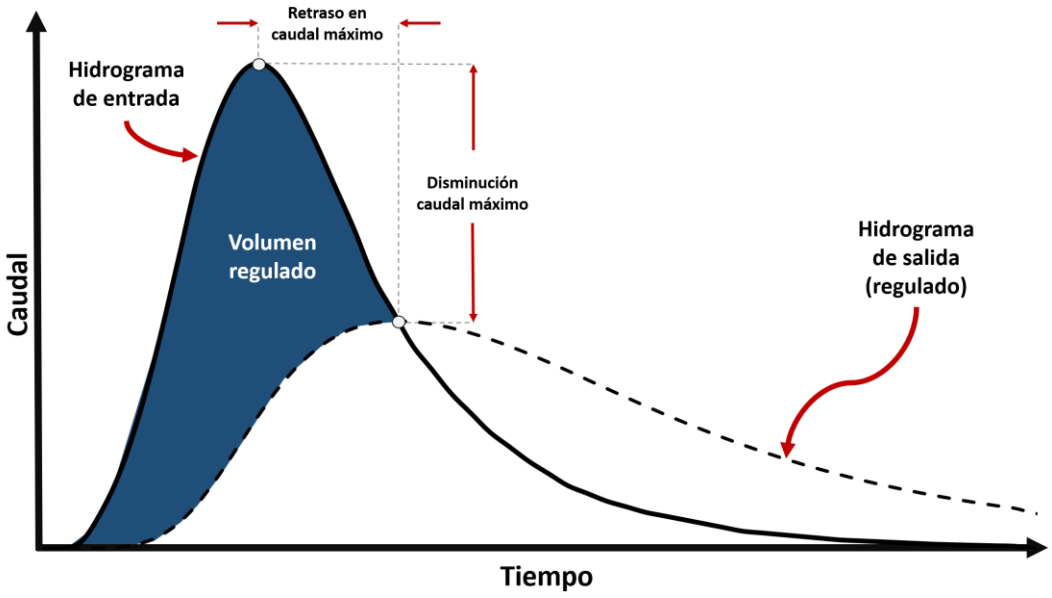


Figura 93. Hidrogramas de entrada y salida de una estructura de disminución de impacto hidrológico. Fuente: elaboración propia [30].

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Respecto al uso de este tipo de estructuras para reducir el impacto hidrológico, es importante tener en cuenta que, si bien tienen un impacto muy positivo al disminuir el caudal máximo de escurrimiento de un cauce y retrasarlo, no reducen el volumen total de escurrimiento. Por lo tanto, no se puede considerar que generan un impacto hidrológico "cero". Sin embargo, permiten disminuir el caudal máximo del cauce hasta el valor que tenía antes de su urbanización (para un cierto periodo de retorno de diseño), lo que representa una reducción de impacto hidrológico significativa y beneficios considerables (Figura 94).

En la Figura 94 se muestran los escenarios típicos de los hidrogramas de un arroyo antes de ser urbanizado (Pre-urbanización), una vez que se ha urbanizado su cuenca y cómo se puede restablecer el caudal máximo mediante la regulación de volumen con una obra de detención.

Es importante destacar que el efecto de las obras de detención, ilustrado mediante los hidrogramas de los tres escenarios mencionados, es similar a la estrategia de "aplanar la curva" utilizada durante la contingencia de Covid-19. En este caso, la idea era regular el flujo de casos graves que requirieran hospitalización para que no se presentaran todos al mismo tiempo, sino de manera espaciada en el tiempo, lo que "aplanaba" la curva de contagios. De manera análoga, las estructuras de detención generan un "aplanamiento" de la curva de caudal de escurrimiento de un cauce (hidrograma), disminuyendo el flujo máximo al regular el volumen escurrido (Figura 94).

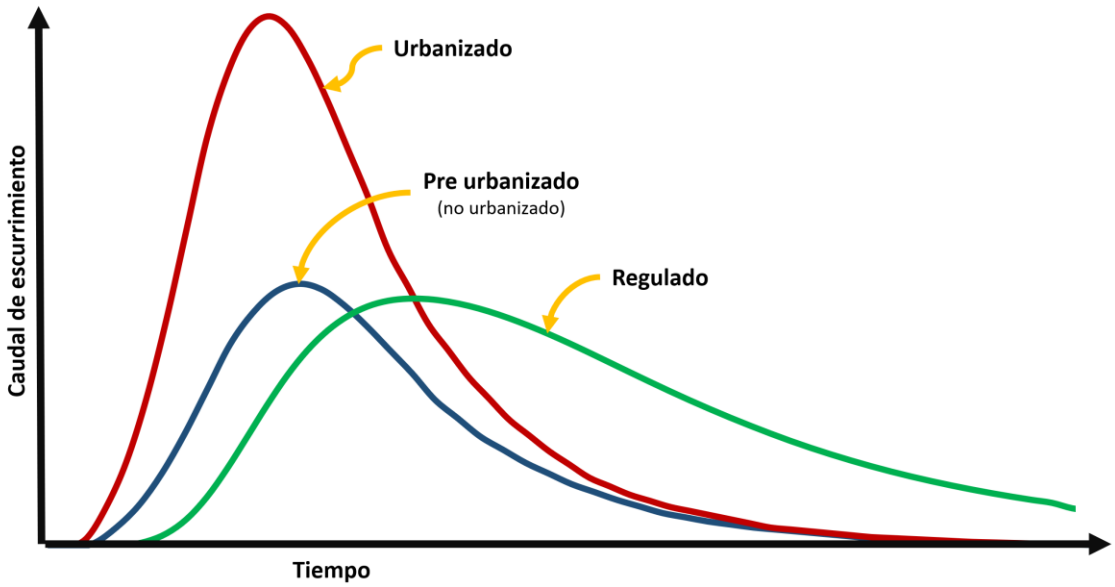


Figura 94. Hidrogramas típicos de escenarios pre-urbanizado, urbanizado y regulado, ejemplo de impacto de estructuras de reducción de impacto hidrológico. Fuente: elaboración propia con información de Hernández-Samaniego (2018) [(30)].

Existen antecedentes de leyes similares a la propuesta, tal es el caso del *artículo 86-bis de la Ley de Agua para el estado de Jalisco* [38], en la que para todo nuevo desarrollo urbano que genere superficies impermeables se solicita contar con un dispositivo de control de escurrimiento de agua pluvial (obra de detención), impidiendo que el agua se drenada directo en calles y cunetas. Dichos dispositivos de control solicitadas son obras de regulación, que deben cumplir con las siguientes características técnicas [38]:

El volumen de reserva necesario para áreas superiores a 10 (diez) hectáreas debe ser determinada a través de estudio hidrológico específico, con precipitación de proyecto con probabilidad de excedencia del 10% en cualquier año (periodo de retorno = 10 (diez) años) para la verificación de los dispositivos de control se deberá considerar una precipitación de proyecto con probabilidad de excedencia del 2% en cualquier año (periodo de retorno = 50 (cincuenta) años).

En caso de que el urbanizador optara por otro tipo de dispositivo de control de escurrimiento, deberá considerar las indicaciones generales del reglamento que emita el organismo operador que le corresponda.

La construcción de todas las estructuras de control indicadas en éste articulo estará sujeta a la autorización del organismo operador que le corresponda, después de la debida evaluación de las condiciones mínimas de infiltración del suelo en el lugar del nuevo desarrollo habitacional, industrial, comercial o de otro tipo que debe ser presentada y comprobada fehacientemente por el interesado.

Todos los dispositivos de control deberán contemplar el drenaje contemplado del terreno para una lluvia equivalente a dos años del periodo de retorno y duración correspondiente al 120% del tiempo de concentración de la superficie analizada y estar de acuerdo con las especificaciones técnicas, que, para tal fin, reglamente el organismo operador que le corresponda.

Se propone tomar dicho *artículo 86-bis de la Ley de Agua para el estado de Jalisco* como punto de partida para generar la Ley de Responsabilidad de Impacto Hidrológico, en la que se exija a particulares y/o empresas que pretendan urbanizar, como parte de los permisos de construcción, la generación de un proyecto ejecutivo y posterior construcción, de una obra de detención que permita la regulación del caudal de salida del propio predio a urbanizar hasta disminuirlo al escenario pre-urbanizado a un periodo de retorno de diseño de 10 años o igual al periodo de retorno de diseño de las obras pluviales construidas para a urbanización, como pudieran ser canales pluviales (en caso de ser necesario, eligiendo el periodo de retorno mayor entre estos dos). Para esto sería necesario que dicho proyecto se base en un estudio hidrológico-hidráulico que incluya por lo menos la determinación de los hidrogramas pre-urbanizados, urbanizados y regulado y características técnicas, hidráulicas y geométricas de la obra de regulación.

Instituto de Planeación Integral del Municipio de Chihuahua
Calle Victoria #14, sexto piso, Col. Centro, C.P. 31000, Chihuahua, Chih. Tel. 614 200 4820
https://implanchihuahua.org/

Idealmente y con base en la ley propuesta, se recomienda se generen planes de desarrollo de infraestructura pluvial a nivel de cuenca, para que los diversos particulares o empresas que pretendan urbanizar una zona específica de la ciudad se apeguen a un solo plan que incluya las obras de manejo de lluvia determinadas en dicha planeación a nivel de cuenca, como recomienda Campos Aranda (2010)[3].

Cabe destacar que, uno de los principales contraargumentos a propuestas de leyes de este tipo son los costos de la construcción de las obras de manejo de agua de lluvia. Costos que terminan trasladándose a los usuarios finales (sociedad en general). Sin embargo, es por lo anterior que se propone que el nombre de la ley haga referencia a la "responsabilidad" de impacto hidrológico, pues el objetivo de la ley no será generar costos adicionales y/o innecesarios a las empresas y particulares que pretendan continuar con el necesario e inevitable proceso de urbanización de la ciudad, sino, simplemente hacer a toda la sociedad responsable de los impactos hidrológicos que generamos mediante los procesos de urbanización.

Reflexión

En la academia y entre los profesionales, existe la noción de que las ciudades deben contar con una mayor planificación, de carácter multidisciplinario, enfocada en la prevención y con un enfoque sustentable. Se menciona que el manejo de las aguas urbanas, incluida el agua pluvial, debe basarse en un entendimiento real de los impactos de las actividades en el ciclo del agua, conocido como ciclo urbano del agua debido a las acciones humanas en una ciudad, así como en los impactos de las ciudades en el medio ambiente. Por lo tanto, es necesario que la urbanización mitigue los impactos que provoca en el medio ambiente.

Sin embargo, lograr una verdadera planificación hídrica sustentable, preventiva y multidisciplinaria requiere una gran inversión de tiempo y recursos humanos para abarcar realmente diversas disciplinas. Por lo tanto, invertir en la generación de diversos estudios multidisciplinarios será crucial para la elaboración de un adecuado Plan Hídrico Municipal.

Como reflexión final, es necesario comprender que el daño de la sociedad a la naturaleza provoca fenómenos naturales cada vez más intensos, los cuales, a su vez, provocan afectaciones cada vez mayores en la misma sociedad que los causó. El riesgo ante inundaciones no puede ni debe ser eliminado completamente; debe ser aceptado y gestionado.

7. Referencias

1. CEPAL. Avances en la Gestión Integrada del Agua Urbana y Rural en América Latina y el Caribe. [Online].; 2014 [cited 2024 02 12.

2. Calderón FM. (GIRH) Alcances de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en el Sector Agrícola de México. FINGUACH. Revista De Investigación Científica De La Facultad De Ingeniería De La Universidad Autónoma De Chihuahua. 2019; 3(7).

3. IMTA. ESTUDIO DE RIESGOS DE INUNDACIONES EN ZONAS URBANAS DE LA REPÚBLICA MEXICANA. FINAL. Jiutepec Morelos: Instituto Mexicano de Tencología del Agua, Coordinación de Hidráulica; 2015.

4. Hernández-Samaniego E. Tesis: Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas México: Universidad Autónoma de México (UNAM); 2018.

5. Municipio de Chihuaua. Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua 2014 Ciudad de México: Desarrollo de Proyectos de Gobernabilidad S.C.; 2014.

6. Viand JM, Silvia GG. www.ina.gov.ar. [Online]. [cited 2017 11 07 [jesicaviand@yahoo.com.ar]. Available from: https://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/01_027_Viand.pdf.

7. Cenapred. LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA ELABORACIÓN DE ATLAS DE RIESGOS. [Online].; 2004 [cited 2017 11 07. Available from: http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieEspecial/metodologiasAtlas.pdf.

8. CEPAL. Información para la gestión de riesgo de desastres. Estudio de caso de cinco países: México. México: Naciones Unidas y BID; 2007.

9. Blaikie P, Wisner B, Cannon T, Davis I. At Risk: Natura hazards, people's vulnerability and disasters: La Red; 2003.

10. Ribera Masgrau L. Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. Doc. Anàl. Geogr. 2004 abril;(43): 153-171.

11. Bravo Jacomé JA, Salgado Rabadán JH, Parra Alarcón TN. www.gob.mx. [Online].; 2013 [cited 2017 07 11. Available from: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/93616/1_CHidro_2013_17dic.pdf.

12. INEGI. INEGI. [Online].; 2020 [cited 2023 12 28. Available from: https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos.

13. Inegi. SINCE. [Online].; 2020 [cited 2022 mayo 15. Available from: https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/.

14. AMAI. Niveles Socioeconómicos - Asociación Mexicana de Agencias de Inteligencia de Mercado y Opinión. [Online].; 2022 [cited 2022 mayo 15. Available from: https://amai.org/NSE/index.php?queVeo=niveles.

15. Gobierno Municipal de Chihuahua, Protección Civil Chihuahua, Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED). Atlas de Riesgos del Municipio de Chihuahua. Atlas de Riesgo. Chihuahua:; 2022.

16. Pérez Ostos LG. Blog Hidra-Bas. [Online].; 2016. Available from: https://hidra-bas.blogspot.com/.

17. CONAGUA. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL DISEÑO Y EJECUCIÓN DE OBRAS E INSTALACIONES HIDRÁULICAS. [Online]. [cited 2024 02 12. Available from: http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/747.htm.

18. SIAPA. Criterios y Lineamientos Técnicos para Factibilidades-Alcantarillado Pluvial Guadalajara; 2014.

19. Baeza Ramírez C. Estimación Regional de Factores de Convectividad para el Cálculo de las Relaciones Intensidad-Duración-Freciencia Ciudad de México: UNAM; 2007.

20. Water footprint network. Water footprint network. [Online].; 2024 [cited 2024 02 12. Available from: https://www.waterfootprint.org/.

21. GIT. Programa de Manejo Integral de la Cuenca del Río Conchos Chihuahua; 2006.

22. CONAGUA. Drenaje Pluvial Urbano. In Agua CNd. Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento. Ciudad de México; 2015.

23. Cenapred/II UNAM. MAPAS ASOCIADOS A DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO CON DISTINTAS DURACIONES. México:; 2006.

24. FAO. Gestión Integrada del Agua Urbana y Rural: Un Marco Conceptual. [Online].; 2007 [cited 2024 02 12. Available from: http://www.fao.org/3/a-ak478s.pdf: http://www.fao.org/3/a-ak478s.pdf.

25. Schmitt T, Thomas M, Ettrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. Journal of Hydrology. 2004.

26. NEW ENGLAND WATER SCIENCE CENTER. USGS science for a changing world. [Online].; 2023 [cited 2024 02 12. Available from: https://www.usgs.gov/centers/new-england-water-science-center/science/delineating-high-resolution-urban-drainage-systems.

27. Yazdanfar Z, Sharma A. Urban drainage system planning and design – challenges with climate change and urbanization: a review. Water Science & Technology. 2015; 72.2.

28. Tzatchkov VG, Alcocer Yamanaka VH, Bourguett Ortíz VJ, Arreguín Cortés FI. Advances in the hydraulics of drinking water distribution networks. [Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable]. Jiutepec: IMTA; 2014.

29. Hernández-Samaniego E. Tesis: Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas México: UNAM-IMTA; 2018.

30. Mediateca INAH. [Online].; 2024. Available from: y www.mediateca.inah.gob.mx/repositorio/islandora/object/mapa:2206.

31. Evangelista S. [Online].; 2024. Available from: www.archivoshistoricoschihuahua.wordpress.

32. Camara de Diputados. Consitución Política de los Estadios Unidos Mexicanos. 2011th ed. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación; 1917.

33. Conagua. Memorandum N° B00.7.-616. Ciudad de México:; 2017.

34. Mpio. Chihuahua. ATLAS DE RIESGO DEL MUNICIPIO DE CHIHUAHUA Chihuahua: Chihuahua; 2022.

35. Hernández-Samaniego E. Tesis - Índice Pérdida-Posesión para Generación de Mapas de Riesgo Ante Inundaciones en Zonas Urbanas México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2018.

36. Gobierno de Jalisco. Ley del Agua para el Estado de Jalisco y sus Municipios; 2020.

37. Campos Aranda DF. Introducción a la Hidrología Urbana. 2nd ed. San Luis Potosí: Printego; 2010.

38. H. AYUNTAMIENTO de CHIHUAHUA. PLAN DE ACCION CLIMATICA MUNICIPAL (PACMUN®) MUNICIPIO DE CHIHUAHUA 2019. Chihuahua:; 2019.

39. Gleick PH. Water and conflict. Annual Review of Enviroment and Resources. 2019; 44: 97-117.