

ATLAS MUNICIPAL DE RIESGOS DE TIJUANA

ACTUALIZACIÓN VERSIÓN 2024





ATLAS MUNICIPAL DE RIESGOS DE TIJUANA

ACTUALIZACIÓN VERSIÓN 2024

M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo
Ejecutor del proyecto actualización del Atlas Municipal de Riesgos
Centro de Investigación Científica y de
Educación Superior de Ensenada, B. C.
lmendoza@cicese.mx
Ensenada, Baja California Diciembre 2024

Resumen

El presente Atlas Municipal de Riesgo de Tijuana 2024, suple al Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana 2014, con el objeto de mostrar la identificación de peligros y riesgos a la fecha producidos por fenómenos perturbadores de origen hidrometeorológico, geológico y sísmico, en una versión actualizada, para el municipio de Tijuana, Baja California. La actualización está representada por mapas a escala municipal y de área urbana. Se realizó mediante la recopilación de eventos históricos, así como, la adquisición y procesamiento de datos incorporando información nueva para los últimos 10 años. El objetivo de este documento es servir como un instrumento actualizado que represente y zonifique cada uno de los fenómenos perturbadores de manera clara y precisa a través de mapas. De tal forma que se pueda generar una consulta y hacer un análisis de la información de los diferentes peligros y susceptibilidades que afectan al territorio municipal.

El capítulo 1 presenta la identificación de los fenómenos hidrometeorológicos el cual está constituido por 32 mapas. Como primera etapa se realizó la identificación de los peligros a través de la generación de un inventario de eventos históricos, en el que se incluyen: heladas, tormentas de granizo, tormentas de nieve, ciclones tropicales, tornados, vientos Santa Ana, tormentas eléctricas, ondas cálidas y gélidas, sequía e inundaciones. Además del recuento histórico se evaluó la probabilidad de ocurrencia para diferentes periodos de retorno de las ondas cálidas, ondas gélidas y el peligro por inundación, siendo este último el de mayor impacto en el municipio. El peligro por inundación se caracteriza por la altura y velocidad del agua, al combinar ambas variables da como resultado la fuerza de arrastre de la corriente, poniendo en riesgo asentamientos irregulares y viviendas cercanas a los cauces. Además del análisis de peligro se hizo una estimación del riesgo por inundación a las viviendas vulnerables.

En el capítulo 2 se muestra la identificación de fenómenos geológicos en donde se evaluaron deslizamientos históricos y activos de terreno en el municipio. Un deslizamiento es el desplazamiento imprevisto de volúmenes de material, siguiendo el talud natural. Este fenómeno responde a factores inevitables como pendientes naturales, atracción gravitacional, debilitamiento de materiales, presencia de agua y estructura geológica. En los últimos años los deslizamientos han afectado considerablemente a varias colonias de Tijuana. En este apartado se presenta el mapa de

deslizamientos que incluye 47 polígonos que representan áreas de deslizamiento en colonias de Tijuana, así como dos polígonos (referencia) de colonias donde no se tuvo acceso y se han realizado modificaciones en la zona, pero hay evidencia de deslizamientos ocurridos. La capa de deslizamientos contiene información que detalla: la fecha de ocurrencia, el desnivel topográfico, la dirección del movimiento y el estado actual u observaciones pertinentes al deslizamiento realizadas durante la visita de reconocimiento. El Mapa G02 Licuefacción, representa las zonas vulnerables a verse afectadas de manera importante en caso de que un evento sísmico provoque que acuíferos someros se vean sometidos a presión de poro súbita y que el agua fluya a la superficie mezclada con materiales que la contienen. Las principales zonas de captación de escurrimientos y en el subsuelo son el Arroyo Alamar y El Río Tijuana, caracterizados por acumulación de sedimentos aluviales y fluvio-aluviales.

En capítulo 3 se presenta el peligro sísmico a través de 36 mapas producto de la compilación de información histórica, campañas recientes de medición y escenarios sísmicos probables que consideran el efecto de sitio (Vs30). Para la identificación del peligro se realizó un análisis regional de las fallas sismogénicas, la sismicidad histórica, isosistas (intensidades) generadas por los grandes sismos históricos. Localmente se presentan sismos registrados por la red acelerométrica de Tijuana (RATJ), operada por CICESE, para el periodo 2017-2023 y se presentan acelerogramas y espectros de Fourier del sismo del 01-abril-2017 que ha producido las mayores aceleraciones pico del suelo en Tijuana. Se presentan las primeras estimaciones de las formas promedio del espectro de respuesta de aceleración absoluta en cada estación de la RATJ. Con las mediciones realizadas en campo (previas y campañas recientes), se obtuvieron estimaciones del periodo dominante y velocidades Vs30. Para el análisis de peligro sísmico se presentan mapas de: a) aceleraciones y velocidades producidas por la probable ruptura de la falla Rose Canyon con y sin efecto de sitio, así como sus intensidades asociadas; b) aceleraciones con probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, producidas por el rompimiento de múltiples fallas. Finalmente se muestra la infraestructura crítica y estratégica para la ciudad de Tijuana y su interacción con las intensidades producidas por la ruptura hipotética de la falla Rose Canyon.

Finalmente en el Capítulo 4 se presentan acciones futuras para incrementar el conocimiento de los factores de peligro y riesgo de los fenómenos hidrometeorológicos, geológicos y sísmicos que afectan a la Ciudad de Tijuana. Estos estudios recomendados, están enfocados a evaluar la vulnerabilidad de asentamientos humanos presentes y servirán como apoyo a los programas de planeación y desarrollo urbano del IMPLAN, además se propone integrar fenómenos perturbadores de origen antropogénico como los Químicos – Tecnológicos, los Sanitario-Ecológicos y los Socio - organizativos para complementar el Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana.

Las evaluaciones de peligro, exposición y vulnerabilidad que se presentan, parcialmente para algunos fenómenos perturbadores en este Atlas, son las bases necesarias para la realización de estudios más a detalle de riesgo. Además, para la formulación y toma de decisiones hacia una correcta incorporación de condiciones de riesgo en la planeación, coordinación, ordenación y regulación de asentamientos humanos en el municipio de Tijuana, permitiendo un aumento de la resiliencia de los centros de población; con el fin de salvaguardar la vida de sus habitantes y la economía del municipio.

Tabla de contenido

	Página
Resumen	.iii
Lista de figuras	4
Capítulo 1. Identificación de peligros hidrometeorológicos.....	8
1.1 Heladas.....	8
1.2 Tormentas de granizo.....	9
1.3 Tormentas de nieve.....	9
1.4 Ciclones tropicales.....	9
1.5 Tornados históricos.....	10
1.6 Vientos Santa Ana.....	10
1.7 Tormentas eléctricas.....	18
1.8 Ondas cálidas y gélidas.....	18
1.8.1 Identificación de peligro por ondas cálidas.....	18
1.8.1.1 Periodos de retorno ondas cálidas.....	18
1.8.2 Identificación de peligro por ondas gélidas.....	19
1.8.2.1 Periodos de retorno ondas gélidas.....	28
1.9 Sequía.....	28
1.10 Inundaciones.....	30
1.10.1 Peligro: altura del agua y severidad de la amenaza.....	30
1.10.2 Exposición y vulnerabilidad ante el peligro por inundación.....	45
1.10.3 Riesgo por inundación: colapso de viviendas.....	46
1.10.4 Conclusiones riesgo por inundación.....	51
Capítulo 2. Identificación de peligros Geológicos.....	53
2.1 Mapa de Deslizamientos.....	53
2.1.1 Uso del Mapa.....	53
2.2 Zonas con potencial de licuefacción.....	55
Capítulo 3. Descripción de mapas de peligros sísmicos.....	58
3.1 Fallas sismogénicas (S01).....	58
3.2 Sismicidad histórica (S02).....	58
3.3 Epicentros de la Red Acelerométrica de Tijuana 2017-2023 (S03).....	61
3.4 Isosistas de diversos sismos (S04-S18).....	63
3.5 Sismo del 2017-Abril-01 (S19-S21).....	79
3.6 Periodos dominantes del suelo (mapa S22).....	79
3.7 Velocidades Vs30 en el subsuelo de Tijuana (S23).....	85
3.8 Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon (S24-S27).....	87
3.9 Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon (S28 y S29).....	92
3.10 Isosistas de la falla Rose Canyon (S30).....	95
3.11 Aceleraciones probables producidas por el rompimiento de multifallas (S31-S34).....	95
3.12 Estructuras críticas y estratégicas de Tijuana (S35 y S36).....	102
Capítulo 4. Propuestas de ampliación de estudios para evaluar y reducir la vulnerabilidad de los asentamientos humanos.....	106
4.1 Contenido mínimo para la elaboración de un Atlas de Riesgos.....	106
4.2 Ampliación de estudios y adecuación del atlas de riesgos naturales.....	106
4.2.1 Aspectos de peligro y riesgos hidrometeorológicos.....	106
4.2.2 Aspectos de peligro y riesgo geológico – “Fenómeno inestabilidad o movimiento de terreno”.....	107
4.2.3 Aspectos peligro y riesgo sísmicos.....	107
4.3 Ampliación de estudios y adecuación del atlas de riesgos Antropogénicos.....	108
4.3.1 Químicos –Tecnológicos.....	108
4.3.2 Sanitario-Ecológicos.....	108
4.3.3 Socio-organizativos.....	108
Bibliografía Peligros hidrometeorológicos.....	109
Bibliografía peligros Geológicos.....	110
Bibliografía peligros Sísmicos.....	110
Lista de figuras	Página
Figura 1. Susceptibilidad a heladas.....	11
Figura 2. Tormentas de granizo históricas.....	12

Figura 3. Nevadas históricas	13	Figura 34. Mapa de área con potencial de licuefacción.	56
Figura 4. Ciclones tropicales históricos	14	Figura 35. Fallas sismogénicas.....	59
Figura 5. Tornados históricos.....	15	Figura 36. Sismicidad histórica	60
Figura 6. Vientos de Santa Ana	16	Figura 37. Epicentros de la RATJ 2017-2023.....	62
Figura 7. Tormentas eléctricas históricas.....	17	Figura 38. Epicentros de sismos históricos grandes con isosistas documentada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).....	63
Figura 8. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 5 años	20	Figura 39. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 11/Marzo/1933 de magnitud 6.4 (mapa S04).	64
Figura 9. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 10 años.....	21	Figura 40. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 30/Diciembre/1934 de magnitud 6.3 (mapa S05).....	65
Figura 10. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 25 años.....	22	Figura 41. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 31/Diciembre/1934 de magnitud 6.4 (mapa S06).....	66
Figura 11. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 50 años.....	23	Figura 42. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 25/Marzo/1937 de magnitud 6.0 (mapa S07).....	67
Figura 12. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 5 años.....	24	Figura 43. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 19/Mayo/1940 de magnitud 6.9 (mapa S08).	68
Figura 13. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 10 años.....	25	Figura 44. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 21/Octubre/1942 de magnitud 6.6 (mapa S09).....	69
Figura 14. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 25 años.....	26	Figura 45. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Enero/1951 de magnitud 6.0 (mapa S10).....	70
Figura 15. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 50 años.....	27	Figura 46. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 19/Marzo/1954 de magnitud 6.4 (mapa S11).....	71
Figura 16. Intensidad de sequía para el municipio de Tijuana.....	29	Figura 47. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 09/Abril/1968 de magnitud 6.6 (mapa S12).....	72
Figura 17. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años.....	31	Figura 48. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 15/Octubre/1979 de magnitud 6.4 (mapa S13).	73
Figura 18. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años.	33	Figura 49. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 09/Junio/1980 de magnitud 6.3 (mapa S14).....	74
Figura 19. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años.....	34	Figura 50. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Noviembre/1987 de magnitud 6.2 (mapa S15).	75
Figura 20. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años.....	35	Figura 51. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Noviembre/1987 de magnitud 6.2 (mapa S16).....	76
Figura 21. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 10 años.	37		
Figura 22. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 25 años.....	38		
Figura 23. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 50 años.....	39		
Figura 24. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 100 años.	40		
Figura 25. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 10 años.	41		
Figura 26. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 25 años.	42		
Figura 27. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 50 años.....	43		
Figura 28. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 100 años.....	44		
Figura 29. Riesgo colapso inundación periodo 10yr	47		
Figura 30. Riesgo colapso inundación periodo 25yr.....	48		
Figura 31. Riesgo colapso inundación periodo 50yr	49		
Figura 32. Riesgo colapso inundación periodo 100yr.....	50		
Figura 33. Mapa de Deslizamientos de terreno con la representación gráfica de las áreas afectadas y el número ID correspondiente en la tabla de atributos.....	54		

Figura 52. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 30/Diciembre/2009 de magnitud 6.0 (mapa S17).	77
Figura 53. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 4/abril/2010 de magnitud 7.2 (mapa S18).	78
Figura 54. Acelerogramas del sismo del 01/abril/2017 de magnitud 3.5 (mapa S19).	80
Figura 55. Espectros de Fourier del sismo del 01/abril/2017 de magnitud 3.5 (mapa S20).	81
Figura 56. Promedios de los espectros de respuesta en cada estación de la RATJ (mapa S21)	82
Figura 57. Periodos dominantes del suelo para el municipio de Tijuana (mapa S22).....	84
Figura 58. Velocidades Vs30 en el subsuelo del municipio de Tijuana (mapa S23).....	86
Figura 59. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S24).....	88
Figura 60. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S25).....	89
Figura 61. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para la ciudad de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S26).....	90
Figura 62. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para la ciudad de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S27).....	91
Figura 63. Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S28).....	93
Figura 64. Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S29).....	94
Figura 65. Isosistas de la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana (mapa S30).	96
Figura 66. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y Norte de Baja California, sin considerar la Vs30 (mapa S31).	97
Figura 67. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y norte de Baja California, representadas sobre el mapa geológico sin considerar la Vs30 (mapa S32).	98
Figura 68. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y norte de Baja California, para el municipio de Tijuana que consideran la Vs30 (mapa S33).....	99
Figura 69. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y norte de Baja California, representadas sobre el mapa geológico considerando la Vs30 (mapa S34).....	100

Figura 70. Estructuras críticas y estratégicas para el municipio de Tijuana (mapa S35)	103
Figura 71. Estructuras críticas y estratégicas para el municipio de Tijuana sobre las intensidades de Mercalli modificada (mapa S36)	104

Lista de tablas

	Página
Tabla 1. Estaciones utilizadas, temperatura máxima registrada en la estación, año de registro, y número de años utilizados para el cálculo de temperaturas extremas máximas para cada periodo de retorno.	19
Tabla 2. Estaciones utilizadas en el análisis, temperatura máxima registrada, año de registro, y número de años (serie de tiempo) para el cálculo de temperaturas extremas mínimas para cada periodo.....	28
Tabla 3. Clasificación de la intensidad de la sequía (nadm).....	30
Tabla 4. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años.....	30
Tabla 5. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años.....	32
Tabla 6. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años.	32
Tabla 7. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años.	36
Tabla 8. Severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018).....	36
Tabla 9. Severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018).....	46
Tabla 10. Sismos históricos con $M \geq 6$. Las isosistas fueron calculadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).	63
Tabla 11. Clasificación de suelos según la tabla 1613.5.2 (SITE CLASS DEFINITIONS) del IBC (2006).	85
Tabla 12. Fenómenos perturbadores basados en el contenido mínimo para la elaboración de un Atlas.....	106

Peligros hidrometeorológicos para el municipio de Tijuana.

Capítulo 1.

Capítulo 2. Identificación de peligros hidrometeorológicos

Los fenómenos hidrometeorológicos son los que se generan por acción de agentes atmosféricos, como ondas cálidas y gélidas, heladas, tormentas de granizo, tormentas de nieve, tornados, vientos Santa Ana, tormentas eléctricas, lluvias extremas, sequía e inundaciones. Estos fenómenos meteorológicos han causado severas afectaciones en el municipio de Tijuana (IMPLAN, 2014). El objetivo general de la presente edición del Atlas Municipal de Riesgos es identificar y actualizar los peligros de origen hidrometeorológico a los que se encuentra sometido el municipio de Tijuana, tomando como punto de partida la evidencia de su ocurrencia histórica. Para el municipio de Tijuana, durante el periodo 2000-2023 se publicaron 12 declaratorias de emergencia (Tabla 1 memoria de cálculo) de las cuales 10 fueron causadas por fenómenos hidrometeorológicos, destacando: lluvias extremas, lluvias atípicas, heladas, nevadas y bajas temperaturas, así como ondas cálidas.

La identificación de los peligros de origen hidrometeorológicos se realizó mediante la construcción y análisis de una base de datos que se creó a partir de consultas distintas bases de datos sobre desastres a nivel global, entre ellas DESINVENTAR, conformada por la Red de Estudios Sociales en Prevención de desastres en América Latina (esta contiene información del año 1970 a 2013); la base de datos GLIDENumber del Centro Asiático de Reducción de Desastres (ADRC); Reliefweb response, es un servicio digital especializado de la Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitario; y el EM-DAT que contiene datos sobre la ocurrencia e impactos desde 1900 hasta la actualidad. Este análisis se complementa con la búsqueda y recuperación exhaustiva de información de notas periodísticas a nivel local y nacional, textos científicos, base de datos de desastres a nivel nacional. Es importante resaltar que la mayor información histórica de los peligros de hidrometeorológicos se encontró en noticias de medios de comunicación local.

Del reconocimiento histórico, sobre el impacto de los fenómenos perturbadores en el municipio se generaron los mapas de identificación del riesgo, localización de afectaciones históricas y la

identificación de zonas susceptibles a presentar fenómenos. En las zonas donde se contó con localización geográfica se generó una base de datos en ArcGIS, para su visualización en forma espacial. Los resultados de las consultas muestran que el municipio de Tijuana ha registrado la ocurrencia de diferentes fenómenos hidrometeorológicos que han causado grandes afectaciones, principalmente en las zonas urbanas, por lo tanto, su identificación es de gran importancia para su análisis e incorporación al Atlas Municipal de Riesgos.

2.1 Heladas

El resultado de una helada es una capa difusa de cristales de hielo sobre superficie del suelo, esta se forma por deposición directa (<https://glossary.ametsoc.o>). Existen diferentes clasificaciones para las heladas, dependiendo de su origen climatológico, la temporada del año en que se presentan o por su efecto visual. Pero en general dependen del punto de rocío y la temperatura de la superficie del terreno. Las heladas se generan cuando la temperatura de la superficie terrestre decae por debajo del punto de congelación. Las condiciones generales para que se forme una nevada son las siguientes: a) cielos despejados que provocan un enfriamiento radiactivo; b) los vientos tranquilos y ligeros que impiden una agitación en la atmósfera desarrollando una capa de temperaturas súper enfriadas en la superficie. Finalmente, la topografía local toma un rol importante en el desarrollo de las heladas: el aire frío se asienta en los valles ya que es más pesado que el aire cálido, por lo que el desarrollo de heladas es más común en estas zonas (https://www.weather.gov/arx/why_frost).

Para identificar las zonas topográficamente susceptibles a peligro por heladas en el municipio, se realizó un análisis de la topografía utilizando curvas de nivel del continuo digital de elevaciones del INEGI, a partir del cual se eligieron zonas bajas del municipio que representan valles, cuencas y hondonadas próximas a las montañas (CENAPRED, 2021b).

La zona achurada del mapa de la Figura 1 contiene elevaciones menores a 200 msnm y las líneas continuas representan cotas que varían de 100 a 350 msnm. Siendo estas elevaciones las más susceptibles a presentar heladas por su relieve. Del registro histórico se presentan alertas por heladas para los años 2007, 2015, 2020 y 2022 (ver Tabla 2 de la memoria de cálculo). Para los años analizados en las estaciones meteorológicas localizadas en Tijuana, no existen registros por

heladas, sin embargo, según el Atlas Nacional de Riesgos, el municipio de Tijuana está catalogado con un número de 1 a 60 días con heladas.

El análisis del mapa H01 se puede concluir que el municipio se encuentra expuesto a este fenómeno, principalmente en las zonas topográficamente bajas (valles cuencas y hondonadas), principalmente en la zona urbana y hacia Valle de las Palmas.

2.2 Tormentas de granizo

El granizo es una precipitación en formas de bolas o trozos irregulares de hielo, producidas por nubes convectivas, regularmente cumulonimbos (<http://glossary.ametsoc.o>). Ocurre cuando corrientes ascendentes de tormentas arrastran gotas de lluvia hacia áreas extremadamente frías donde se congelan y se convierten en hielo (<https://www.nssl.noaa.gov/research/hail/>). El granizo crece cuando chocan gotas de agua líquida y se congelan en la superficie del granizo, este cae cuando la corriente ascendente de la tormenta ya no puede soportar su peso. A pesar de que las precipitaciones en el municipio de Tijuana son menores que en el centro del país, el municipio ha presentado afectaciones por granizadas como lo marca el Fascículo de tormentas severas (CENAPRED, 2021c) en donde indica que en marzo de 1998 se presentó una granizada que dejó hasta 15 cm de espesor.

El mapa H02 (Figura 2) muestra el resultado de la recuperación de información histórica donde se encontraron cinco eventos de granizadas en los años 2016, 2019, 2022 y dos eventos en el 2021, varios de estos eventos se registraron junto con tormentas eléctricas (Tabla 3 de la memoria de cálculo). Cabe indicar que estas tormentas de granizo se han presentado en invierno y en temporada de ciclones tropicales. La Figura 2 muestra la localización aproximada de las afectaciones y se puede indicar que el fenómeno de granizadas se ha presentado en el municipio principalmente en la zona urbana de Tijuana.

2.3 Tormentas de nieve

Las tormentas de nieve pueden ocurrir cuando los cristales de hielo chocan en presencia de un líquido sobre enfriado, y se presentan en forma de precipitación sólida de aglomeraciones de

cristales transparentes, el tamaño de los copos depende de la temperatura y humedad de la atmosfera (CENAPRED, 2021c). Las nevadas ocurren generalmente en invierno ocasionadas por las masas de aire polar y los frentes fríos. Las zonas altas en México son las más propensas a que ocurran nevadas, siendo más acentuado este fenómeno en regiones altas como montañas o sierras como las que existen en el estado de Baja California.

Las nevadas generalmente ocurren en las zonas altas de Baja California, afectando principalmente al municipio de Tecate en especial la Rumorosa, sin embargo, cuando son más fuertes las condiciones climáticas estas nevadas se extienden hasta el municipio de Tijuana como lo muestra la Tabla 4 de la memoria de cálculo y el mapa de la Figura 3 en donde los resultados de la búsqueda indican que han ocurrido nevadas en las parte altas de los Cerros San Isidro y Cerro Colorado, además, de presentarse cerca de Boulevard 2000 y en la carretera hacia Tecate, los asteriscos azules, localización aproximada de estas observaciones. Las cotas superiores a 200 msnm nos muestran las zonas más altas, susceptibles a presentar el fenómeno de nevadas en la zona este y al sur del municipio. Como observa del mapa de la Figura 3 el municipio es afectado por el fenómeno de nevadas.

2.4 Ciclones tropicales

El termino ciclón tropical abarca los huracanes del hemisferio occidental y sus equivalentes de tifones y ciclones en otros lugares (<http://glossary.ametsoc.o>). Se clasifican según su intensidad como: a) depresión tropical, tormenta tropical y huracán. Los huracanes están categorizados de acuerdo con la escala Saffir-Simpson, esta es una escala que los clasifica según la intensidad del viento, siendo los más peligrosos los de escala 5. Un ciclón tropical es un sistema atmosférico cuyo viento circula en dirección ciclónica (en sentido contrario de las manecillas del reloj en el hemisferio norte), se desarrolla en la regiones tropicales y su energía proviene principalmente del calor y de la humedad que se transfiere del océano al aire en los niveles bajas de la atmosfera (CENAPRED, 2007).

En Tijuana se han registrados dos eventos de ciclones tropicales cuya trayectoria ha impactado al municipio de Tijuana (Figura 4), el primero clasificado como tormenta tropical "Jen-Kath", el cual se presentó del 17 al 19 de septiembre de 1963 con vientos de 45 mph, el cual se debilito y

causó varias pulgadas de lluvia. El más reciente “Huracán Hillary” se desarrolló del 16 al 21 de agosto del 2023, impacto al municipio de Tijuana como una tormenta tropical el 20 de agosto con vientos sostenidos de 75 km/h, y rachas de 95 Km/h. Se pronosticaron lluvias puntuales fuertes (<https://www.gob.mx/cenapred/es/articulos/huracan-hilary-se-aproxima-a-la-peninsula-de-baja-california>).

La tormenta Hillary a su paso por el municipio de Tijuana provocó inundaciones, autos varados y accidentes de tránsito, así como deslizamientos de tierra y encharcamientos (<https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2023/8/20/video-autos-varados-inundaciones-por-tormenta-tropical-en-baja-california-531601.html>).

De la recuperación de la información podemos observar que a pesar de que algunos huracanes no han afectado directamente al municipio, los remanentes de estos fenómenos meteorológicos han dejado lluvias intensas que han afectado al municipio, principalmente dejando inundaciones súbitas como se muestra en la Tabla 5 de la memoria de cálculo.

2.5 Tornados históricos

Los tornados son columnas de aire que giran violentamente, están en contacto con la superficie del suelo y que pueden ser producidas por nubes convectivas y tormentas, estos pueden producir importantes daños materiales, lesiones y muertes (Honerkamp et al., 2020). Los tornados están suspendidos de una nube cumuliforme y a menudo, visible como una nube en forma de embudo y/o escombros o polvo que circulan en el suelo” (<http://glossary.ametsoc.o>). Es uno de los fenómenos más violentos en los cuales se han llegado a medir velocidades superiores a 130 m/s.

Para la identificación del riesgo en Tijuana se obtuvo información del Atlas Nacional de Riesgos, en donde marca un tornado, sin embargo, no precisan la fecha exacta. En el 2001 y 2020 existen reportes de que ocurrieron tornados que tiraron árboles en las calles 5 y 10 en el municipio. Por otro lado el 19 de marzo del 2020 se observaron varias trombas marinas en diversos puntos en Playas de Tijuana. De la recuperación de información se puede observar que es un fenómeno

poco común, sin embargo los registros indican que se ha manifestado en el municipio, como se observa en la Figura 5 del peligro por tornados en el municipio.

2.6 Vientos Santa Ana

Los vientos de Santa Ana están asociados con temperaturas anómalas en la costa sur de California. El aire seco que fluye sobre las cordilleras costeras del sur de California desde la Gran Cuenca (Great Basin, EE.UU.) y el desierto superior de Mojave en California hasta el nivel del mar, este se calienta de forma adiabática (Gershunov et al., 2021). Este fenómeno produce eventos de calor costeros, sin embargo, los vientos de Santa Ana regionales más fuertes tienden a ser fríos. Los eventos calientes, están precedidos por el calentamiento de la Gran cuenca y condiciones secas (en EE.UU.), los fríos están precedidos por precipitaciones en el sureste y sur de California y la acumulación de nieve en la Gran Cuenca. Los vientos Santa Ana es un fenómeno regional que afecta ciudades altamente pobladas como Tijuana, San Diego, Los Ángeles etc. En Baja California esta condición ambiental se presenta durante el otoño e invierno, a su paso levanta tolveneras y favorece la aparición de incendios forestales (Ortiz Figueroa, 2003). Se han observado velocidades en la superficie con magnitud promedio entre 28 y 56 km/h (Miguel Miller, 2012; Zamora-Machado et al., 2023). El Servicio Meteorológico Nacional de estados Unidos reserva este término para velocidades de más de 146 km/h. La zonificación eólica generada por la CFE (Atlas Nacional de Riesgos) cataloga al municipio con velocidades de 100 a 130 y 130 a 160 Km/h (ver Figura 6). De la búsqueda en periódicos locales se obtuvieron 25 notas informativas del año 2012 al 2023 (Figura 6).

Las afectaciones más importantes en el municipio de Tijuana fueron incendios forestales, así como caídas de árboles y espectaculares. Los más graves se presentaron en la zona urbana, principalmente la colonia de Cumbres de Rubí donde los vientos favorecieron el incendio de 30 casas en el 2020. También se presentaron afectaciones en los servicios de la CFE en el 2019. Como se puede observar de la Figura 6 la zona urbana del municipio ha presentado numerosas afectaciones por vientos de Santa Ana, por lo que se considera un peligro recurrente en el municipio.

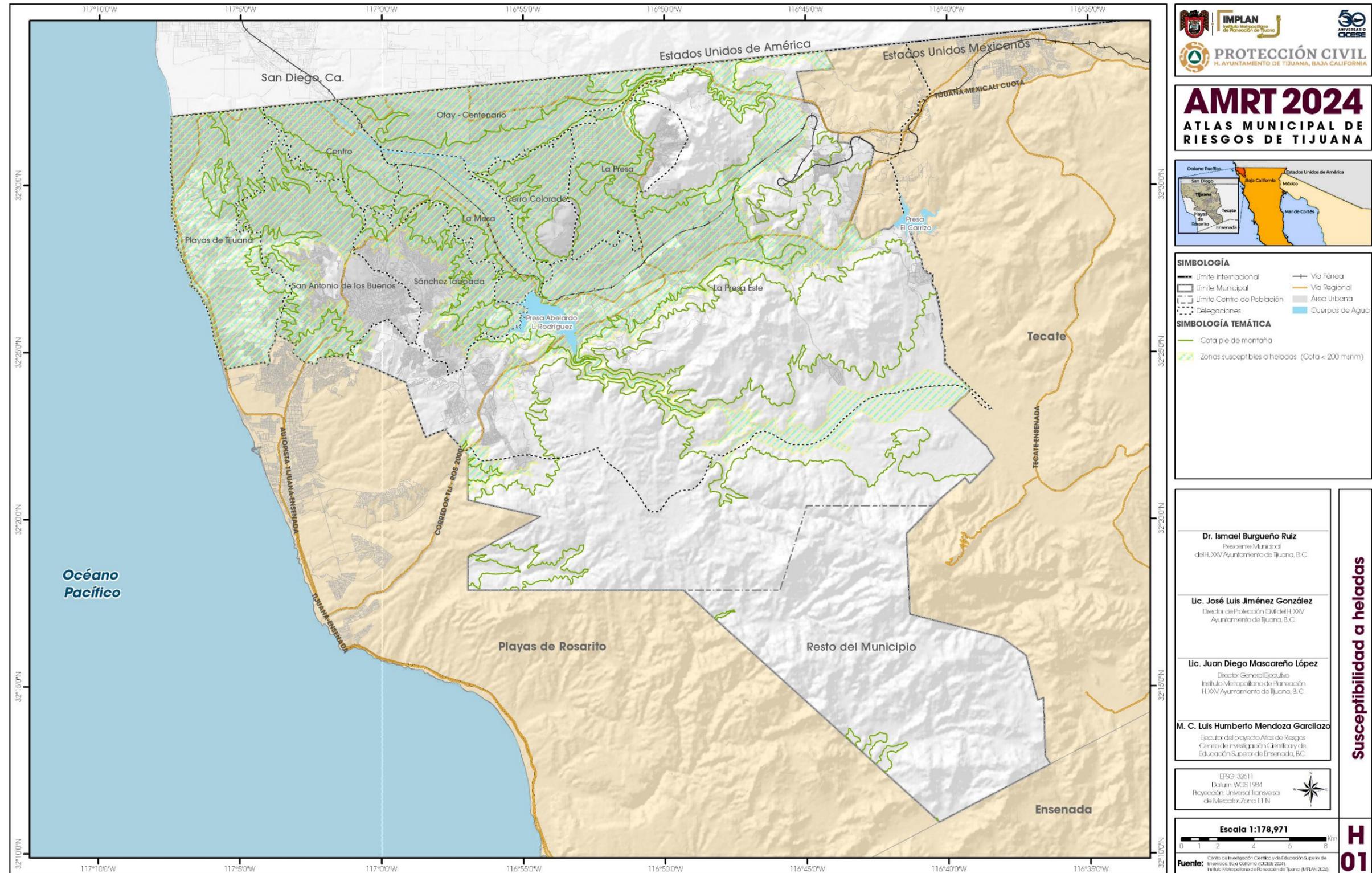


Figura 1. Susceptibilidad a heladas

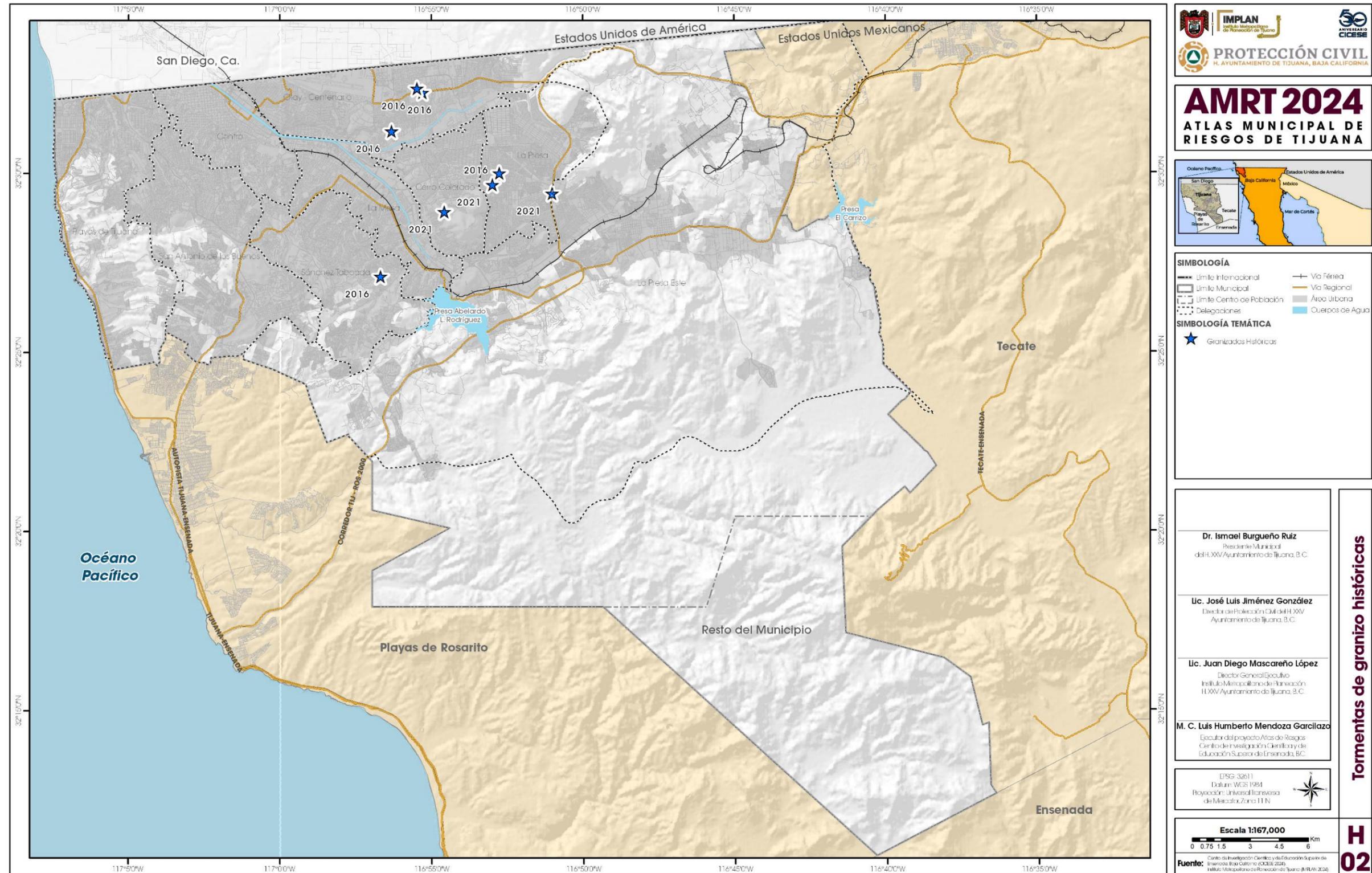


Figura 2. Tormentas de granizo históricas

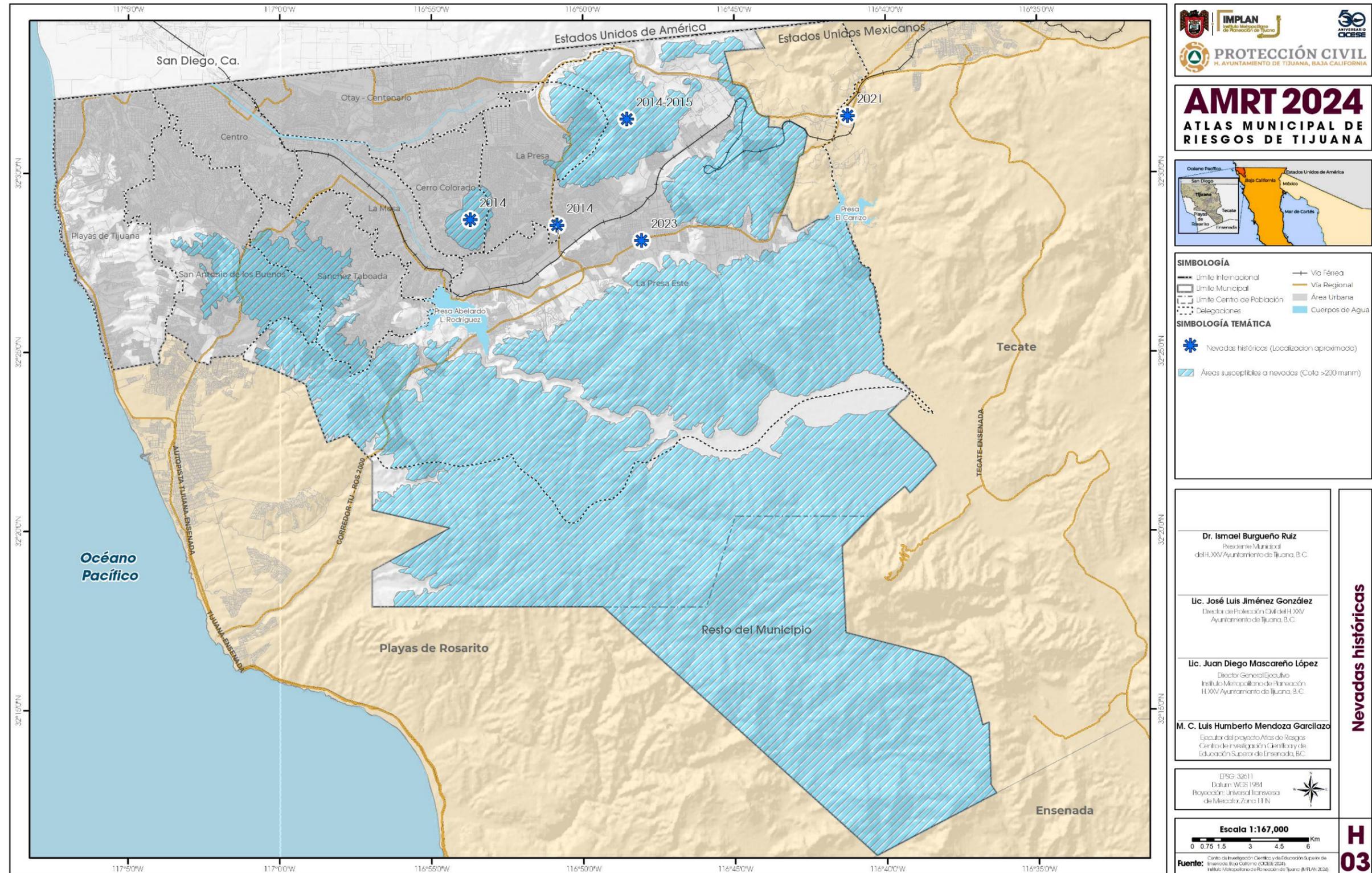


Figura 3. Nevadas históricas

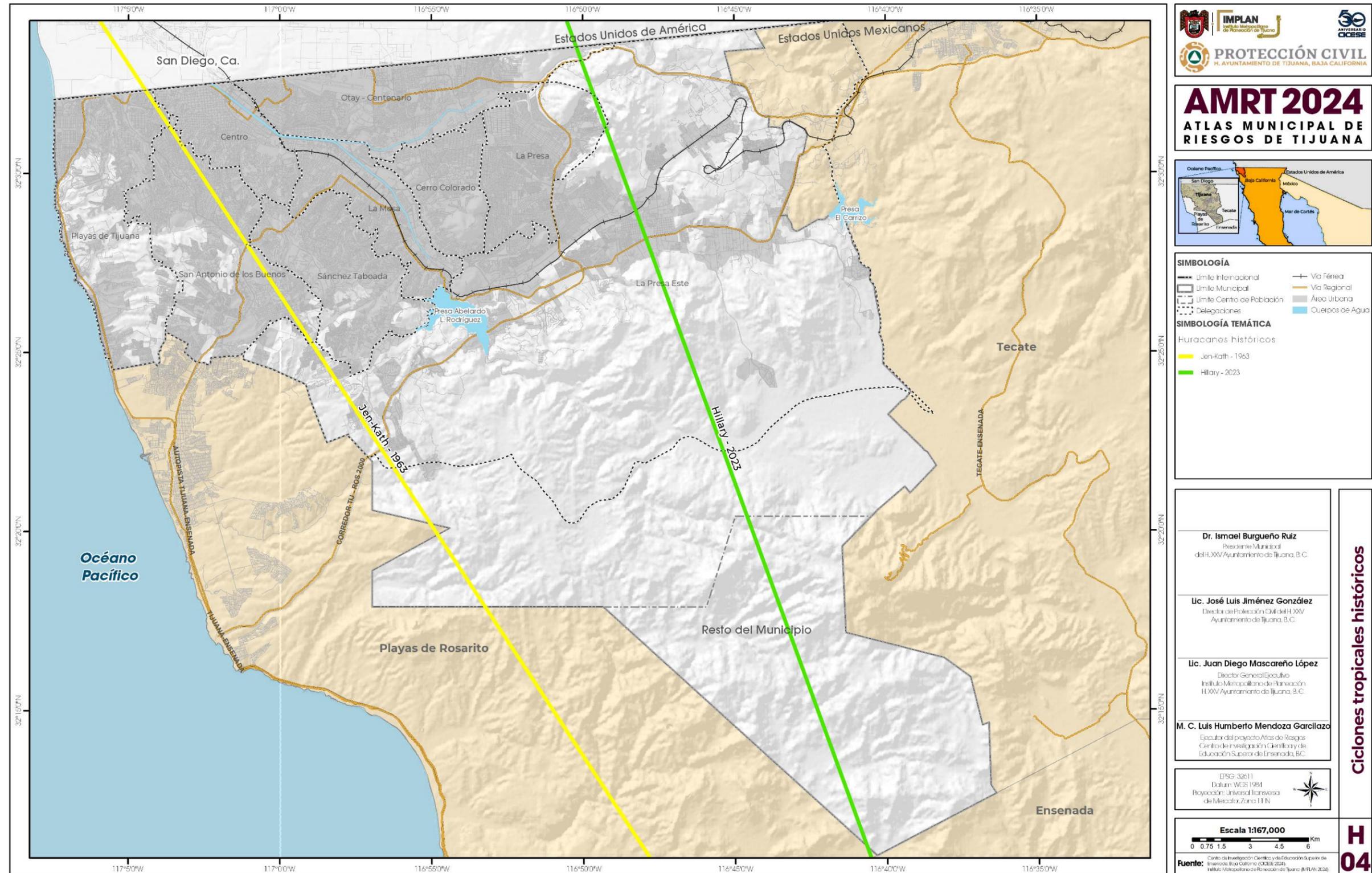


Figura 4. Ciclones tropicales históricos

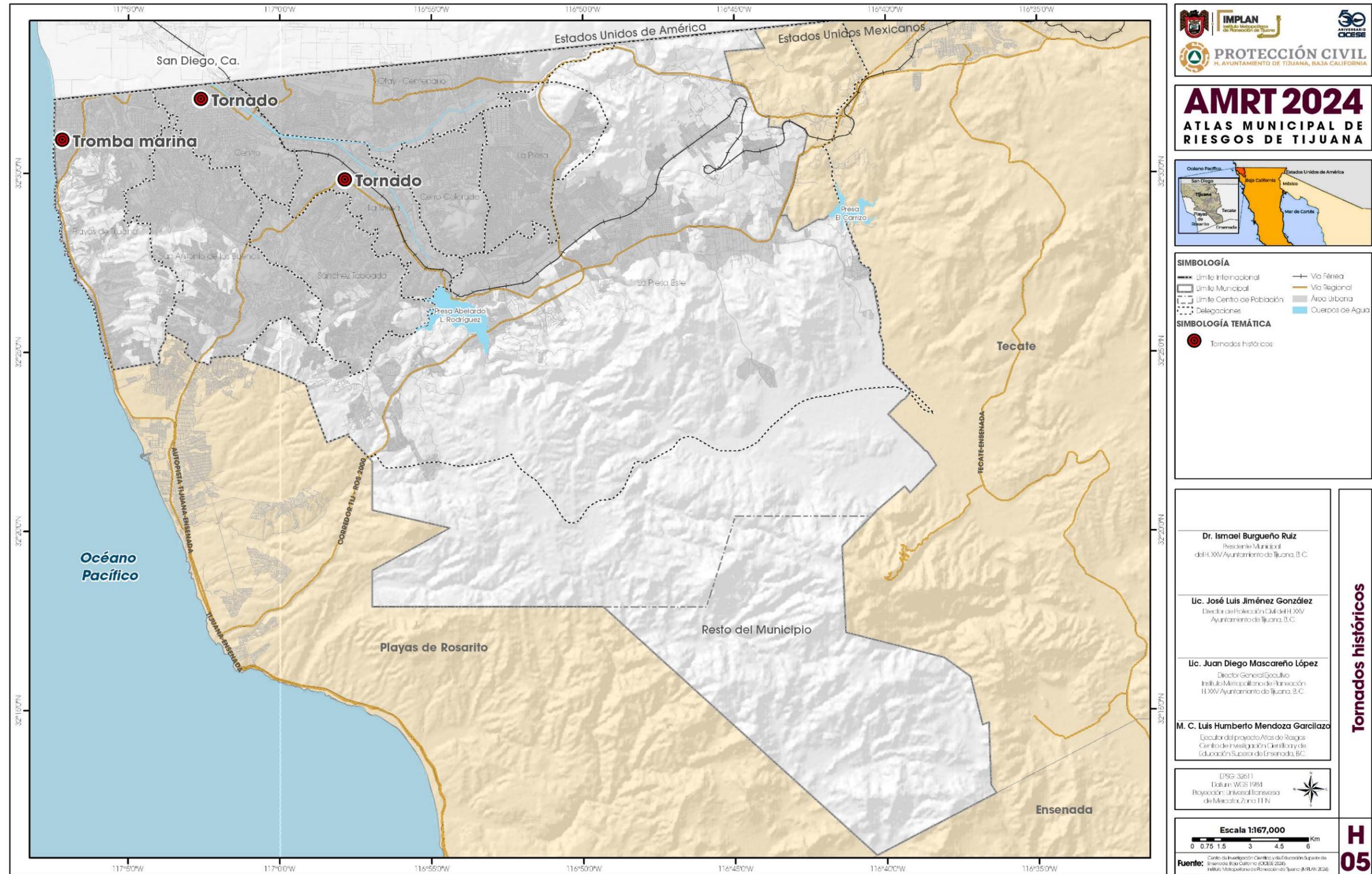


Figura 5. Tornados históricos

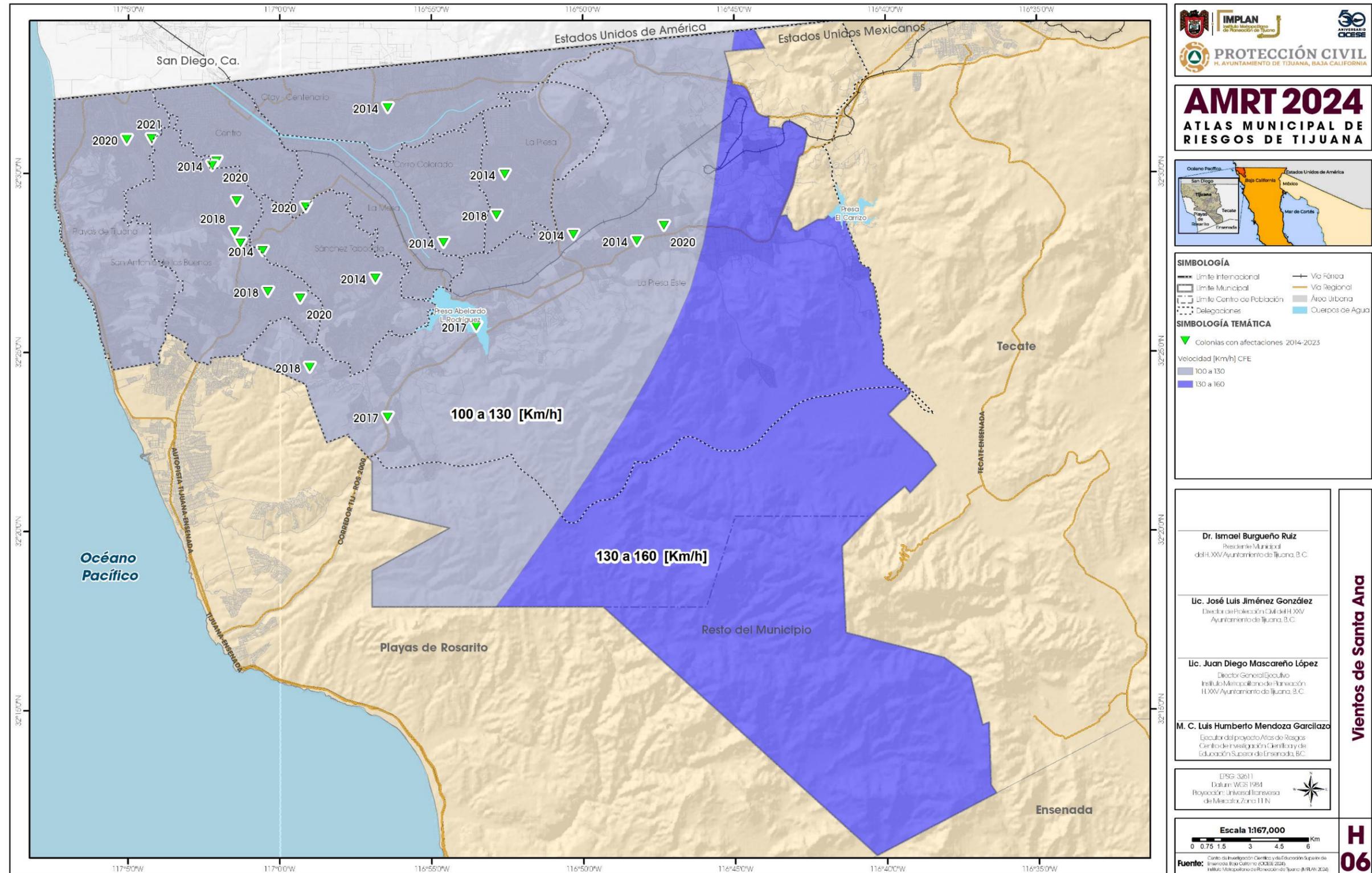


Figura 6. Vientos de Santa Ana

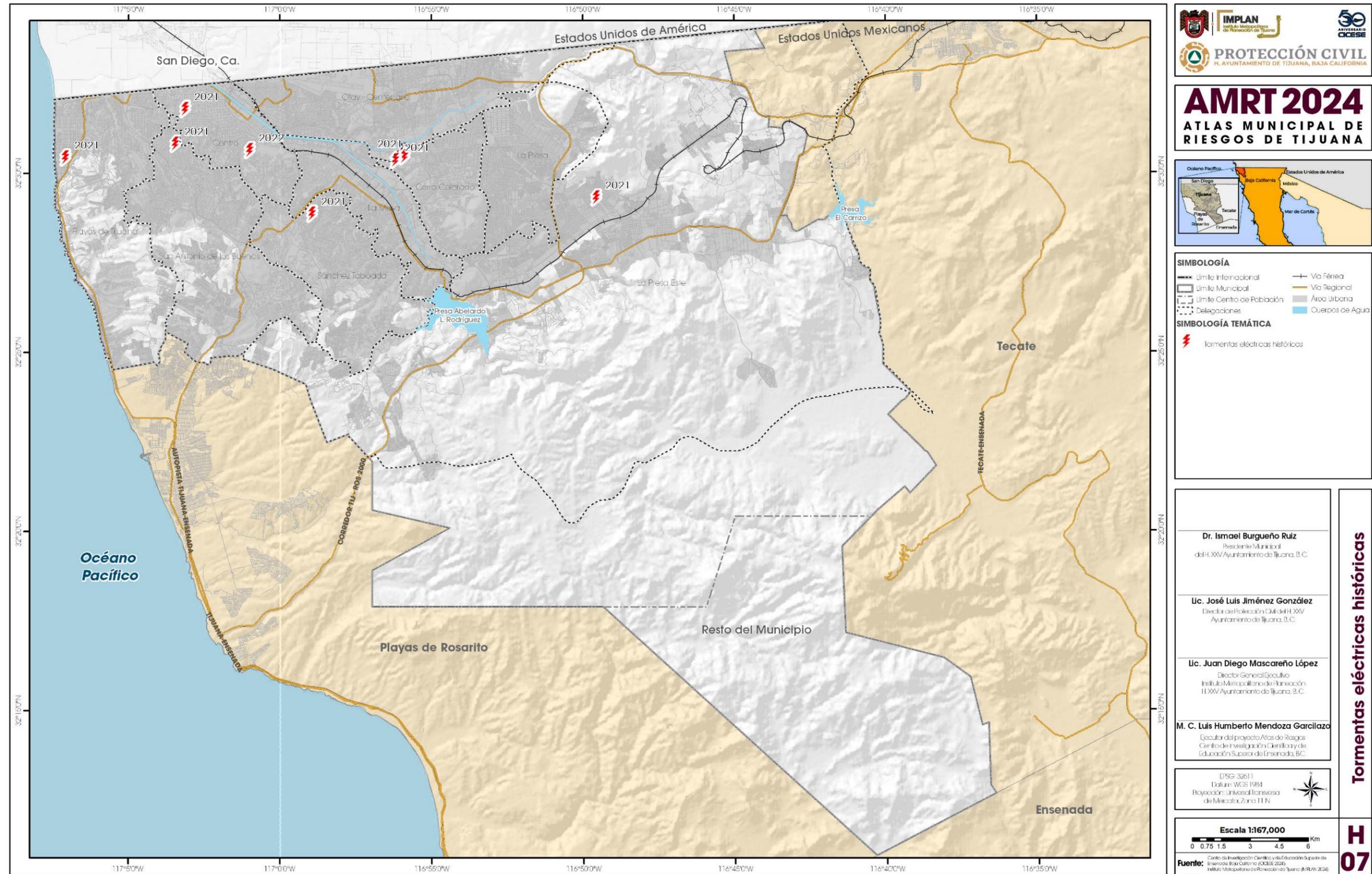


Figura 7. Tormentas eléctricas históricas

2.7 Tormentas eléctricas

Una tormenta eléctrica es aquella tormenta que viene acompañada por descargas de electricidad atmosférica, que se manifiestan como una luz brillante (conocido como rayo o relámpago) y por el sonido que produce (trueno). El rayo se puede definir como una chispa eléctrica muy larga (mayor que aproximadamente 1 km). La mayoría de los relámpagos se generan en tormentas eléctricas y se caracterizan por tener una longitud de 5 a 10 km, en el extremo superior a 100 km (Dwyer & Uman, 2014). Las tormentas se asocian a nubes convectivas (cumulonimbus), las cuales alcanzan una altura máxima de 10 a 20 km y es producida por corrientes ascendentes intensas asociadas a la condensación de aire húmedo (Uman, 1984).

La Figura 7 muestra localización aproximada de colonias afectadas por tormentas eléctricas, basadas principalmente en las notas informativas locales (tabla 8, memoria de cálculo). Se destaca el año 2021 con la presencia de tormentas eléctricas con truenos y relámpagos en gran parte de la zona urbana de Tijuana (Figura 7) estas se han presentado junto con los fenómenos de granizo en invierno y verano. En menor medida se obtuvo información para el resto de los años. Por lo que el municipio está expuesto al peligro por tormentas eléctricas.

2.8 Ondas cálidas y gélidas

Las ondas de calor y de frío son fenómenos de temperaturas extremas con un alto potencial de causar impactos negativos en la salud humana y en los sistemas naturales y socioeconómicos, dependiendo de la duración e intensidad (Serrano-Notivoli et al., 2022).

2.8.1 Identificación de peligro por ondas cálidas

Las ondas de calor (múltiples días calurosos consecutivos) presentan una amenaza importante a la vida humana (Baldwin et al., 2019). Una onda de calor (u ola de calor) es un periodo de clima anormalmente caluroso que dura más de dos días, los días de calor pueden ocurrir con o sin alta humedad (<https://www.weather.gov/safety/heat-during>). El municipio de Tijuana está clasificado con un *índice de calor alto* (Arlette et al., 2018), donde uno de los criterios utilizados en México para definir una onda de calor es un umbral de 30 y 35° en tres días consecutivos (Herrera, 2012).

García-Cueto et al., 2021 realiza un análisis de temperaturas extremas en 12 ciudades de México, entre ellas la ciudad de Tijuana (estación Tijuana) en el periodo de 1950 a 2012 en este periodo se tiene registrada una temperatura máxima de 45°C y calcularon temperaturas extremas para cinco periodos de retorno, encontrando temperaturas de 41.1, 42.2, 43.9 y 45.9 para los periodos de retorno de 10, 20, 50 y 100 años.

Como primera etapa se realizó un análisis del comportamiento histórico de temperaturas máximas en el municipio de Tijuana publicadas por el Servicio Meteorológico Nacional (<https://smn.conagua.gob.mx/>), la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/>) y la estación General Abelardo L. Rodríguez International Airport (<https://es.weatherspark.com/>). De esta información se generó una base de datos con los días que rebasan los umbrales de temperatura de 34°, 39° y 43°. Observándose que el municipio está expuesto al fenómeno de temperaturas extremas mayores al umbral de 34° (memoria de cálculo). Del análisis de la información histórica regional de Baja California en bases de datos internacionales se obtuvo pronósticos por altas temperaturas por una onda de calor en del 13 al 15 de septiembre del 2017 y otra para el 21 de mayo del 2018 (<https://reliefweb>). En los medios locales se recuperaron un total de 21 notas asociadas con temperaturas extremas y ondas de calor de los años 2014 al 2023 (Tabla 8 de la memoria de cálculo), en donde las principales afectaciones a la población son golpes de calor y la propagación de incendios.

2.8.1.1 Periodos de retorno ondas cálidas

En el municipio de Tijuana las estaciones meteorológicas en operación y con datos actualizados son escasas (ver Tabla 1), por lo que se recurrió a utilizar series de tiempo de diferentes épocas (estaciones suspendidas) y las que cuentan con datos actualizados (operando), estos son publicados por la Comisión Nacional del Agua y por AOML de la NOAA con la finalidad de cubrir con información a la mayor parte del municipio. Se realizó este análisis para las series de temperaturas diarias y se utilizó la temperatura máxima anual para el cálculo de valores extremos (memoria de cálculo).

El resultado del análisis de las series de tiempo de valores extremos para el municipio de Tijuana se presenta en la Tabla 1. Para obtener una distribución en todo el municipio interpolaron los

valores de retorno utilizando como límite el municipio de Tijuana. Cabe recordar que los valores de las estaciones Valle Redondo, Tijuana, Tijuana CFE y Planta de Bombeo en Rosarito, presentan aproximadamente 40 años sin datos. Estos mapas se muestran de la Figura 8 a Figura 11.

Tabla 1. Estaciones utilizadas, temperatura máxima registrada en la estación, año de registro, y número de años utilizados para el cálculo de temperaturas extremas máximas para cada periodo de retorno.

Nombre	No. Estación	Situación	T máxima °C	Año de T Max	No. Años utilizados	5T	10T	25T	50T
San Diego Brown Field, Ca. Us.	USW00003178	Operando	43.3	2006	27	39.7	41.1	42.9	44.3
Presa Rodríguez	2038	Operando	45	2010/2020	92	40.8	42.6	44.8	46.5
La Puerta	2030	Operando	51	1962	76	43.4	44.9	46.8	48.2
La Misión	2077	Operando	41	2009	21	39.1	40.6	42.6	44.0
El Florido	2156	Operando	46	1988	35	42.5	43.9	45.6	46.8
Ejido Carmen Serdán	2114	Operando	49	2023	40	43.7	46.9	50.8	53.8
Valle Redondo	2070	Suspendida	47	1934	23	44.7	47.2	50.5	52.9
Valle De Las Palmas	2069	Suspendida	50	2006	68	45.3	47.2	49.5	51.2
Tijuana (CFE)	2073	Suspendida	47.5	1982	12	39.7	43.7	48.7	52.5
Tijuana	2068	Suspendida	49	1963	37	40.5	42.8	45.7	47.8
Planta De Bombeo	2017	Suspendida	41.5	1975	23	38.0	40.1	42.9	44.9

Como se observa en los resultados, las estaciones con temperaturas más altas se localizan en el este del municipio, en particular las estaciones La Puerta, Valle Redondo, Valle de las Palmas y Ejido Carmen Serdán que se localizan fuera del municipio (Tecate) y presentan temperaturas mayores a 40°C. Las estaciones Tijuana y Tijuana CFE presentan también un registro de temperaturas mayores a 44°C a un periodo de retorno de 50 T, sin embargo, necesita verificarse con datos recientes. Como se observa en la Tabla 1 la mayor parte del municipio rebasa el límite superior de tolerancia a altas temperaturas (>35°C), en donde se producen golpes de calor, con inconciencia en algunas personas y las enfermedades aumentan (SEDATU, 2014).

2.8.2 Identificación de peligro por ondas gélidas

Las temperaturas mínimas extremas no son lo mismo que las ondas gélidas, las primeras se presentan una vez al día y pueden llegar a ser extremas, dependiendo de la región, pueden ser menores a 0 °C; por otro lado, las ondas gélidas son periodos de más de tres días con temperaturas más bajas que la temperatura promedio de una región, es decir, puede presentarse temperaturas por debajo de los 0°C en una región en la que la temperatura promedio es de 16 °C (CENAPRED, 2021a).

El análisis por ondas gélidas se realizó de forma similar que el de ondas cálidas. Como primera etapa se analizaron las temperaturas mínimas registradas por las estaciones meteorológicas aledañas al municipio de Tijuana y son publicadas por el Servicio Meteorológico Nacional (<https://smn.conagua.gob.mx/>), la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/>) y la estación General Abelardo L. Rodríguez International Airport (<https://es.weatherspark.com/>).

Se obtuvo que la temperatura mínima anual registrada fue de -11 °C en la estación Ejido Carmen Serdán en el 1956. Por otro lado en la actualización de capas de índice de peligro y riesgo del Atlas Nacional de Riesgos por ondas cálidas y ondas gélidas (CENAPRED, 2021a), indica para el municipio de Tijuana una temperatura mínima absoluta en un rango de -11.1 a -6.4 °C, mostrando un índice alto de peligro por bajas temperaturas.

A nivel regional las bases de datos internacionales arrojaron información de los frentes fríos que azotaron a Baja California (<https://reliefweb>). Principalmente para los años 2013 al 2023 en donde se registraron temperaturas de 0 a -5° C en las sierras de Baja California. De la base de datos DESINVENTAR, indican que existen muertes asociadas a bajas temperaturas en enero del 2012. En la recuperación de información a nivel local se encontraron 15 notas informativas del año 2014 al 2023; el año con mayor número de registros es el 2022. También se encontraron 4 notas relacionadas con pérdidas humanas debido a las temperaturas extremas. Esta información se localiza en la Tabla 9 de la memoria de cálculo.

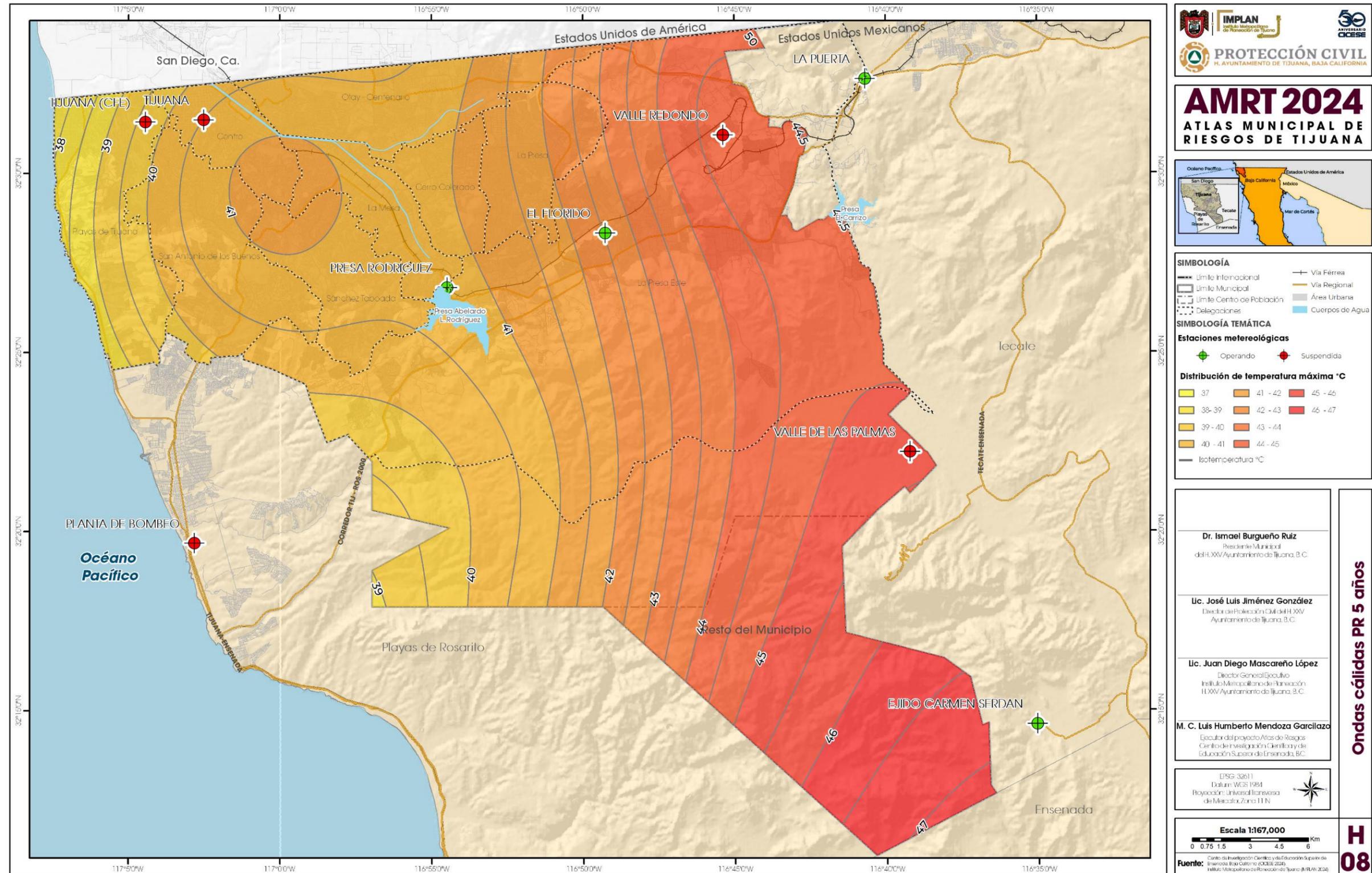


Figura 8. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 5 años

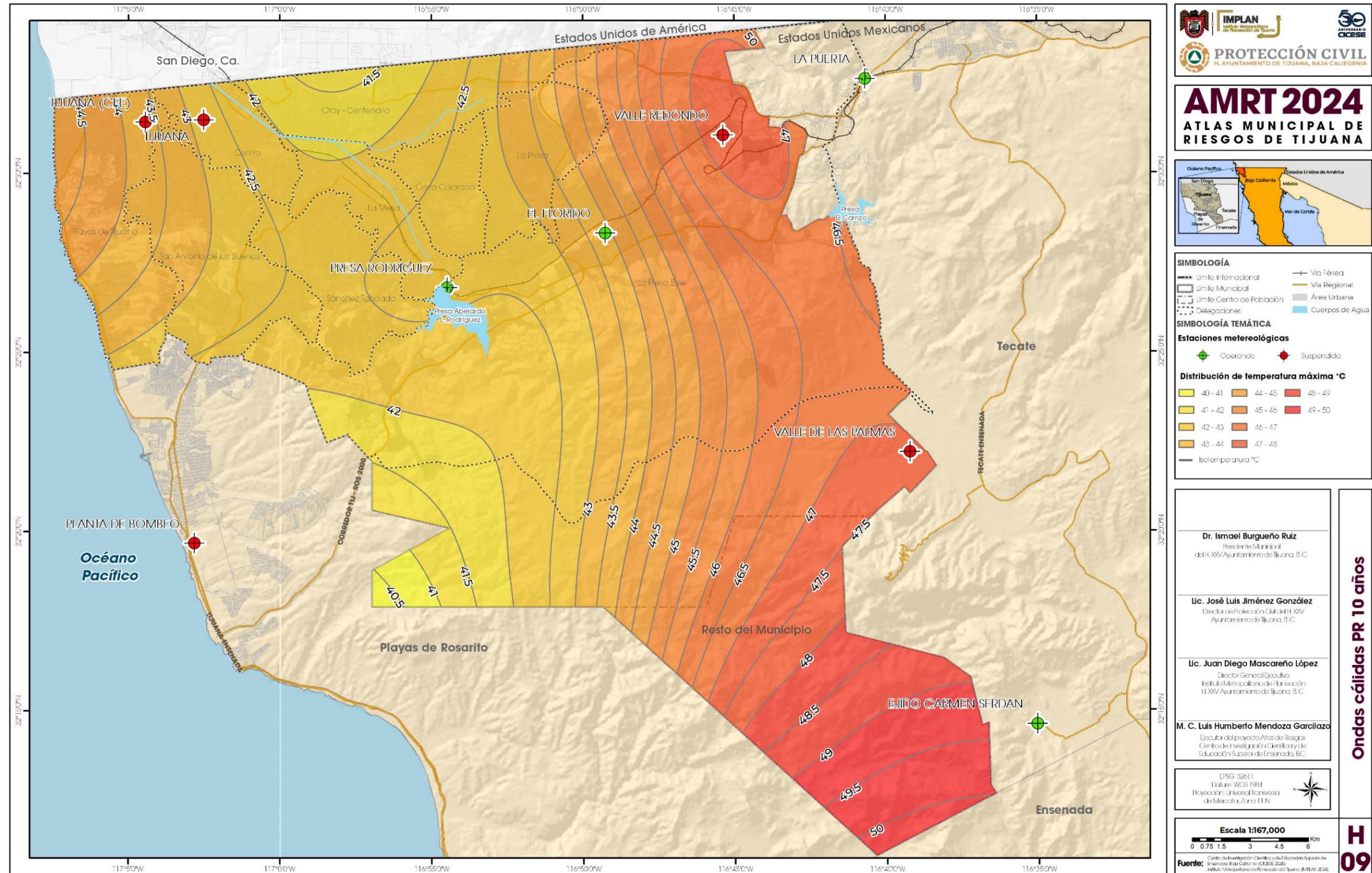


Figura 9. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 10 años

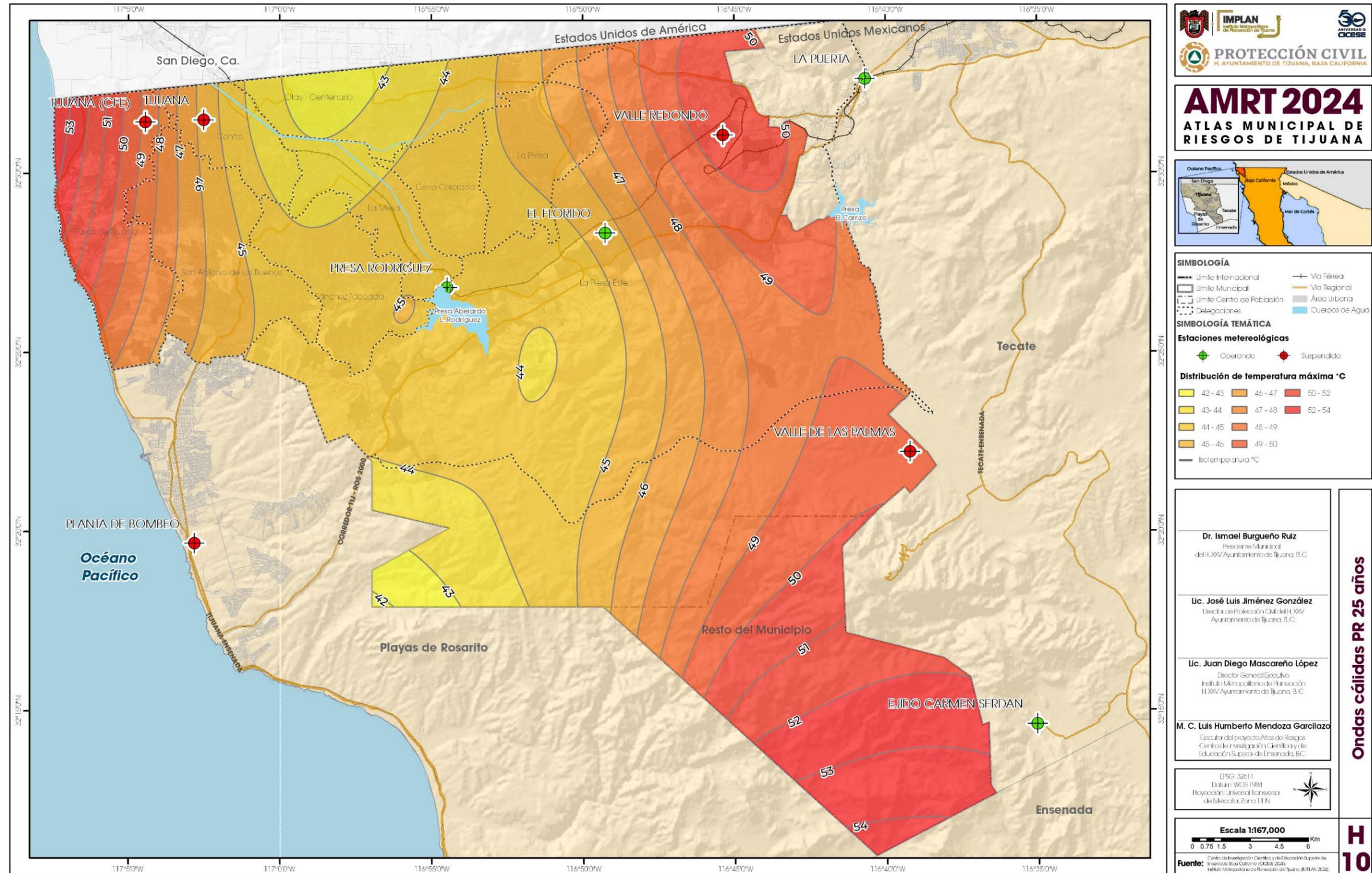


Figura 10. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 25 años.

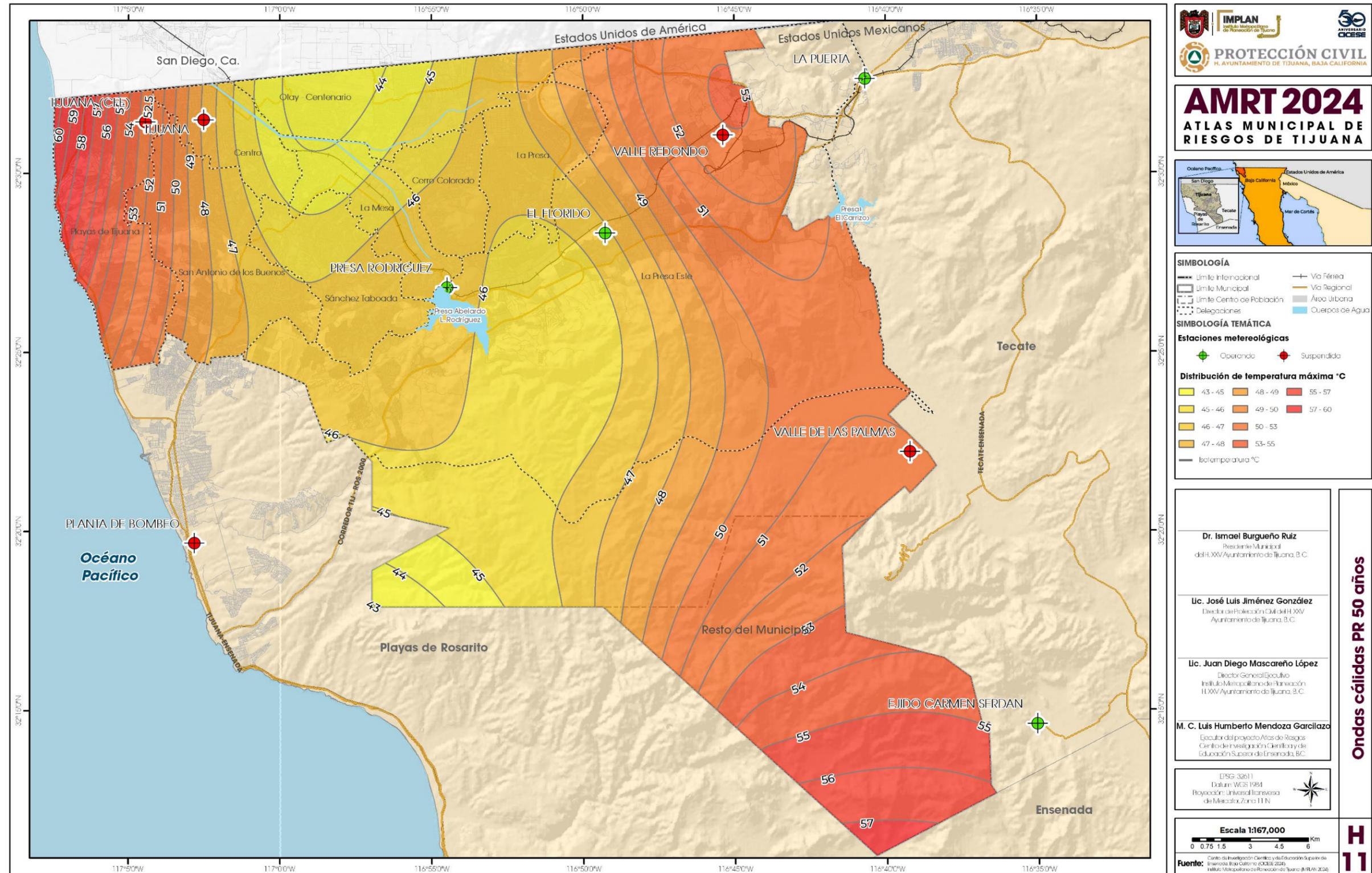


Figura 11. Periodo de retorno de temperaturas máximas a 50 años.

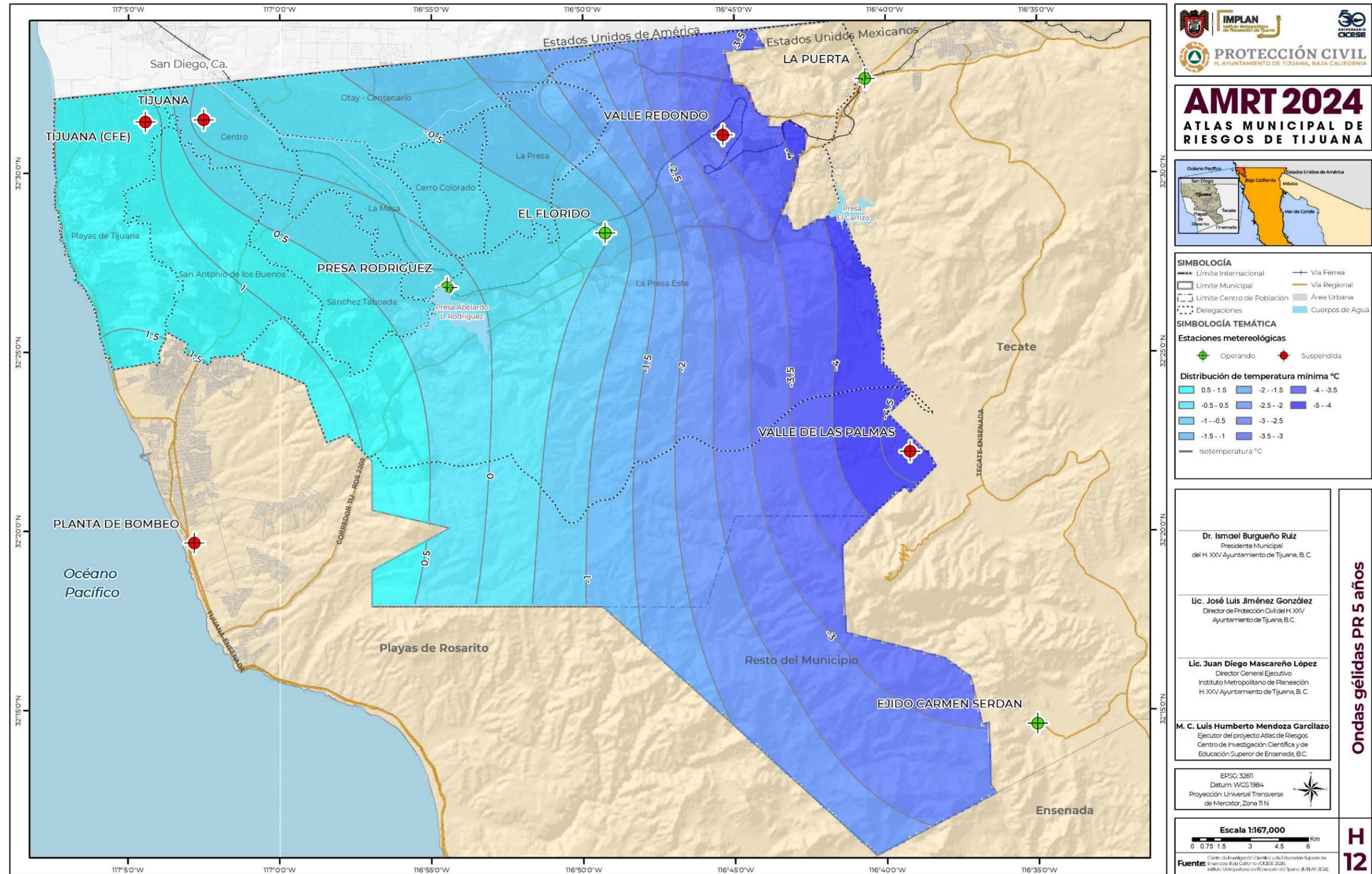


Figura 12. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 5 años

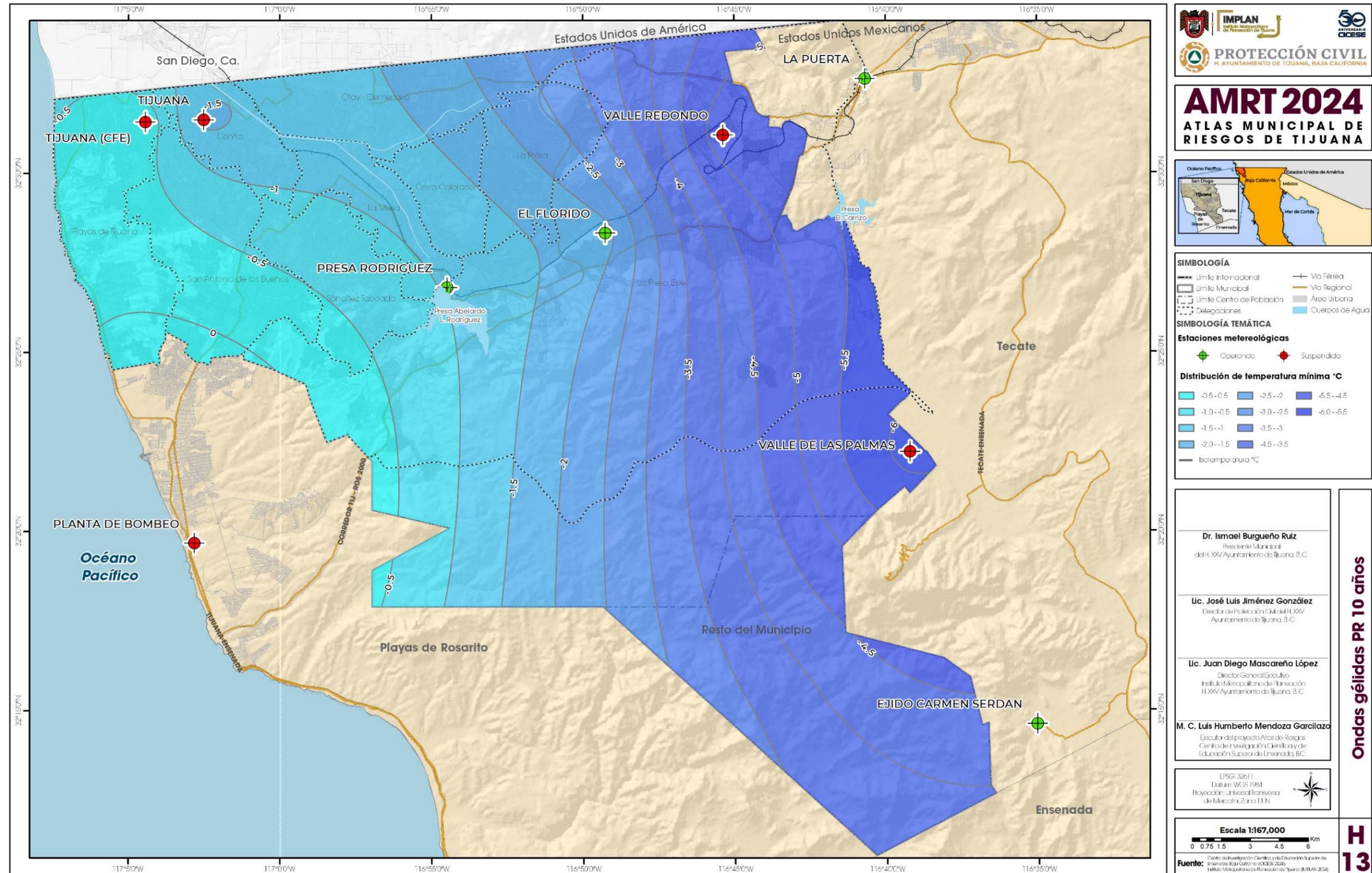


Figura 13. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 10 años

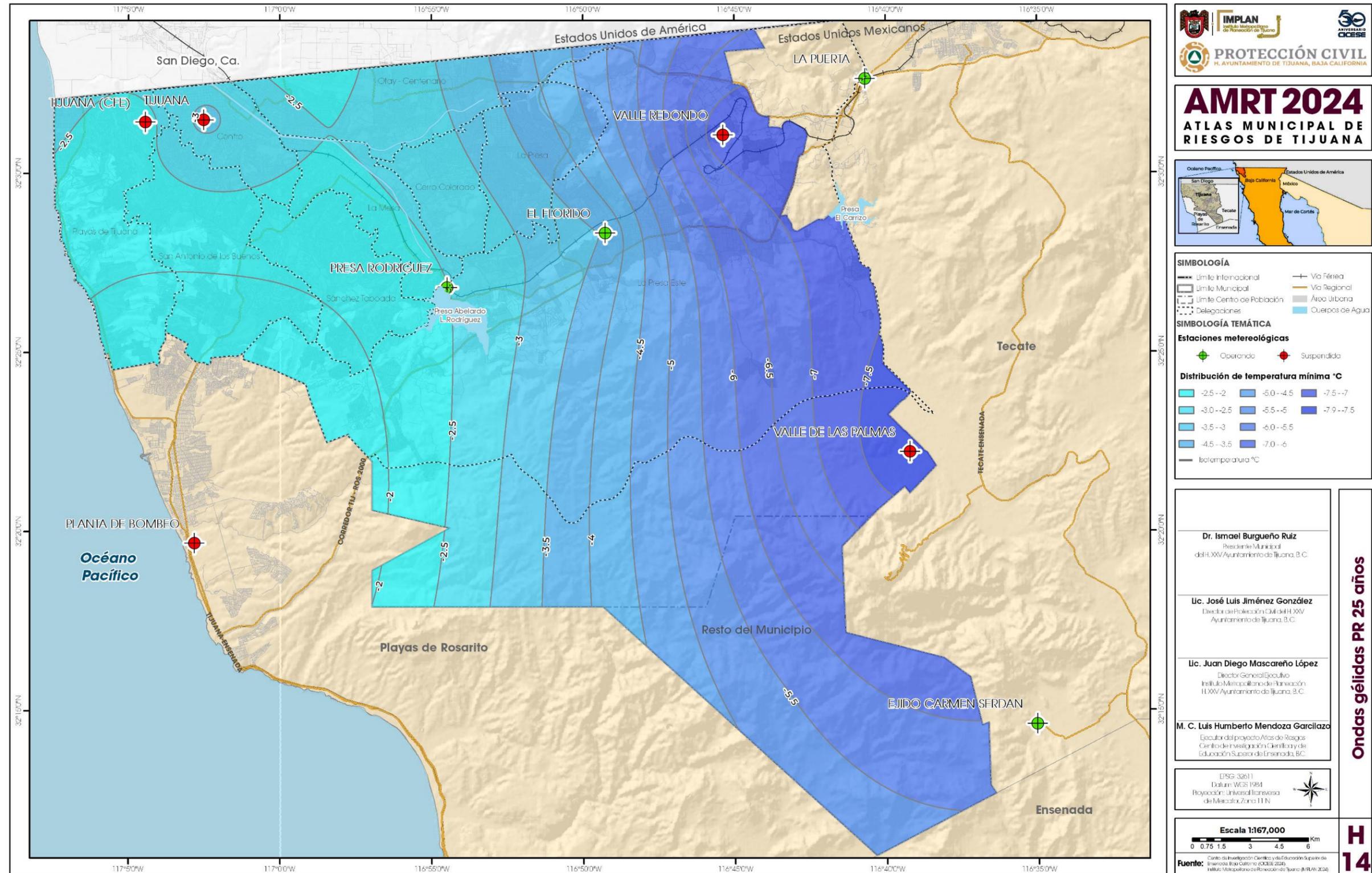


Figura 14. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 25 años

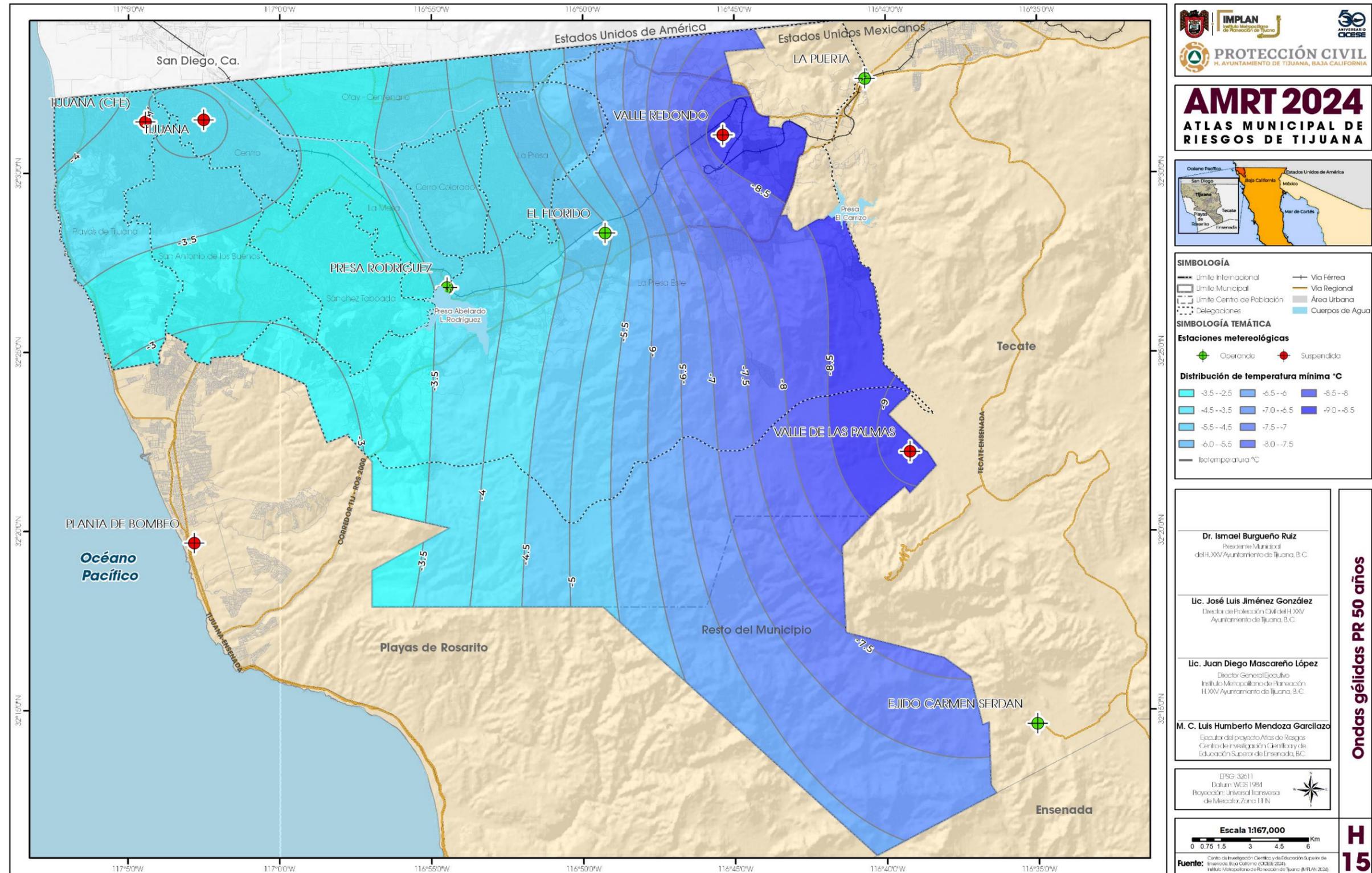


Figura 15. Periodo de retorno de temperaturas mínimas a 50 años

2.8.2.1 Periodos de retorno ondas gélidas

Como se indicó en la sección 1.8, las ondas gélidas también son un fenómeno climático extremo que afecta al municipio de Tijuana principalmente en la temporada invernal. Como es de esperarse las temperaturas mínimas extremas se presentan en al sur y este del municipio en las estaciones La Puerta, Valle Redondo, Valle Las Palmas y Ejido Carmen Serdán. En la zona urbana las temperaturas mínimas se presentan en la estación El Florido y Presa Rodríguez en la que se ha calculado una temperatura extrema mínima de -3.52 a -4.87 °C para un periodo de retorno de 50 años. Los mapas de periodo de retorno para temperaturas mínimas extremas se muestran de las Figura 12 a la Figura 15. Las estaciones Tijuana y Tijuana CFE alcanzan temperaturas bajo cero, sin embargo, se recuerda que estas estaciones presentan un déficit de datos (se analizó la serie completa disponible), por lo que, el análisis no está actualizado en los 40 años recientes.

Tabla 2. Estaciones utilizadas en el análisis, temperatura máxima registrada, año de registro, y número de años (serie de tiempo) para el cálculo de temperaturas extremas mínimas para cada periodo.

Nombre	No. Estación	Situación	T mínima °C	Año de T Min	No. Años utilizados	5T	10T	25T	50T
San Diego Brown	USW0000317	Operando	-2.7	2007	27	-0.4	-1.1	-2.0	-2.6
Field, Ca. Us.	8								
Presa Rodríguez	2038	Operando	-6	1969	92	0.1	-1.0	-2.5	-3.6
La Puerta	2030	Operando	-9	1973	76	-4.2	-5.3	-6.8	-7.8
La Misión	2077	Operando	-2	2008	21	-1.0	-1.7	-2.6	-3.2
El Florido	2156	Operando	-4	1990/2000/ 2013	35	-0.4	-1.8	-3.5	-4.8
Ejido Carmen Serdán	2114	Operando	-8	2011	40	-4.0	-5.8	-8.1	-9.7
Valle Redondo	2070	Suspendida	-8	1987	23	-3.7	-5.4	-7.4	-9.0
Valle De Las Palmas	2069	Suspendida	-11	1956	68	-4.8	-6.2	-8.0	-9.3
Tijuana (CFE)	2073	Suspendida	-1	1971	12	1.5	-0.2	-2.4	-4.0
Tijuana	2068	Suspendida	-5	1973	37	-0.4	-1.6	-3.2	-4.3
Planta De Bombeo	2017	Suspendida	0	1972	23	2.1	0.9	-0.7	-1.9

Para realizar un análisis confiable en todo el municipio se recomienda instalar un mayor número de estaciones meteorológicas en la zona urbana y en el resto del municipio. Con la finalidad de mejorar la cobertura y estimación de temperaturas extremas en el municipio.

2.9 Sequía

La sequía es el proceso natural errático, resultado del déficit de precipitaciones con relación a la precipitación media durante largos periodos de tiempo, es decir llueve mucho menos que lo registrado normalmente en un periodo de tiempo. Este proceso provoca incremento de las temperaturas, la evapotranspiración, la insolación, menos nubosidad. Como consecuencia ocurre el desbalance hídrico en las cuencas, debido a la menor escorrentía; la percolación profunda se reduce y, por tanto, se afecta la recarga de las aguas subterráneas, con impacto socioeconómico, social y ambiental (Wilhite y Glantz, 1985; Del-Toro-Guerrero y Kretschmar, 2020; Rosales-Ibarra, 2021).

El mapa de la Figura 16 (HI6_Intensidad de sequía) representa la severidad de la sequía con el impacto de la sequía histórica en el municipio de Tijuana durante los últimos 10 años. La clasificación de la severidad de la sequía es asignada por el monitor de sequía del Servicio Meteorológico Nacional mostrada en la Tabla 3. El impacto de la sequía muestra las noticias de las afectaciones de la sequía en todo el municipio de Tijuana, se representa por las estrellas amarillas.

La sequía reportada por el SMN indica que para los años 2014 al 2016 la sequía en Tijuana se clasificó como extrema, con un impacto de largo periodo (L), típicamente mayor a seis meses, de acuerdo con NADM. El 2018 se comportó como un año relativamente seco, donde se evaluó la sequía de mayo a noviembre como severa. Los inicios del 2019 se consideraron de anormalmente seco, sin embargo, a finales de este año y durante el 2020 se reportó como un período sin sequía. Los primeros meses del 2021 fue anormalmente seca problemática que se agudizo a severa a partir del mes de mayo de ese año hasta enero del 2023, fecha donde se incrementaron las precipitaciones evaluándose Tijuana sin sequía hasta finales del presente año.

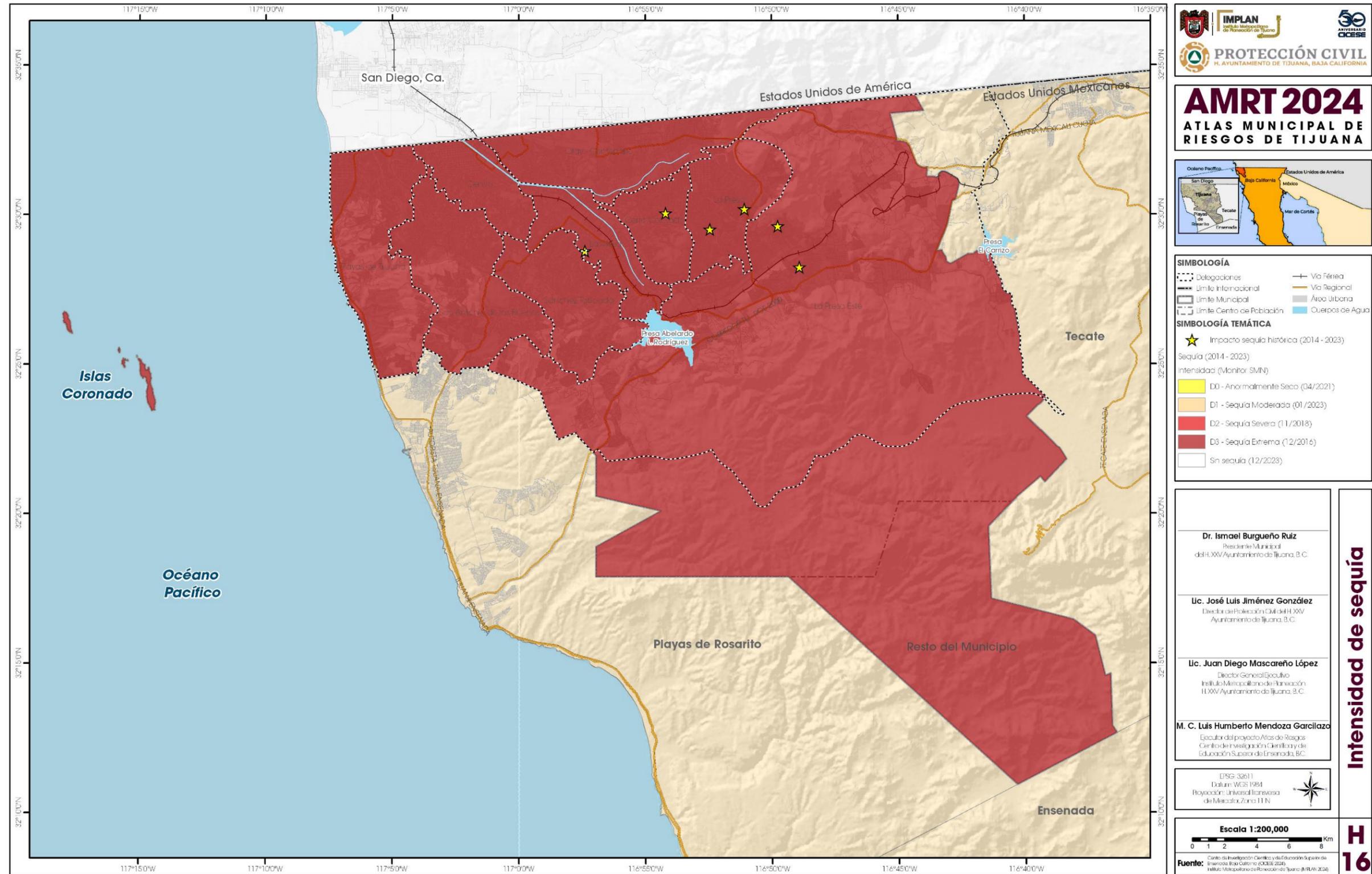


Figura 16. Intensidad de sequía para el municipio de Tijuana.

Tabla 3. Clasificación de la intensidad de la sequía (nadm)

Escala	Intensidad	Descripción
 D0	Anormalmente Seco (D0)	Se trata de una condición de sequedad, no es una categoría de sequía. Se presenta al inicio o al final de un periodo de sequía. Al inicio de un período de sequía: debido a la sequedad de corto plazo puede ocasionar el retraso de la siembra de los cultivos anuales, un limitado crecimiento de los cultivos o pastos y existe el riesgo de incendios. Al final del período de sequía: puede persistir déficit de agua, los pastos o cultivos pueden no recuperarse completamente.
 D1	Sequía Moderada (D1)	Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.
 D2	Sequía Severa (D2)	Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios, es común la escasez de agua, se deben imponer restricciones en el uso del agua.
 D3	Sequía Extrema (D3)	Pérdidas mayores en cultivos y pastos, el riesgo de incendios forestales es extremo, se generalizan las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.
 D4	Sequía Excepcional (D4)	Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, es probable una situación de emergencia debido a la ausencia de agua.

2.10 Inundaciones

2.10.1 Peligro: altura del agua y severidad de la amenaza

El peligro por inundación se caracteriza por las áreas de inundación que rebasan la capacidad hidráulica de los arroyos. Esto ocurre cuando una lluvia dada para una duración y una probabilidad de ocurrencia, relacionada con el periodo de retorno (T_r), los niveles de agua rebasan los puntos más altos de las secciones transversales de cada arroyo. El flujo producido llega a un nivel, o altura de agua, y abarca un área alrededor del arroyo. Dependiendo de la topografía y de la pendiente del arroyo, el flujo del agua, o caudal viaja con una velocidad, y al combinarse con la

altura del agua se produce una fuerza de arrastre de la corriente. De tal manera que el peligro por inundación estará caracterizado por: 1. Alturas de agua en metros para cada periodo de retorno, y 2. Severidad que representa la fuerza de la corriente que se calcula por la altura y la velocidad del agua en m^2/s .

- a) Altura del agua. Los mapas de las figuras 17 a 20 muestran el peligro por inundación caracterizado por la altura del agua en los arroyos de la zona urbana de Tijuana para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 4. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años.

No. subcuenca	Nombre de subcuenca	Tc=hr	Área (km ²)	I (mm/hr)	Q (m ³ /s)
1	Los Laureles	1.14	3.39	23.89	8.29
2	El Matadero	1.09	2.40	24.69	17.36
3	Sistema Centro	0.55	1.44	38.52	7.23
4	Aguaje de la Tuna	1.30	7.71	21.81	15.80
5	Camino Verde	0.77	0.89	31.20	3.51
6	Sánchez Taboada	0.67	2.70	33.95	12.34
7	La Mesa 2	0.67	1.93	34.11	8.26
8	La Mesa 1	0.51	0.94	40.48	5.37
9	México Lindo	0.53	0.99	39.59	5.74
10	El Sainz	0.51	0.75	40.34	4.59
11	Pasteje o Aviación	4.25	7.84	9.20	4.56
12	La Pechuga	0.50	2.84	40.66	14.02
13	Tributario Alamar derecho 1	0.85	5.29	29.23	18.84
14	Tributario Alamar derecho 2	0.88	5.21	28.46	18.75
15	Tributario Alamar derecho 3	1.00	1.85	26.19	5.48
16	Las Torres	0.5	4.05	38.66	18.21
17	Nido Águilas	0.38	2.62	47.65	15.80
18	Rinconada	0.38	0.90	47.77	7.14
19	El Florido	1.56	9.19	19.74	15.19

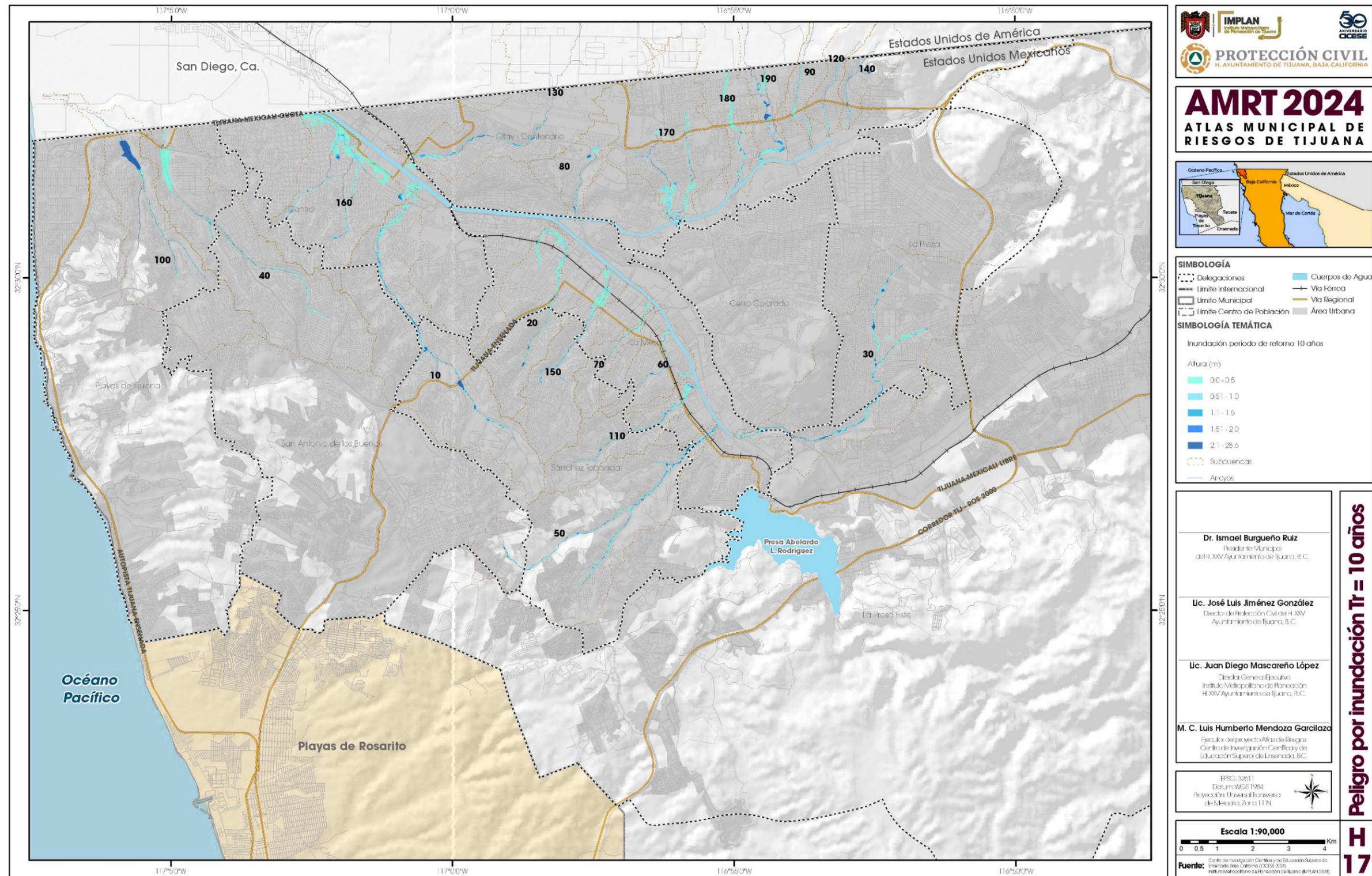


Figura 17. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años.

La Figura 17 muestra las áreas de inundación con diferentes alturas, o nivel de agua, que se alcanzaría en cada una de las subcuencas, numeradas del 1 al 19, para un periodo de retorno de 10 años. En la tabla 4 se muestra los datos en la salida de cada cuenca, el tiempo de concentración en horas (Tc), para un área de cuenca (km²), la intensidad de precipitación para el tiempo dado (mm/hr), y el caudal o escurrimiento generado (m³/s), para que se produzca la inundación. Un uso de este mapa es para estimar las pérdidas de los bienes de las viviendas que alcance la altura del agua.

Tabla 5. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años.

No. subcuenca	Nombre de subcuenca	Tc=hr	Área (km ²)	I (mm/hr)	Q (m ³ /s)
1	Los Laureles	1.14	3.39	29.02	11.14
2	El Matadero	0.68	1.82	40.94	11.98
3	Sistema Centro	0.55	1.44	46.81	9.52
4	Aguaje de la Tuna	1.30	7.71	26.50	21.36
5	Camino Verde	0.77	0.89	37.90	4.65
6	Sánchez Taboada	0.67	2.70	41.26	16.39
7	La Mesa 2	0.67	1.93	41.45	11.09
8	La Mesa 1	0.51	0.94	49.18	7.13
9	México Lindo	0.53	0.99	48.10	7.55
10	El Sainz	0.51	0.75	49.01	6.06
11	Pasteje o Aviación	4.25	7.84	11.18	6.11
12	La Pechuga	0.50	2.84	49.41	19.20
13	Tributario Alamar derecho 1	0.85	5.29	35.52	25.06
14	Tributario Alamar derecho 2	0.88	5.21	34.59	21.32
15	Tributario Alamar derecho 3	1.00	1.85	31.82	7.08
16	Las Torres	0.38	4.05	46.97	25.03
17	Nido Águilas	0.38	2.62	57.90	21.57
18	Rinconada	0.38	0.90	58.04	9.36
19	El Florido	1.56	9.19	23.98	20.91

La Figura 18 muestra las áreas de inundación con diferentes alturas, o nivel de agua, que se alcanzaría en cada una de las subcuencas, numeradas del 1 al 19, para un periodo de retorno de 25 años. En la tabla 5 se muestra los datos en la salida de cada cuenca, el tiempo de concentración en horas (Tc), para un área de cuenca (km²), la intensidad de precipitación para el tiempo dado (mm/hr), y el caudal o escurrimiento generado (m³/s), para que se produzca la inundación. Un uso de este mapa es para estimar las pérdidas de los bienes de las viviendas que alcance la altura del agua.

Tabla 6. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años.

No. subcuenca	Nombre de subcuenca	Tc=hr	Área (km ²)	I (mm/hr)	Q (m ³ /s)
1	Los Laureles	1.14	3.39	32.91	13.60
2	El Matadero	0.68	1.82	46.42	14.56
3	Sistema Centro	0.55	1.44	53.08	11.47
4	Aguaje de la Tuna	1.30	7.71	30.05	26.13
5	Camino Verde	0.77	0.89	42.98	5.60
6	Sánchez Taboada	0.67	2.70	46.78	19.58
7	La Mesa 2	0.67	1.93	34.11	8.26
8	La Mesa 1	0.51	0.94	55.77	8.57
9	México Lindo	0.53	0.99	54.54	9.03
10	El Sainz	0.51	0.75	55.57	7.22
11	Pasteje o Aviación	4.25	7.84	12.68	7.42
12	La Pechuga	0.50	2.84	56.03	23.39
13	Tributario Alamar derecho 1	0.85	5.29	40.27	30.26
14	Tributario Alamar derecho 2	0.88	5.21	39.22	25.96
15	Tributario Alamar derecho 3	1.00	1.85	36.09	8.32
16	Las Torres	0.38	4.05	53.26	30.56
17	Nido Águilas	0.38	2.62	65.65	26.27
18	Rinconada	0.38	0.90	65.81	11.09
19	El Florido	1.56	9.19	27.19	25.61

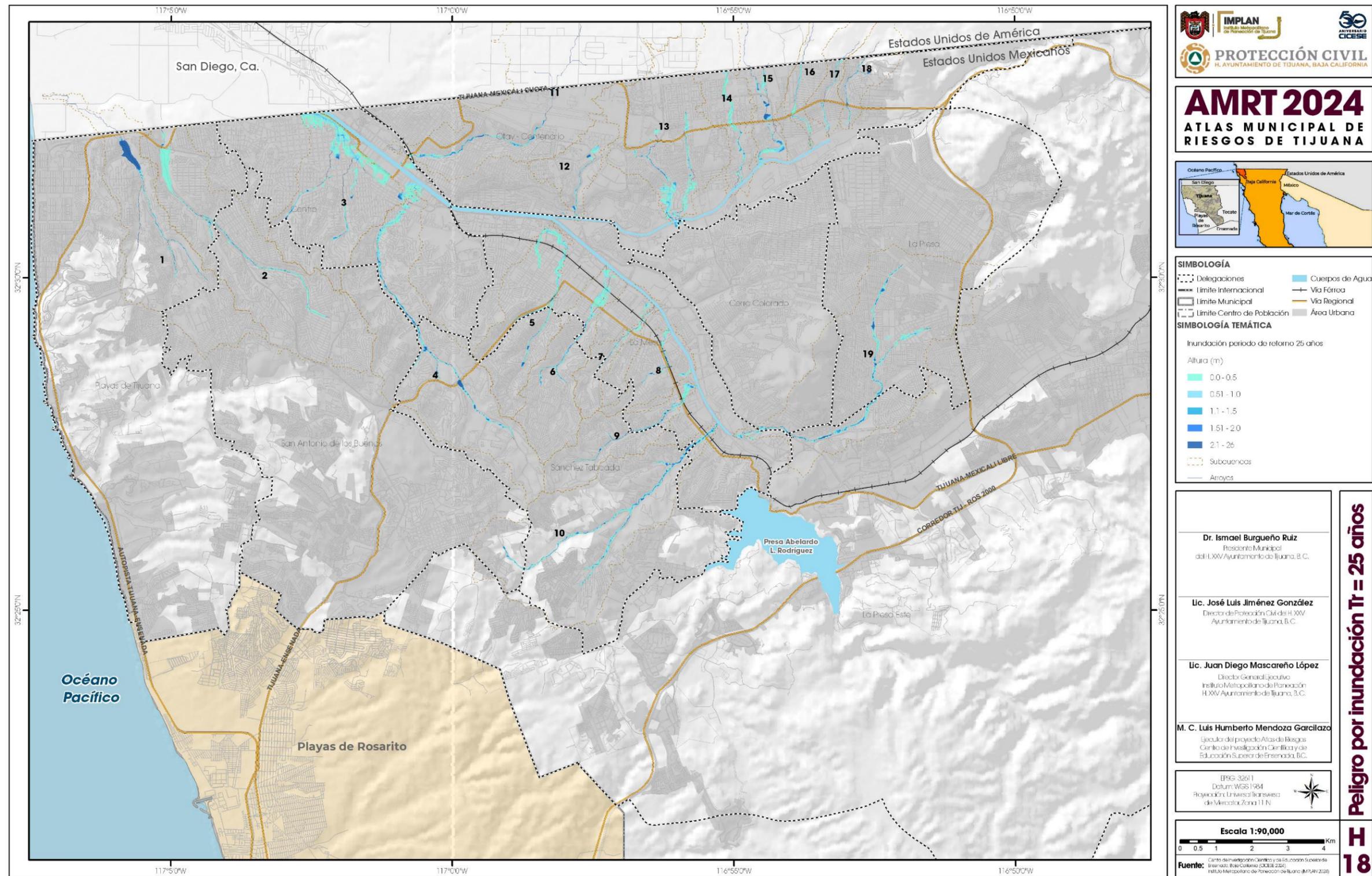


Figura 18. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años.

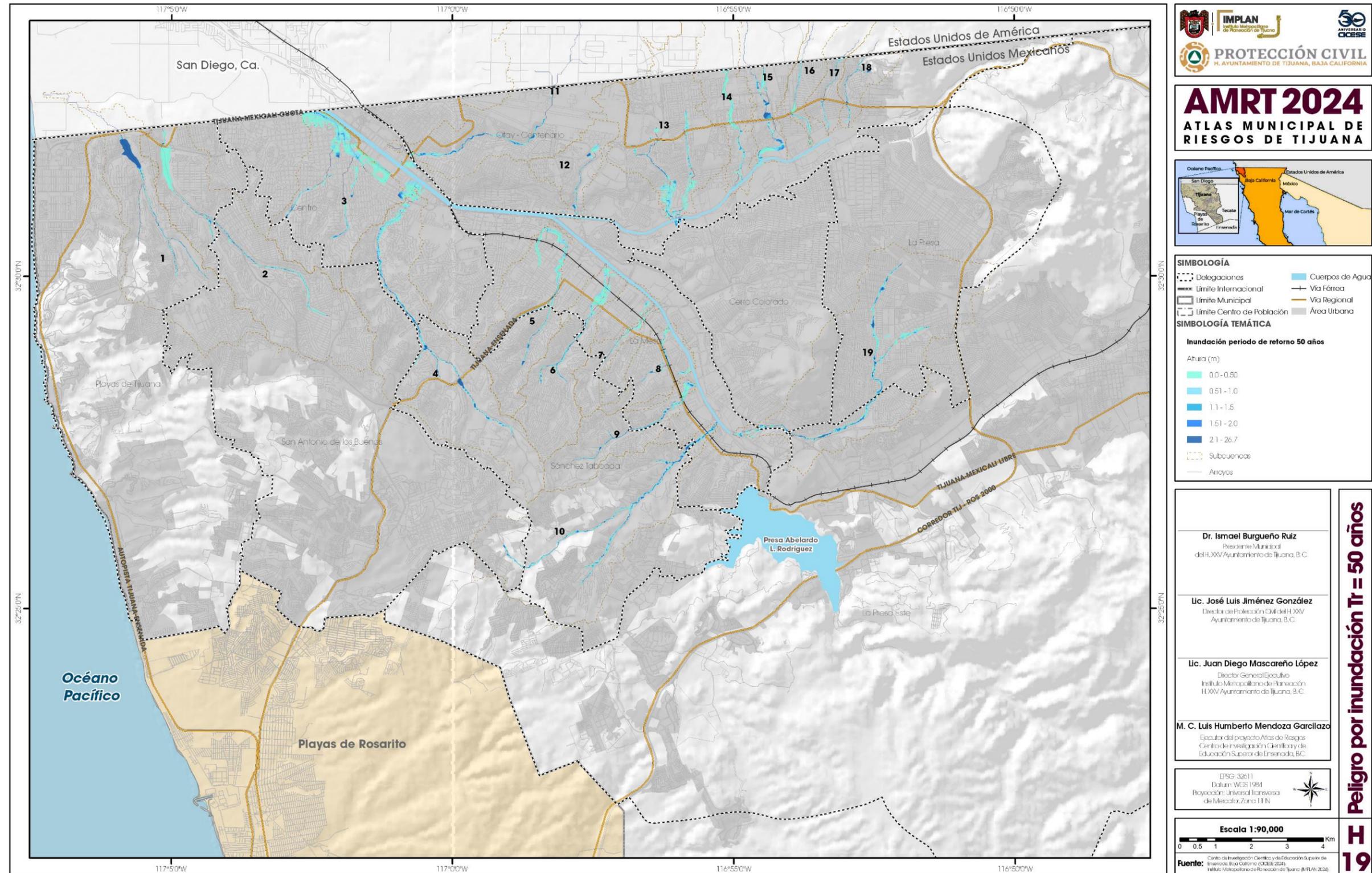


Figura 19. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años.

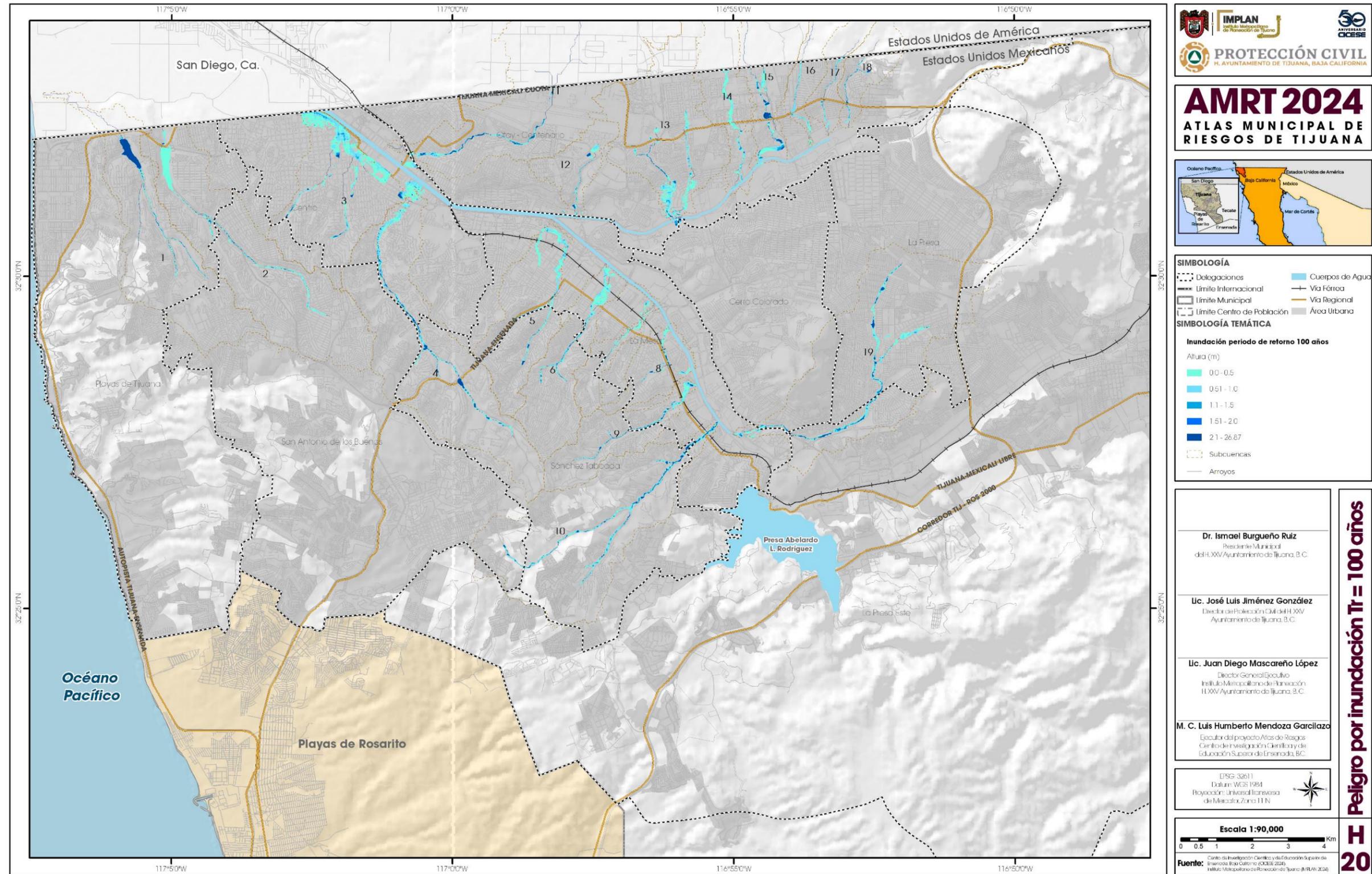


Figura 20. Peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años.

La Figura 19 muestra las áreas de inundación con diferentes alturas, o nivel de agua, que se alcanzaría en cada una de las subcuencas, numeradas del 1 al 19, para un periodo de retorno de 50 años. En la tabla 6 se muestra los datos en la salida de cada cuenca, el tiempo de concentración en horas (Tc), para un área de cuenca (km²), la intensidad de precipitación para el tiempo dado (mm/hr), y el caudal o escurrimiento generado (m³/s), para que se produzca la inundación. Un uso de este mapa es para estimar las pérdidas de los bienes de las viviendas que alcance la altura del agua.

Tabla 7. Clasificación Datos y caudales para el peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años.

No. subcuenca	Nombre de subcuenca	Tc=hr	Área (km ²)	I (mm/hr)	Q (m ³ /s)
1	Los Laureles	1.14	3.39	36.80	16.4
2	El Matadero	0.68	1.82	51.90	16.89
3	Sistema Centro	0.55	1.44	59.34	13.57
4	Aguaje de la Tuna	1.30	7.71	33.60	31.53
5	Camino Verde	0.77	0.89	48.05	6.64
6	Sánchez Taboada	0.67	2.70	52.30	22.90
7	La Mesa 2	0.67	1.93	52.54	15.54
8	La Mesa 1	0.51	0.94	62.35	10.06
9	México Lindo	0.53	0.99	60.98	10.65
10	El Sainz	0.51	0.75	62.13	8.42
11	Pasteje o Aviación	4.25	7.84	14.18	9.09
12	La Pechuga	0.50	2.84	62.64	27.74
13	Tributario Alamar derecho 1	0.57	1.26	58.01	12.09
14	Tributario Alamar derecho 2	0.88	5.21	3.85	31.18
15	Tributario Alamar derecho 3	1.00	1.85	40.35	9.57
16	Las Torres	0.38	4.05	59.55	36.36
17	Nido Águilas	0.38	2.62	73.41	31.13
18	Rinconada	0.38	0.90	73.59	12.87
19	El Florido	1.56	9.19	30.40	30.71

La Figura 20 muestra las áreas de inundación con diferentes alturas, o nivel de agua, que se alcanzaría en cada una de las subcuencas, numeradas del 1 al 19, para un periodo de retorno de 100 años. En la tabla 7 se muestra los datos en la salida de cada cuenca, el tiempo de concentración en horas (Tc), para un área de cuenca (km²), la intensidad de precipitación para el tiempo dado (mm/hr), y el caudal o escurrimiento generado (m³/s), para que se produzca la

inundación. Un uso de este mapa es para estimar las pérdidas de los bienes de las viviendas que alcance la altura del agua.

- b) Severidad. Representa la fuerza de la corriente que se calcula por la altura y la velocidad del agua en m²/s. La tabla 8 muestra la clasificación de la severidad de la amenaza por inundación debido a la fuerza de arrastre de la corriente. Los mapas de las figuras 21 a 24 muestran la severidad de la amenaza por inundación para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Tabla 8. Severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018)

Clasificación de severidad de la amenaza	Rango de altura x velocidad del agua (m ² /s)
Baja	< 0.2
Media	0.2 – 0.5
Alta	0.5 – 1.5
Muy alta	1.5 – 2.5
Extrema	> 2.5

La Figura 21 muestra la fuerza de arrastre de la corriente cuando se produce una inundación para un periodo de retorno de 10 años. Esta información es importante para conocer las zonas de mayor severidad, si hay viviendas vulnerables que pueden ser arrastradas por la corriente, o si se atraviesan calles por donde circulan vehículos que pudieran ser arrastrados por la corriente. Además, se afecta el suelo que puede ser erosionable y al mismo tiempo podría ser un factor de riesgo para otros elementos que depende de la estabilidad del suelo. De esta manera al comunicar el peligro se pueden tomar medidas para reducir el riesgo.

La Figura 22 muestra la fuerza de arrastre de la corriente cuando se produce una inundación para un periodo de retorno de 25 años. Esta información es importante para conocer las zonas de mayor severidad, si hay viviendas vulnerables que pueden ser arrastradas por la corriente, o si se atraviesan calles por donde circulan vehículos que pudieran ser arrastrados por la corriente. Además, se afecta el suelo que puede ser erosionable y al mismo tiempo podría ser un factor de riesgo para otros elementos que depende de la estabilidad del suelo. De esta manera al comunicar el peligro se pueden tomar medidas para reducir el riesgo.

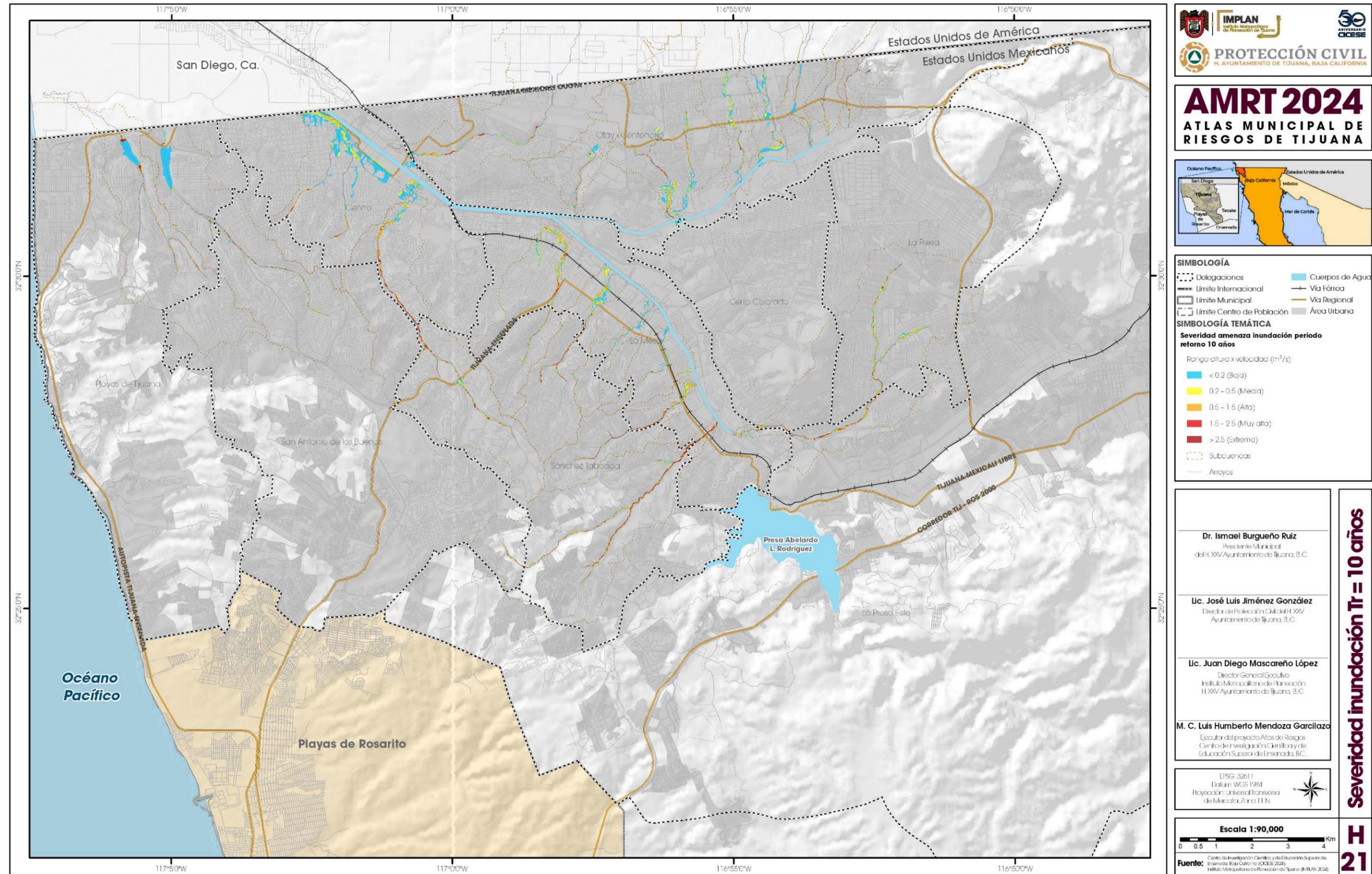


Figura 21. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 10 años.

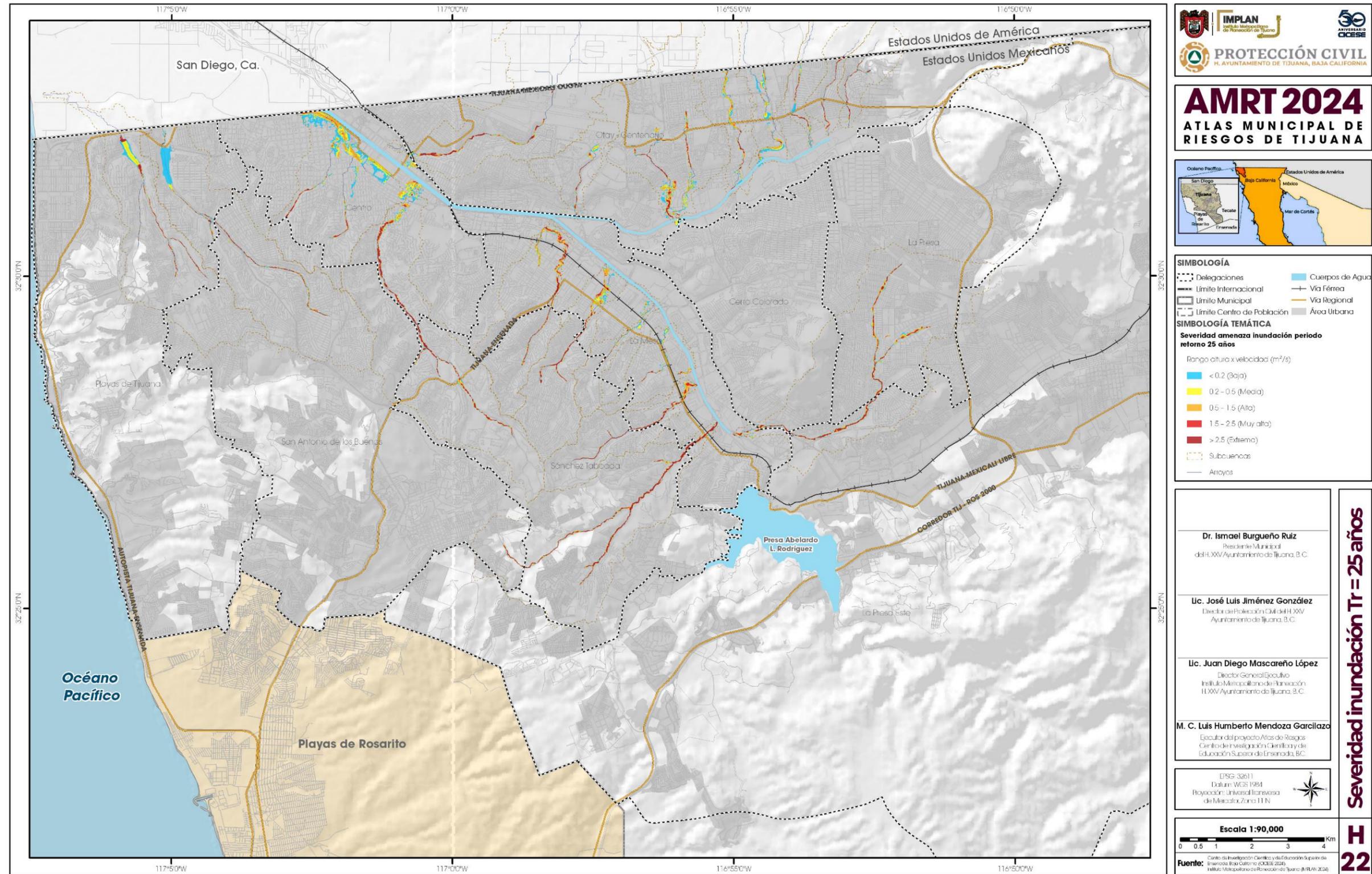


Figura 22. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 25 años.

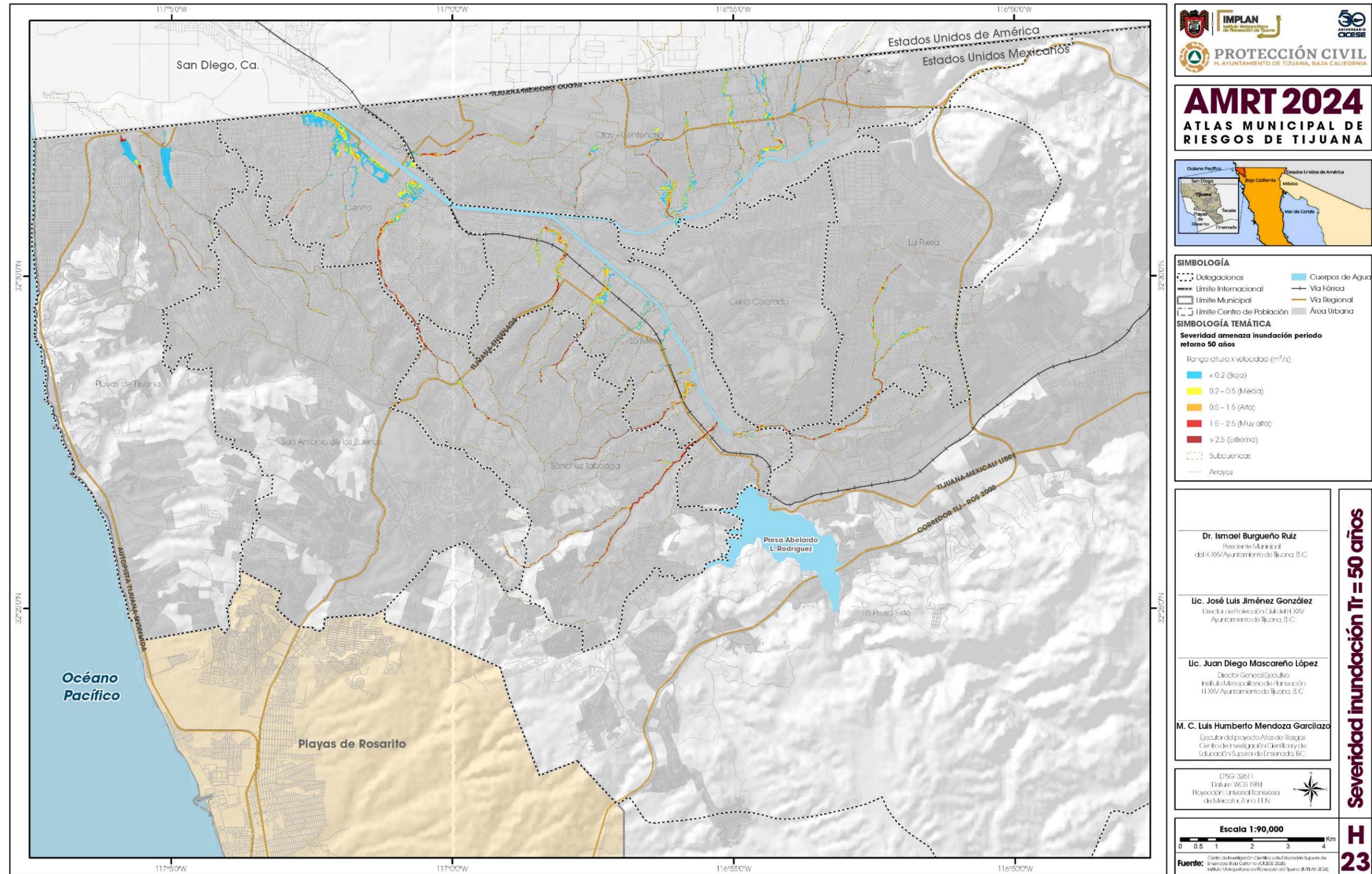


Figura 23. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 50 años.

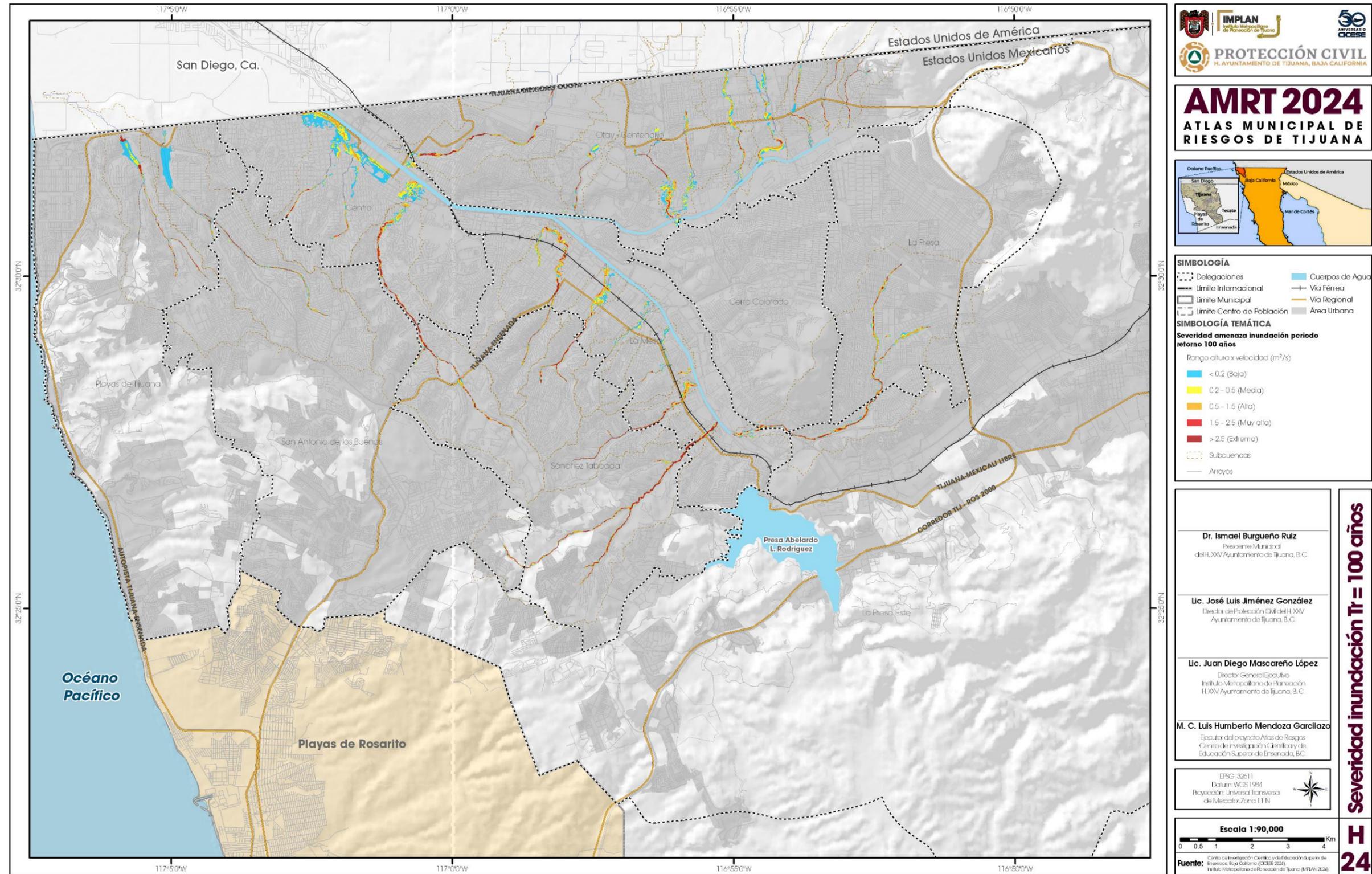


Figura 24. Severidad de la amenaza por inundación para periodo de retorno de 100 años.

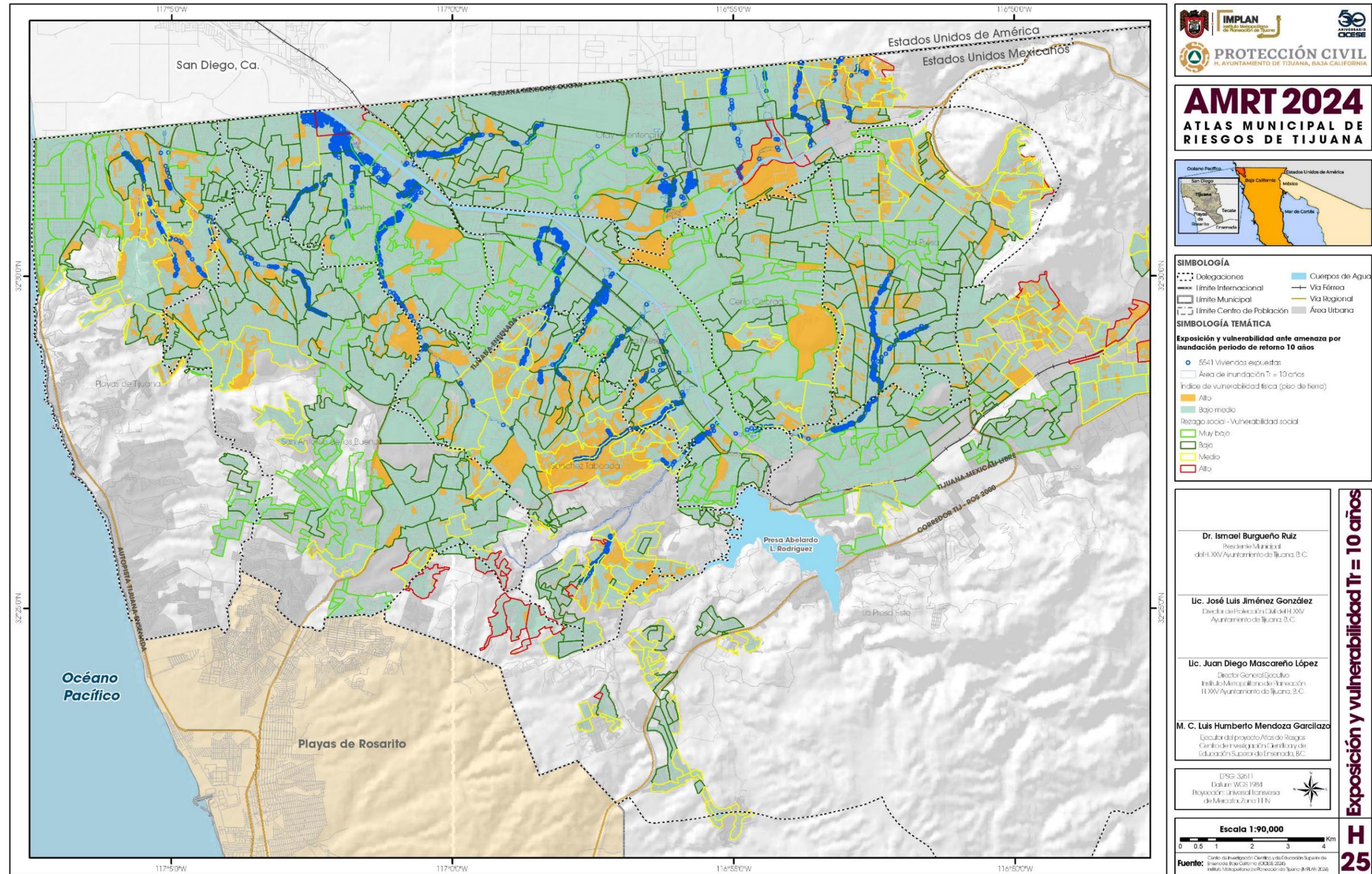


Figura 25. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 10 años.

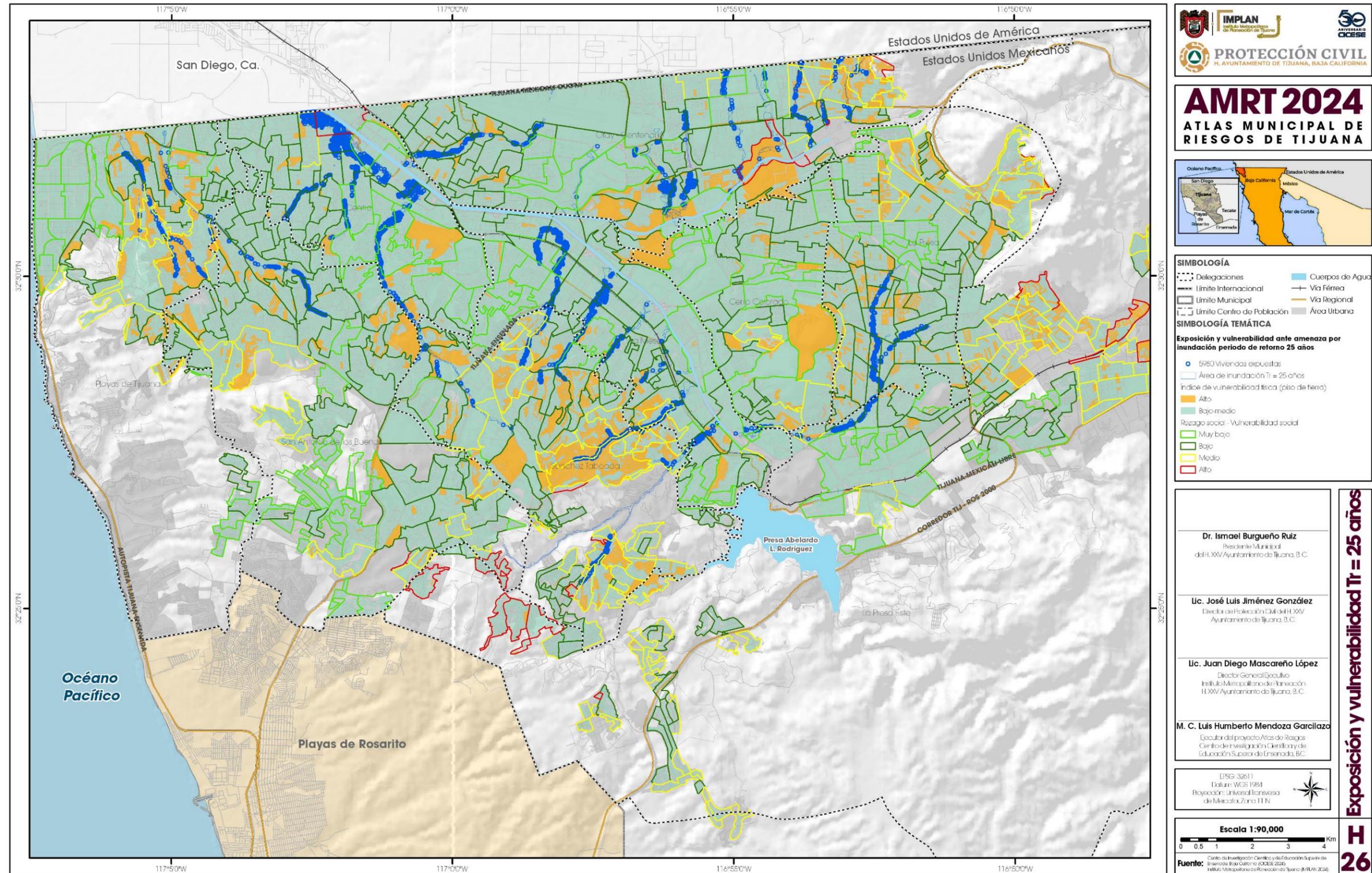


Figura 26. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 25 años.

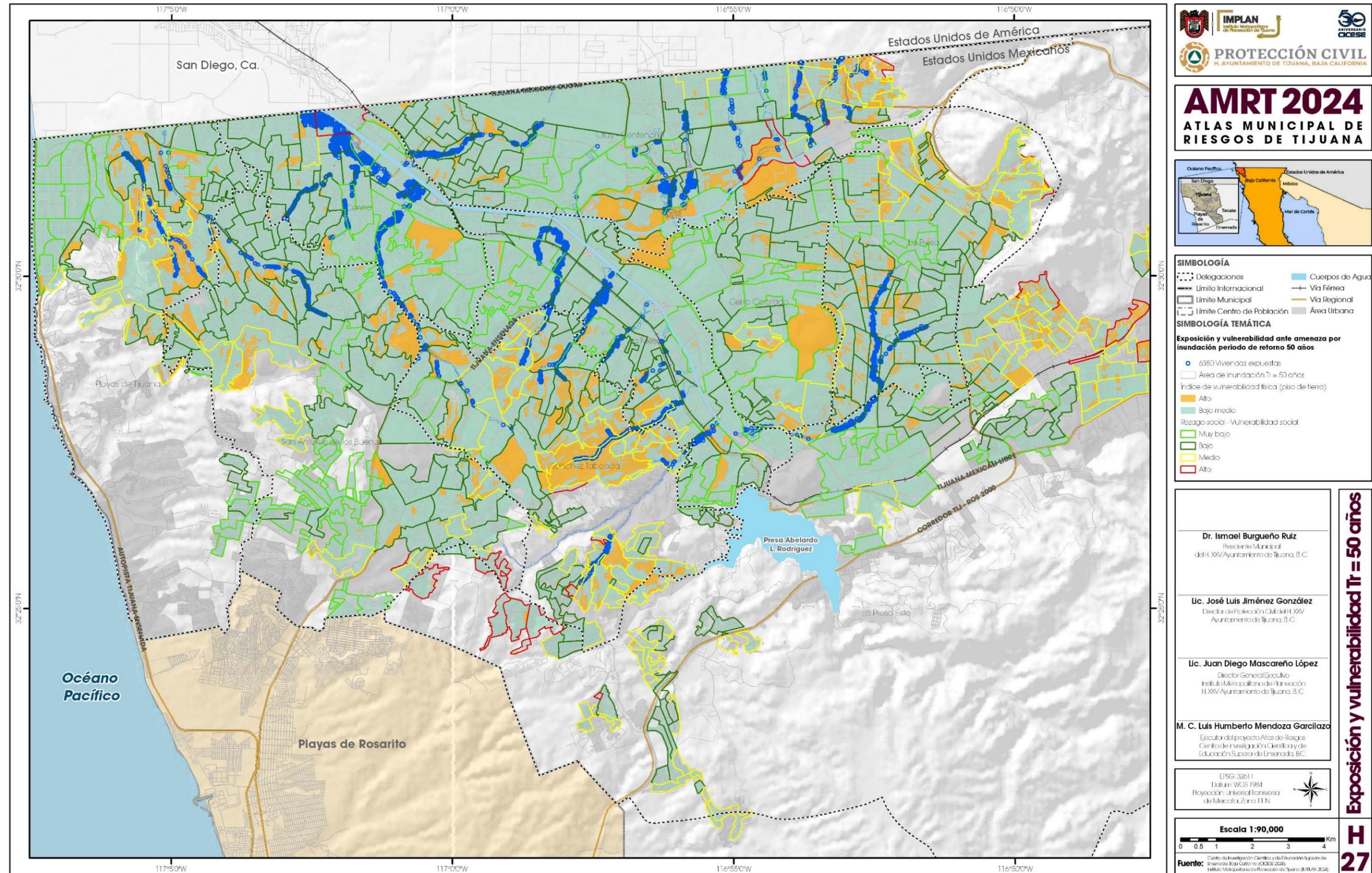


Figura 27. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 50 años.

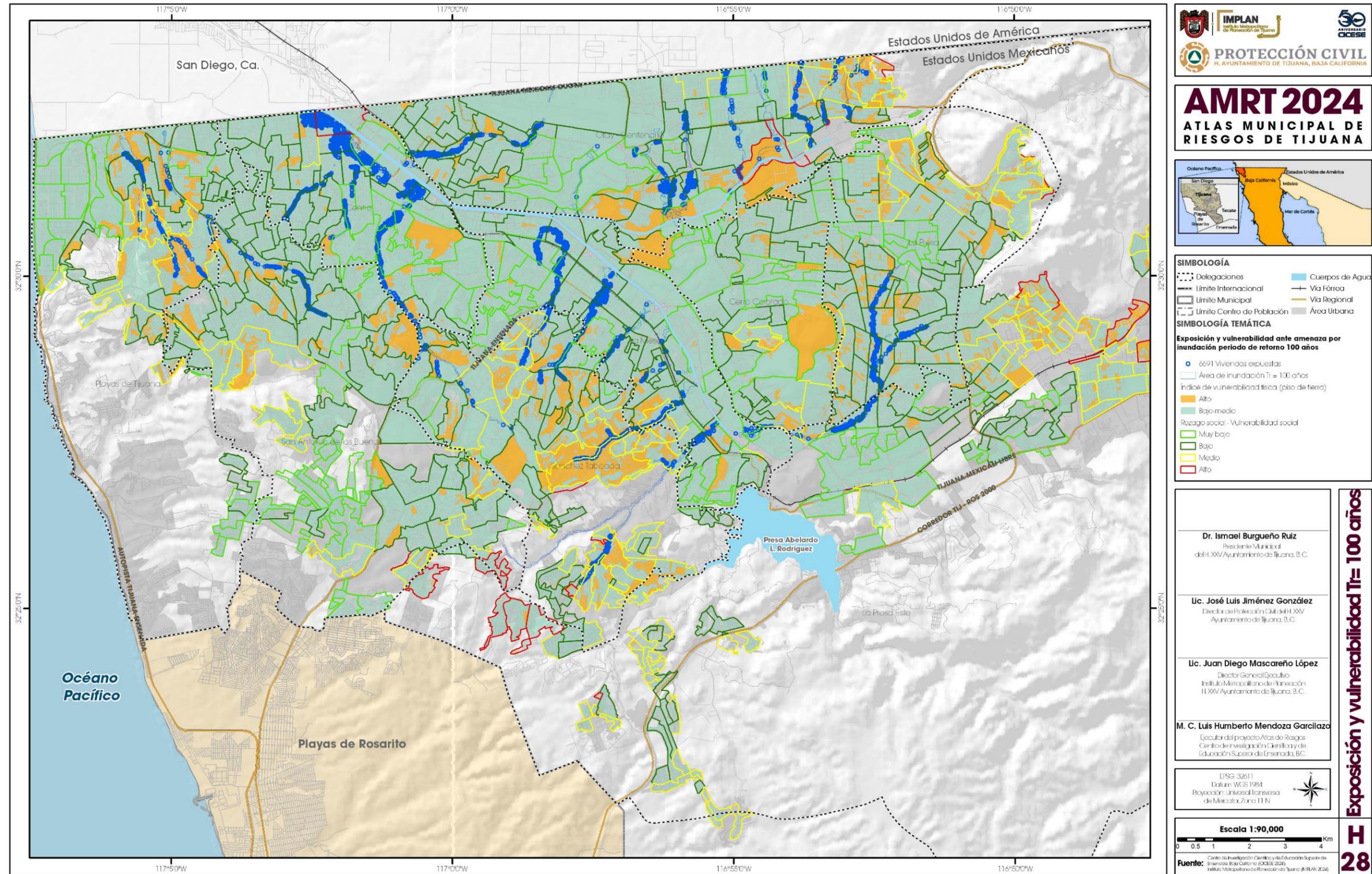


Figura 28. Exposición vulnerabilidad periodo de retorno de 100 años.

La Figura 23 muestra la fuerza de arrastre de la corriente cuando se produce una inundación para un periodo de retorno de 50 años. Esta información es importante para conocer las zonas de mayor severidad, si hay viviendas vulnerables que pueden ser arrastradas por la corriente, o si se atraviesan calles por donde circulan vehículos que pudieran ser arrastrados por la corriente. Además, se afecta el suelo que puede ser erosionable y al mismo tiempo podría ser un factor de riesgo para otros elementos que depende de la estabilidad del suelo. De esta manera al comunicar el peligro se pueden tomar medidas para reducir el riesgo.

La Figura 24 muestra la fuerza de arrastre de la corriente cuando se produce una inundación para un periodo de retorno de 100 años. Esta información es importante para conocer las zonas de mayor severidad, si hay viviendas vulnerables que pueden ser arrastradas por la corriente, o si se atraviesan calles por donde circulan vehículos que pudieran ser arrastrados por la corriente. Además, se afecta el suelo que puede ser erosionable y al mismo tiempo podría ser un factor de riesgo para otros elementos que depende de la estabilidad del suelo. De esta manera al comunicar el peligro se pueden tomar medidas para reducir el riesgo.

2.10.2 Exposición y vulnerabilidad ante el peligro por inundación

La exposición se refiere a los elementos que están expuestos en el área de la amenaza o peligro por inundación y vulnerabilidad es la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños (UNISDR, 2009). Los mapas de las figuras H25 a H28 muestran los elementos expuestos y datos de vulnerabilidad ante el peligro por inundación para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años. Para el caso de Tijuana se tomaron como elementos expuestos a las viviendas, que se obtuvieron del censo de población y vivienda de INEGI 2020 a nivel de manzanas, los resultados son una buena aproximación de exposición. Para evaluar la vulnerabilidad física de las viviendas se necesitan datos de la tipología de las viviendas respecto al tipo de paredes, techo y piso. En esta etapa del Atlas no se realizó este inventario de viviendas, debido a la limitación de tiempo para realizar un recorrido de campo por todo el municipio y hacer la clasificación del tipo estructural de las viviendas, tipo de paredes y tipo de piso. Sin embargo, se trabajó con los datos del censo de población y viviendas de INEGI (2020), a nivel de manzanas, con el único indicador disponible sobre la vulnerabilidad física, que fue el dato de viviendas con piso de tierra. A este indicador se le asignó un índice de vulnerabilidad alto por manzanas, en el supuesto de que las

viviendas no presentan cimentación rígida o una cimentación de concreto estable. A las demás viviendas de las manzanas que no muestran el dato del tipo de piso se le asignó un índice de vulnerabilidad bajo-medio ya que no se cuenta con datos de la cimentación. A pesar que no se cuenta con el dato del tipo de material de paredes de las viviendas, con ayuda del dato de rezago social, se puede inferir que las manzanas con rezago social medio a alto presentan viviendas de madera o materiales inferiores.

La Figura 25 muestra las viviendas expuestas ante el peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años, corresponde a 5541 viviendas. Muestran la vulnerabilidad física por manzana como alto donde hay viviendas con piso de tierra y bajo-medio donde no hay dato. Se muestra también el índice de vulnerabilidad social obtenido del grado de rezago social. Este mapa permite ver las áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física, puede ser usado para planificar, y para respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

La Figura 26 muestra las viviendas expuestas ante el peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años, corresponde a 5980 viviendas. Muestran la vulnerabilidad física por manzana como alto donde hay viviendas con piso de tierra y bajo-medio donde no hay dato. Se muestra también el índice de vulnerabilidad social obtenido del grado de rezago social. Este mapa permite ver las áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física, puede ser usado para planificar, y para respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

La Figura 27 muestra las viviendas expuestas ante el peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años, corresponde a 6380 viviendas. Muestran la vulnerabilidad física por manzana como alto donde hay viviendas con piso de tierra y bajo-medio donde no hay dato. Se muestra también el índice de vulnerabilidad social obtenido del grado de rezago social. Este mapa permite ver las áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física, puede ser usado para planificar, y para respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

La Figura 28 muestra las viviendas expuestas ante el peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años, corresponde a 6691 viviendas. Muestran la vulnerabilidad física por manzana como alto donde hay viviendas con piso de tierra y bajo-medio donde no hay dato. Se muestra también el índice de vulnerabilidad social obtenido del grado de rezago social. Este mapa permite ver las áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física, puede ser usado para planificar, y para respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

2.10.3 Riesgo por inundación: colapso de viviendas

El riesgo se evalúa a partir de los datos de amenaza, exposición y vulnerabilidad. De acuerdo con los datos obtenidos en este Atlas, se propone una matriz de riesgo por colapso (tabla 9), que resultó del análisis de la función de vulnerabilidad para viviendas de madera sin cimentación rígida propuesta por FEMA (2001). Esta función evalúa el colapso de la estructura ante una altura y velocidad del agua, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, donde se indica que las viviendas que se encuentren debajo del límite de la curva son vulnerables a colapso. A partir de la severidad de la amenaza y vulnerabilidad física y social, que proporciona el indicador piso de tierra y calidad de las viviendas expuestas se plantea la matriz de riesgo de la tabla 9. Para los datos obtenidos, las viviendas expuestas a diferente severidad de la amenaza en las manzanas con piso de tierra presentan tres tipos de riesgo: medio, alto y muy alto. Se tomaron como referencia las guías del CENAPRED complementadas con los métodos publicados por Gámez Balmaceda y colaboradores (2021) para la evaluación de las componentes del riesgo.

Tabla 9. Severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018)

Severidad de la amenaza	Vulnerabilidad (cimentación inestable)	Riesgo por colapso
Baja	Alta	Medio
Media	Alta	Alto
Alta	Alta	Alto
Muy alta	Alta	Muy Alto
Extrema	Alta	Muy Alto

La Figura 29 muestra el riesgo de las viviendas por colapso cuando se encuentran expuestas al peligro por inundación para un periodo de retorno de 10 años. Las viviendas que se muestran en esta figura solo son las que presentan vulnerabilidad alta. Se muestran 64 viviendas con riesgo muy alto, esto quiere decir que estas viviendas pueden colapsar cuando se presenten inundaciones para un periodo de retorno de 10 años. Las zonas de mayor riesgo están en las cuencas: Los Laureles, México Lindo, Nido de las Águilas, Las Torres y Tributario Alamar Derecho 1. Este mapa permite ver las zonas donde se encuentran las viviendas y áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física. Este mapa puede ser usado para planificar, y para el sector operativo en respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

La Figura 30 muestra el riesgo de las viviendas por colapso cuando se encuentran expuestas al peligro por inundación para un periodo de retorno de 25 años. Las viviendas que se muestran en esta figura solo son las que presentan vulnerabilidad alta. Se muestran 104 viviendas con riesgo muy alto, esto quiere decir que estas viviendas pueden colapsar cuando se presenten inundaciones para un periodo de retorno de 10 años. Las zonas de mayor riesgo están en las cuencas: Los Laureles, México Lindo, Camino Verde, Sánchez Taboada, Nido de las Águilas, Las Torres y Tributario Alamar Derecho 1. Este mapa permite ver las zonas donde se encuentran las viviendas y áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física. Este mapa puede ser usado para planificar, y para el sector operativo en respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

La Figura 31 muestra el riesgo de las viviendas por colapso cuando se encuentran expuestas al peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años. Las viviendas que se muestran en esta figura solo son las que presentan vulnerabilidad alta. Se muestran 54 viviendas con riesgo muy alto, esto quiere decir que estas viviendas pueden colapsar cuando se presenten inundaciones para un periodo de retorno de 10 años. Las zonas de mayor riesgo están en las cuencas: Los Laureles, México Lindo, El Sainz, El Florido, Nido de las Águilas, Las Torres y Tributario Alamar Derecho 1. Este mapa permite ver las zonas donde se encuentran las viviendas y áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física. Este mapa puede ser usado para planificar, y para el sector operativo en respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

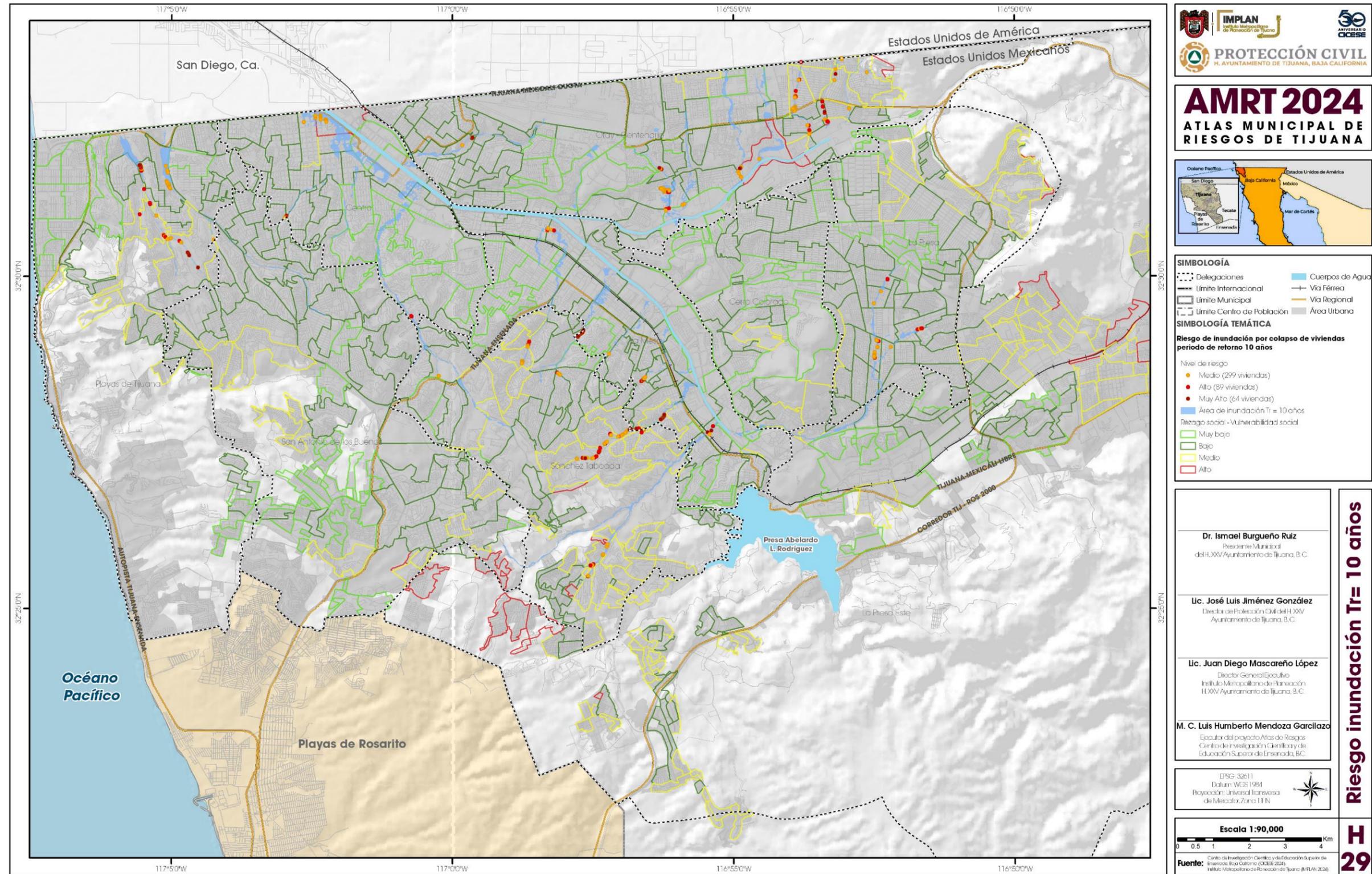


Figura 29. Riesgo colapso inundación periodo 10yr

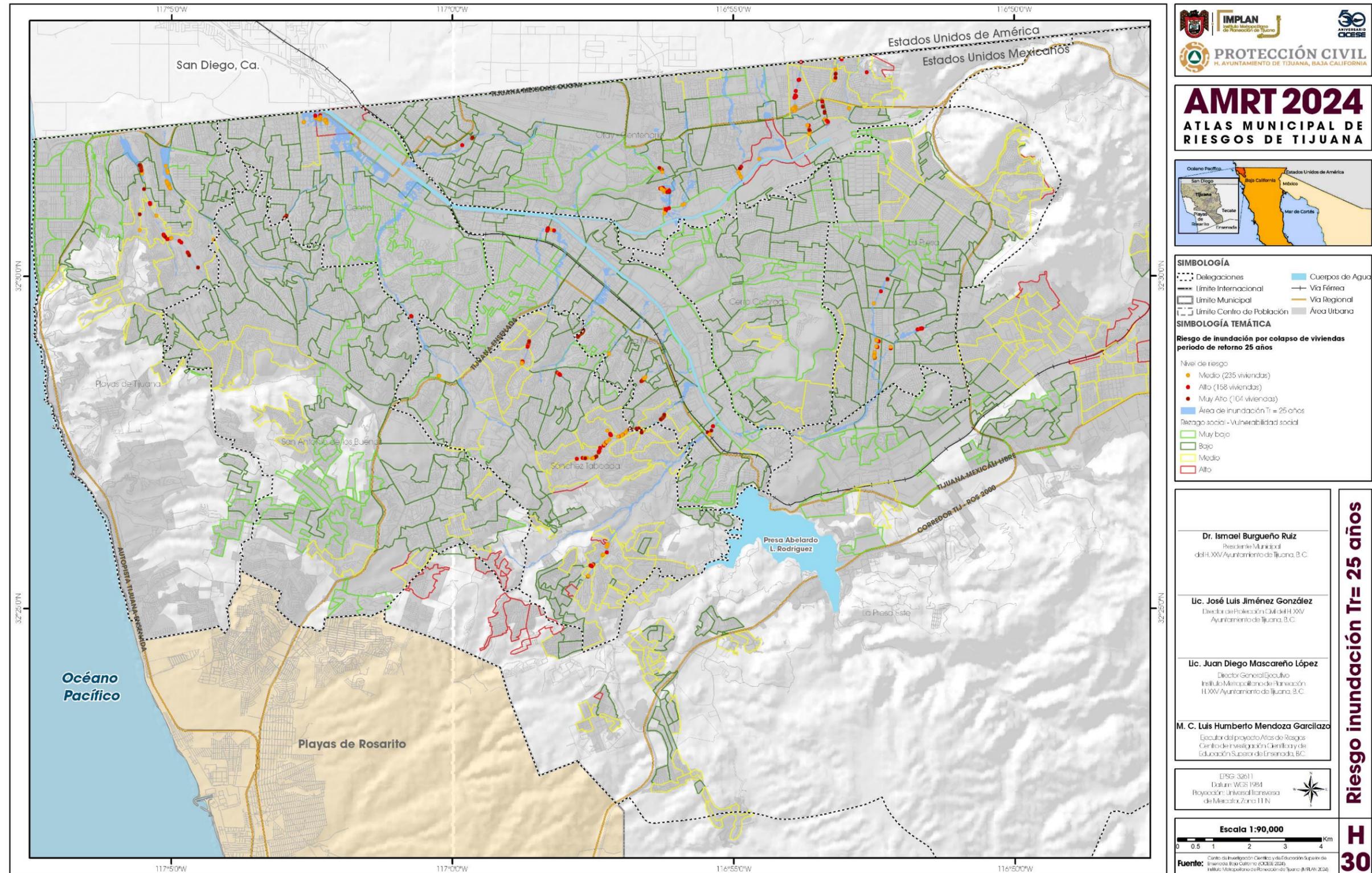


Figura 30. Riesgo colapso inundación periodo 25yr

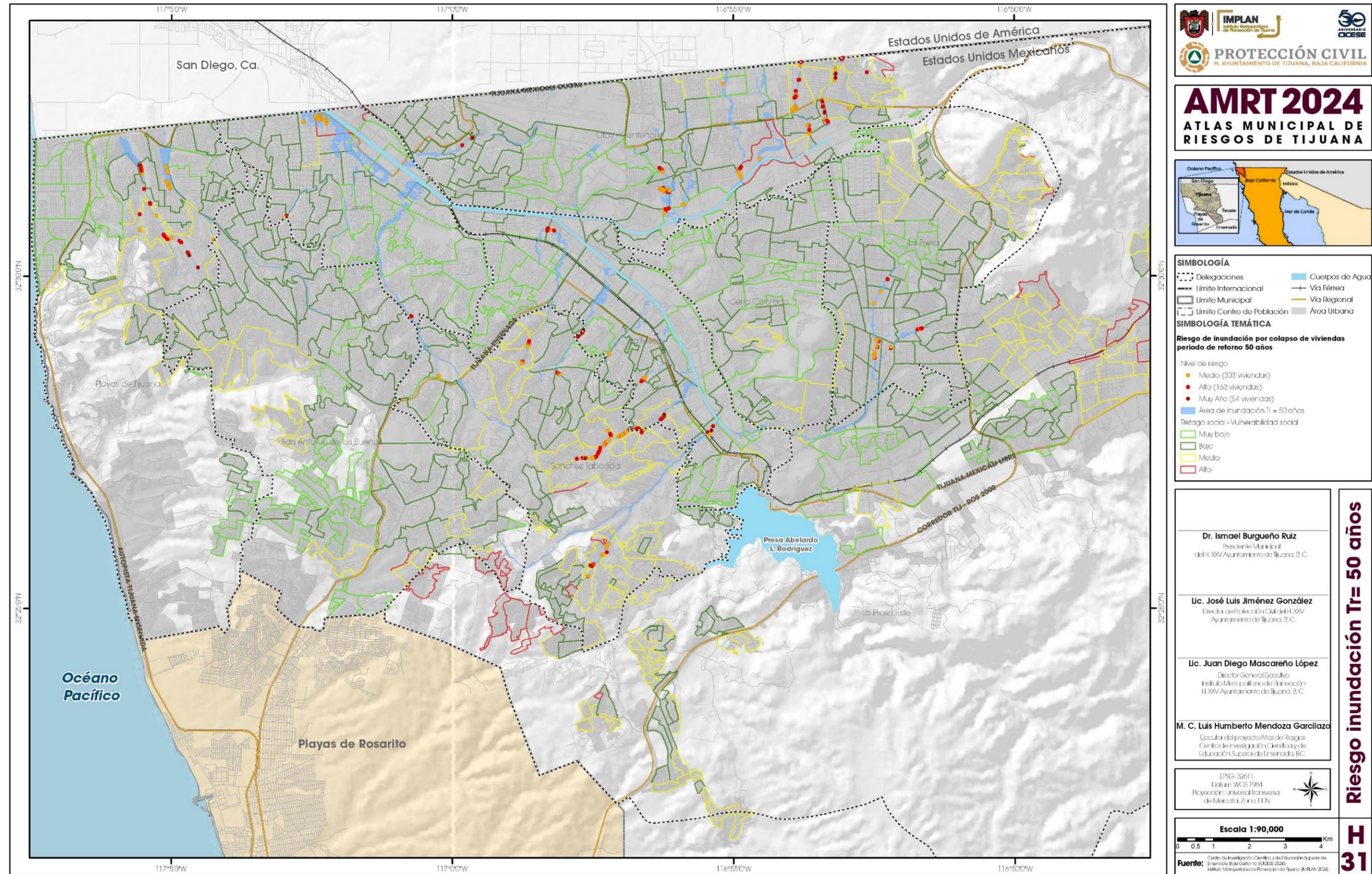


Figura 31. Riesgo colapso inundación periodo 50yr

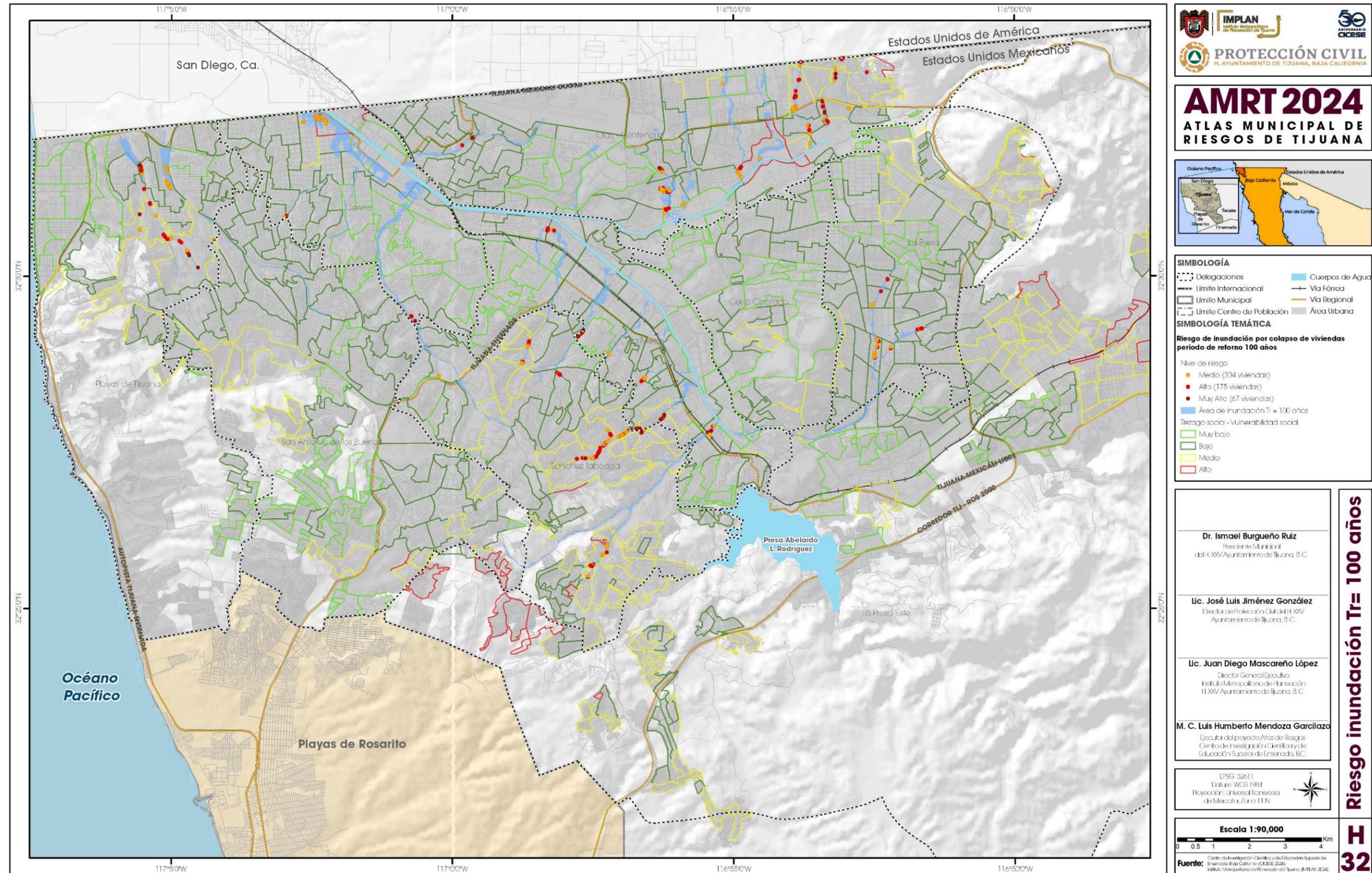


Figura 32. Riesgo colapso inundación periodo 100yr

La Figura 32 muestra el riesgo de las viviendas por colapso cuando se encuentran expuestas al peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años. Las viviendas que se muestran en esta figura solo son las que presentan vulnerabilidad alta. Se muestran 67 viviendas con riesgo muy alto, esto quiere decir que estas viviendas pueden colapsar cuando se presenten inundaciones para un periodo de retorno de 10 años. Las zonas de mayor riesgo están en las cuencas: Los Laureles, México Lindo, El Sainz, El Florido, Nido de las Águilas, Las Torres y Tributario Alamar Derecho 1 y 2. Este mapa permite ver las zonas donde se encuentran las viviendas y áreas vulnerables socialmente, las zonas de mayor peligro y vulnerabilidad física. Este mapa puede ser usado para planificar, y para el sector operativo en respuesta a la emergencia o de prevención ante una alerta temprana.

2.10.4 Conclusiones riesgo por inundación

La evaluación del riesgo requiere una estimación detallada de cada uno de sus elementos y su integración con un análisis conjunto para un mejor entendimiento y buena gestión. En esta evaluación se logró hacer la evaluación de la amenaza, y a partir de algunos datos sobre exposición se determinó la vulnerabilidad relacionada al daño esperado en cada vivienda por el colapso. Sin embargo, esta evaluación solo es una pequeña muestra de los daños que se espera. Para poder determinar las pérdidas potenciales ante el peligro de inundación se necesita realizar un inventario de elementos expuestos, la clasificación de uso y tipo de materiales en cada estructura, de tal manera que se pueda desarrollar las funciones de vulnerabilidad y fragilidad para cada tipo de construcción.

La calidad de los datos es lo primero que hay que mejorar para una buena evaluación del riesgo. Por lo tanto, es recomendable que se complementen con datos de campo, siempre que sea posible, para tener una mejor estimación de resultados, así como datos económicos para poder evaluar los costos de los daños esperados en el municipio de Tijuana.

Con esta evaluación preliminar se espera concientizar a la población a la hora de decidir construir en zonas propensas a inundarse o elegir la forma de construcción. Las viviendas de materiales ligeros y de madera son las más vulnerables ya que no cuentan con cimentación rígida y son propensas a que se las lleve la corriente.

Peligros Geológicos para el municipio de Tijuana.

Capítulo 3. Identificación de peligros Geológicos

El área urbana del municipio de Tijuana ha sido afectada frecuentemente por fenómenos asociados a debilitamiento, inestabilidad y deslizamiento de terreno. En algunos casos el fenómeno ha sido recurrente y en otros se mantiene latente la posibilidad de reactivación. Adicionalmente se han detectado sitios donde el terreno ha dado muestras de debilitamiento y sitios con evidencia de inestabilidad de terreno. Esta situación requiere contar con un acervo que permita conocer y ubicar donde han ocurrido, cuando iniciaron, cuántos son, de que magnitud, y su condición actual. Para lograrlo se cumplió con un programa de reconocimiento de campo de las áreas que han sido impactadas por el fenómeno de deslizamiento de terreno.

3.1 Mapa de Deslizamientos.

El Mapa de deslizamientos de terreno es la representación gráfica de la ocurrencia de deslizamientos. Se elaboró a partir de información actualizada, obtenida directamente en las zonas afectadas. Se compone de dos capas una identificada como GA-Deslizamientos-zona-urbana-áreas, que incluye la cobertura en área de terreno afectado, la forma que ha adoptado y su ubicación. Otra capa identificada como GP_Deslizamientos_zona_urbana_puntos, se refiere a la ubicación de referencia por coordenadas de cada caso recorrido en campo. Comparando las dos capas se observarán más puntos que áreas, esto debido a que en algunas zonas con antecedente de deslizamiento no fue posible el acceso por diversos motivos.

La capa de deslizamientos que representa áreas, está ligada a una tabla de atributos que contiene información de la colonia donde ha ocurrido el deslizamiento, coordenadas de referencia, fecha de inicio del fenómeno, área afectada con dato actualizado, tipo de fenómeno, altura máxima del escarpe en la zona de cabecera, el desnivel topográfico entre el pie de la masa deslizada y la cima de la corona en el escarpe de cabecera, la dirección de movimiento, el estado o condición actual y las observaciones pertinentes percibidas durante la visita de reconocimiento. La capa de puntos se refiere al posicionamiento en el mapa de la coordenada de referencia de cada evento recorrido. En la mayoría de los casos se podrá visualizar en el mapa un polígono acompañado de un punto, sin embargo en otros casos, los menos, solo será visualizado el punto,

indicando de no fue posible reconocer el estado actual de esos deslizamientos. A esta capa está asociada una tabla de atributos que contiene colonia donde se ubica el evento, coordenadas de referencia para ubicar en mapa, datos de latitud y longitud, fecha conocida de inicio del fenómeno, magnitud del área afectada, desnivel de altura entre el pie de la masa inestable y la corona del escarpe de la cabecera, dirección de movimiento de la masa inestable, estado del evento identificado durante el reconocimiento de campo, observaciones sobre aspectos importantes de cada caso y la ubicación por Delegación Administrativa del Municipio.

3.1.1 Uso del Mapa.

Representando conjuntamente las capas con áreas y puntos de deslizamientos sobre el mapa base del municipio de Tijuana donde se incluyen las delegaciones administrativas, puede identificarse en que delegaciones están concentradas más afectaciones por deslizamiento (destacando la Delegación San Antonio de los Buenos y la Delegación Sánchez Taboada), asimismo, el tamaño del polígono en el mapa es representativo de la magnitud de cada deslizamiento, permitiendo ubicar en que Delegación Administrativa están los deslizamientos que han afectado mayor área (Figura 33).

Los números que identifican cada polígono es el número de referencia para identificar en que colonia se ubica, de acuerdo a la lista desplegada en la parte inferior del mapa (Figura 33), este número es el mismo que corresponde en la tabla de atributos, columna ID. En los casos donde solo se aprecia un círculo color rojo en el mapa, es indicativo que no fue posible el acceso a la zona pero que el evento ocurrió, también tiene un número de identificación para ubicar en la lista inferior la colonia donde se ubica, por ejemplo número 47 que corresponde a la colonia Centro Urbano 70-76 en la Delegación Mesa de Otay y número 48 correspondiente a la colonia Jardín Dorado en la Delegación Centenario; de acuerdo a la tabla de atributos de la capa GP_Deslizamientos_zona_urbana_puntos. Este mapa está dirigido a funcionarios y autoridades con capacidad en la toma de decisiones para salvaguardar la integridad física de los ciudadanos. En la procuración de la integridad de la infraestructura vital para proveer servicios básicos y complementarios. En el análisis de usos de suelo y los eventuales cambios. En el desarrollo y control urbano. En la movilidad de las personas y el transporte. Planificadores Urbanos y desarrolladores de vivienda.

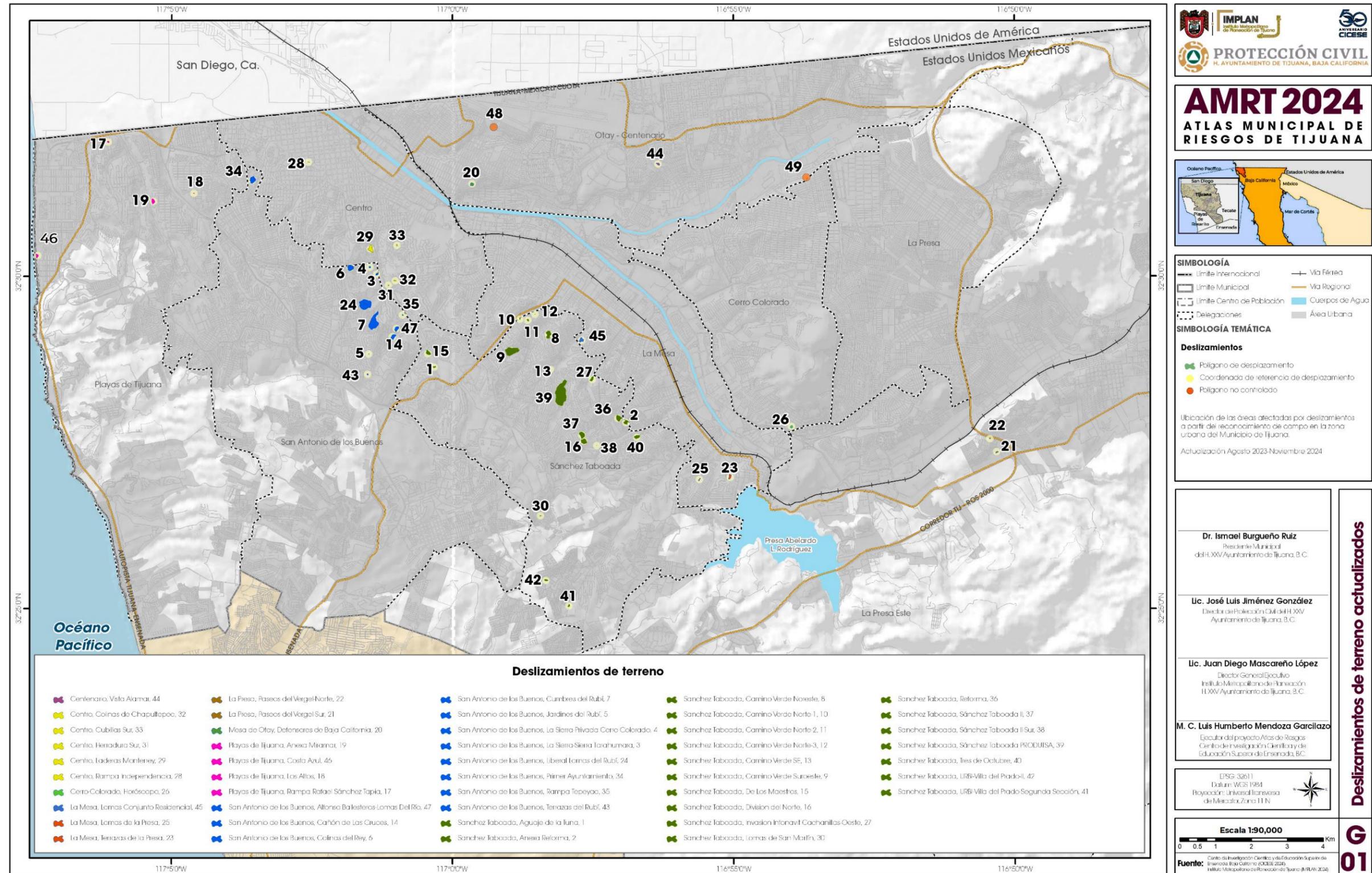


Figura 33. Mapa de Deslizamientos de terreno con la representación gráfica de las áreas afectadas y el número ID correspondiente en la tabla de atributos.

3.2 Zonas con potencial de licuefacción

El término licuefacción, originalmente acuñado por Mogami & Kubo (1953), históricamente ha sido usado en conjunción con una variedad de fenómenos relacionados con deformaciones del terreno causados en suelos no-cohesionados, saturados en condiciones de no drenaje y bajo cargas cíclicas. La generación de una excesiva presión de poro bajo las condiciones de no-drenaje es un rango distintivo del fenómeno.

La licuefacción o licuación se induce generalmente por terremotos, en donde las ondas sísmicas generan un aumento en la presión de poro (en sedimentos no consolidados, saturados), reduciendo la tensión efectiva y disminuye la resistencia al corte (Palacios et al., 2021), comportándose como un líquido o semilíquido, provocando la expulsión de agua y el consecuente hundimiento.

El medio ambiente deposicional, el medio hidrológico y la edad de un depósito, son elementos que contribuyen a la susceptibilidad de licuefacción (Youd y Hoose, 1977). La susceptibilidad puede producirse debido a la combinación de los siguientes factores (Palacios et al., 2021):

- a) Edad de los sedimentos (suelos y depósitos sedimentarios jóvenes presentan baja cohesión);
- b) Profundidad del nivel freático (más susceptible por encima de 3 m, debajo de esta profundidad se vuelve menos susceptible);
- c) Tamaño y forma del grano, los procesos geológicos que sorteán suelos en distribuciones de tamaño de grano uniformes y estados sueltos son altamente susceptibles;
 - i. Arena de grano medio a fino es vulnerable a la licuación.
 - ii. Las arenas uniformemente graduadas, de grano muy grueso a medio tienen mayor probabilidad de licuarse.

- iii. Arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas más severas.

- d) Origen de los sedimentos. Consecuentemente, depósitos fluviales, coluviales y eólicos, cuando están saturados pueden ser susceptibles. También se ha observado en abanicos-aluviales, valles aluviales, playas, terrazas y estuarios, pero con menos frecuencia que anteriores;
- e) Potencia de los sedimentos.
- f) Amplitud de la onda y duración de la vibración del terreno (la probabilidad de licuación aumenta con la magnitud y duración del sismo).
- g) Peso del recubrimiento y profundidad del suelo.

Para evaluar la susceptibilidad o potencial de licuación en Tijuana se utilizó el criterio geológico e hidráulico para evaluar los factores que condicionan la ocurrencia del fenómeno (ver Figura 34).

A partir de la cartografía geológica superficial de INEGI se identificó el área que abarcan los materiales sedimentarios recientes (Cuaternario). Este material aluvial está depositado a lo largo del río Tijuana en la porción central, en el Alamar al este y el Florido al sureste. Estos depósitos albergan al acuífero Tijuana (0201, Conagua 2024). El medio acuífero está constituido por depósitos clásticos de origen aluvial y coluvial de granulometría variada, así como conglomerados. El espesor de sedimentos acumulados varía de 140 m a 300 m, principalmente a lo largo del Río Tijuana. Por otro lado, los niveles freáticos en el año 2013 variaron de 4 a 15 m (CONAGUA, 2024), siendo un acuífero somero. Según el análisis regional y tomando en cuenta los factores que condicionan la ocurrencia de la licuación se concluye que, principalmente en la zona río Tijuana, la Presa Abelardo L. Rodríguez y el cauce del arroyo Alamar son susceptibles a licuefacción, sin embargo se requiere la ampliación de los estudios, para que, a través de ensayos geotécnicos, geofísicos e información piezométrica de pozos se pueda caracterizar de forma más específica la granulometría, saturación, condiciones de carga etc. a nivel local. Estos estudios se pueden complementar con los escenarios sísmicos a sumarlos a la vulnerabilidad de sistemas expuestos (como lo indica la norma PROY-NOM-006-SEDATU- SEDATU, 2024).

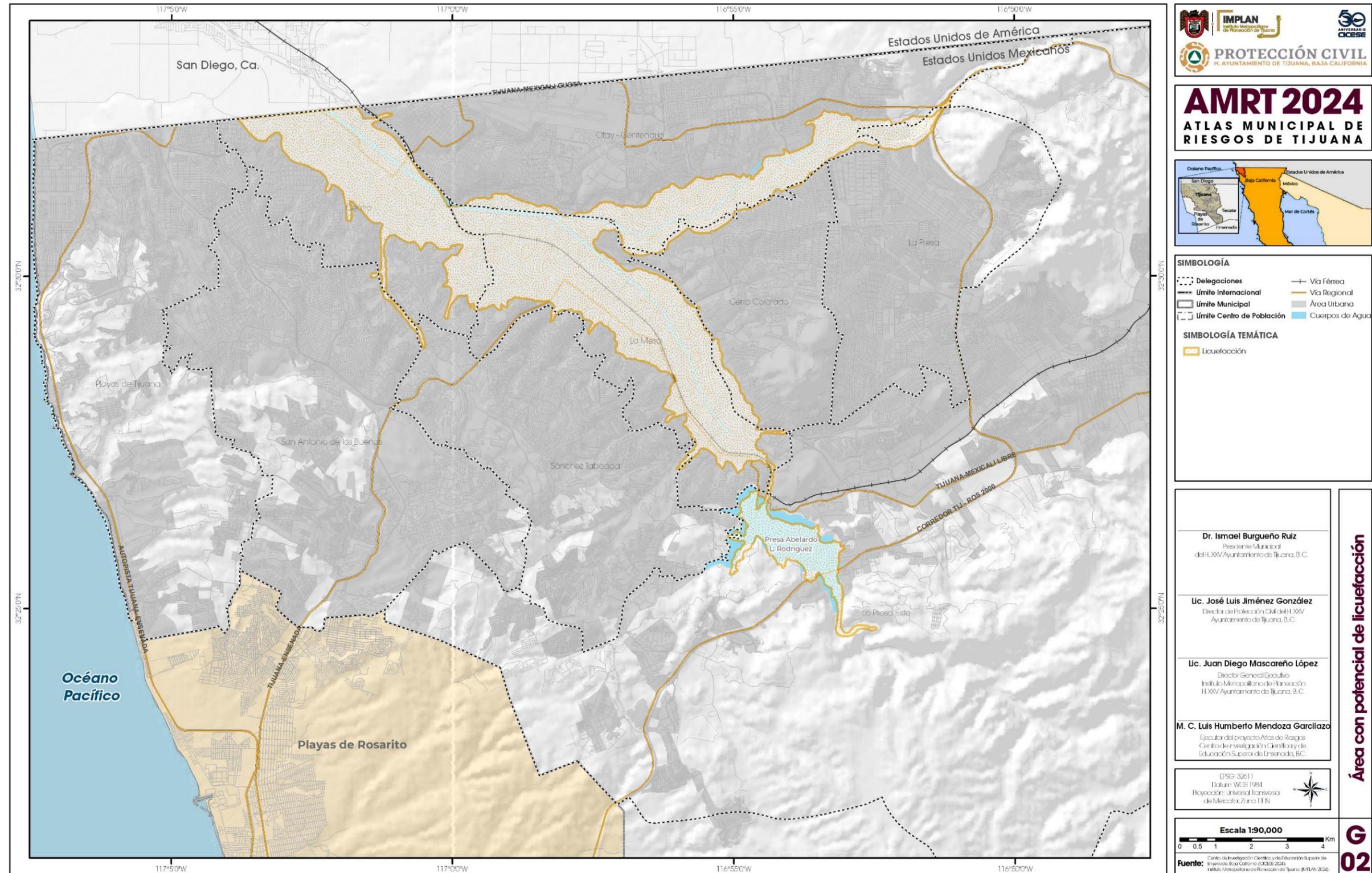


Figura 34. Mapa de área con potencial de licuefacción.

Peligros Sísmicos para el municipio de Tijuana.

Capítulo 3. Descripción de mapas de peligros sísmicos

Los productos generados para el capítulo de peligro sísmico de la actualización del Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana, versión 2024 - IMPLAN Tijuana, corresponden a 36 mapas construidos con sistemas de información geográfica (ARCGIS). El mapa base proporcionado por el IMPLAN fue utilizado para cada producto y contiene información de los límites del municipio de Tijuana, delegaciones, cuerpos de agua y área urbana. Los resultados de cada variable o parámetro físico son representados en diferentes escalas de colores, curvas y puntos.

Los detalles de la fuente de datos, bases de datos construidas, adquisición y metodologías de procesado se describen en el documento de las memorias de cálculo.

3.1 Fallas sismogénicas (S01)

Las fallas sismotectónicas toman importancia porque se interrelacionan directamente con los movimientos sísmicos, ya sea que el movimiento sísmico provenga de una falla ya identificada o bien un evento (terremoto o sismo) sea lo suficientemente grande como para generar, activar, extender o en algunos casos inactivar los segmentos de falla. Para ello es importante la actividad de los sismólogos que se encargan de identificar los epicentros de los sismos (localización espacial) y correlacionar estos con la información histórica, descriptiva y geométrica espacial de las fallas, para identificar la actividad sísmica y su potencial generador de daños en alguna región específica.

Para identificar las fallas que toman el carácter de sismogeneradoras de una región, se ha revisado la información bibliográfica de identificación de fallas que pueden imponer peligro sobre el municipio de Tijuana, ya sea por su capacidad de grandes acumulaciones de energía, como por su distancia a la región de estudio. El detalle de la metodología se puede consultar en el documento de memorias de cálculo.

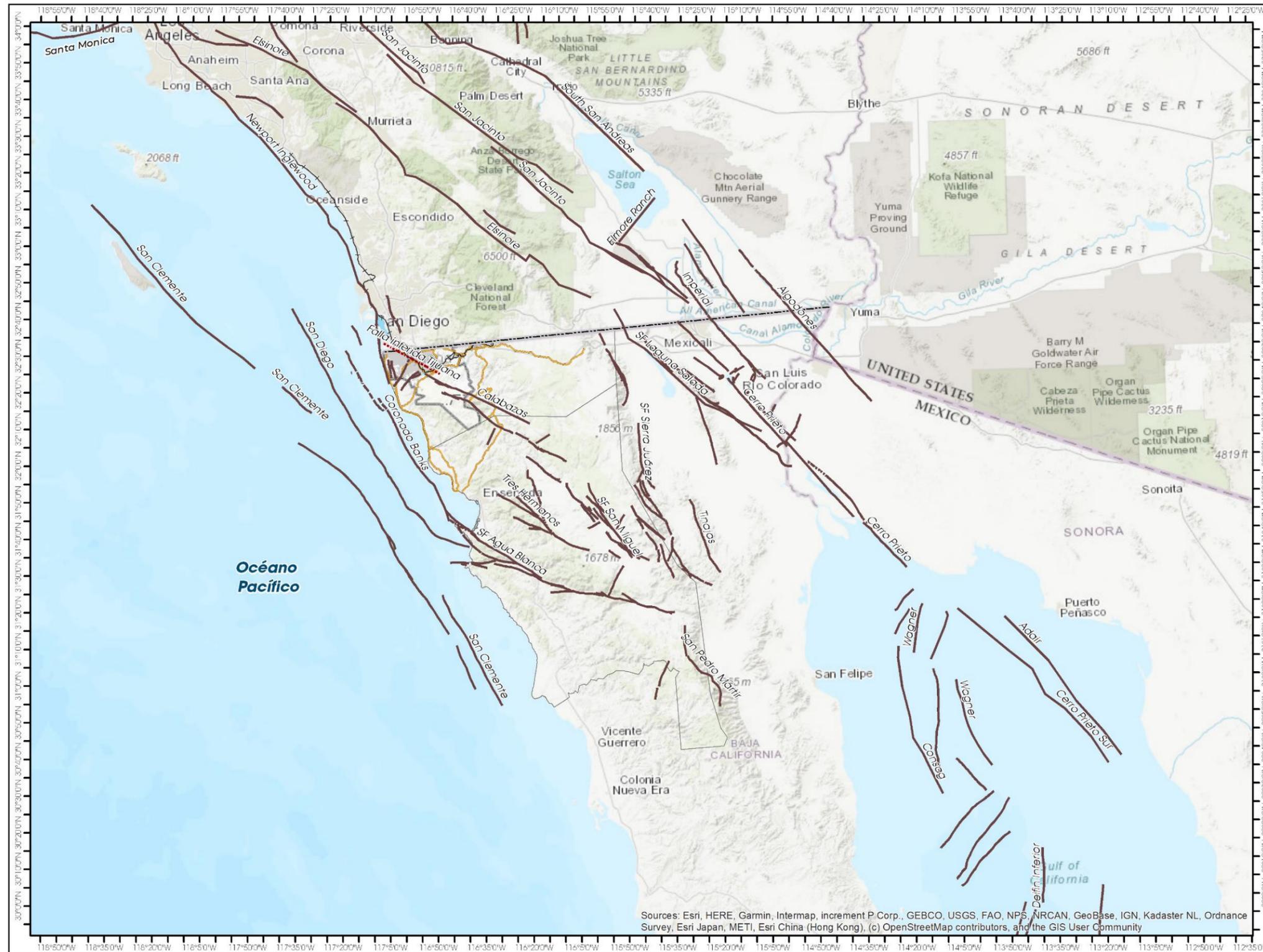
El mapa S01 (Figura 35) muestra las fallas que se han identificado como resultado de la actividad tectónica de las placas Norteamérica y Pacífico, de las cuales pondremos mayor atención a las

fallas de la región del sur de California y norte de Baja California; porque ahí se encuentra ubicado el municipio de Tijuana y en específico el área de estudio. El mapa muestra que el municipio de Tijuana se encuentra expuesto a la actividad sísmica. Son de consideración especial los sistemas de fallas Rose Canyon, Silverstrand, La Nación, Vallecitos y Calabazas, principalmente debido a la combinación de su potencial de generar sismos fuertes como a la cercanía con la zona urbana de Tijuana. La geometría que se aprecia en las expresiones superficiales de las fallas puede dar una idea de la magnitud que se esperaría por su eventual rompimiento, ya que existen varias relaciones empíricas entre la magnitud y las dimensiones de los segmentos de falla. Es pertinente hacer notar que no es esperable el rompimiento simultáneo de todo un sistema de falla, sino de algún segmento aislado en la mayoría de los casos. Es notable en el mapa sistemas de fallas cerca de la costa, Océano Pacífico, sur de California y sureste del municipio de Tijuana.

El mapa S01 puede ser utilizado para la identificación de sistemas de fallas regionales que podrían considerarse como peligro sísmico para ciudades, poblaciones y zonas urbanas. La distribución de fallas puede ser utilizada por especialistas que deseen evaluar escenarios sísmicos debido al rompimiento de alguna falla. También la localización geográfica de fallas puede ser utilizada como información a priori en estudios geofísicos de gravimetría, estudios de deslizamientos y mapeo estructural en geología.

3.2 Sismicidad histórica (S02)

La sismicidad es la medida de la actividad sísmica en regiones tectónicamente activas. La información que producen los sismos se almacena en registros sísmicos y se elaboran catálogos sísmicos para su posterior distribución por parte de los servicios sismológicos. Las localizaciones epicentrales de los sismos se hace mediante ajustes estadísticos de las observaciones de los tiempos en los que arriban las fases sísmicas conocidas como onda P y onda S que son propios de cada evento y cuyas lecturas de tiempos pueden conllevar un error humano, debido a la apreciación subjetiva del técnico en sismología encargado del proceso.





AMRT 2024

ATLAS MUNICIPAL DE RIESGOS DE TIJUANA



SIMBOLOGÍA

<ul style="list-style-type: none"> Límite Internacional Límites Municipios Externos Límite Islas Límite Municipal Límite Centro de Población 	<ul style="list-style-type: none"> — Via Férrea — Via Regional Área Urbana Cuerpos de Agua
--	---

SIMBOLOGÍA TEMÁTICA

- Fallas Sismogénicas BC
- Falla Inferida

Dr. Ismael Burguenio Ruiz
Residente Municipal del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

Lic. José Luis Jiménez González
Director de Protección Civil del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

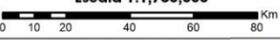
Lic. Juan Diego Mascareño López
Director General Geológico Instituto Metropolitano de Planeación del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

M. C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo
Geocultor del proyecto Atlas de Riesgos Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.

ETSG-32611
Datum: WGS 1984
Proyección: Universal Transversa de Mercator, Zona 11 N



Escala 1:1,780,000



Fuente: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE 2024). Instituto Metropolitano de Planeación de Tijuana (IMPLAN 2024).

S
01

Fallas Sismogénicas

Figura 35. Fallas sismogénicas

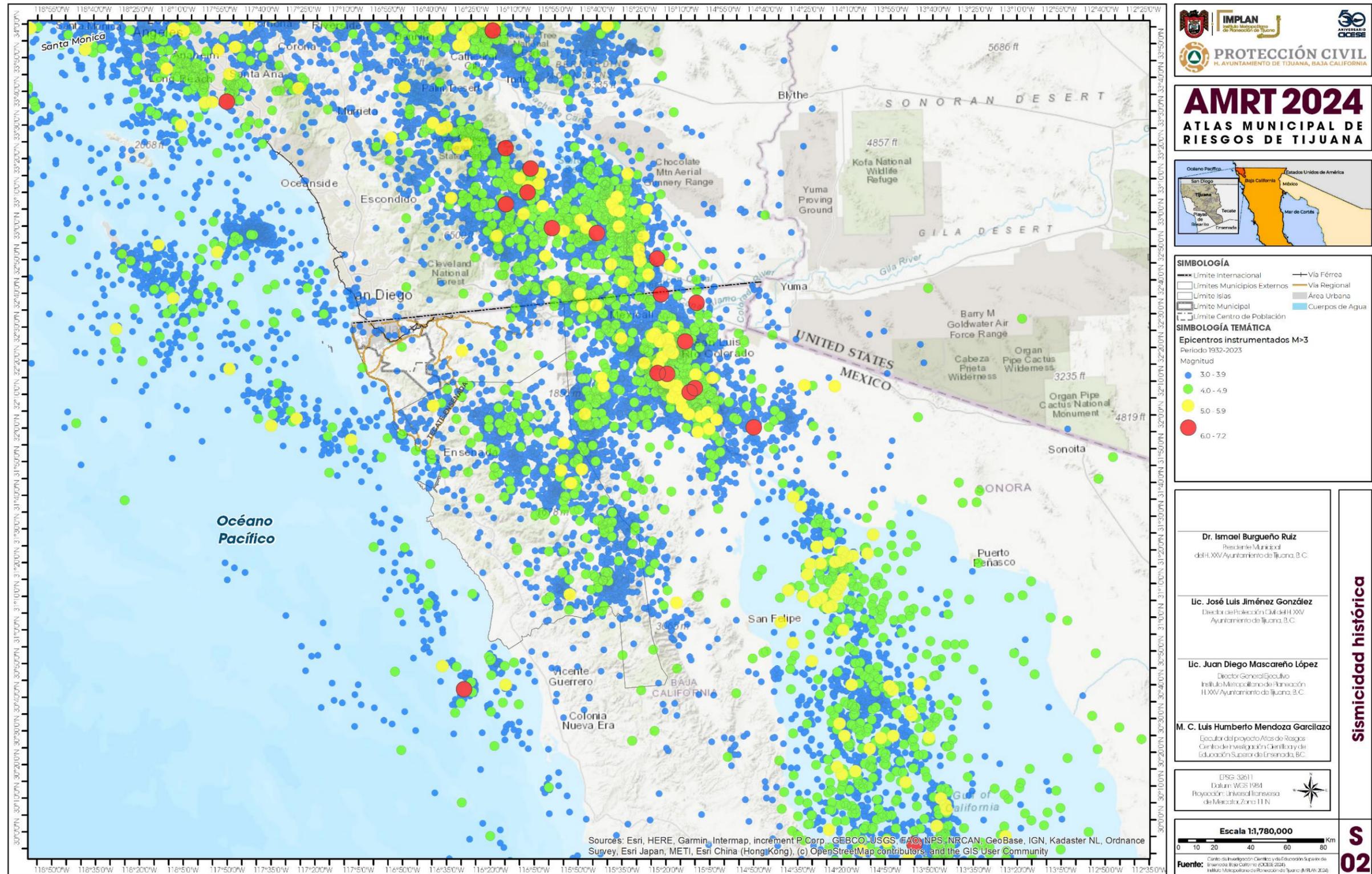


Figura 36. Sismicidad histórica

Para la elaboración del mapa S02, se utilizó la información recuperada de bases de datos de las instituciones: *International Seismic Catalog* (ISC, 2013), *Southern California Earthquake Data Center* (SCDEC, 2024) y Red Sísmica del Noreste de México (RESNOM, 1980), cuya cobertura instrumental les permite llevar los registros de la actividad sísmica en las cercanías del municipio de Tijuana. Se revisaron los catálogos en los siguientes rangos de fechas ISC (2024), inicia 1960-03-16 08:21:38 y termina 2022-05-29 15:26:55.15; SCEDC (2013), inicia 1932-01-03 17:58:10.01 y termina 2024-05-18 23:50:25.13; y RESNOM (1980), inicia 1979-10-15 23:16:53 y termina 2023-08-21 17:03:33. Los detalles de la metodología para unificar los catálogos se pueden consultar en la sección correspondiente del documento de memorias de cálculo.

EL resultado final de la selección de datos epicentrales fue un sólo catálogo unificado de información para mostrar la sismicidad histórica regional (1932-2023) cercana al área de estudio. El resultado queda expresado en el mapa S02 (Figura 36). El mapa muestra que gran parte de la sismicidad para magnitudes mayores a 5 grados, se concentra hacia el este del municipio de Tijuana donde se ubica la ciudad de Mexicali y sur de California. Los sismos en esta zona son de menor riesgo debido a su lejanía con respecto al municipio de Tijuana.

Es notable que dentro de un radio de 40 km alrededor de la zona urbana (salvo una franja hacia el noroeste) parece existir una zona de quietud sísmica, por la baja densidad de epicentros; eso no significa un bajo riesgo general para la ciudad, ya que las fallas fuera de ese radio tienen una combinación de magnitud y distancia con peligro elevado. Las zonas con mayor sismicidad cerca del municipio de Tijuana se concentran fuera del municipio hacia el sureste, principalmente en los sistemas San Miguel-Vallecitos-Calabazas. Dentro del municipio de Tijuana hacia la zona urbana la sismicidad es menor con magnitudes moderadas ($3 < M < 3.9$). Un evento de magnitud mayor a 4 se muestra al sureste de la mancha urbana.

El mapa S02 puede ser utilizado para identificar espacialmente las direcciones y magnitudes de los sismos que han ocurrido desde 1932 al 2023 en las cercanías al municipio de Tijuana. Esta información nos indica las regiones en donde han ocurrido sismos de mayor magnitud (por ejemplo, $M > 5$). Debido a que las distribuciones de los epicentros algunas veces siguen tendencias sistemáticas (líneas), puede ser utilizado para determinar lineamientos que podrían estar asociadas a fallas no mapeadas superficialmente.

3.3 Epicentros de la Red Acelerométrica de Tijuana 2017-2023 (S03)

Desde el año 2010 se mantiene una red formada por acelerómetros ubicados sobre los principales tipos de suelos que forman la geología superficial de la zona urbana de Tijuana. La intención de la red es el registro del movimiento del suelo inducido por terremotos, expresado por medio de la aceleración del suelo. En el área de la ingeniería, la aceleración del suelo es un parámetro muy utilizado para representar la sollicitación sísmica esperable sobre las estructuras asentadas en la superficie. Existe abundante evidencia de la variación de la respuesta de los diferentes tipos de suelos ante el arribo de la energía sísmica, de allí la necesidad de formar una base de datos abundante de aceleraciones en diferentes suelos del municipio, o al menos de la zona urbana, la cual subsanamos mediante esta red acelerométrica de Tijuana (RATJ).

El Mapa S03 (Figura 37) muestra los epicentros de 181 terremotos registrados en la RATJ en el periodo de 2017 a 2023, para los cuales se tienen los acelerogramas digitales triaxiales que sirven de base para caracterizar la respuesta sísmica de los suelos. La mayoría de los terremotos que registró la red, se ubican lejos del municipio de Tijuana y solo 6 dentro del municipio. El terremoto de mayor magnitud ($M=3.5$) que registró la RATJ dentro del el municipio de Tijuana fue el del 1 de abril del 2017. Hacia el sureste del municipio de Tijuana, fuera del municipio, se muestra una mayor sismicidad.

El mapa S03 puede ser utilizado para identificar regiones con mayor sismicidad a escala local del municipio de Tijuana (periodo 2017-2023) con la finalidad de planear el crecimiento urbano y realizar estudios que evalúen el peligro sísmico. En los mapas S19, S20 y S21 se presentan algunos de los estudios que se obtuvieron a partir de la base de acelerogramas presentados en el mapa S03.

3.4 Isosistas de diversos sismos (S04-S18)

Las isosistas son curvas geográficamente ubicadas en un área de interés, que nos indican los sitios en los que se presentó el mismo valor de intensidad sísmica. Para fines prácticos en la ingeniería esta información puede relacionarse directamente con el grado de daño que se presenta en las estructuras en una región determinada.

Para identificar los sismos con mayor probabilidad de presentar grandes daños, se revisaron los catálogos de sismos descritos en la sección 3.2 y extrajimos los sismos más cercanos al municipio de Tijuana con magnitud mayor o igual a 6 (Tabla 10). La Figura 38 muestra la localización de los sismos seleccionados.

Las isosistas de cada sismo se presentan en una serie de mapas redibujados e identificados como mapa S04 al S18 (Figura 39 a Figura 53). La información se presenta en curvas de iso-valores de intensidad sísmica en escala de colores con su valor arábigo. Los valores cercanos a 1, representan sismos imperceptibles, mientras que valores cercanos a 12 se consideran sismos catastróficos con destrucción total.

Tabla 10. Sismos históricos con $M \geq 6$. Las isosistas fueron calculadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

Número de sismo	Fecha	Hora	Magnitud
1	1933-03-11	01:54:11	6.4
2	1934-12-30	13:52:02	6.3
3	1934-12-31	18:45:43	6.4
4	1937-03-25	16:49:03	6
5	1940-05-19	04:36:47	6.9
6	1942-10-21	16:22:14	6.6
7	1951-01-24	07:16:52	6
8	1954-03-19	09:54:32	6.4
9	1968-04-09	02:28:58	6.6
10	1979-10-15	23:16:53	6.4
11	1980-06-09	03:28:19	6.3
12	1987-11-24	01:54:14	6.2
13	1987-11-24	13:15:59	6.2
14	2009-12-30	18:48:57	6
15	2010-04-04	22:40:40	7.2

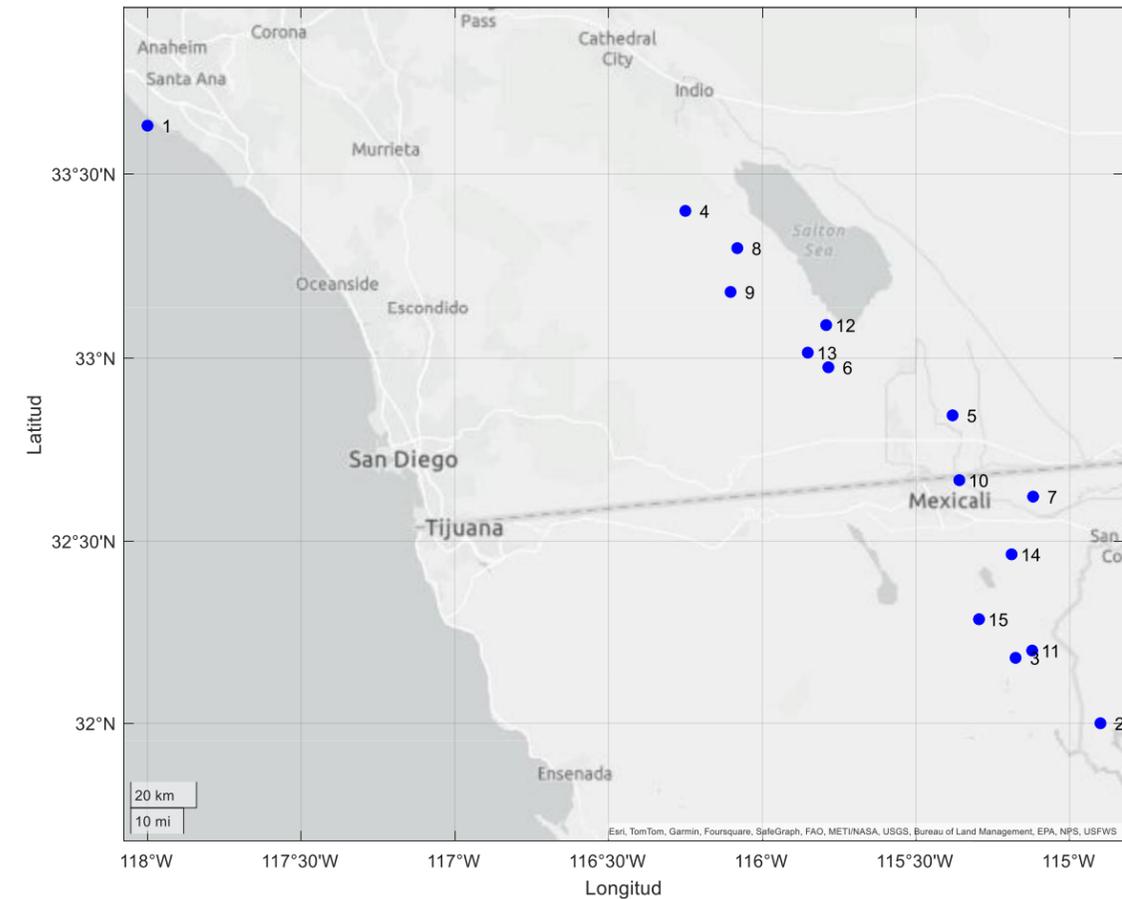


Figura 38. Epicentros de sismos históricos grandes con isosistas documentada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

La mayoría de los terremotos (13) muestran isosistas entre 3 y 4 en el municipio de Tijuana (mapas S04, S05, S06, S07, S08, S09, S10, S11, S13, S14, S15, S16, y S17). De la Figura 39 a la Figura 46 y Figura 48 a la Figura 52 se muestran las isosistas de estos terremotos. De acuerdo a la escala de Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) el grado de intensidad de estos terremotos es de leve a moderada. Los terremotos del 9 de abril de 1968 y 4 de abril del 2010 (mapas S12 y S18 de la Figura 47 y Figura 53) producen isosistas entre 4 y 5, por lo que su grado de intensidad es de moderado a un poco fuerte. Los mapas presentados en esta sección (S04-S18), nos da una idea del grado de intensidad en la escala de Mercalli, de terremotos que han ocurrido en el sur y norte de Baja California.

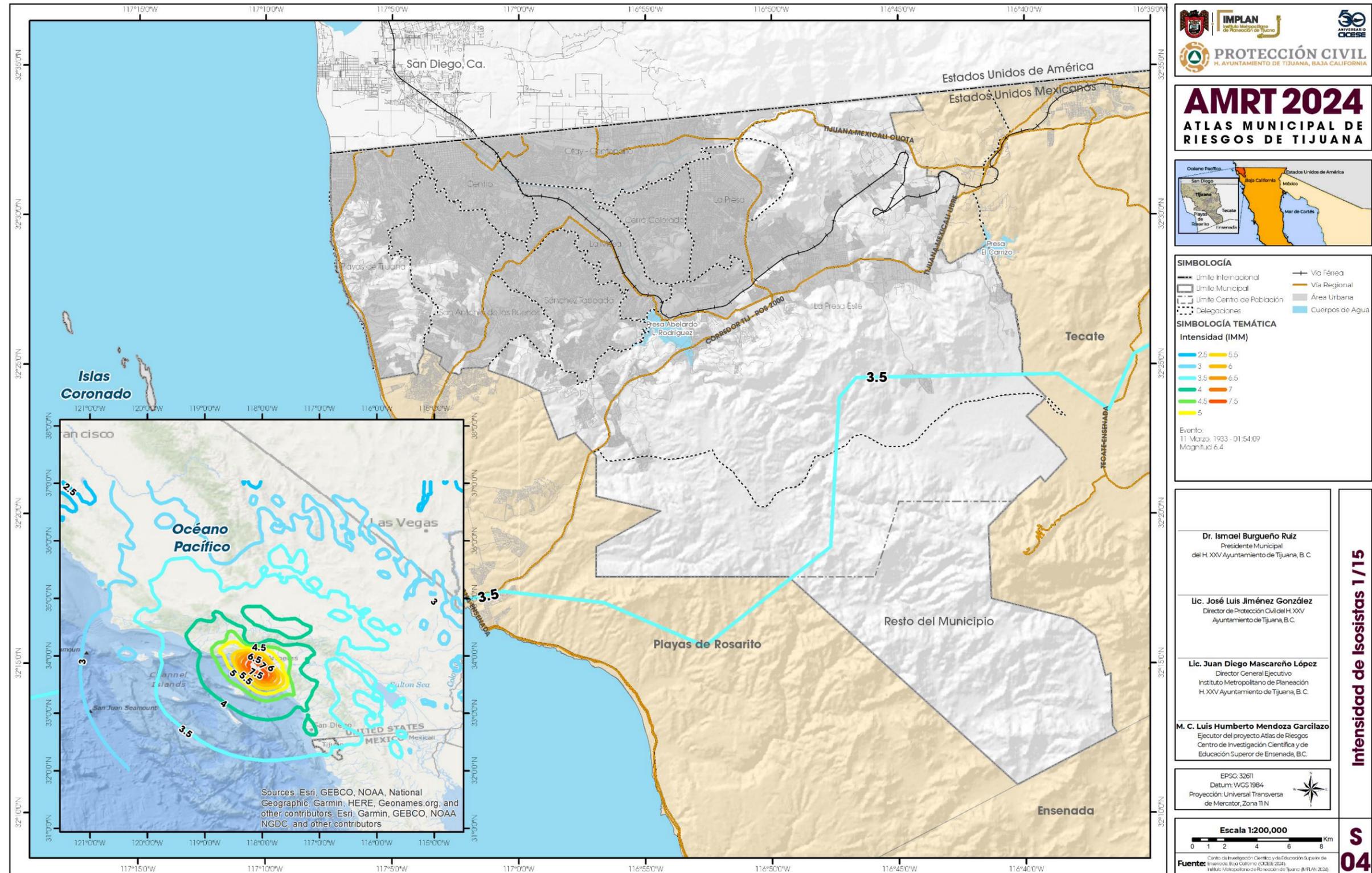


Figura 39. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 11/Marzo/1933 de magnitud 6.4 (mapa S04).

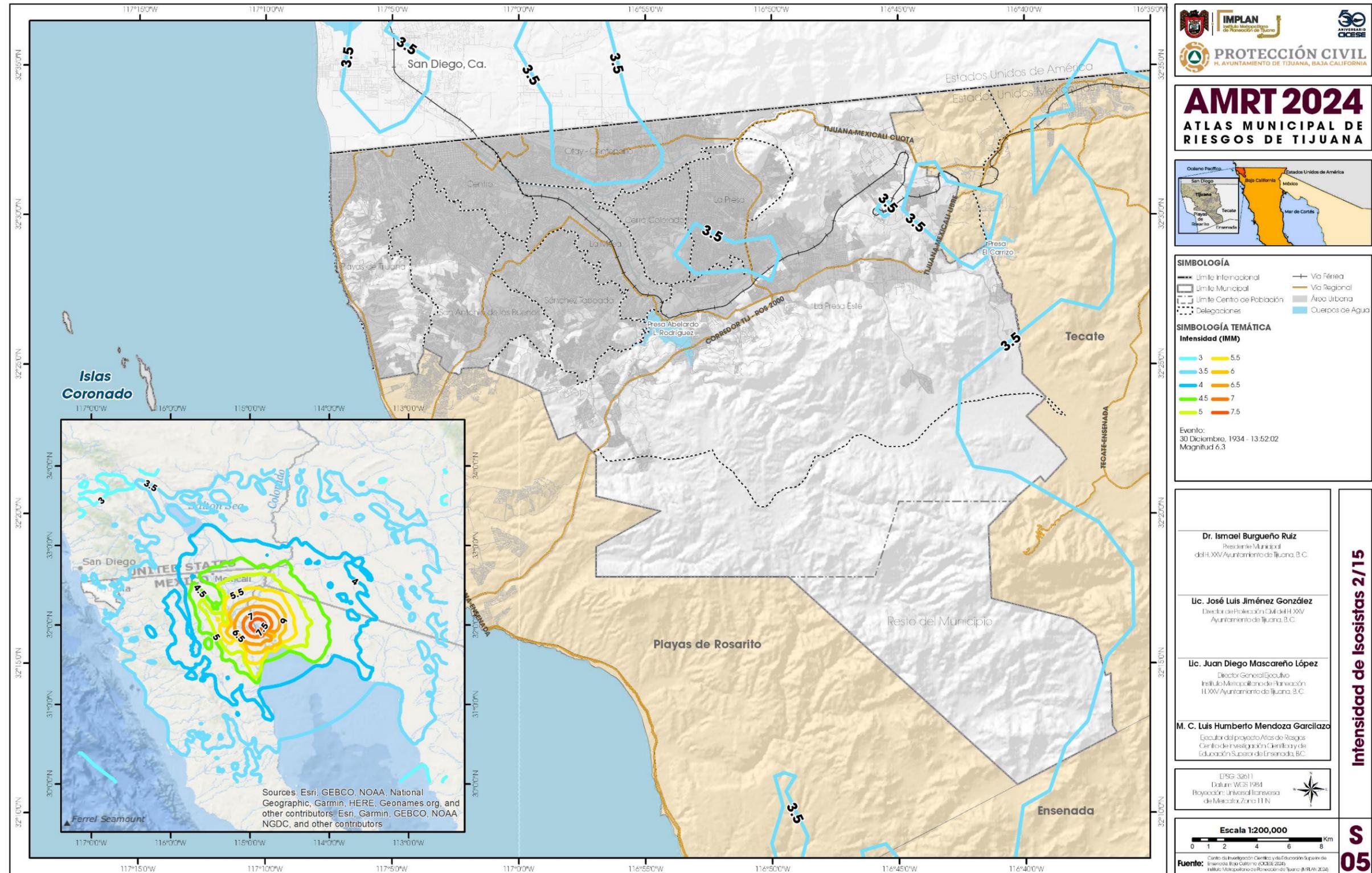


Figura 40. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 30/Diciembre/1934 de magnitud 6.3 (mapa S05).

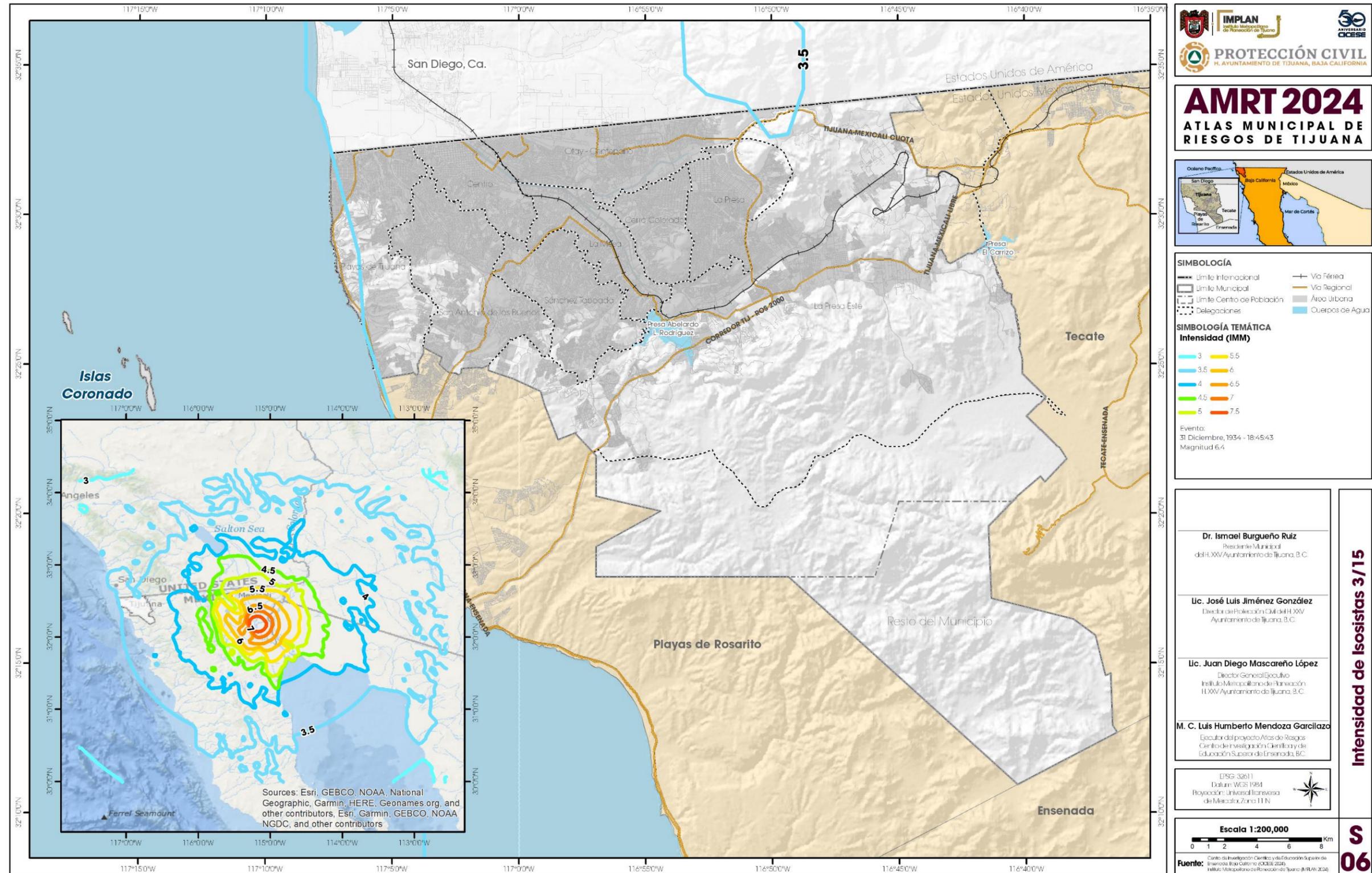


Figura 41. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 31/Diciembre/1934 de magnitud 6.4 (mapa S06).

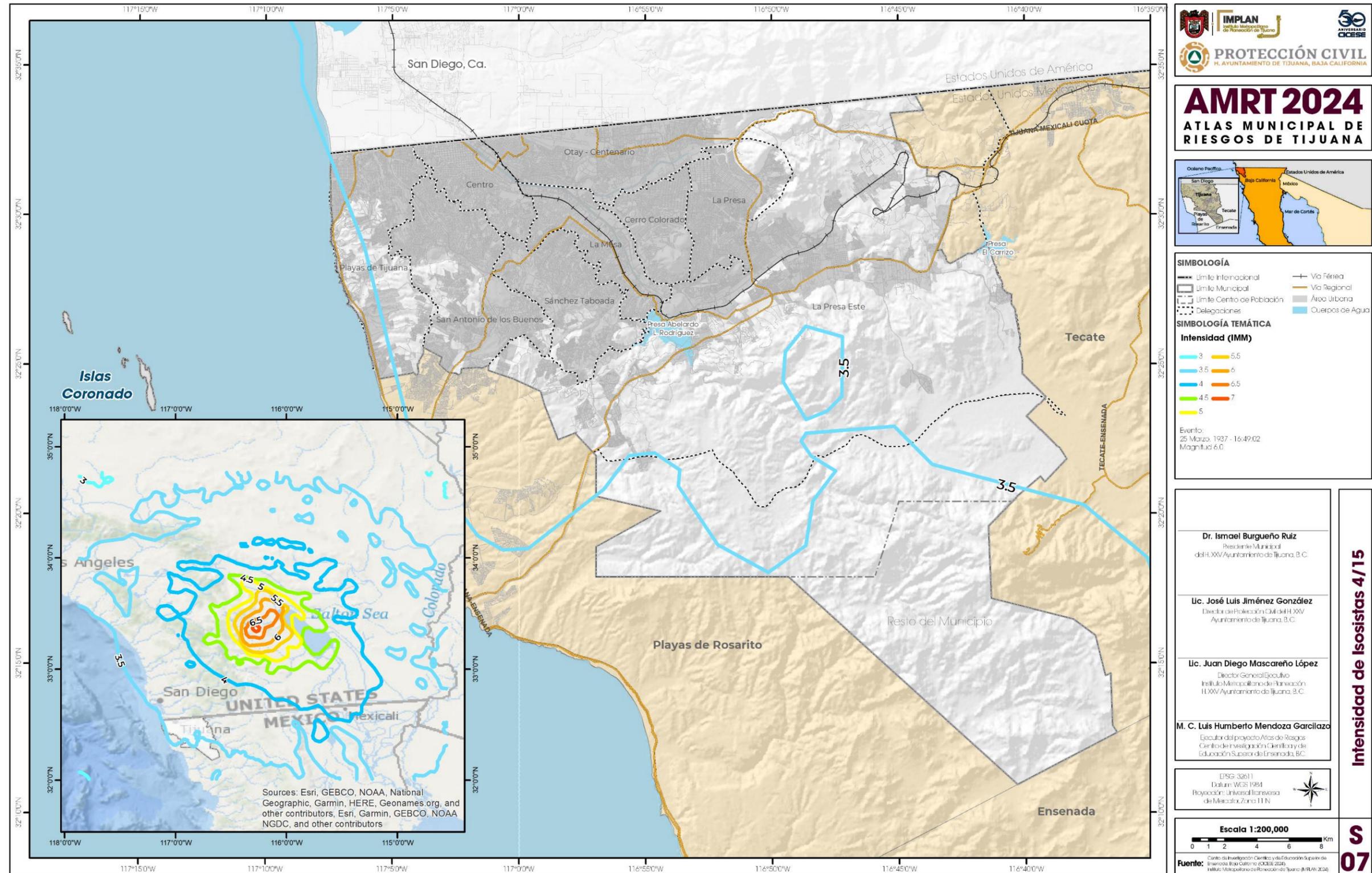


Figura 42. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 25/Marzo/1937 de magnitud 6.0 (mapa S07).

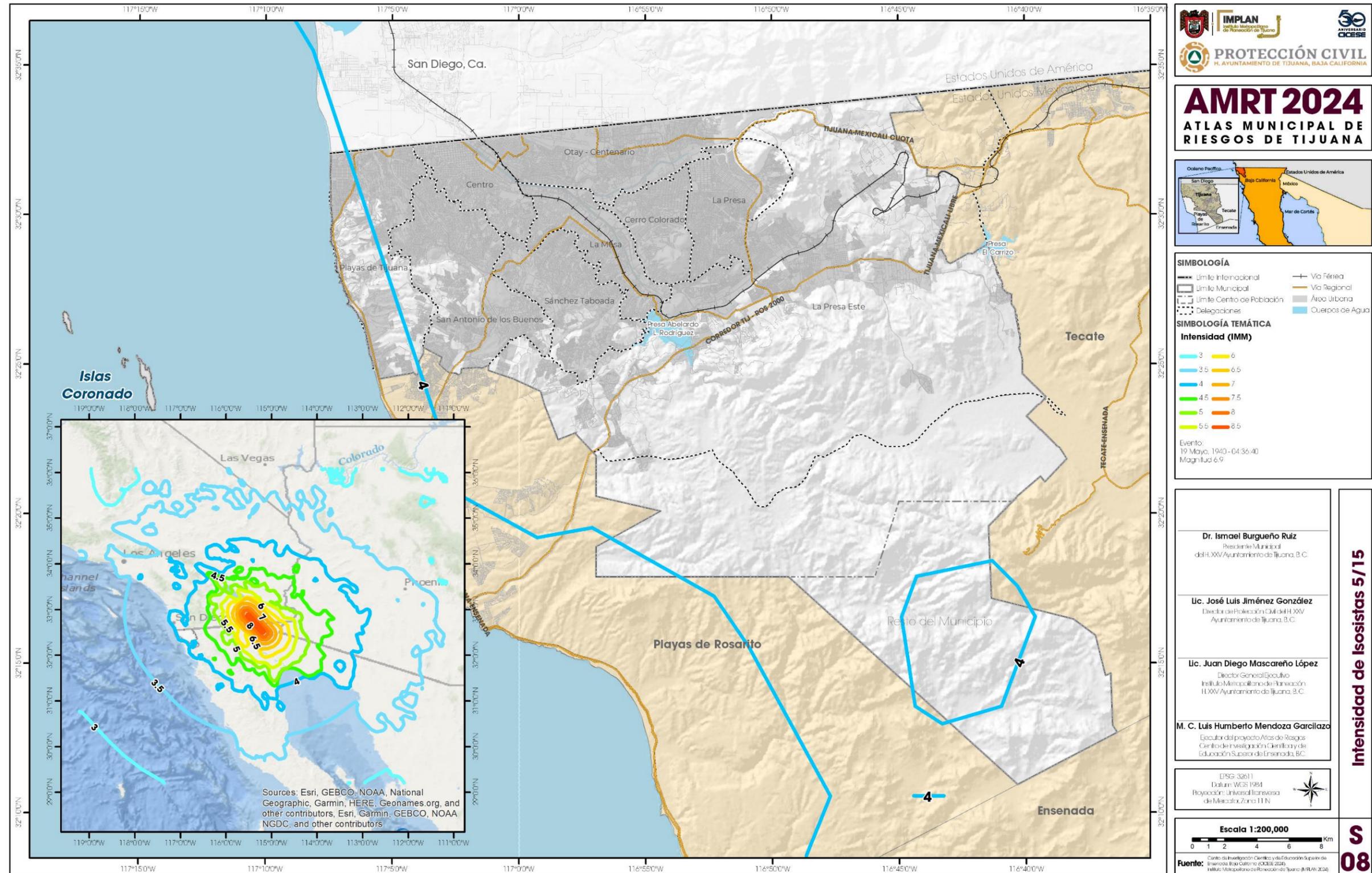


Figura 43. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 19/Mayo/1940 de magnitud 6.9 (mapa S08).

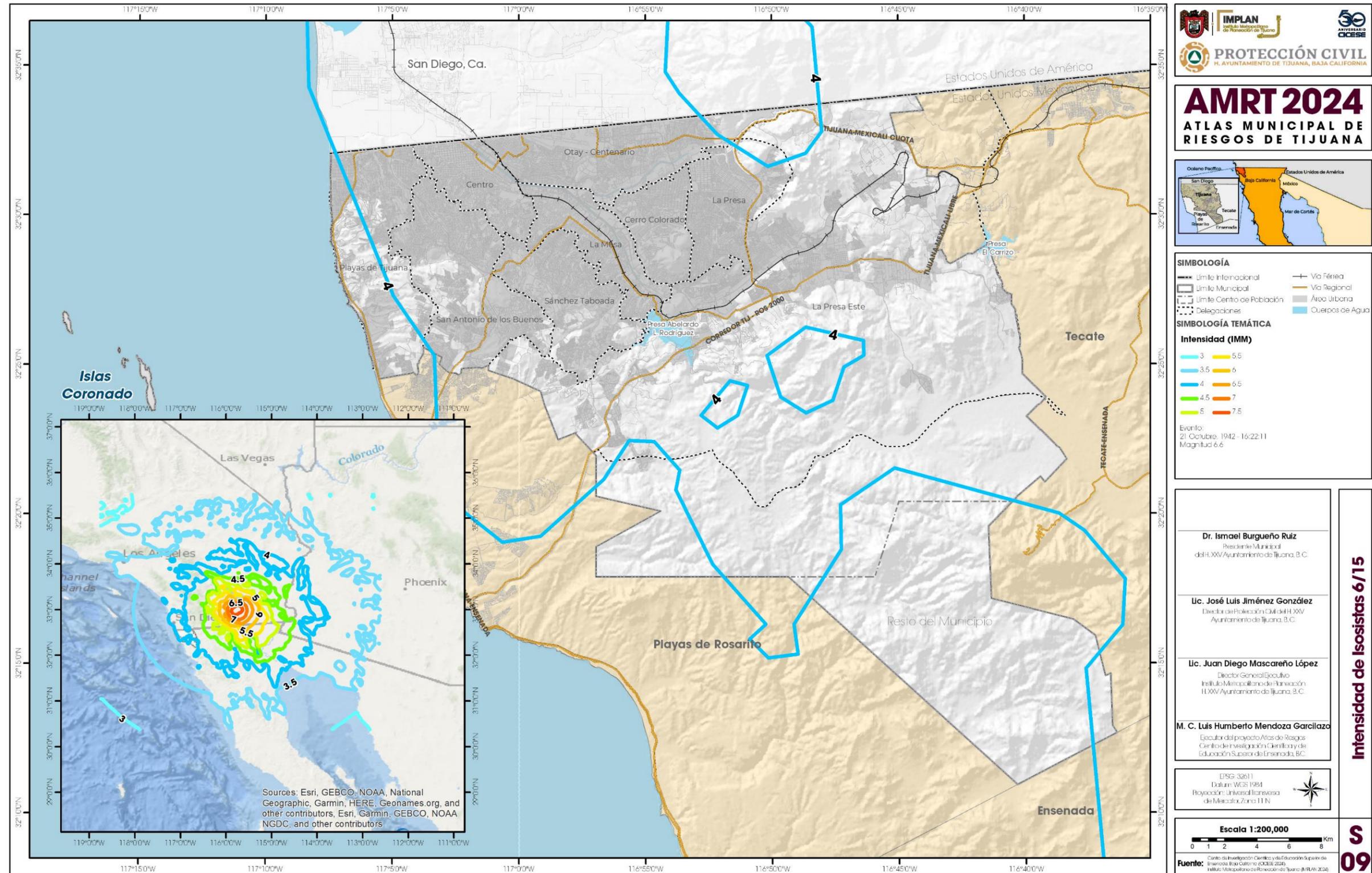


Figura 44. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 21/Octubre/1942 de magnitud 6.6 (mapa S09).

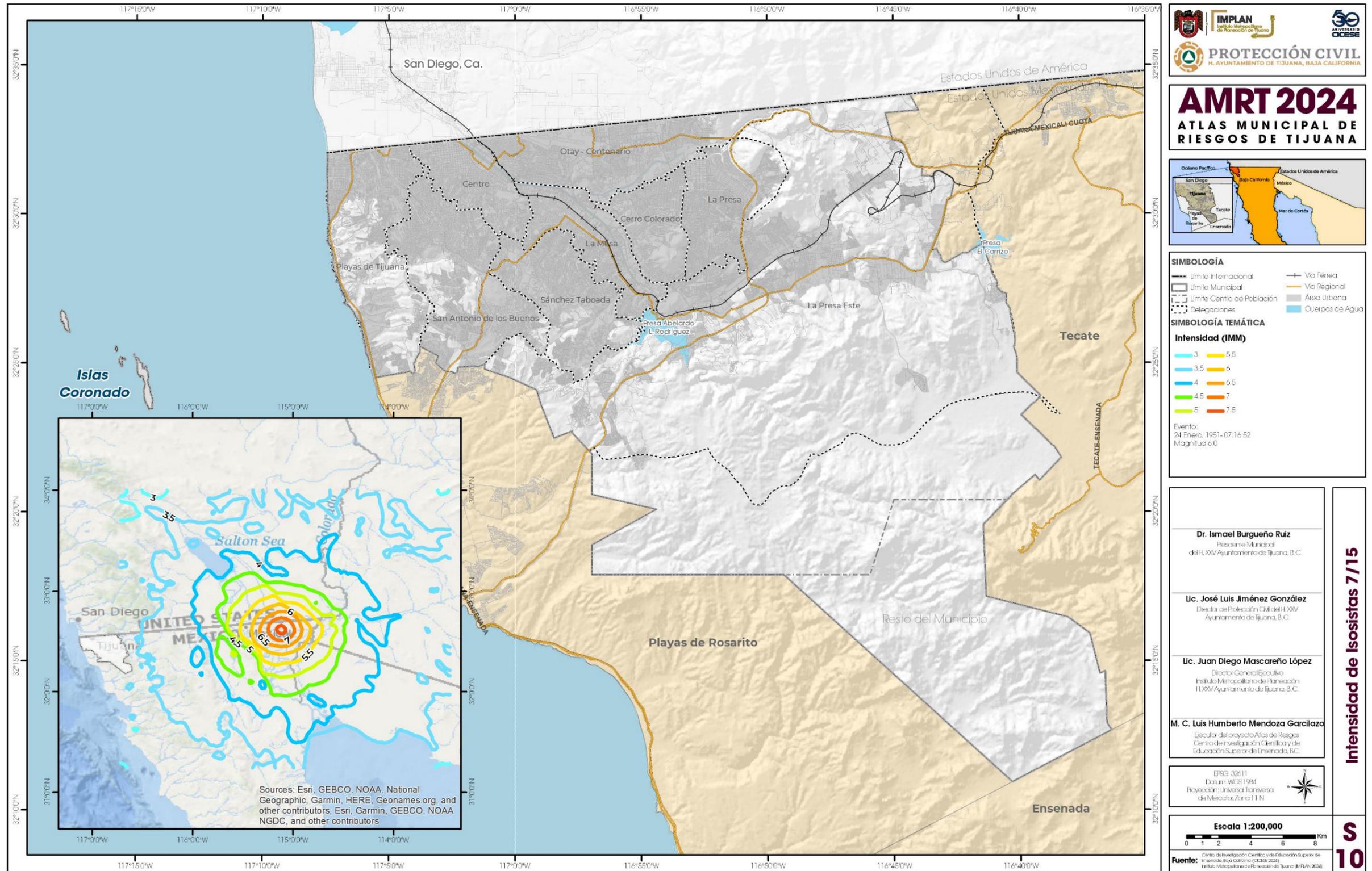


Figura 45. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Enero/1951 de magnitud 6.0 (mapa S10).

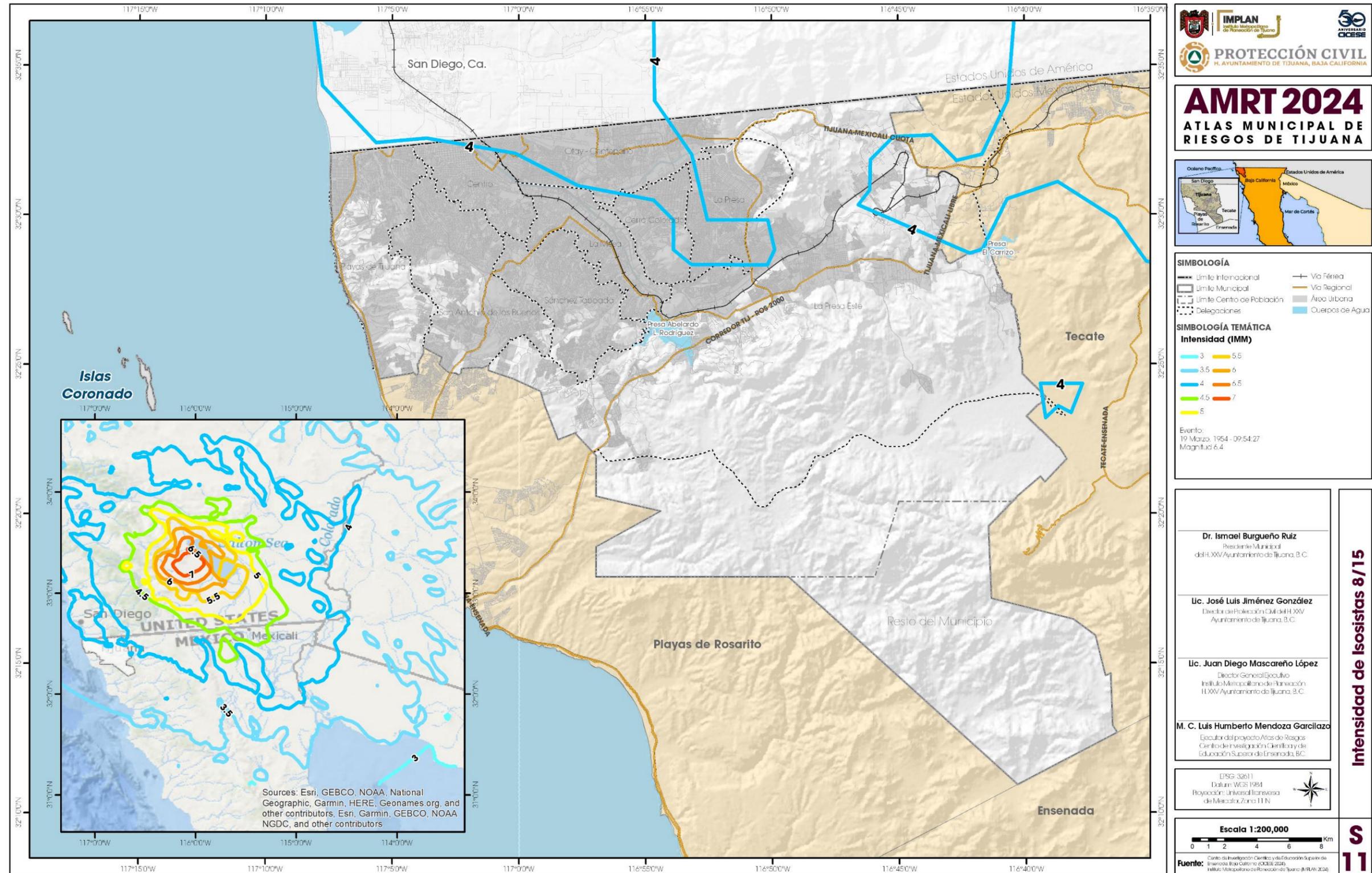


Figura 46. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 19/Marzo/1954 de magnitud 6.4 (mapa S11).

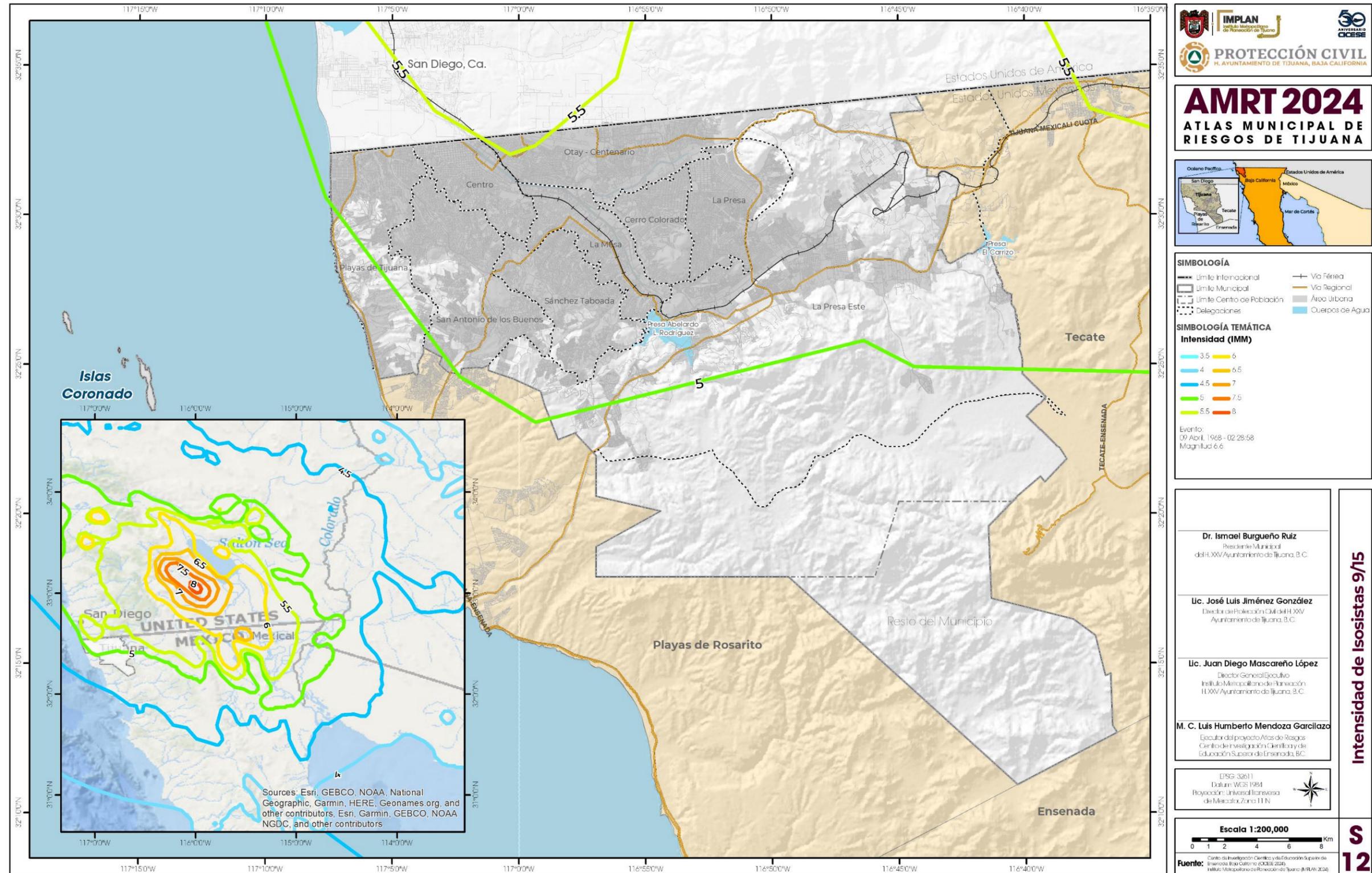


Figura 47. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 09/Abril/1968 de magnitud 6.6 (mapa S12).

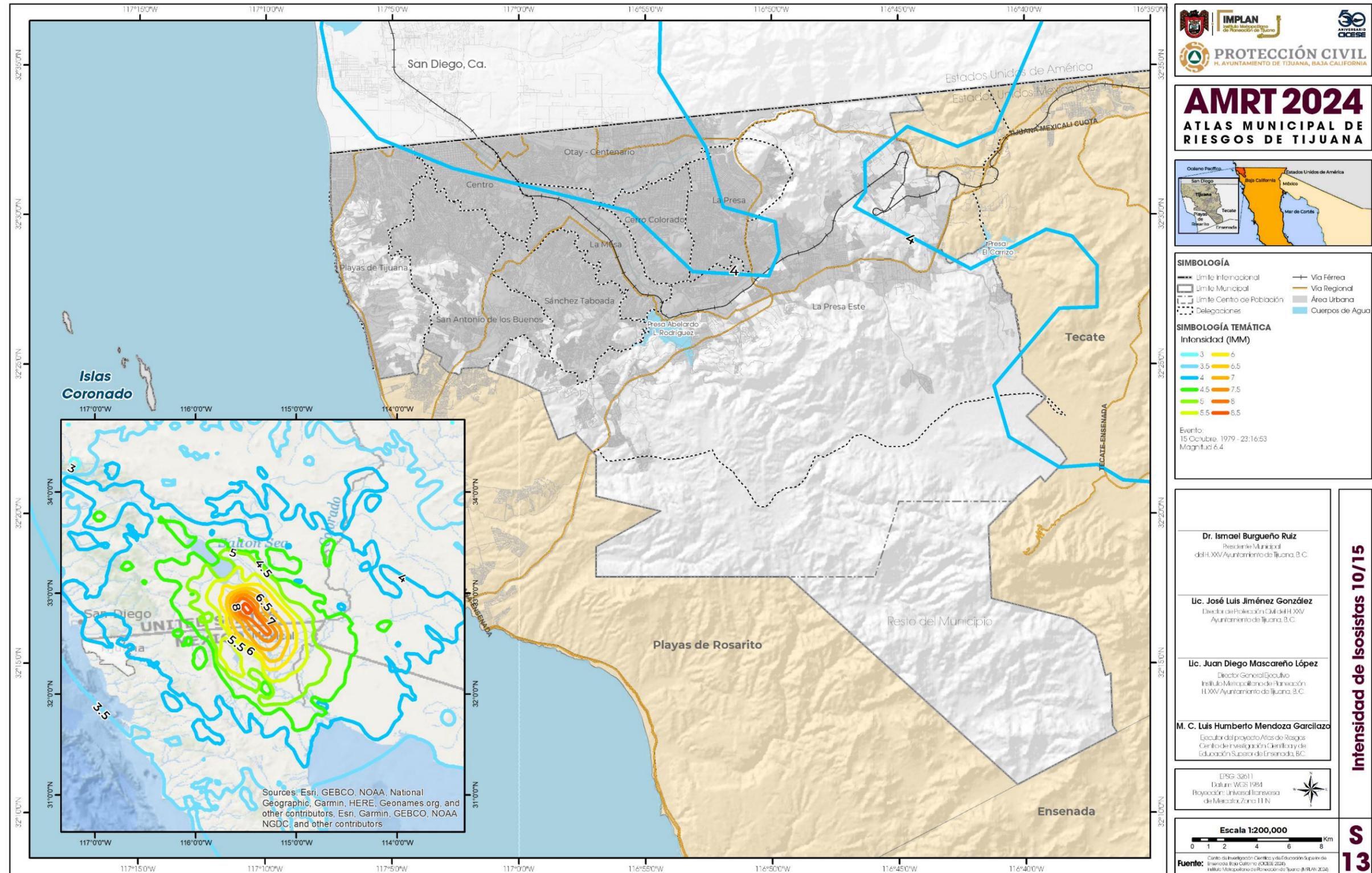


Figura 48. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 15/Octubre/1979 de magnitud 6.4 (mapa S13).

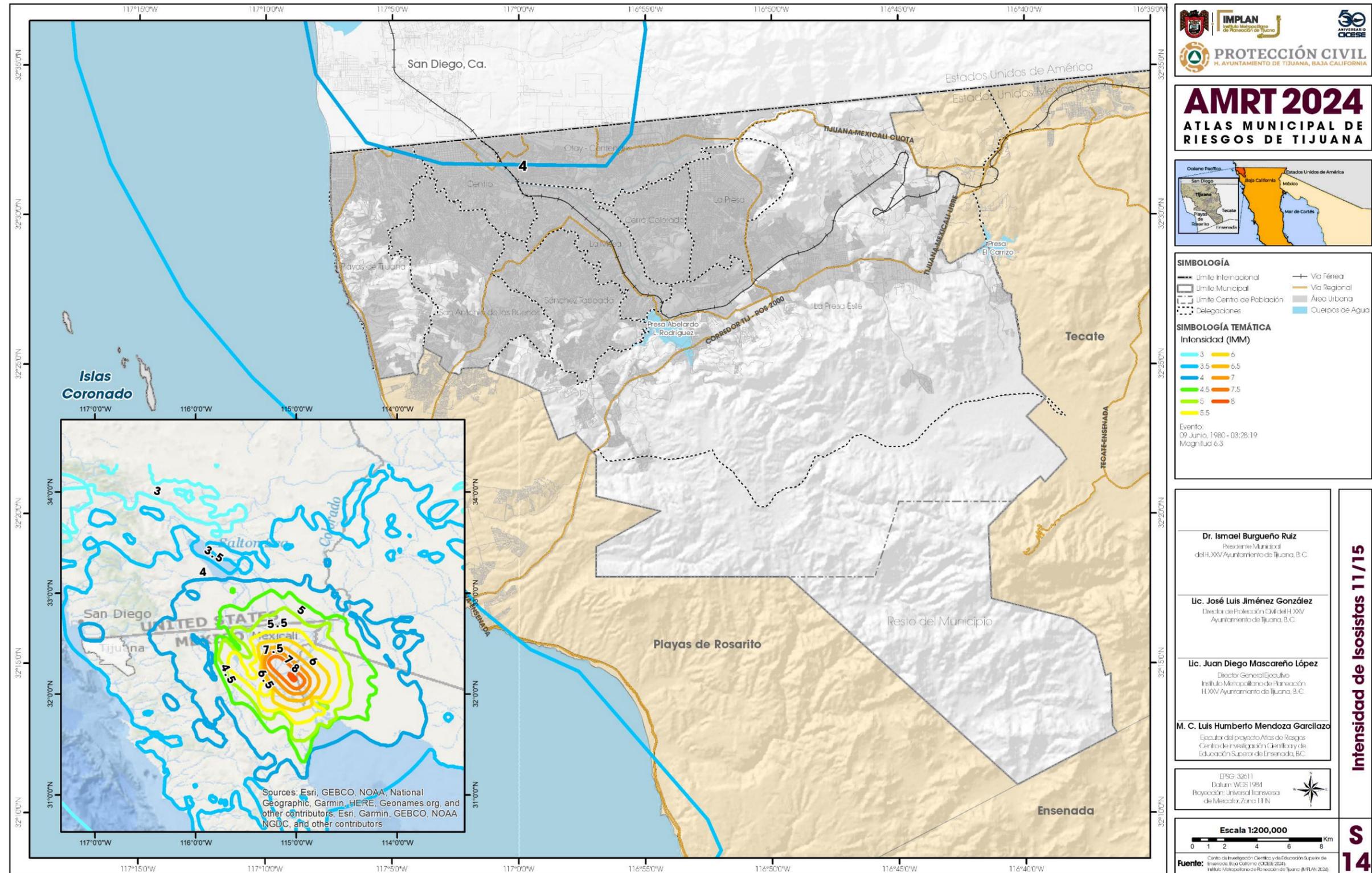


Figura 49. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 09/Junio/1980 de magnitud 6.3 (mapa S14).

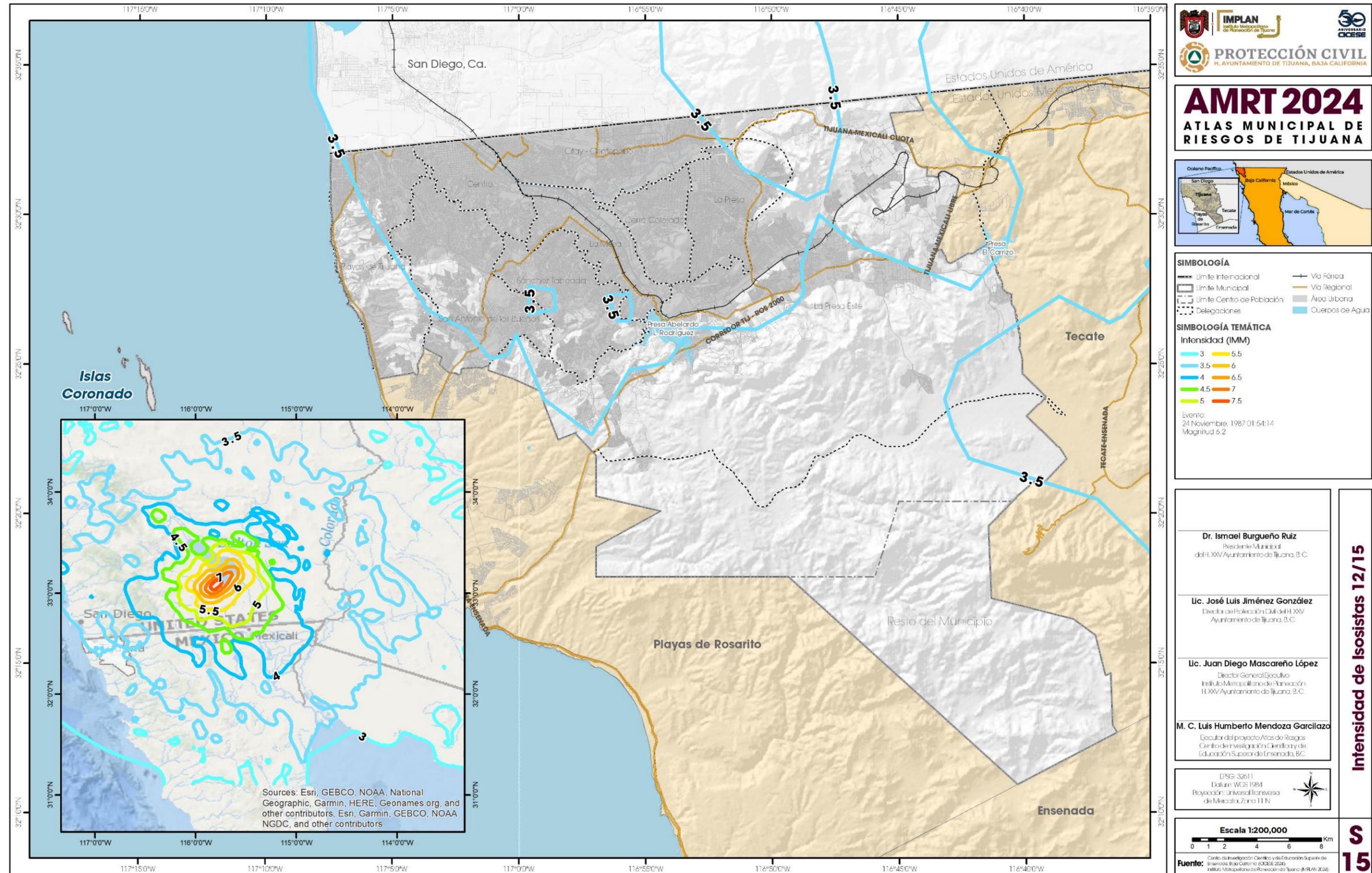


Figura 50. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Noviembre/1987 de magnitud 6.2 (mapa S15).

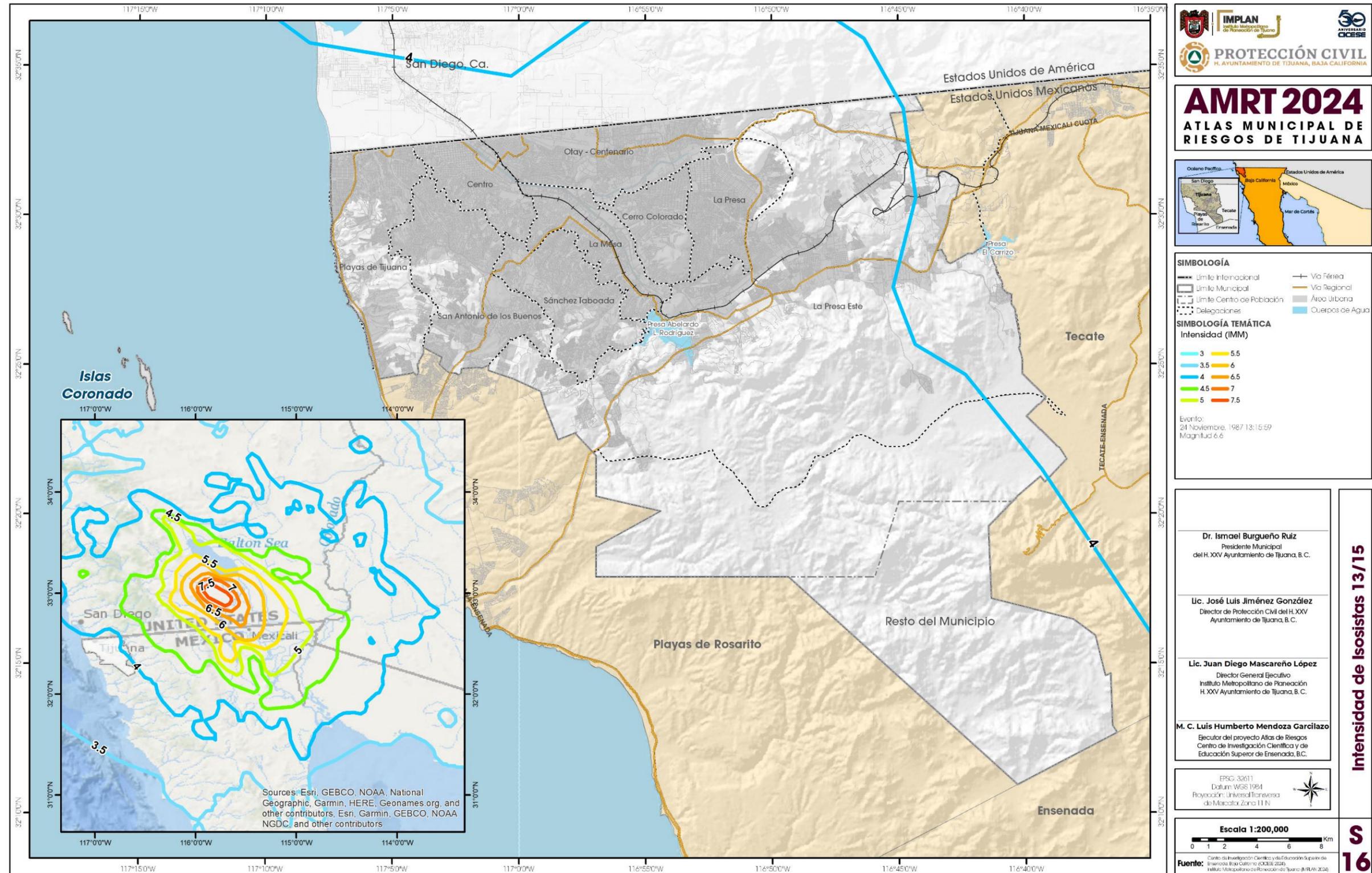


Figura 51. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 24/Noviembre/1987 de magnitud 6.2 (mapa S16).

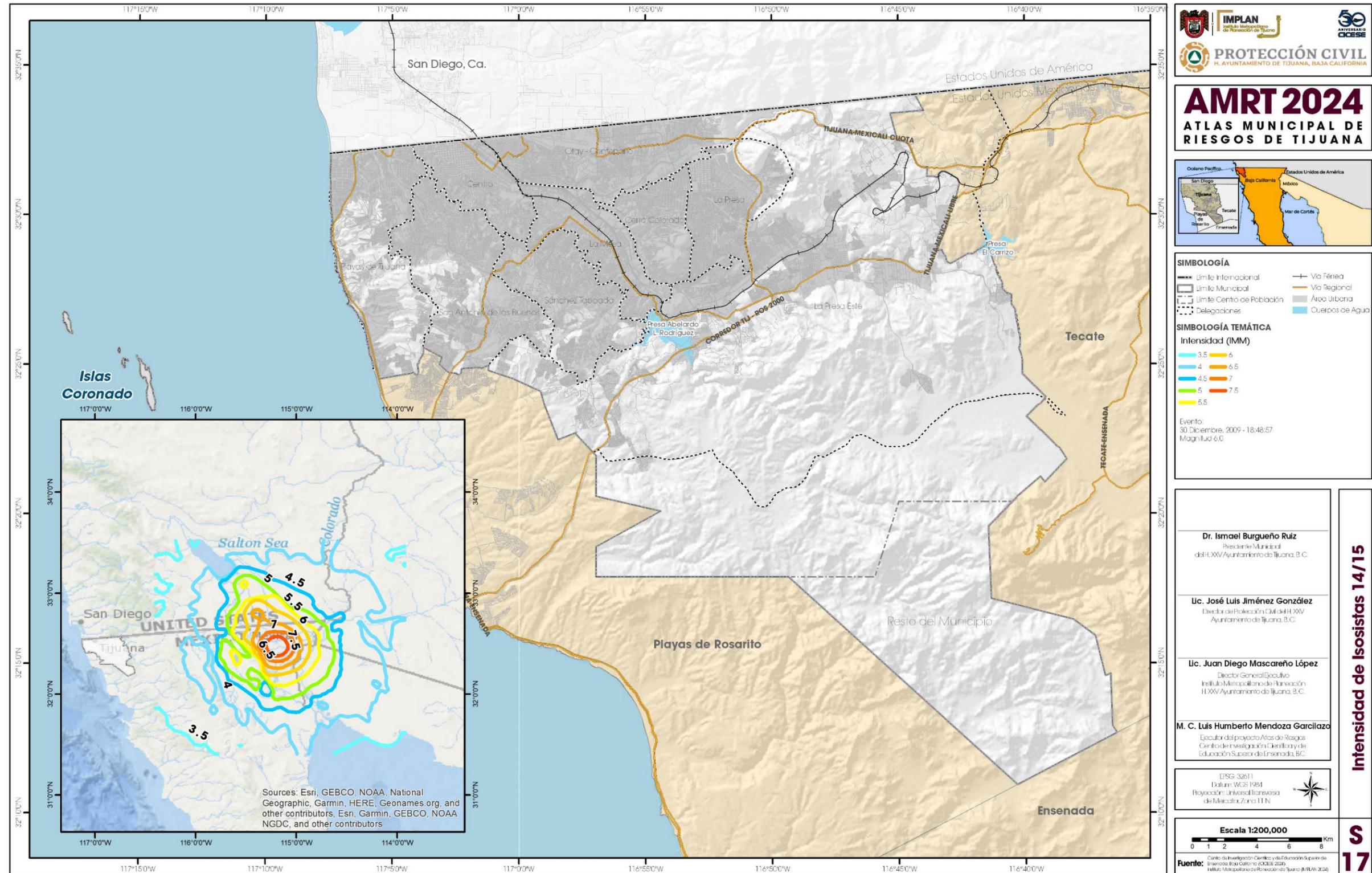


Figura 52. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 30/Diciembre/2009 de magnitud 6.0 (mapa S17).

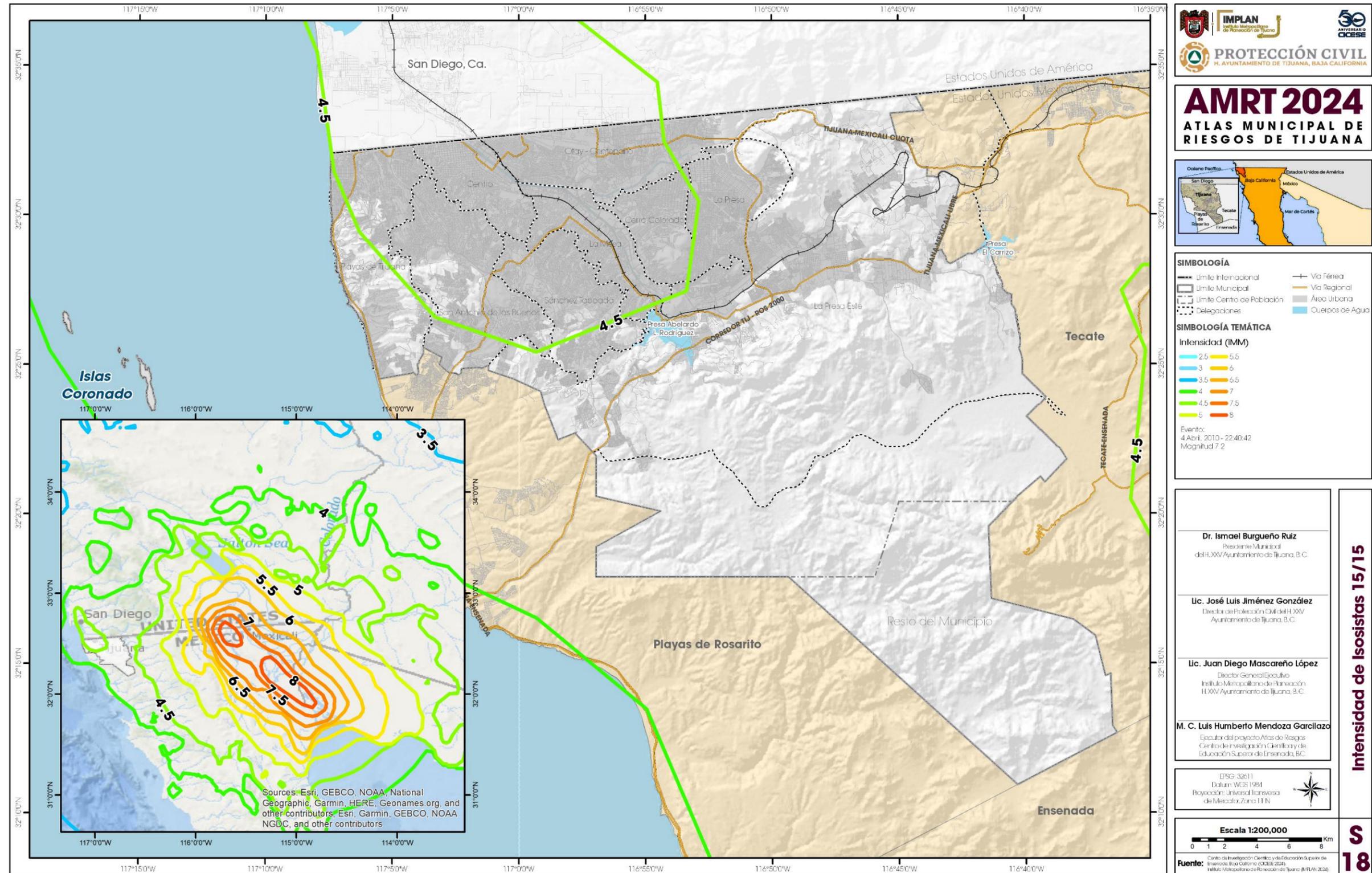


Figura 53. Intensidad de isosistas producidas por el evento del 4/abril/2010 de magnitud 7.2 (mapa S18).

3.5 Sismo del 2017-Abril-01 (S19-S21)

Como se anotó en la sección 3.3, la base de acelerogramas capturados por la RATJ sirve para caracterizar la respuesta de los diferentes tipos de suelos de la zona urbana de Tijuana y especificar las diferencias en algunos de las características más importantes de esa respuesta, como la amplificación del movimiento del suelo, la duración del paquete de movimientos mayores, el contenido espectral de frecuencias y la respuesta de estructuras de un grado de libertad.

En el mapa S19 (Figura 54 en el Atlas) se muestran los acelerogramas registrados para el sismo del 1 de abril de 2017, el cual ha producido las mayores aceleraciones en Tijuana, hasta 2023. Las trazas corresponden al componente horizontal norte-sur y su inicio se encuentra ubicado sobre el mapa en la posición del acelerómetro que lo registró. La escala horizontal (tiempo, en segundos) es común para todos los acelerogramas para visualizar las diferencias en la duración, mientras que las escalas verticales son diferentes, con el valor de la aceleración en unidades cm/s^2 .

La aceleración máxima producida por este sismo fue registrada en la estación HGTTJ ($\sim 59 \text{ cm/s}^2$) y la mínima en AGUTJ ($\sim 4.6 \text{ cm/s}^2$). El uso de este mapa permite identificar en que delegaciones se produjeron las aceleraciones máximas del terreno. Esta información puede ser utilizada para la elaboración de espectros de diseño. Es importante mencionar que las aceleraciones registradas en cada estación pueden cambiar, ya que dependerá del epicentro del sismo, profundidad, magnitud y patrón de radiación.

El contenido espectral del movimiento del suelo, usualmente expresado mediante los espectros de Fourier, depende de la combinación de los tres factores que componen un movimiento sísmico: fuente, trayectoria y sitio. En suelos sedimentarios granulares ese contenido espectral está fuertemente influido por el efecto de sitio. La Figura 55 (S20 en el Atlas) muestra los espectros de amplitud de Fourier de cada una de los tres componentes ortogonales (norte-sur, este-oeste y vertical) de los acelerogramas registrados durante el sismo del 1 de abril de 2017.

En el ámbito de la ingeniería es bien sabido que el movimiento de una estructura asentada sobre un suelo que se mueve como resultado de un terremoto no necesariamente es igual al del suelo. Desde el punto de vista de sistemas lineales, el movimiento del suelo es la entrada al sistema representado por la estructura y la salida es el movimiento de la estructura. Es usual que la señal de entrada a ese sistema lo sea un acelerograma y la salida sea la respuesta de una estructura de un grado de libertad, con variados periodos naturales de oscilación y amortiguamientos. A esa colección de respuestas, en función del periodo (segundos) se le conoce como espectro de respuesta y puede ser empleado como dato inicial para estimar la respuesta de estructuras más complejas.

La Figura 56 (S21 en el Atlas) muestra el resultado de calcular, en cada estación de la RATJ, los espectros de respuesta de aceleración absoluta (SA), para un amortiguamiento del 5%, a partir de los acelerogramas horizontales de los 10 sismos con mayor amplitud. En cada estación se normalizaron a la unidad todos los SA y se promediaron. El resultado es una forma espectral promedio característica para cada sitio, que puede emplearse en un proceso de escalamiento mediante la aceleración PGA máxima esperable y así obtener el espectro de respuesta correspondiente al terremoto capaz de producir el valor de PGA empleada en el escalamiento.

3.6 Periodos dominantes del suelo (mapa S22)

Las propiedades dinámicas de los suelos (velocidades de corte y periodos) son parámetros importantes que influyen en el efecto de sitio y es información básica para estudios de ingeniería sísmica y geotecnia. Particularmente, el periodo dominante de vibrar del suelo es información básica para los ingenieros que diseñan estructuras civiles. Esta información representada a través de mapas, permite intuir de forma rápida el comportamiento dinámico del suelo a través de identificar las variaciones laterales del periodo.

El periodo dominante (inverso de la frecuencia) es un valor que representa el periodo natural de vibrar de los materiales más superficiales (suelo), depositados sobre roca firme o materiales más rígidos. Cuando el periodo aumenta, significa que el espesor del suelo aumenta o el suelo es más blando (la velocidad de la onda S disminuye), lo que produciría efectos de sitio considerables.

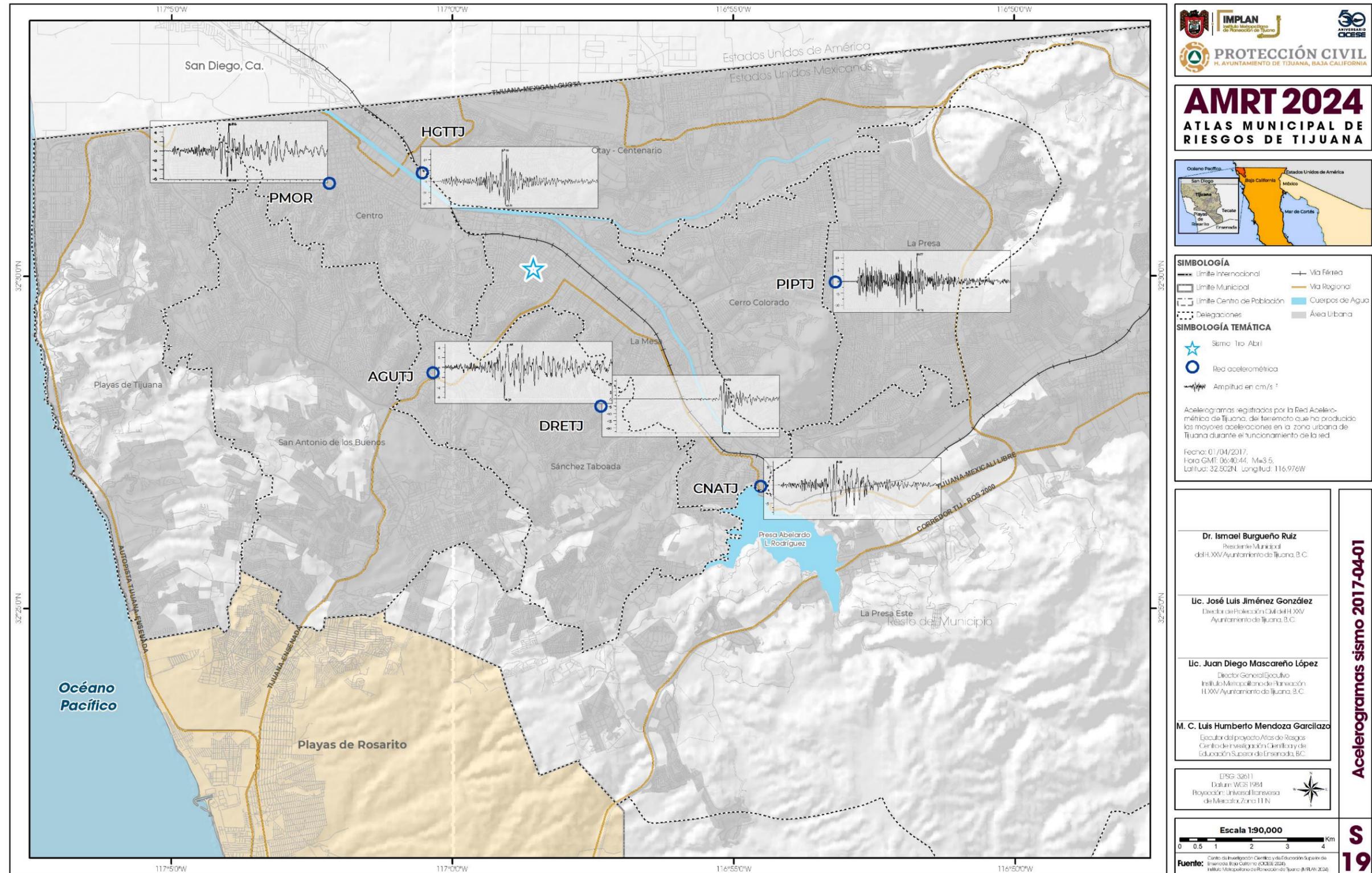
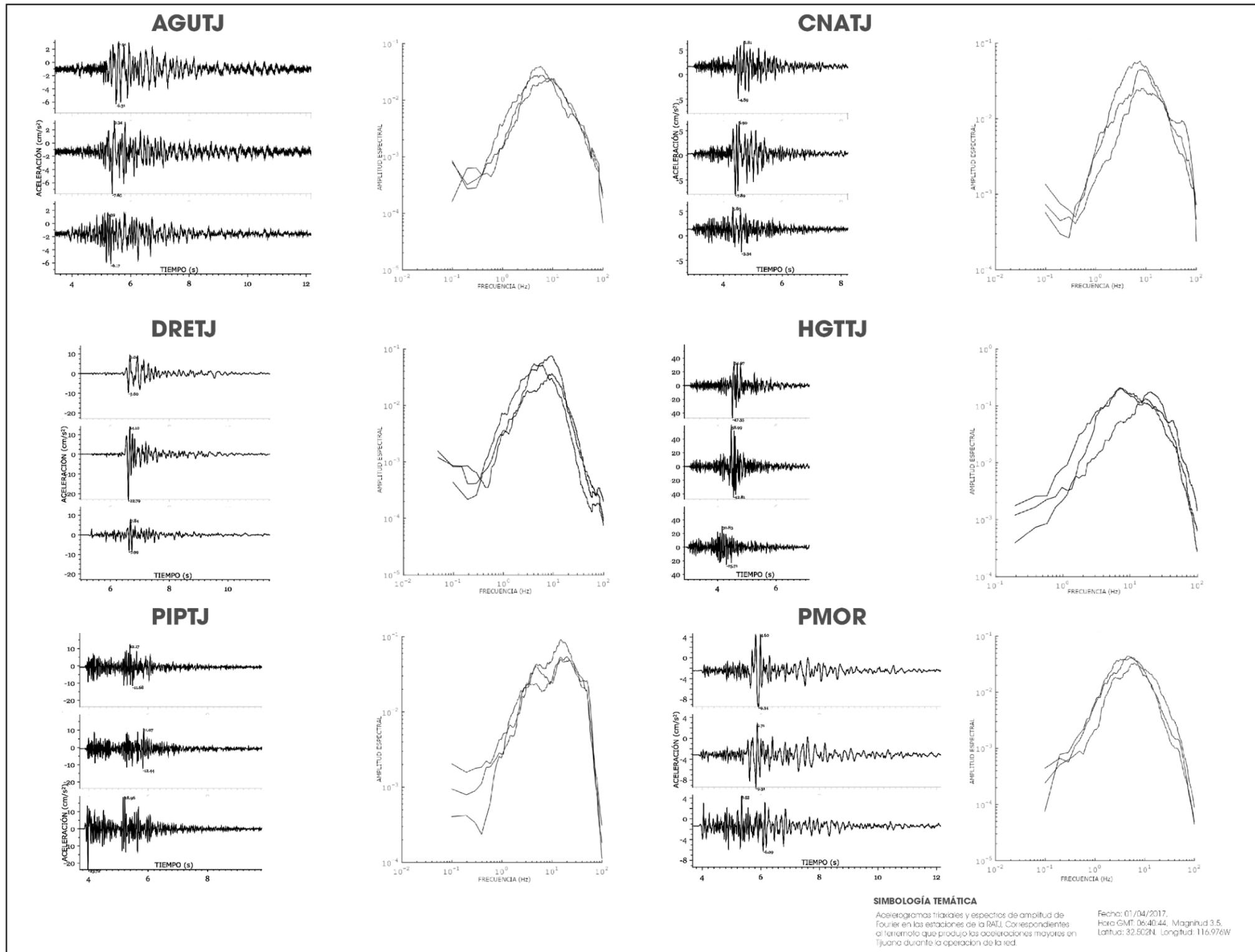


Figura 54. Acelerogramas del sismo del 01/abril/2017 de magnitud 3.5 (mapa S19).

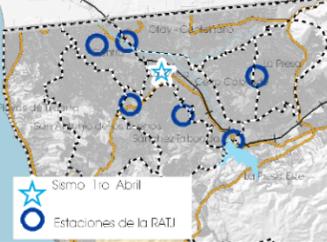




AMRT 2024

ATLAS MUNICIPAL DE RIESGOS DE TIJUANA





SIMBOLOGÍA

- Limite Internacional
- Limite Municipal
- Limite Centro de Población
- Delegaciones
- +— Vía Férrea
- Vía Regional
- Cuerpos de Agua
- Área Urbana

Dr. Ismael Burguenio Ruiz
Residente Municipal del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

Lic. José Luis Jiménez González
Director de Protección Civil del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

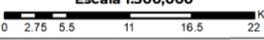
Lic. Juan Diego Mascareño López
Director General Ejecutivo Instituto Metropolitano de Planeación H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

M. C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo
Ejecutor del proyecto Atlas de Riesgos Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.

ETSG-32611
Datum: WGS 1984
Proyección: Universal Transversa de Mercator, Zona 11 N



Escala 1:500,000

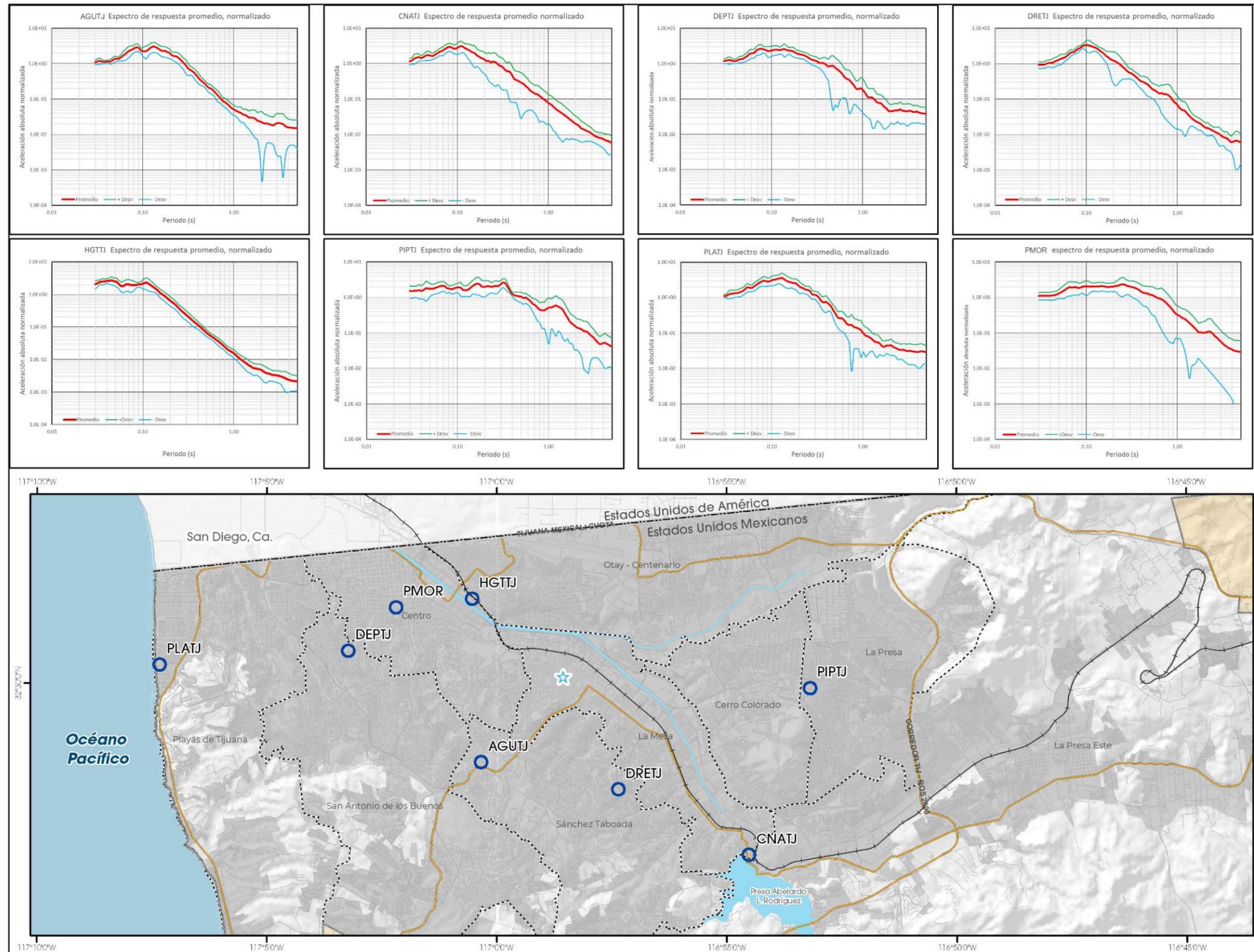


Fuente: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE 2024). Instituto Metropolitano de Planeación de Tijuana (IMPLAN 2024).

Espectros de Fourier sismo 01-04-2017

S
20

Figura 55. Espectros de Fourier del sismo del 01/abril/2017 de magnitud 3.5 (mapa S20).



AMRT 2024
ATLAS MUNICIPAL DE RIESGOS DE TIJUANA

SIMBOLOGÍA
 --- Límite Internacional +---+ Vía Férrea
 --- Límite Municipal --- Vía Regional
 --- Límite Centro de Población --- Cuerpos de Agua
 --- Delegaciones --- Área Urbana

SIMBOLOGÍA TEMÁTICA
 ★ Sismo 1ro Abril
 ○ Estaciones de la RATJ
 --- Promedio de los espectros de respuesta de aceleración absoluta, normalizados a una aceleración unitaria del suelo. La desviación se indica con las curvas de +/- una desviación estándar.

Fecha: 01/04/2017.
 Hora: GMT 06:40:44. Magnitud: 3.5.
 Latitud: 32.502 N. Longitud: 116.976 W

Dr. Ismael Burguenio Ruiz
 Presidente Municipal
 del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

Lic. José Luis Jiménez González
 Director de Protección Civil del H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

Lic. Juan Diego Mascareño López
 Director General Ejecutivo
 Instituto Metropolitano de Planeación
 H. XXV Ayuntamiento de Tijuana, B.C.

M. C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo
 Ejecutivo del proyecto Atlas de Riesgos
 Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.

EPSG: 32611
 Datum: WGS 1984
 Proyección: Universal Transversa de Mercator, Zona 11 N

Escala 1:120,000
 0 0.5 1 2 3 4 Km

Fuente: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE 2014). Instituto Metropolitano de Planeación de Tijuana (IMPLAN 2014).

Espectros de respuesta sismo 01-04-2017

S 21

Figura 56. Promedios de los espectros de respuesta en cada estación de la RATJ (mapa S21)

Ante la ocurrencia de un sismo, el periodo natural del suelo y el periodo de vibrar de las estructuras civiles pueden ocasionar interferencia constructiva de las ondas sísmicas, produciendo amplificaciones del movimiento del terreno que podrían afectar las estructuras. Debido a este fenómeno de interferencia, es importante conocer los periodos de vibración del suelo para que se consideren en el diseño de estructuras civiles.

El periodo dominante se puede estimar a través del cociente espectral del movimiento del suelo con respecto a un sitio de referencia con roca firme utilizando ruido sísmico ambiental o terremotos. Esta opción es considerada como una técnica confiable, pero es costosa y no muy práctica, debido a que implica ubicar sensores sísmicos en el sitio de referencia dentro de un pozo en contacto con roca firme o en afloramientos de roca firme. Otra alternativa es hacer el cociente espectral del movimiento horizontal respecto al vertical en un mismo sitio considerando que el movimiento vertical no tiene efecto de sitio (la amplificación es menor).

Para la actualización del mapa de periodos dominantes se utilizó la segunda opción a través de estimar el cociente espectral promedio de más de 30 terremotos registrados en ocho sitios de la red acelerométrica de Tijuana (RATJ). Adicionalmente, se utilizó un terremoto registrado en 2 estaciones sísmicas temporales y un sitio donde se realizaron mediciones de ruido sísmico ambiental. Los detalles del procesado y datos utilizados se presentan en la sección correspondiente del documento de las memorias de cálculo.

Los periodos dominantes interpretados en 11 sitios nuevos en conjunto con 120 estimaciones anteriores (CICESE, 2009; Atlas 2014), fueron utilizados para elaborar el mapa S22 a través de la interpolación de valores obtenidos en cada sitio de medición. Es importante mencionar que esta versión del Atlas considera información de terremotos registrados por red acelerométrica de Tijuana (RATJ) que no se había considerado en versiones anteriores del Atlas. Encontramos que los periodos dominantes interpretados desde el análisis de los terremotos son similares a los obtenidos desde mediciones de ruido sísmico ambiental en sitios aledaños.

El mapa S22 (Figura 57) representa curvas de isovalores de los periodos de vibrar del suelo. Las curvas varían de 0.2 a 3 segundos con incrementos de 0.2 segundos. Se observa una tendencia a

augmentar de este a oeste (desde la delegación La Presa hacia Playas de Tijuana). Clasificamos de acuerdo al rango de periodos, 4 regiones que se describen a continuación:

- a) Región I. Zonas en color verde que corresponde a periodos menores a 1 segundo. Se asocia a suelos rígidos o afloramientos de roca firme. El mapa geológico (S23) muestra rocas ígneas, areniscas y conglomeradas para esta región. Los periodos de la región I, se identifican hacia el este del centro de Tijuana en las delegaciones Otay-Centenario, La Presa, Cerro Colorado y la Mesa.
- b) Región II. Zonas en color café claro que corresponden a periodos entre 1 y 2 segundos. El incremento del periodo se asocia al aumento del espesor del suelo o sedimentos. El mapa geológico (S23) muestra depósitos de areniscas, conglomerados y aluvión. Esta región, se identifica principalmente en la región central del municipio de Tijuana en las delegaciones de Otay-Centenario, Centro, Sánchez Taboada, La Mesa, Cerro Colorado y La Presa. Hacia el oeste donde se ubica la delegación Playas de Tijuana, se observa una región de menor área.
- c) Región III. Zonas en color rosado oscuro que corresponden a periodos entre 2 y 3 segundos. El aumento del periodo se asocia a un incremento mayor del espesor del suelo o sedimentos. El mapa geológico (S23) muestra depósitos de areniscas, conglomerados y aluvión. Esta región, se identifica principalmente hacia el oeste del municipio de Tijuana en las delegaciones Centro, San Antonio de los Buenos, y Playas de Tijuana.
- d) Región IV. Zona de menor área en color gris claro con periodos mayores a 3 segundos. Es probable que un aumento mucho mayor del espesor de sedimentos produzca periodos mayores a 3 segundos. El mapa geológico (S23) indica depósitos de arenisca y conglomerados. Los periodos de esta región se distribuyen en los límites de las delegaciones de Playas de Tijuana y San Antonio de los Buenos.

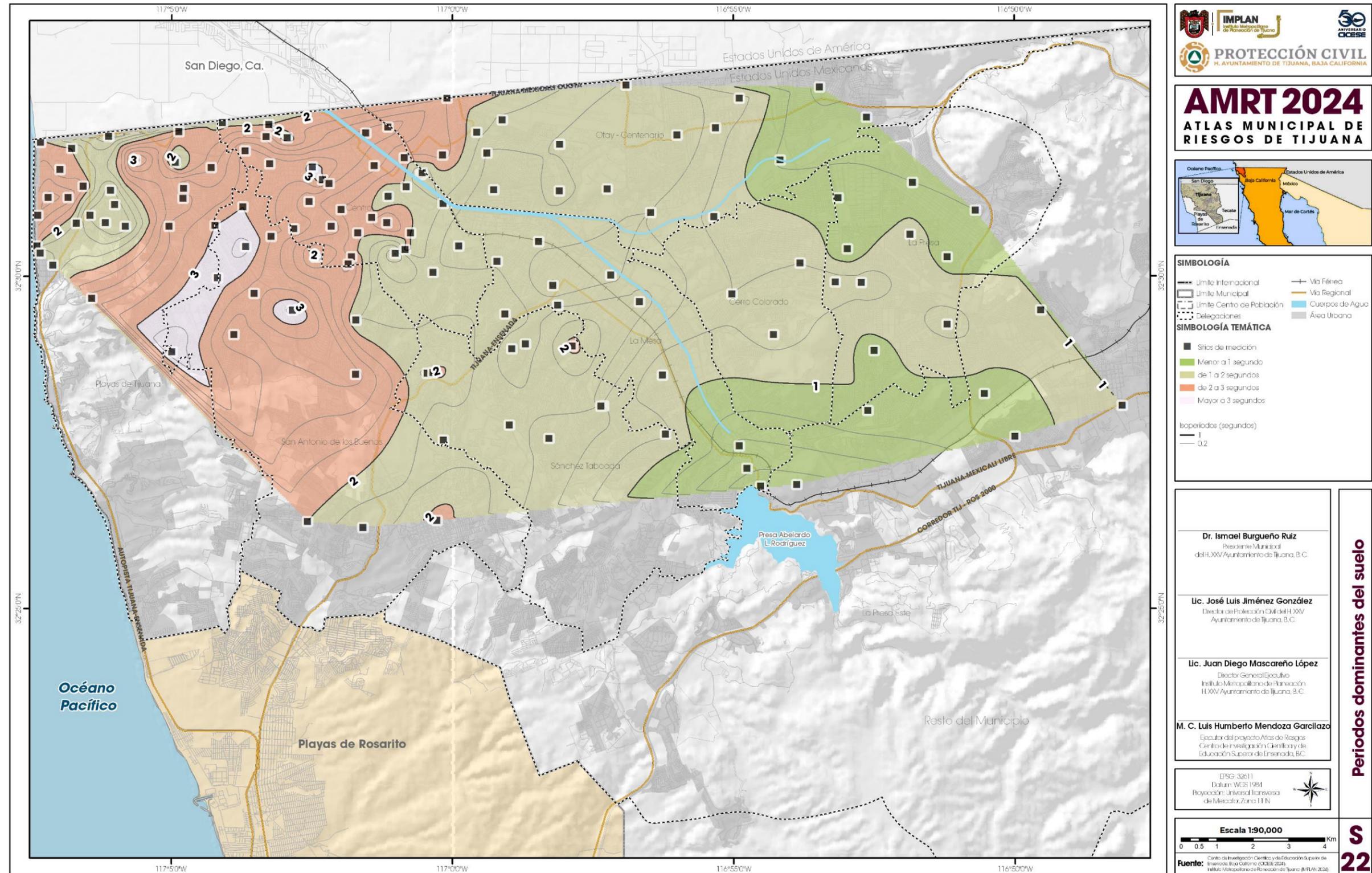


Figura 57. Periodos dominantes del suelo para el municipio de Tijuana (mapa S22)

3.7 Velocidades Vs30 en el subsuelo de Tijuana (S23)

La velocidad de las ondas S es una propiedad dinámica que está relacionada con el efecto de sitio y las características geológicas de los suelos (Aki, 1988). Cuando la velocidad de las ondas S de los suelos disminuye significa que los materiales son menos rígidos y se consideran suelos blandos. Ante la ocurrencia de un sismo se espera que las amplificaciones sean mayores y se dice que hay efecto de sitio. En lugares donde la velocidad de onda S aumenta comúnmente se asocia a un suelo rígido o roca firme. En suelos con estas características, las amplificaciones serán menores ante la ocurrencia de un sismo y el efecto de sitio será menor o nulo.

Un parámetro estandarizado para la clasificación suelos (por ejemplo, Tabla 11) y el efecto de sitio es la Vs30. Este parámetro representa la velocidad promedio ponderada en los primeros 30 metros de profundidad. Los valores de la Vs30 pueden modificar la respuesta sísmica e incorporar esta información es de gran importancia para el cálculo de espectros de diseño, clasificación de suelos y para evaluar el peligro sísmico.

Tabla 11. Clasificación de suelos según la tabla 1613.5.2 (SITE CLASS DEFINITIONS) del IBC (2006).

Tipo	Vs30 (m/s)	Material
A	>1500	Roca competente
B	760-1500	Roca de cualquier espesor
C	360-760	Suelo muy denso o roca blanda
D	180-360	Suelo rígido de cualquier espesor
E	<180	Suelo blando o arcillas de más de 3 m
F	Suelos vulnerables a una excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados.	

La Vs30 puede estimarse a partir de diferentes metodologías que incluyen mediciones de ondas sísmicas producidas por fuentes controladas (explosivos o caídas de peso), ruido sísmico ambiental y sísmico de pozo (cross-hole, sonda suspendida y down-hole). Para la estimación de la Vs30 utilizamos ruido sísmico ambiental y terremotos. Los detalles del procesado, datos utilizados y la asignación de la Vs30 a las unidades geológicas, se presentan en la sección correspondiente del documento de las memorias de cálculo.

El mapa S23 (Figura 58) fue construido a partir de la estimación de la Vs30 en 40 sitios. 21 valores de la Vs30 fueron obtenidos en campañas anteriores (Álvarez et al., 1994; CICESE, 2009) y 19 en campañas recientes para la actualización del Atlas de Riesgos. El mapa S23 muestra curvas de isovalores de la Vs30 como resultado de la interpolación de los sitios de medición. Adicionalmente muestra valores promedios de Vs30 asignados a cada unidad litológica. Debido a los resultados de las nuevas campañas de medición, fue posible diferenciar propiedades dinámicas diferentes para la unidad geológica de arenisca-conglomerado y clasificarla en dos unidades diferentes, una hacia el este y otra hacia el oeste.

Las curvas representan isovalores de Vs30 varían de 200 a 750 m/s con incrementos de 50 m/s. Se observa una tendencia general de la Vs30 a disminuir desde el sureste (Presa Abelardo L. Rodríguez) hacia el noroeste (Playas de Tijuana).

Considerando los valores promedios Vs30 asignados a cada unidad geológica, los resultados de los periodos dominantes (mapa S22) y a la Tabla 11, describimos las siguientes características de los suelos para el municipio de Tijuana del mapa S23 (Figura 58):

Rocas ígneas con valores de Vs30 > 760 m/s. Esta unidad geológica, se observa hacia el este y sur del municipio de Tijuana. Gran parte de este tipo de suelo, se distribuye en la delegación La Presa Este. Se espera que el efecto de sitio sea menor debido a que se considera roca firme.

Basaltos con valores promedio de Vs30 = 548 m/s. Esta unidad geológica, se distribuye hacia el oeste del municipio de Tijuana en la delegación Playas de Tijuana. De acuerdo al valor de la Vs30, este suelo se considera muy denso o roca blanda, pero el incremento en el periodo para esta zona (mapa S22) sugiere que el efecto de sitio es mayor.

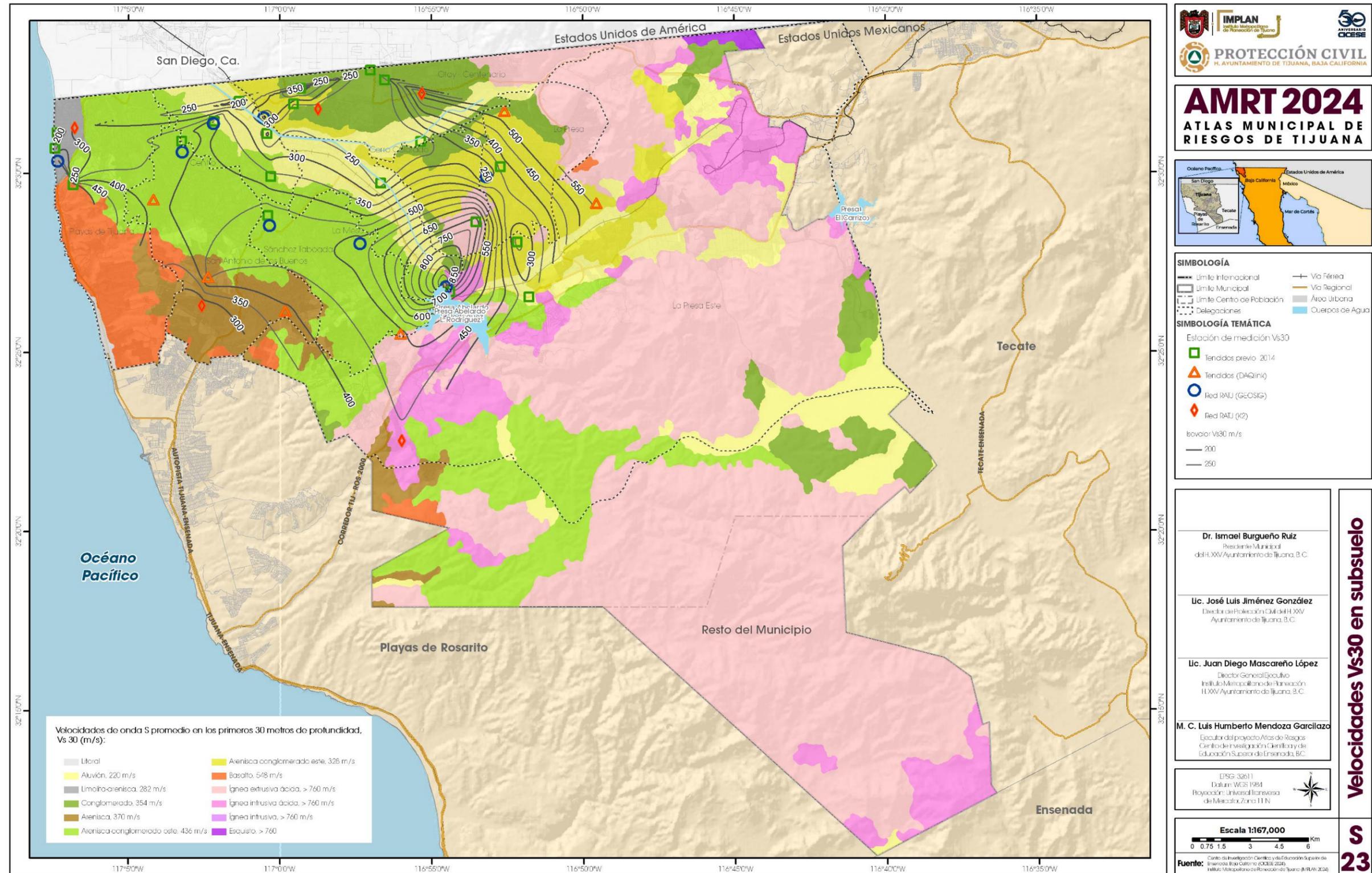


Figura 58. Velocidades Vs30 en el subsuelo del municipio de Tijuana (mapa S23).

Arenisca y conglomerado hacia el este con valores promedio de $V_{s30}=328$ m/s. Esta unidad geológica, se identifica en la zona central del municipio de Tijuana en las delegaciones Cerro Colorado, La Presa y en una zona de menor área en la delegación La Presa Este. La disminución de la V_{s30} estaría asociado a un suelo rígido con efecto de sitio considerable (mapa S22).

Arenisca y conglomerado hacia el oeste con valores promedio de $V_{s30}=436$ m/s Esta unidad geológica, se identifica hacia el oeste y sur del municipio de Tijuana en las delegaciones Playas de Tijuana, Centro, San Antonio de los Buenos, Sánchez Taboada y La Presa Este. El valor de la V_{s30} indicaría un suelo muy denso o roca blanda con incremento en el efecto de sitio (mapa S22) hacia las delegaciones San Antonio de los Buenos, Centro y Playas de Tijuana.

Arenisca con valores promedio de $V_{s30}= 370$ m/s. Esta unidad geológica, se distribuye hacia el oeste y sur del municipio de Tijuana, específicamente al sur de la delegación San Antonio de los Buenos y hacia el límite suroeste de la delegación La Presa Este. De acuerdo al valor de la V_{s30} , este suelo se considera muy denso o roca blanda, pero el incremento en el periodo para esta zona (mapa S22) indicaría que el efecto de sitio es mayor.

Conglomerado con valores promedio de $V_{s30}= 340$ m/s. Esta unidad geológica, se distribuye hacia el centro-norte y sureste del municipio de Tijuana, específicamente en las delegaciones Otay-Centenario, Cerro Colorado, La Presa, y al sureste de la delegación La Presa Este. De acuerdo al valor de la V_{s30} , este suelo se considera rígido, con incremento en el efecto de sitio hacia las delegaciones Cerro Colorado y Otay-Centenario (mapa S22).

Limolita-arenisca con valores promedio de $V_{s30}= 282$ m/s. Esta unidad geológica representa una región de menor área que se ubica en el límite norte de la delegación Playas de Tijuana. De acuerdo al valor de la V_{s30} , este suelo se considera rígido con efecto de sitio considerable (mapa S22).

Aluvión con valores promedio de $V_{s30}= 220$ m/s. Esta unidad geológica se extiende desde las delegaciones Centro, La Mesa y Otay-Centenario. En algunas regiones de la delegación La Presa Este, se observa esta unidad geológica. De acuerdo al valor de la V_{s30} , este suelo se considera blando con efecto de sitio considerable (mapa S22).

3.8 Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon (S24-S27)

La falla Rose Canyon está documentada por parte del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2017), como una falla sismotectónica capaz de generar un sismo de una magnitud grande y aceleraciones altas para áreas cercanas a la falla.

Con el objetivo de anticiparse a la ocurrencia de un sismo que pueda generar muchos daños a las estructuras, se optó por simular la ruptura de la falla completa de Rose Canyon, estimando una magnitud en función a su longitud total. Para el caso de esta falla se obtuvo una magnitud de 7.0, con esa magnitud se estima el decaimiento de la amplitud en todas direcciones a manera de tener documentado ese comportamiento alrededor de la falla. Se consideró una probabilidad del 2% de que ocurra esa ruptura y una suposición de que este escenario se repita cada 50 años. Las simulaciones fueron realizadas sin considerar y considerando la V_{s30} de cada unidad geológica (mapa S23). Cuando la V_{s30} se considera en la simulación, se dice que estamos tomando en cuenta el efecto de sitio. Los detalles para el cálculo de las aceleraciones probables que produciría este sismo y su efecto para el municipio de Tijuana sin y con efecto de sitio, se presentan en la sección correspondiente de la memoria de cálculo. Una vez conocida la aceleración probable en cualquier punto en el espacio, los ingenieros podrán aplicar los métodos de sismoresistencia para que las estructuras sean capaces de soportar esas aceleraciones que no han ocurrido pero que podrían ocurrir en caso de que la falla *Rose Canyon* rompiera.

El mapa S24 (Figura 59), representa las aceleraciones máximas probables (en unidades de g) a cada 0.02 g producidas por el sismo hipotético de Rose Canyon, sin considerar el efecto de sitio. Es decir, no se considera el valor de V_{s30} de cada unidad geológica. Para este caso las curvas de aceleración empiezan a disminuir gradualmente de 0.38 g hasta 0.08 g desde la delegación Playas de Tijuana hacia el sureste del municipio de Tijuana. Esta distribución representaría las variaciones espaciales de las aceleraciones en roca firme y podría ser utilizado como dato inicial para evaluar la respuesta sísmica en diferentes sitios. Sin embargo, si se considera la V_{s30} de cada unidad geológica, las aceleraciones sufren modificaciones en su amplitud y en su distribución (Figura 60). Este caso representa las aceleraciones probables con efecto de sitio.

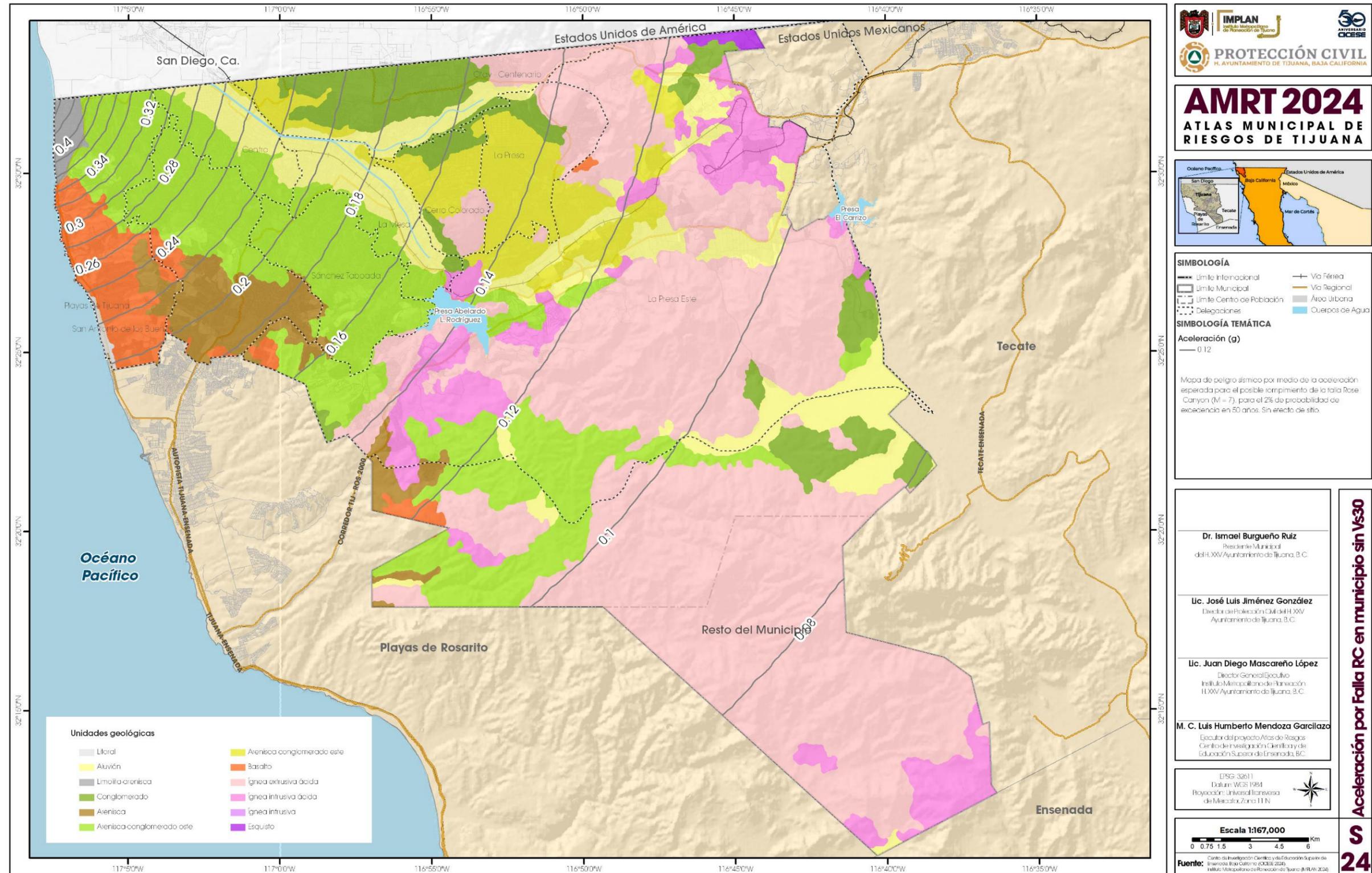


Figura 59. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S24).

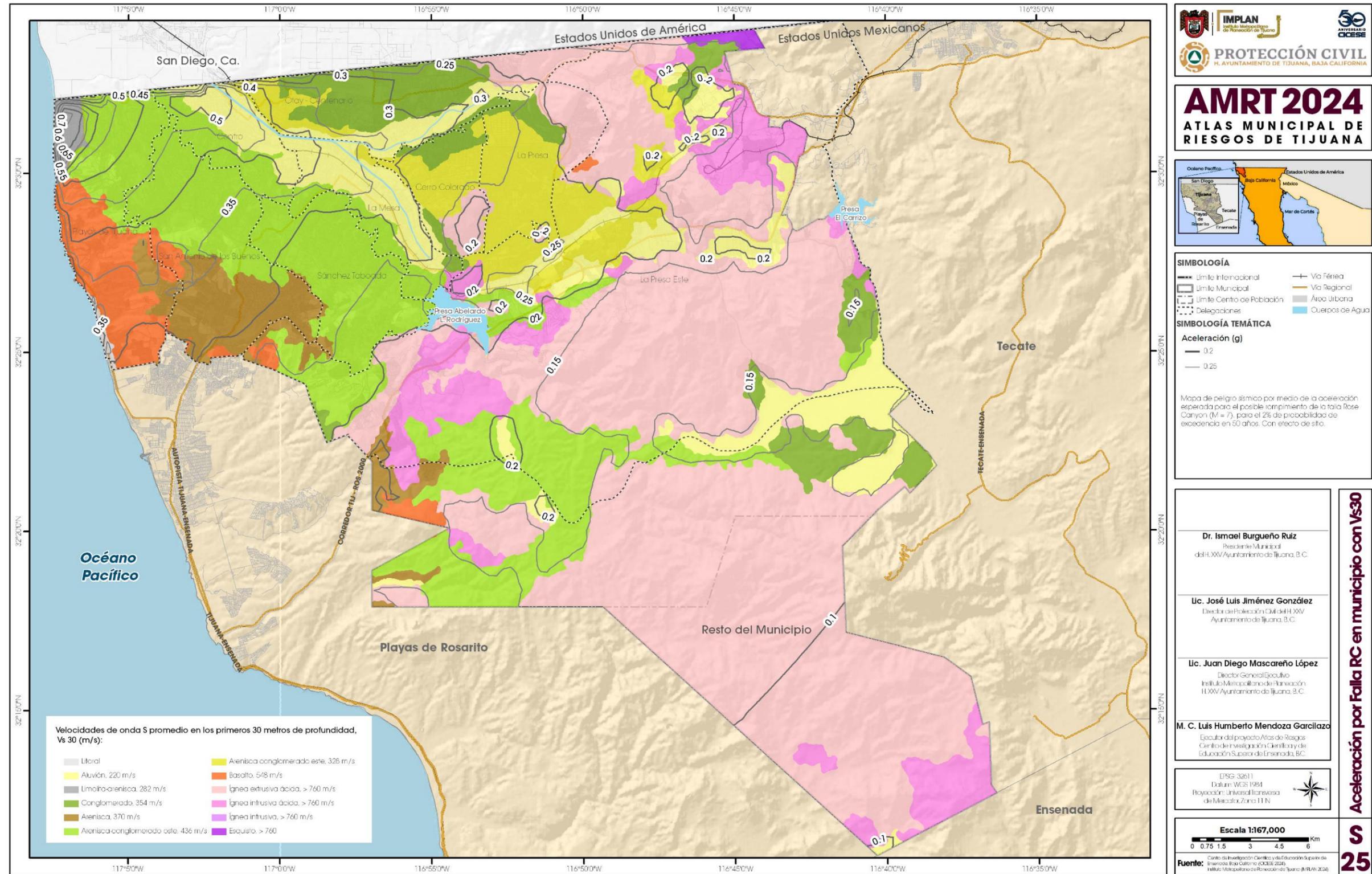


Figura 60. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S25).

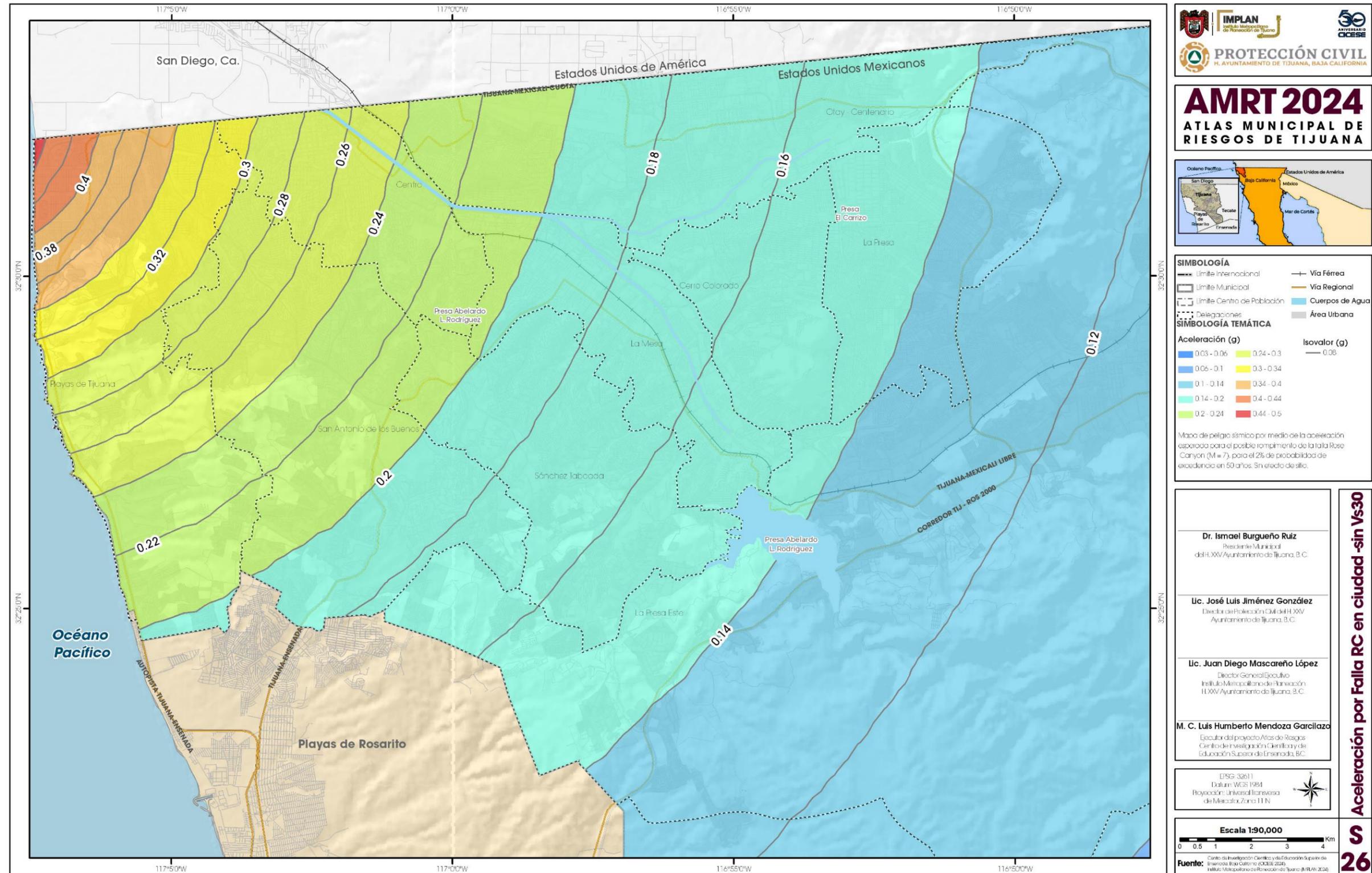


Figura 61. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para la ciudad de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S26).

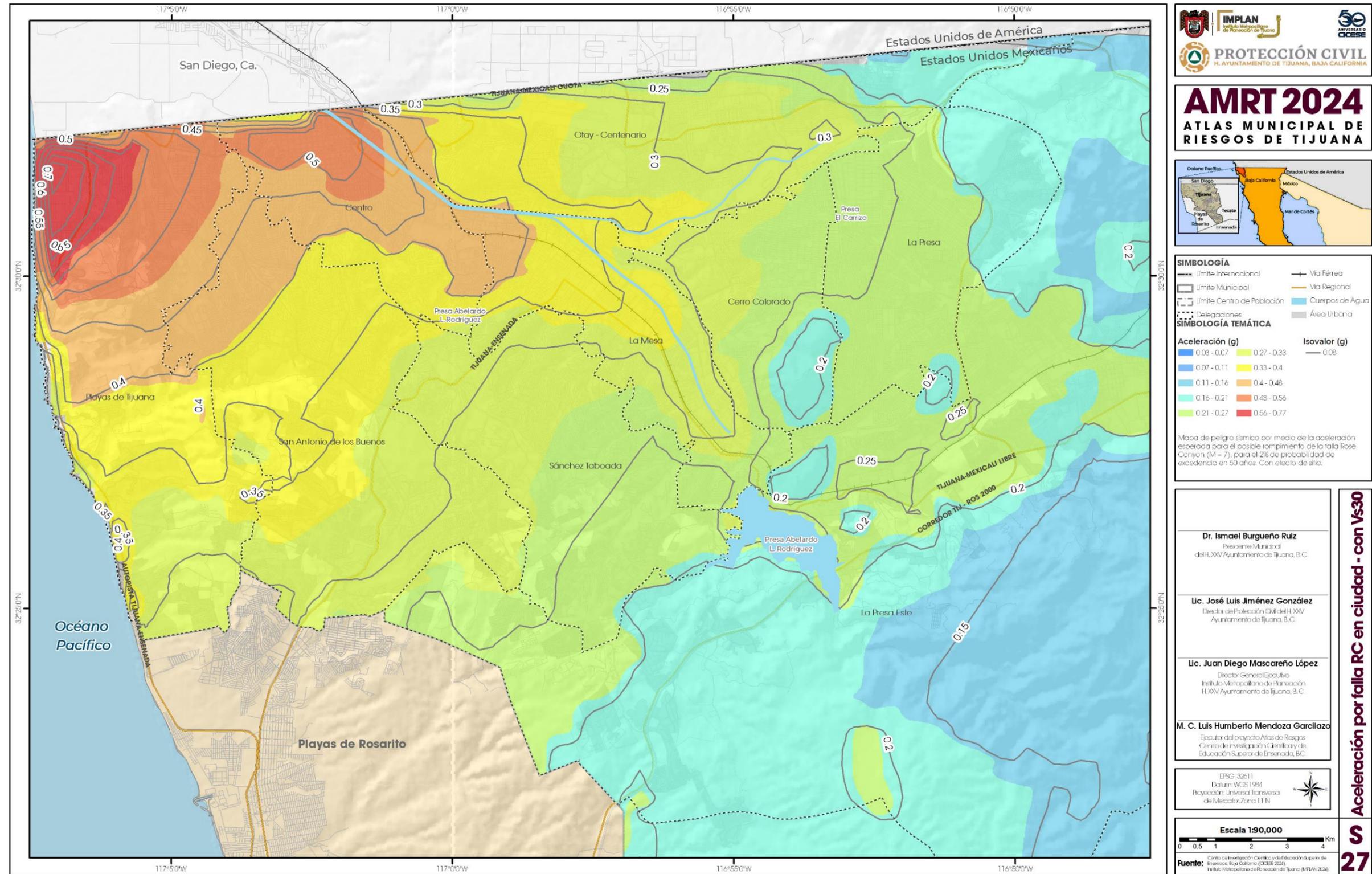


Figura 62. Aceleraciones probables producidas por la falla Rose Canyon para la ciudad de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S27).

En el mapa S25 (Figura 60) observamos variaciones en las curvas de aceleración (a cada 0.05 g) respecto al mapa S24. Por ejemplo, si ubicamos la curva 0.28 g del mapa S24 (Figura 59) se mantiene con una curvatura constante desde el océano pacífico hacia la frontera México-Estados Unidos; y observamos que pasa sobre un suelo de tipo Basáltico (naranja) a Arenisca-conglomerado (verde claro) y termina en suelo tipo Aluvión (amarillo). Si revisamos el mapa S25 (Figura 60), observamos que donde pasaba la curva 0.28 g ahora la aceleración aumentó a 0.4 g. Además, la curva de aceleración se extiende en el suelo tipo aluvión donde incluso se observan aceleraciones de 0.5 g hacia la frontera con Estados Unidos. Con esto podemos mencionar que el tipo de suelo influye en la amplificación o reducción de las aceleraciones máximas pico ante la ocurrencia de un sismo hipotético y su distribución espacial se modifica por efecto de las propiedades dinámicas de los suelos (V_{s30}). Las aceleraciones mayores a 0.49 g se producirían al norte de la delegación Playas de Tijuana y norte de la delegación Centro. Mientras que hacia la delegación La Presa Este, se esperarían aceleraciones menores a 0.2 g.

Con la finalidad de mostrar detalle de las aceleraciones probables sin y con efecto de sitio en la ciudad de Tijuana, la Figura 61 y Figura 62 muestran un acercamiento de la zona centro del Municipio de Tijuana. El mapa S26 (Figura 61) muestra la misma información discutida para el mapa S24, pero en escala de colores y se muestra la mancha urbana con la idea de visualizar las probables bandas de aceleración probables predichas sobre la infraestructura urbana del municipio. Para el caso del mapa S27 (Figura 62), se muestra un acercamiento de la misma información del mapa S25. Las aceleraciones mayores de 0.4 g se producirían en parte de las delegaciones de Playas de Tijuana, San Antonio de los Buenos y el Centro.

La aplicación que tiene este tipo de mapas (S26 y S27), es apoyar a las dependencias correspondientes de las áreas de ingeniería, planeación urbana y respuesta ante desastres naturales por sismo. Por ejemplo, zonificar el municipio de Tijuana ante el impacto de este fenómeno y utilizar estos resultados podrían mejorar la seguridad de la población y la infraestructura urbana.

Cabe mencionar que, a diferencia del escenario mostrado en el Atlas de Riesgos del 2014, en este escenario, se implementó la corrección por efecto de sitio para aplicar un escalamiento de las aceleraciones lo más adecuadas al tipo de geología que se tiene en el municipio de Tijuana.

Las aceleraciones sin efecto de sitio del mapa S26 pueden interpretarse como las aceleraciones esperadas para superficie de roca. Son empleadas en aquellos casos en que son necesarios estudios puntuales del efecto de sitio debido a la importancia de las estructuras a desplazar o reforzar; para ello, se hacen estudios locales de sitio, por ejemplo, midiendo la V_{s30} in-situ y aplicando la corrección correspondiente a la aceleración especificada en el mapa S26.

3.9 Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon (S28 y S29)

Es pertinente especificar la diferencia entre la velocidad V_{s30} (mapas S23) y la velocidad pico del movimiento del suelo (PGV): la V_{s30} representa la velocidad con que se transmiten las ondas sísmicas de corte (ondas S), calculada como un promedio pesado dentro de los primeros 30 metros del subsuelo. La PGV es la velocidad máxima con que se mueve el suelo cuando arriba la energía sísmica.

La PGV puede provenir de dos fuentes: como un valor registrado con sismógrafos cuando ocurren terremotos, generalmente expresado como un vector tridimensional, proyectado en tres direcciones perpendiculares (2 horizontales y una vertical), y como un valor estimado a partir del modelamiento de la ruptura de alguna falla geológica. Debido a la ausencia de registros históricos de la PGV provocada por alguna de las fallas más peligrosas para el municipio de Tijuana, es necesario acudir a la segunda opción mencionada, el modelamiento de la ruptura de la falla considerada la más peligrosa para Tijuana, la falla Rose Canyon (ver mapa S01).

Debido a la mayor facilidad para disipar las sollicitaciones sísmicas verticales en las estructuras civiles, resulta de mayor importancia el movimiento horizontal del suelo, por ello en este trabajo ese es el componente reportado. No se especifica la orientación ni la dirección del componente horizontal reportado, más bien es una orientación aleatoria, lo cual significa que para propósitos de diseño o planeación urbana el valor PGV (cm/s) debe ser considerado en cualquier orientación y dirección, en el plano horizontal.

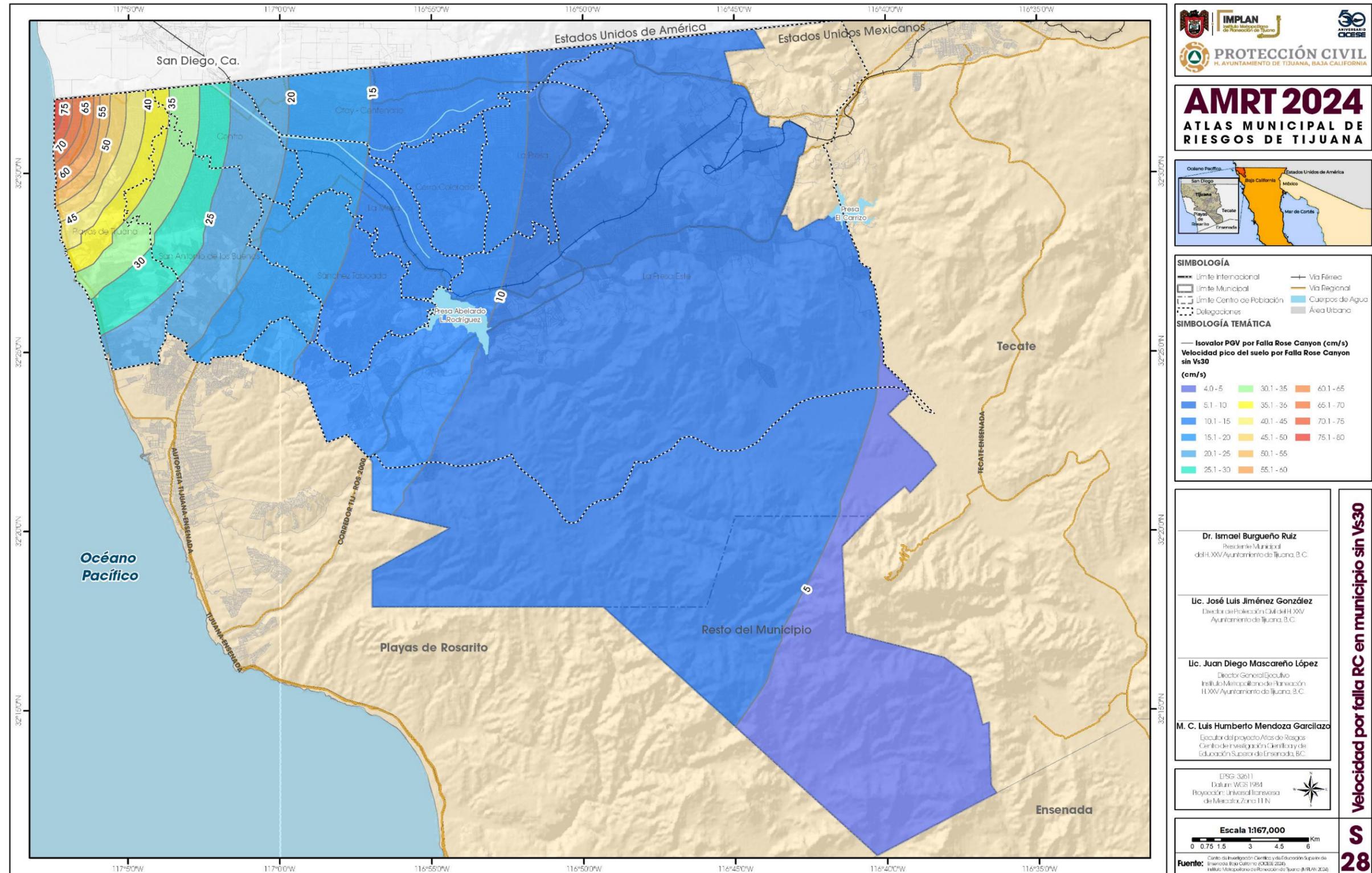


Figura 63. Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana sin considerar la Vs30 (mapa S28).

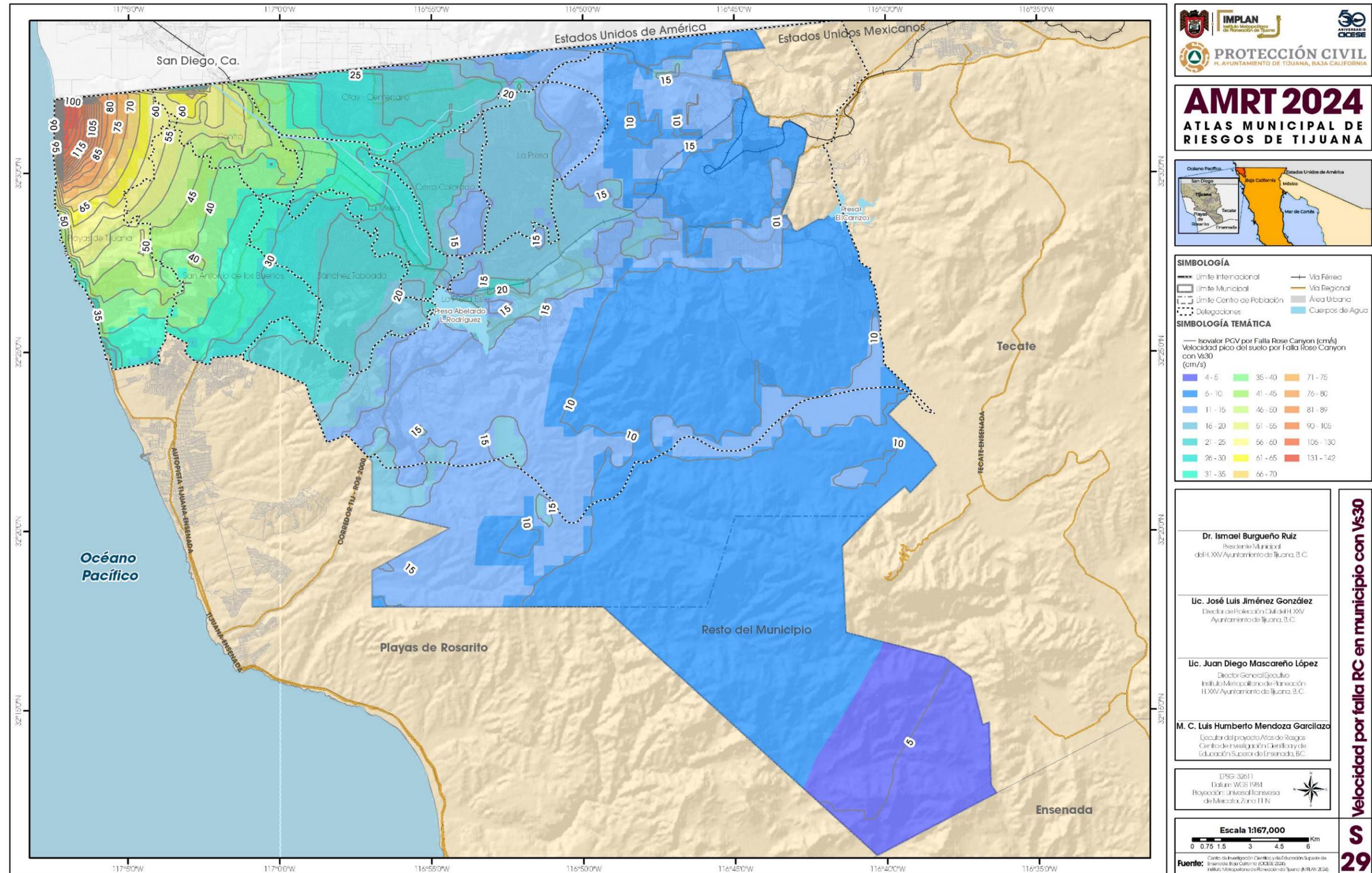


Figura 64. Velocidades probables producidas por la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana considerando la Vs30 (mapa S29).

El mapa S28 (Figura 63) muestra la distribución de la PGV sin efecto de sitio. Los valores están representados tanto por una escala de colores, como por curvas del nivel de PGV. Es notable que las curvas tienen una forma muy regular y suave, con variaciones debidas únicamente a la distancia al trazo de la falla y a la geometría de ésta. Esta distribución representa la PGV sobre roca firme, la cual puede ser empleada como dato inicial en los estudios de la respuesta sísmica en sitios específicos: se utilizan los resultados de estudios puntuales de geotecnia o perfiles sísmicos para aplicar sobre la PGV leída de este mapa una corrección por efecto de sitio. Prácticamente en cualquier suelo sedimentario o roca muy alterada, el efecto de sitio ocasionará una amplificación del movimiento del suelo.

Este tipo de aplicaciones es frecuente en predios donde se proyectan estructuras críticas o estratégicas, o cualquier tipo de estructura importante, cuando es necesaria y exigible por reglamento la realización de estudios puntuales de sitio.

El mapa S29 (Figura 64) despliega el valor de la velocidad pico del suelo (PGV, en cm/s), incluyendo el efecto de sitio. El efecto de sitio lo expresamos como una función de la V_{s30} (ver mapa S23). Los valores contenidos en este mapa surgieron de aplicar sobre los valores del mapa S28 (Figura 63) las correcciones de sitio (Figura 58). Aquí las curvas de iso-valor aparecen deformadas por la heterogeneidad de la geología superficial, y por ende de la V_{s30} . Nótese la clara amplificación del movimiento del suelo a lo largo del cauce del río Tijuana en las delegaciones Centro y Otay-Centenario.

Es importante resaltar que los valores aquí presentados no son mediciones obtenidas durante el rompimiento de la falla Rose Canyon, sino los obtenidos en el escenario más creíble para el posible rompimiento de esa falla. Las características del escenario están apoyadas en las especificaciones más recientes de las características geométricas y dinámicas de Rose Canyon, en las leyes de atenuación verificadas para la región y la expresión del efecto de sitio más aceptado actualmente. Como todo resultado de un modelamiento numérico de un proceso físico, es necesario cierto grado de prudencia en su empleo, sobre todo cuando se trate de aplicarlo en estructuras críticas y estratégicas.

3.10 Isosistas de la falla Rose Canyon (S30)

El parámetro llamado intensidad sísmica es importante en el área de la ingeniería por su definición basada en el tipo e intensidad de daños observados en estructuras civiles y naturales durante la ocurrencia de un terremoto. El concepto de intensidad puede manejarse en tres aspectos muy útiles: uno, en la observación de los daños durante un sismo y la asignación de un valor de intensidad de acuerdo a una escala como la de Mercalli Modificada (IMM), tal como se presenta en la serie de mapas S04 al S18. Dos, el empleo de relaciones empíricas entre el movimiento del suelo (aceleración PGA o velocidad PGV) y la IMM; esto puede aplicarse cuando se dispone de la distribución espacial de la PGA o PGV y se necesita de la IMM para tener una estimación de los daños asociados a ese movimiento del suelo, eso se presenta en el mapa S30 (Figura 65), para las PGV esperadas con el probable rompimiento de la falla Rose Canyon ($M=7.0$). Tres, conocido el valor de IMM en el sitio de desplante de un tipo estructural conocido es posible utilizar relaciones entre 3 variables, IMM, tipo estructural y daño, para hacer una estimación del daño esperado de una estructura, lo cual se conseguirá con el empleo de la información contenida en los mapas S30 (Figura 65), S35 (Figura 70) y S36 (Figura 71).

3.11 Aceleraciones probables producidas por el rompimiento de multifallas (S31-S34)

El objetivo del diseño sismoresistente de una estructura es conocer cómo debe construirse para permitirle soportar valores máximos probables del movimiento del suelo ante la ocurrencia de un sismo; y mantenerse en pie durante su tiempo de vida útil. El diseño antisísmico requiere determinar previamente las características de los sismos que serán después introducidas en los cálculos dinámicos de las estructuras, siendo ésta una cuestión abordada por los códigos y normativas sismorresistentes. En principio, mediante estudios de peligrosidad sísmica se pueden determinar previamente los parámetros que caracterizan al movimiento del suelo ante la ocurrencia de sismos que podrían ocurrir en la zona que se pretende edificar una estructura.

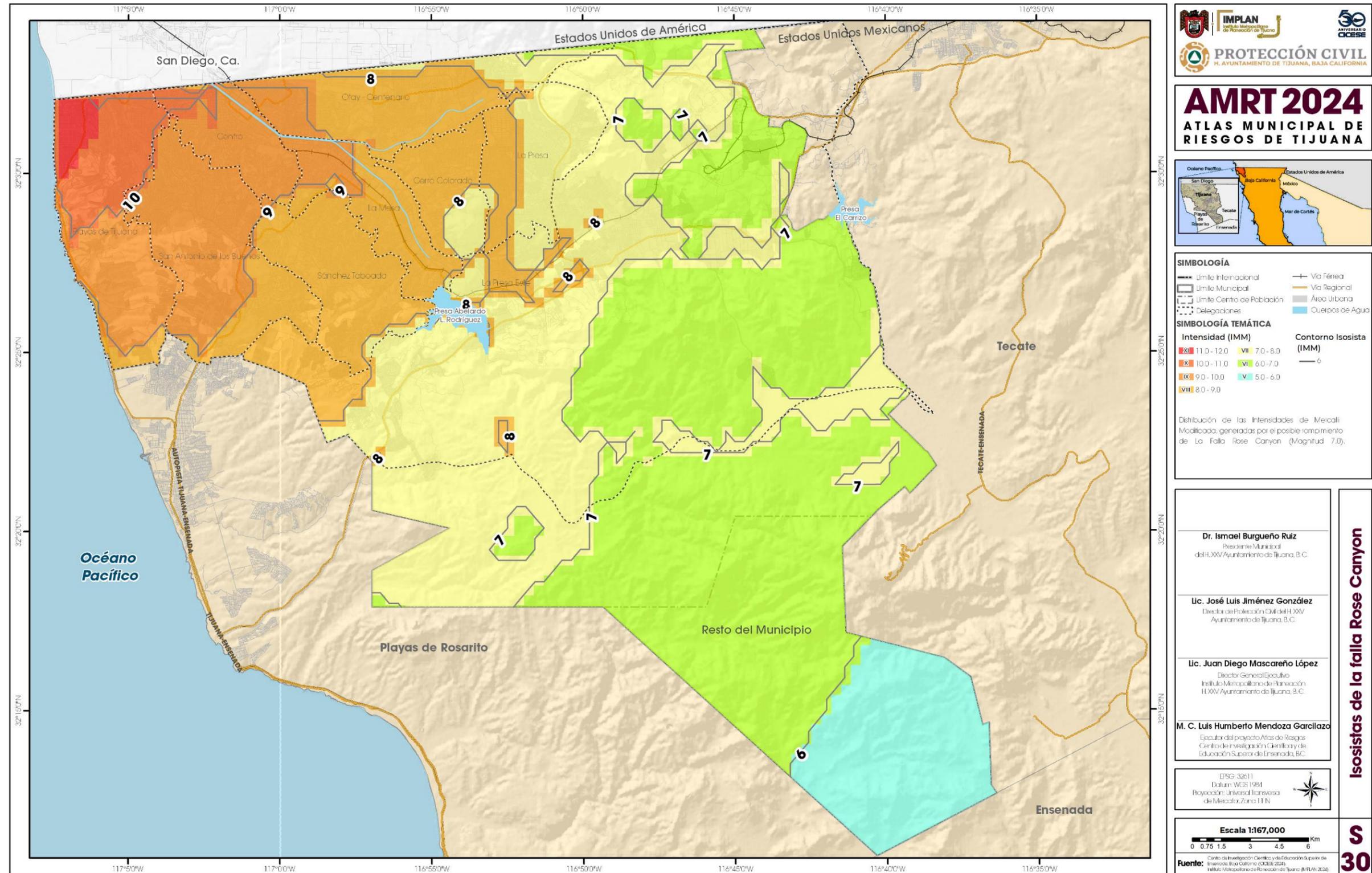


Figura 65. Isosistas de la falla Rose Canyon para el municipio de Tijuana (mapa S30).

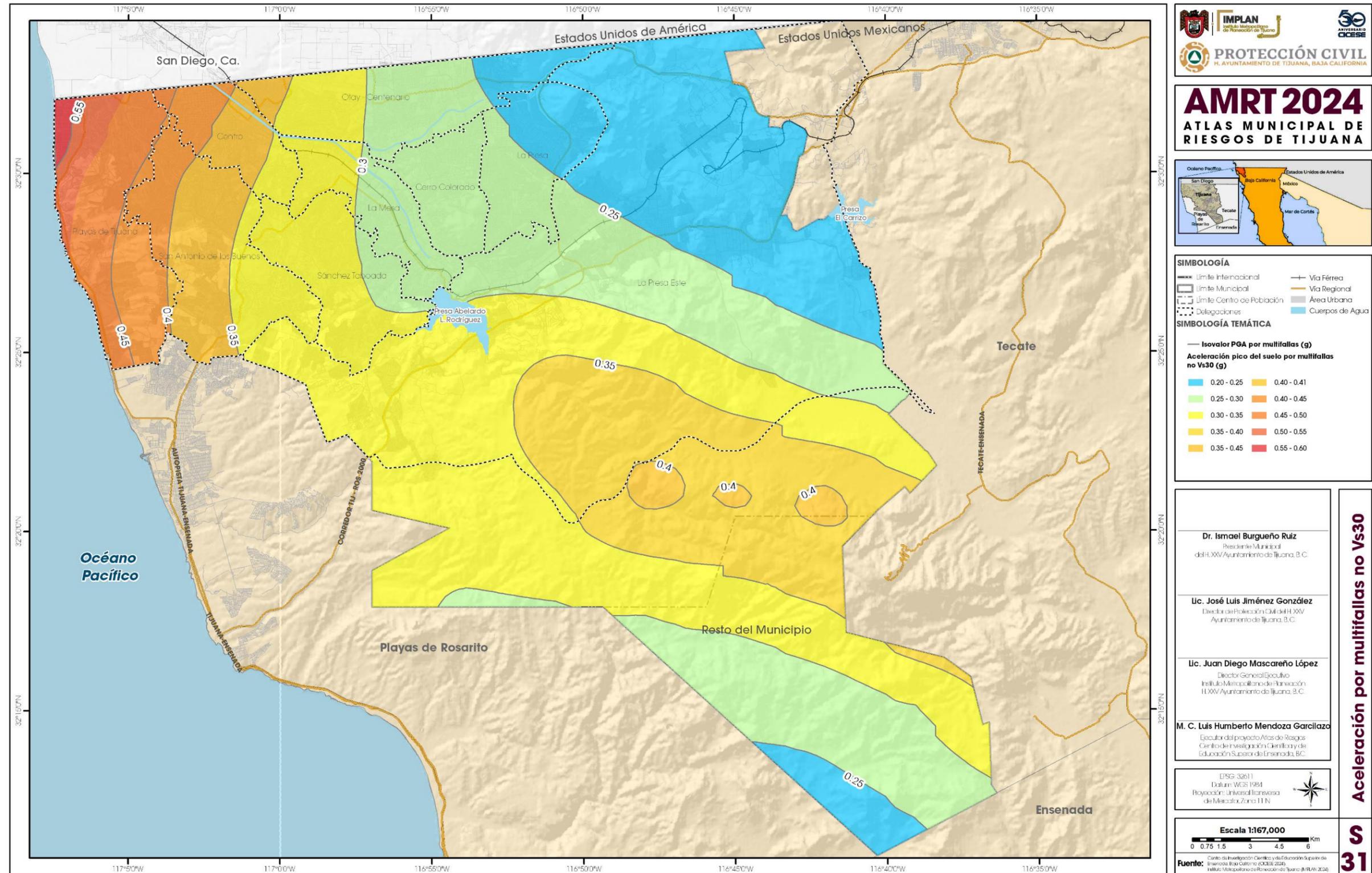


Figura 66. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y Norte de Baja California, sin considerar la Vs30 (mapa S31).

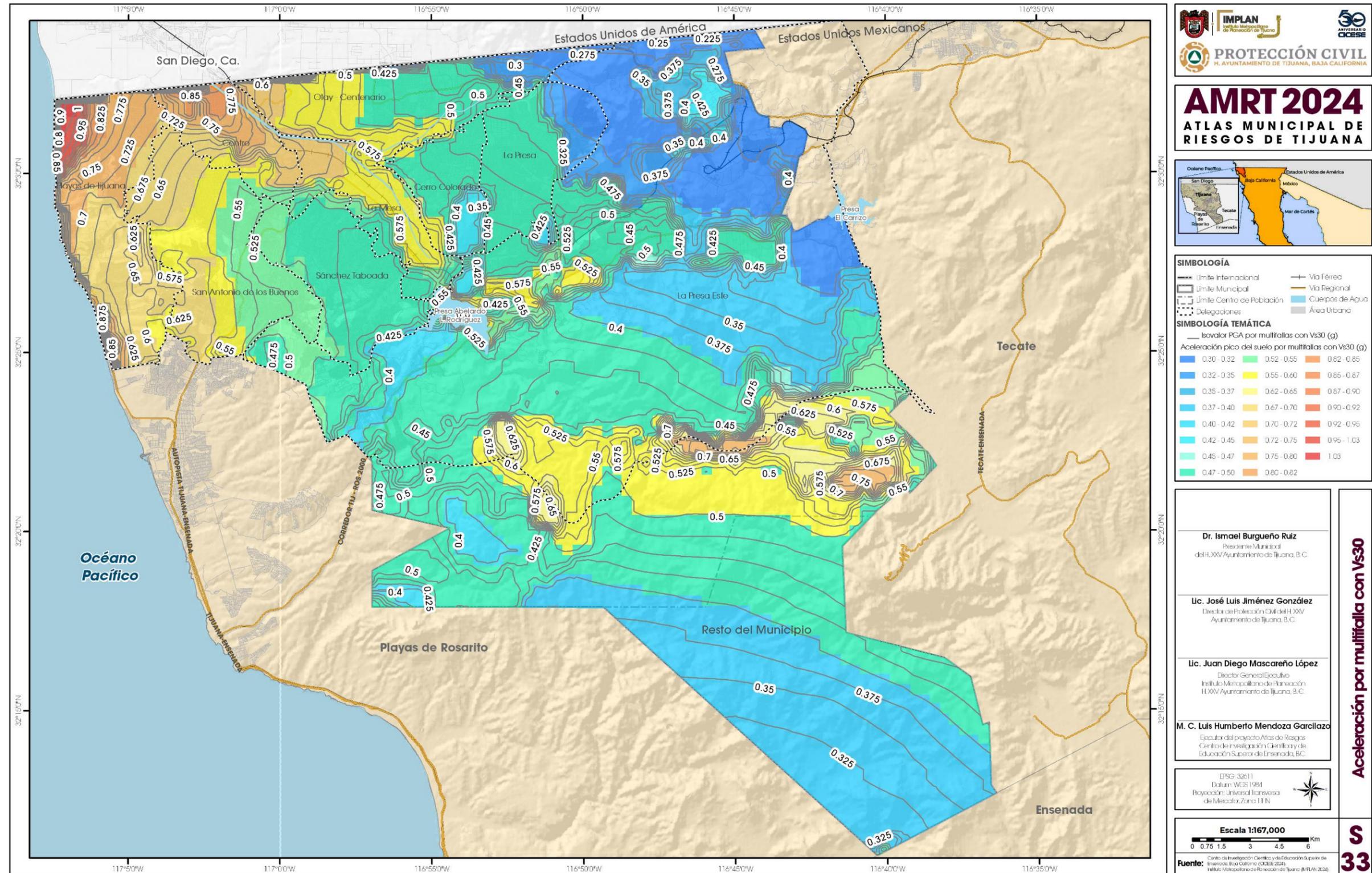


Figura 68. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y norte de Baja California, para el municipio de Tijuana que consideran la Vs30 (mapa S33).

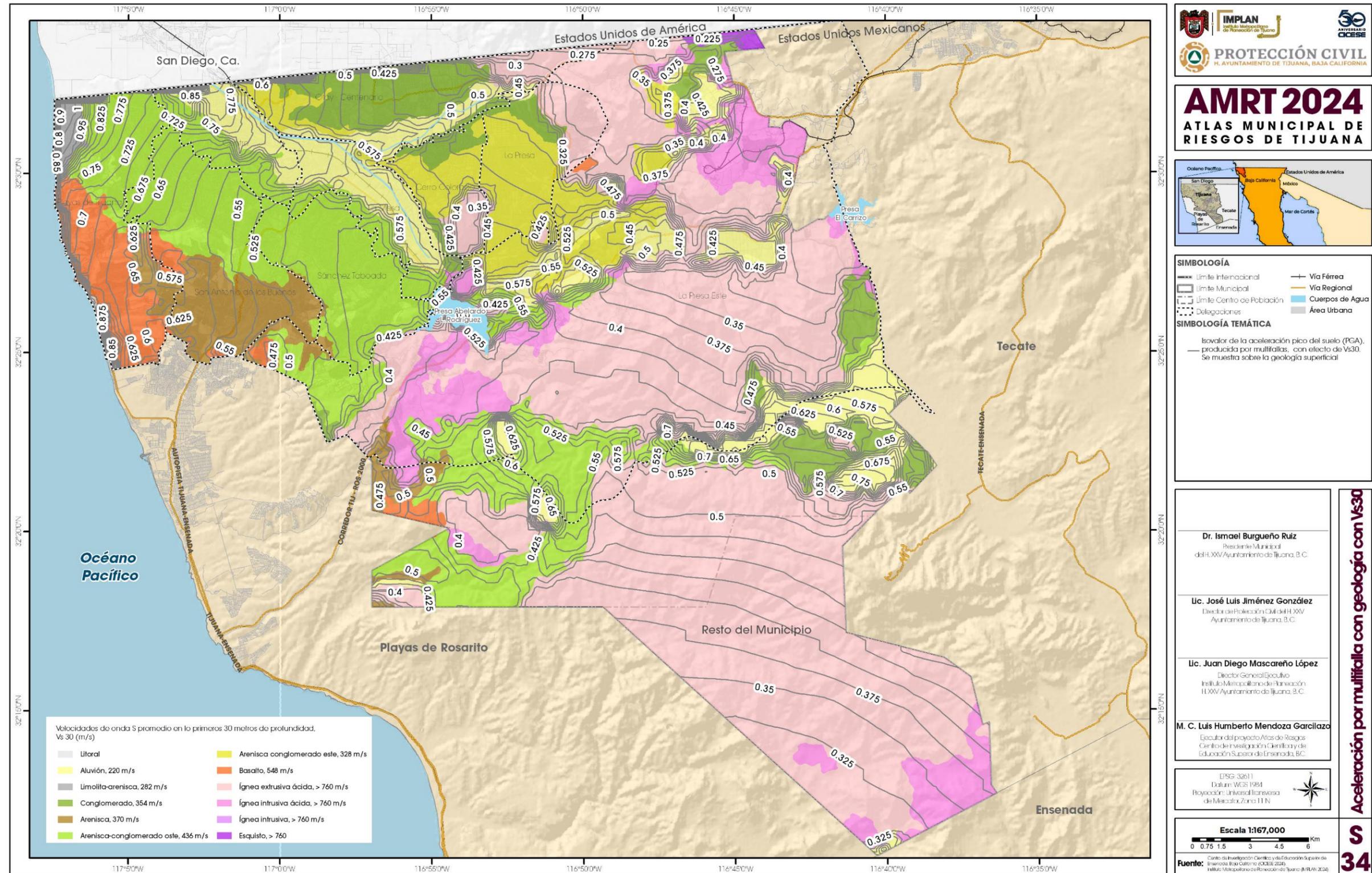


Figura 69. Aceleraciones probables producidas por múltiples fallas del sur de California y norte de Baja California, representadas sobre el mapa geológico considerando la Vs30 (mapa S34)

La aceleración pico del suelo (Peak Ground Acceleration, PGA) es uno de los parámetros que ha tomado relevancia porque los métodos de diseño sismoresistentes se basan en ella. Este parámetro puede ser medido mediante instrumentación sismológica, sin embargo, no siempre se cuenta con una red sismológica bien diseñada en cobertura del área de interés; y en las redes que existen no se tienen los suficientes sismos fuertes registrados como para ser tomados en cuenta en los estudios sismoresistentes.

Cuando no tenemos información necesaria de peligrosidad en la zona de interés, la sismología se ha encargado de implementar metodologías para la modelación de los parámetros que caracterizan el movimiento del suelo a partir de las condiciones sismotectónicas de la región, como es el caso de aplicación en este estudio, ruptura de alguna falla geológica.

Estas metodologías parten de suponer que el movimiento del suelo se propaga en un medio continuo, si esto fuera cierto, la amplitud de la PGA sería constante desde el origen del sismo, sin embargo, no es así, por ello se emplean leyes empíricas de atenuación para que las amplitudes de las ondas decaigan conforme se alejan del origen del sismo. Además, las amplitudes de las ondas sufren cambios al llegar a la superficie, por las condiciones geológicas que imperan en el lugar. Para este último proceso, se emplea la corrección por efecto del sitio, que consiste en amplificar o reducir las ondas según sea la geología (primeros 30 metros del subsuelo) o su parámetro característico que es la velocidad V_{s30} (mapas S23).

En estudios previos del Servicio Geológico de Estados Unidos, se han emitido escenarios de las aceleraciones que tendrían un 2% de probabilidad de excedencia dentro de un periodo de 50 años, que podrían alcanzarse en caso de ocurrir rupturas en fallas cercanas a Tijuana, sin embargo, solo muestran información hasta el límite de la frontera sur de Estados Unidos, por lo que fue necesario estimar el escenario añadiendo al conjunto de fallas del sur de California utilizadas por el USGS las fallas de Baja California, Calabazas ($M=6.7$), Vallecitos ($4 \leq M \leq 6.4$), San Miguel ($4.8 \leq M \leq 6.1$), para periodo de respuesta estructural "0" (lo que equivale a la aceleración del suelo). Se considera el rompimiento individual de cada falla y en cada punto sobre la superficie se asigna la mayor aceleración, sin distinguir de cuál falla proviene. Nosotros simulamos este caso sin incluir el efecto de sitio y también considerándolo. Los detalles metodológicos se pueden consultar en la sección correspondiente de la memoria de cálculo.

El mapa S31 (Figura 66), muestra las aceleraciones probables en escala de colores debido al rompimiento de multi-fallas. Las aceleraciones varían de 0.2 a 0.6 g. Aceleraciones mayores a 0.3 g se presentarían en las delegaciones Centro, San Antonio de los Buenos, Playas de Tijuana, Sánchez Taboada y parte de la delegación La Presa Este. Una representación de esta misma información se muestra en el mapa S32 (Figura 67), pero sobrepuesta con la geología superficial.

El mapa S33 (Figura 68) muestra la distribución de la PGA (g) que considera el efecto de sitio (V_{s30}). Para este escenario, las aceleraciones varían 0.3 a 1 g y se distribuyen siguiendo la forma de las unidades geológicas. Para el diseño sismoresistente, se aplicarían las aceleraciones máximas probables en el sitio de interés utilizando la información del mapa S33.

En la modelación del rompimiento de multi fallas, se consideró todas las fallas que se muestran en el mapa S01 (Figura 35), las cuales corresponden a 114 segmentos de fallas del sur de California y 10 segmentos de fallas del norte de Baja California. Sin embargo, la mayor contribución en las aceleraciones pico son debido al posible rompimiento de las fallas San Miguel, Vallecitos y Calabazas que se ubican cerca del municipio de Tijuana. Las características del escenario están apoyadas en las especificaciones más recientes de las características geométricas y dinámicas de las fallas según el *National Seismic Hazard Mapping Project* (2014), en las leyes de atenuación verificadas para la región y la expresión del efecto de sitio más aceptado actualmente. Como todo resultado de un modelamiento numérico de un proceso físico, es necesario cierto grado de prudencia en su empleo, sobre todo cuando se trate de aplicarlo en estructuras críticas y estratégicas.

El mapa S34 (Figura 69) muestra los mismos resultados del mapa S33 sobrepuesto en las unidades geológicas superficiales del municipio de Tijuana. El uso de esta información es de utilidad para estudios puntuales en el que se desea proyectar estructuras críticas o estratégicas, o cualquier tipo de estructura importante. Además, permitiría reglamentar el diseño sismoresistente.

3.12 Estructuras críticas y estratégicas de Tijuana (S35 y S36)

Las estructuras críticas son aquellas cuyo desperfecto podría afectar seriamente a un conjunto grande de la población, ya sea por:

- -Daño físico directo como resultado del colapso de las estructuras civiles (conjuntos habitacionales, escuelas, salas de espectáculos y reuniones, centros comerciales, etc.).
- -Pérdidas económicas (complejos industriales, infraestructura urbana, centros comerciales, etc.).
- -Peligro adicional sobre la población o medio ambiente por la destrucción de otras estructuras estratégicas (presas, plantas nucleares, depósitos de materiales tóxicos, plantas de procesamiento químico, depósitos de gas y otros combustibles líquidos, etc.).

Las estructuras estratégicas son aquellas indispensables para el mantenimiento de las funciones vitales de una población y para su socorro después de los desastres. Deberán permanecer no solamente intactas, sino en operación, después de un terremoto. La principal afectación consistiría en el desamparo como resultado de la disfunción de esas estructuras estratégicas (centros hospitalarios, centros de gobierno, bomberos y otras instalaciones de auxilio civil, redes de agua potable y drenaje, líneas de energía y comunidades, etc.).

El mapa S35 (Figura 70) muestra las localizaciones de estructuras críticas y estratégicas en Tijuana, comprendidas en las siguientes categorías:

1. Salud privado
2. Salud pública
3. Energía eléctrica
4. Drenaje

5. Agua potable

6. Aeropuerto

Para estimar el daño causado sobre las estructuras, por el movimiento sísmico del suelo, se emplean las matrices de vulnerabilidad, también conocidas como matrices de probabilidad de daño, las cuales expresan en forma discreta la probabilidad de obtener un porcentaje de daño, dado una sollicitación sísmica. Estas matrices se definen para cada clase separada de edificio. Es más común encontrarlas cuando se trabaja en términos de intensidad sísmica. La más usada es la escala de intensidad modificada de Mercalli (IMM). Un ejemplo de matrices de vulnerabilidad es el ATC-13 (Earthquake Damage Evaluation Data for California, de la Federal Emergency Management Agency)

En la Figura 71 (mapa S36) se presentan las IMM, con corrección por efecto de sitio para la ruptura de una de las fallas que aportan más peligro para la ciudad de Tijuana, Rose Canyon, tanto por su cercanía, como su capacidad para generar un sismo fuerte. También se muestran las ubicaciones de las estructuras críticas y estratégicas mencionadas antes. La aplicación de este par de mapas es para documentar el riesgo sísmico del municipio de Tijuana ante la ocurrencia de los terremotos que representan el mayor peligro sísmico para la ciudad. En el mapa S36 se puede obtener el valor de IMM al que estaría sometida cada estructura en el probable escenario del sismo fuerte en Rose Canyon, si se asigna el tipo estructural en cada caso, se puede emplear una relación de daños apropiada a la región (como la ATC-13) que correlaciona la sollicitación sísmica (IMM), el tipo estructural y el daño más probable. Se espera que los sectores de ingeniería, planeación urbana y respuesta a los desastres naturales puedan utilizar estos resultados para mejorar la seguridad de la población y la infraestructura urbana.

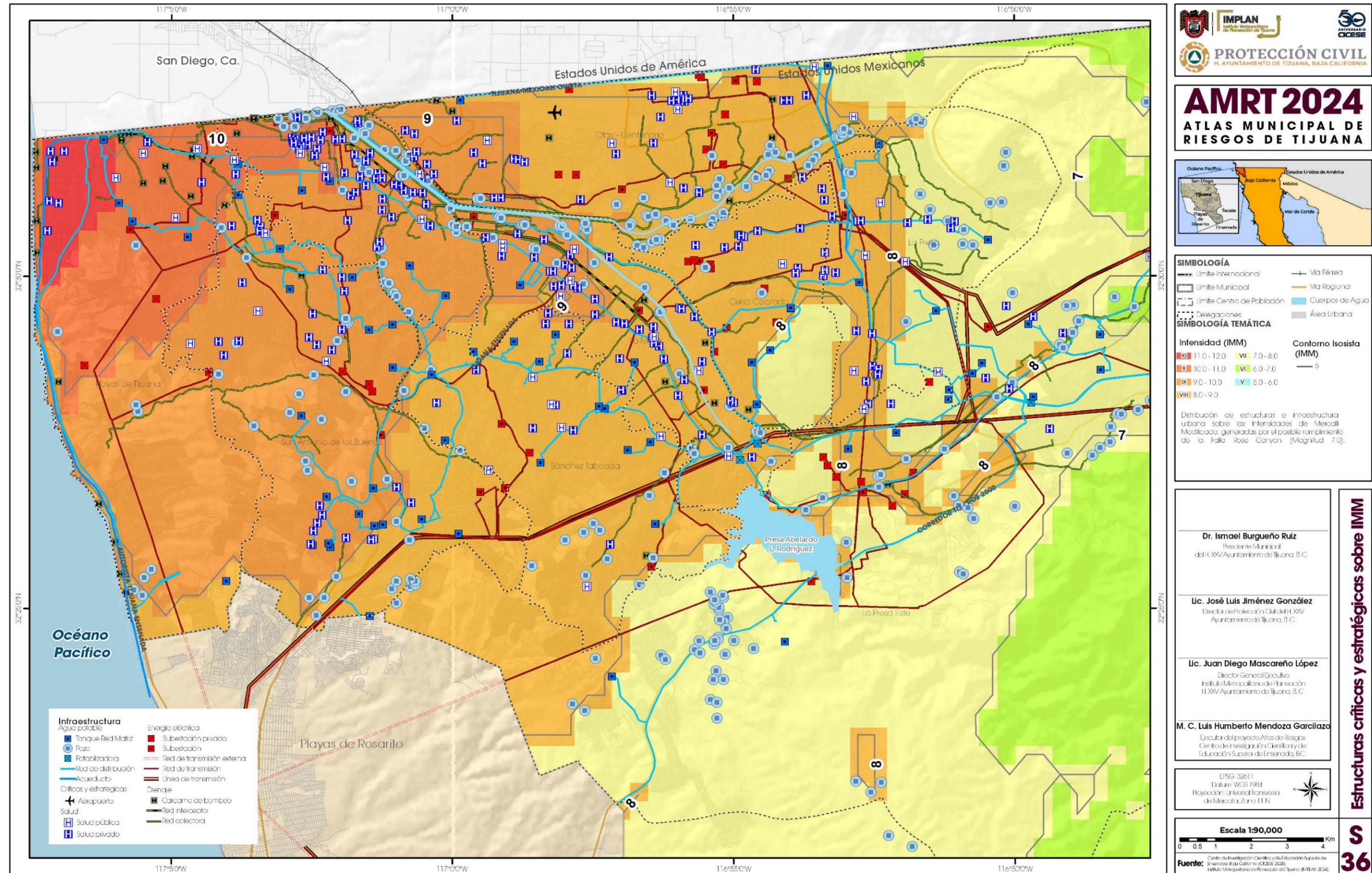


Figura 71. Estructuras críticas y estratégicas para el municipio de Tijuana sobre las intensidades de Mercalli modificada (mapa S36)

Recomendaciones para la ampliación de estudios y adecuación del Atlas Municipal de Riesgos del Municipio de Tijuana, Baja California

Capítulo 4. Propuestas de ampliación de estudios para evaluar y reducir la vulnerabilidad de los asentamientos humanos

En este capítulo se presenta el trabajo a futuro para garantizar una gestión integral del Riesgo siguiendo las normas de la SEDATU y CENAPRED para la construcción del Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana.

4.1 Contenido mínimo para la elaboración de un Atlas de Riesgos

Los fenómenos perturbadores son agentes destructivos que podrían producir riesgo, emergencia o desastre. Estos fenómenos se presentan como contenido mínimo para la elaboración de un Atlas de Nacional Riesgos publicada en el DOF (2016). Esta guía indica que los Atlas estatales y municipales se deben crear bajo criterios homogéneos por lo se propone adecuar el presente Atlas de Riesgos con el resto de los fenómenos perturbadores (ver Tabla 12).

Tabla 12. Fenómenos perturbadores basados en el contenido mínimo para la elaboración de un Atlas

Fenómeno	
1. Geológicos	a) Inestabilidad de laderas (deslizamientos, flujos y caídos o derrumbes); b) Licuación de suelos; c) Sismos; d) Tsunamis.
2. Hidrometeorológicos	a) Ciclón tropical (marea de tormenta, oleaje, vientos y lluvia); b) Inundaciones (pluviales, fluviales, costeras, lacustres); c) Tormentas de nieve; d) Tormentas de granizo; e) Tormentas eléctricas; f) Tormentas de polvo; g) Sequías; h) Ondas cálidas; i) Ondas gélidas; j) Heladas; k) Tornados.
3. Químicos – Tecnológicos	a) Almacenamiento de sustancias peligrosas; b) Autotransporte y transporte ferroviario de sustancias peligrosas; c) Transporte por ductos; d) Incendios forestales.
4. Sanitario-Ecológicos	a) Contaminación del suelo, aire y agua; b) Epidemias y plagas.
5. Sociorganizativos.	a) Demostraciones de inconformidad social; b) Concentración masiva de población; c) Terrorismo, Sabotaje, Vandalismo; f) Accidentes (aéreos, marítimos y terrestres); i) Interrupción y afectación de servicios básicos e infraestructura estratégica.

Los apartados 1 y 2 de la Tabla 12 se encuentran en la primera fase (Capítulos 1 a 3 del presente documento) y en lo siguiente se presentan acciones para incrementar el conocimiento de los factores de peligro y riesgo de los fenómenos hidrometeorológicos, geológicos y sísmicos que afectan a la Ciudad de Tijuana, la mayoría basados en la NORMA Oficial Mexicana NOM-006-SEDATU-2024, publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 23 de agosto de 2024. Respecto a los apartados 4 a 5 de la Tabla 12. En la sección 4.3, se presenta una breve descripción del fenómeno y los lineamientos que solicita la guía de contenido mínimo.

4.2 Ampliación de estudios y adecuación del Atlas Municipal de Riesgos

Los siguientes estudios recomendados, están enfocados a evaluar la vulnerabilidad de asentamientos humanos presentes y servirán como apoyo a los programas de planeación y desarrollo urbano del IMPLAN.

4.2.1 Aspectos de peligro y riesgos hidrometeorológicos

En este apartado se presenta la propuesta para la adecuación del Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana, Baja California versión 2024, en los aspectos de peligro y riesgos hidrometeorológicos en las zonas donde existe información, conforme NOM-006-SEDATU-2024. Con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de los asentamientos humanos, tanto los presentes como los futuros se plantean los siguientes trabajos:

1. Creación de base de datos de viviendas y estructuras hidráulicas presentes en las áreas de peligro por escorrentía e inundación.
2. Identificación de indicadores de vulnerabilidad en estructuras hidráulicas en las áreas de peligro por inundación.
3. Identificación de funciones de vulnerabilidad para tipologías de viviendas del municipio de Tijuana en las áreas de peligro por inundación.

- Inclusión de análisis hidrológicos en las áreas de proyección de crecimiento poblacional para identificar las zonas de peligro ante fenómenos hidrometeorológicos a tomarse en cuenta en la planificación urbana.
- Adecuación del punto 7.1.4 de la NOM-006-SEDATU-2024 enfocada a peligros hidrometeorológicos que dice:

“Análisis a partir de álgebra de mapas y ponderación: Se emplea el método de álgebra de mapas mediante la sobreposición de capas de información de las áreas del apartado 5, es decir, la información del análisis de riesgo, las áreas con valor ambiental, cultural y las que aportan a la resiliencia territorial, utilizando criterios de ponderación”.

El resultado de esta integración permitirá delimitar las áreas no susceptibles para asentamientos humanos dentro de la zonificación primaria del territorio municipal.

4.2.2 Aspectos de peligro y riesgo geológico – “Fenómeno inestabilidad o movimiento de terreno”

La información vertida en el Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana, versión 2024, refleja claramente que, en materia de inestabilidad y movimiento de terreno, la Delegación San Antonio de los Buenos y la Delegación Sánchez Taboada cuentan con la mayor incidencia histórica de manifestaciones de inestabilidad y movimiento de terreno, en algunos casos recurrente. Partiendo del hecho que el riesgo implica la probabilidad de que ocurra un fenómeno, entonces es importante identificar condiciones de vulnerabilidad, entendiendo que la *vulnerabilidad* implica la tendencia de que exista una afectación del medio físico y social, bien por impacto de un fenómeno natural o algún proceso inducido.

La recomendación es que se conjunten métodos de análisis de teledetección (como InSAR: Interferometría por radar de apertura sintética), que permite detectar desplazamientos en la superficie del terreno y reconocimiento de campo para discriminar señales donde pueda existir duda respecto a un proceso real de inestabilidad o cambios en la morfología del terreno por actividades antropogénicas, como movimientos de tierra para acondicionamiento de terrenos, acumulación de residuos de materiales de construcción o acumulación de basura.

El objetivo será identificar zonas vulnerables que puedan verse afectadas por ajustes gravitacionales o deslizamientos. Se puede trabajar por delegaciones, atendiendo al grado de impacto actual. Como aporte complementario esta conjunción de trabajo ayudaría a identificar la tendencia a la recurrencia de zonas de inestabilidad, previas o activas.

Para un mejor conocimiento de las condiciones de subsuelo en las zonas de escurrimientos importantes, además del Río Tijuana y el Arroyo Alamar, será necesario contar con la información completa de los pozos perforados en esas zonas. La información debe incluir coordenada de localización, cota topográfica del brocal de pozo, profundidad total, columna litológica registrada, identificación de nivel estático, resultado del pozo y estado actual. Con esta información y la de geología superficial, se pueden realizar ejercicios de correlación para identificar otras zonas con mayor o menor potencial de licuefacción.

4.2.3 Aspectos peligro y riesgo sísmicos

Esta propuesta recomienda adicionar un conjunto de elementos que definen el peligro y riesgo sísmico con la finalidad de adecuar el actual Atlas Municipal de Riesgos de Tijuana a las especificaciones de la NOM-006-SEDATU-2024, de reciente vigencia. A continuación se presenta el articulado correspondiente al riesgo geológico-sísmico, extraído del Diario Oficial de la Federación del día 23 de agosto de 2024, en la sección 5.1.1.4 Sismo.

*“Para la evaluación del riesgo sísmico es necesario realizar el análisis de la **distribución de aceleraciones espectrales** asociadas a un lugar específico que podrá estar expuesto, considerando la ubicación en relación con zonas sísmicamente activas y diferentes periodos de retorno. Las aceleraciones deben reportarse, al menos, para periodos estructurales que sean de utilidad para el análisis. Lo anterior con el fin de identificar y evaluar las zonas donde pudiera haber **daños en la vivienda y en la infraestructura estratégica**. Para la vulnerabilidad física se pueden **utilizar funciones de vulnerabilidad, que se deberán realizar con base en las características físicas de los sistemas expuestos y el grado de intensidad del sismo**, definido por la aceleración espectral reportada en los mapas del estudio de peligro sísmico. En caso de proponer una metodología alterna, ésta se podrá utilizar siempre y cuando sea aprobada previamente por el Centro Nacional de Prevención de Desastres.”*

Para conseguirlo, se proponen las siguientes actividades:

1. Distribución de aceleraciones espectrales. Se construirán los mapas de aceleraciones espectrales correspondientes a los 3 periodos más abundantes en las principales estructurales críticas y estratégicas del municipio de Tijuana.
2. Determinación de las funciones o matrices de vulnerabilidad idóneas para la región del Municipio y tipos estructurales existentes.
3. Formación de una base de datos con las estructuras críticas y estratégicas del Municipio de Tijuana, especificando el tipo estructural y su función social.
4. Aplicación de las funciones de vulnerabilidad del inciso 2 sobre las estructuras del inciso 3, con las solicitaciones sísmicas de los mapas del inciso 1 y los mapas de peligro sísmico ya contenidos en el Atlas actual.
5. Inclusión de los resultados en el cuerpo del Atlas actual, manteniendo el formato del documento existente.

4.3 Ampliación de estudios y adecuación del Atlas a riesgos Antropogénicos

Los fenómenos perturbadores de origen antropogénico se extraen de la guía de contenido mínimo para el Atlas Nacional de Riesgos, estos también afectan al municipio de Tijuana.

4.3.1 Químicos –Tecnológicos

“Estos fenómenos se producen como consecuencia de un accidente durante el almacenamiento o transporte de sustancias químicas peligrosas entre los cuales destacan: la fuga o derrame de sustancias tóxicas en estado gaseoso líquido y sólido; incendios, explosiones. Estos pueden afectar a la población (lesiones, muerte, invalidez, intoxicación, o enfermedades), al ambiente (contaminación del suelo, aire, agua superficial o subterránea), a construcciones (ocasionando

daño a equipo) y a la economía (suspensión de actividades productivas, pérdida de empleos, gastos de reconstrucción de viviendas y servicios públicos, así como gastos para el auxilio de la población afectada)”. En este apartado también se pueden incluir la localización de fuentes radioactivas y el peligro por incendios forestales.

4.3.2 Sanitario-Ecológicos

Este apartado principalmente se concentrará en la contaminación de agua, aire y suelo. La contaminación está definida como un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas del ambiente natural, producido principalmente por la actividad humana. Y los efectos se ven reflejados en la salud de la población, así como la escasez de los recursos naturales como agua, suelo y aire limpios. Además se puede evaluar el efecto relacionado con epidemias (incremento de casos de una enfermedad infecto-contagiosa) y plagas (cualquier organismo perjudicial para el humano o sus actividades agropecuarias).

4.3.3 Socio-organizativos

Según la Ley General de Protección Civil un fenómeno socio-organizativos es un agente perturbador que se genera con motivo de errores humanos o por acciones premeditadas, que se dan en el marco de grandes concentraciones o movimientos masivos de población.

En estos los sistemas expuestos son los sitios en los que se llevan a cabo festividades religiosas, deportivas o culturales así como manifestaciones. Además dentro de estos fenómenos se deben analizar también los factores asociados con: Terrorismo, Sabotaje, Vandalismo; Accidentes (aéreos, marítimos y terrestres; Interrupción y afectación de servicios básicos e infraestructura estratégica. Cada uno de estos fenómenos debe ser analizado de forma independiente, ligado con otros elementos (ya sean naturales o antropogénicos) para evaluar el riesgo.

De estos últimos tres apartados es importante generar mapas de susceptibilidad, inventarios de bienes expuestos, inventarios de vulnerabilidades así como mapas y escenarios de riesgos, con la finalidad de caracterizar de forma regional los fenómenos perturbadores en el municipio de Tijuana.

Bibliografía Peligros hidrometeorológicos

Arlette, D., Devesa, C., & Cruz, V. M. (2018). Mapas de riesgo por temperaturas máximas. Sistema Nacional de Protección Civil Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Baldwin, J. W., Dessy, J. B., Vecchi, G. A., & Oppenheimer, M. (2019). Temporally Compound Heat Wave Events and Global Warming: An Emerging Hazard. *Earth's Future*, 7(4), 411–427. <https://doi.org/10.1029/2018EF000989>

CENAPRED. (2007). Serie Ciclones Tropicales.

CENAPRED. (2021a). Actividad 4-1: Actualización de capas de índice de peligro y riesgo del ANR por ondas cálidas y ondas gélidas. Sistema Nacional de Protección Civil. Centro Nacional de Prevención de Desastres, 43.

CENAPRED. (2021b). FaSciculo Heladas (Issue 1).

CENAPRED. (2021c). FASCICULO TORMENTAS SEVERAS.

Gamez-Balmaceda, E., López-Lambraño, A., Villacís, C., Seingier, G., Huerta, H., Suárez, J., López-Ramos, A., Martínez, L., (2021). Capítulo III Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México. 71. SN - 978-607-437-561-9

Gershunov, A., Guzman Morales, J., Hatchett, B., Guirguis, K., Aguilera, R., Shulgina, T., Abatzoglou, J. T., Cayan, D., Pierce, D., Williams, P., Small, I., Clemesha, R., Schwarz, L., Benmarhnia, T., & Tardy, A. (2021). Hot and cold flavors of southern California's Santa Ana winds: their causes, trends, and links with wildfire. *Climate Dynamics*, 57(7–8), 2233–2248. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05802-z>

Herrera, J. L. (2012). Análisis de las olas de calor en la república mexicana. 229. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5149/TESIS.pdf?sequence=1>

Honerkamp, R., Yan, G., & Snyder, J. C. (2020). A review of the characteristics of tornadic wind fields through observations and simulations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 202(April), 104195. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104195>

IMPLAN. (2014). Atlas de riesgos naturales del Municipio de Tijuana, 2014.

Miguel Miller, F. (2012). The weather guide. A Weather Information Companion for the Forecast Area of the National Weather Service in San Diego, 159 S.

Ortiz Figueroa, M. (2003). "Condición Santa Ana "... No Todo Es Viento Seco , Alergias E Incendios Forestales. 2002–2003.

Palacios, S., Lara, G., & Perucca, L. (2021). Susceptibility to soils and sediments liquefaction in the ullum-zonda valley (31o30' s-68o25' w), precordillera, central andes, Argentina. *Andean Geology*, 48(2), 333–349. <https://doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3331>

Rafael García-Cueto, O., Ernesto López-Velázquez, J., Bojórquez-Morales, G., Santillán-Soto, N., & Flores-Jiménez, D. E. (2021). Trends in Temperature Extremes in Selected Growing Cities of Mexico Under a Non-stationary Climate. *Atmosfera*, 34(3), 233–254. <https://doi.org/10.20937/ATM.52784>

Serrano-Notivoli, R., Lemus-Canovas, M., Barrao, S., Sarricolea, P., Meseguer-Ruiz, O., & Tejedor, E. (2022). Heat and cold waves in mainland Spain: Origins, characteristics, and trends. *Weather and Climate Extremes*, 37(February), 100471. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100471>

Zamora-Machado, M., Lambert-Arista, A. A., García-Cueto, O. R., Jaramillo-Salgado, O. A., Leyva-Sánchez, E., Reynaga-López, R. C., Herrera-García, J. R., Lizárraga-Osuna, N., & Anguiano-Cota, R. C. (2023). Classification of Santa Ana winds for the evaluation of their wind potential in La Rumorosa, Baja California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 49. <https://doi.org/10.7773/cm.y2023.3358>

Bibliografía peligros Geológicos

Aragón Arreola, Manuel de J., Luis A. Delgado Argote, Juan García Abdeslem y Juan Manuel Espinosa Cardeña. (1993). Estimación de riesgo geológico en zonas aledañas a la estación de bombeo de aguas residuales de Playas de Tijuana. Informe preparado para la Comisión de Servicios de Agua del Estado. Pt 22 (deslizamiento).

CONAGUA. (2024) Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Tijuana, estado de Baja California.

Mogami, T., & Kubo, K. (1953). The Behaviour of Soil during Vibration. The International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE), 152-155. <https://www.issmge.org/publications/online-library>

Palacios, S., Lara, G., & Perucca, L. (2021). Susceptibility to soils and sediments liquefaction in the ullum-zonda valley (31o30' s-68o25' w), precordillera, central andes, Argentina. *Andean Geology*, 48(2), 333-349. <https://doi.org/10.5027/andgeoV48n2-3331>

Youd, T. L y Hoose, S. N (1977). Liquefaction susceptibility and geologic setting. *Proceedings, 6th World Conference on Earthquake Engineering*, Nueva Delhi, Vol. 3, pp.2189-2194

PROY-NOM-006-SEDATU-2024. PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-006-SEDATU-2024, Clasificación, caracterización y delimitación de zonas no susceptibles para asentamientos humanos en la zonificación primaria por presentar riesgos críticos originados por amenazas hidrometeorológicas, geológicas y las asociadas al cambio climático o por tener valor ambiental o cultural en los instrumentos que conforman el Sistema General de Planeación Territorial. SEDATU, Ciudad de México, DOF, 22 de enero de 2024. [Citado el 17-12-2024]; Disponible en versión en internet: <https://www.dof.gob.mx>

Bibliografía peligros Sísmicos

Álvarez S., Arellano G., Montalvo J.C. y Acosta J. (1994). Perfiles de velocidad en la ciudad de Tijuana, B.C. Comunicaciones Académicas, Serie Sismología. CICESE. CISIT9403.

Aki, K., Ed. (1988). Local site effects on strong ground motion. In Van Thun, J.L. (Ed) *Earthquake engineering and soil dynamics II. Recent advances in ground-motion evaluation* Geotechnical Special Publication No.20, American Society of Civil Engineers Reston, VA, pp 103-155.

Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Tijuana (2014). <https://implan.tijuana.gob.mx/implan/planes-y-programas/atlas-de-riesgos-naturales.aspx>

CICESE, DEPC-Tijuana. 2009. Microzonificación Sísmica de Tijuana. Informe final. Grupo Sismología Aplicada a la Ingeniería, Centro de Investigación y Educación Superior de Ensenada; Dirección Estatal de Protección Civil de Baja California. 185 pp.

IBC (2006). "International Building Code. Capítulo 16, sección 1613. International Code Council, EE.UU"

NSHMP (2014). National Seismic Hazard Mapping Project Legacy Fortran Code. USGS. <https://github.com/usgs/nshmp-haz-fortran/tree/nshmp2014r1> [fecha de consulta. 3 agosto 2023].

USGS (2017). M7.0 Scenario Earthquake – Rose Canyon. 2017-05-16 14:31:55 (UTC), 32.850°N 117.258°W, 4.9 km depth., USGS National Earthquake Information Center, PDE. https://earthquake.usgs.gov/scenarios/eventpage/bssc2014rosecanyonshaw09modg_m6p9_9_se/executive [fecha de consulta. 25 septiembre 2023.]

Coordinación Institucional

H. XXV Ayuntamiento de Tijuana

Dr. Ismael Burgueño Ruiz

Presidente Municipal de Tijuana

Lic. Juan Diego Mascareño López

Director General Ejecutivo del Instituto Metropolitano de Planeación de Tijuana

Lic. José Luis Jiménez González

Director de Protección Civil Municipal

Elaboración del Atlas Municipal de Riesgos

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C.

Responsables Técnicos del Informe CICESE

M. en C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo, Coordinador

M. en C. José Guadalupe Acosta Chang, Peligro Sísmico

M. en C. Sergio Vázquez Hernández, Inestabilidad de laderas

Dra. Ena del Carmen Gámez Balmaceda, Peligro Hidrometeorológico y SIG

M. en C. Jessica Jazmín Salas Ariza, Peligro Hidrometeorológico y SIG

Colaboradores del Informe CICESE

M. en I. Rogelio Reyes Serrano

M. en C. Euclides Ruiz Cruz

Dr. Favio Cruz Hernández

MGTIC Armando Valdéz Terríquez

Supervisor del Atlas Municipal de Riesgos

Instituto Metropolitano de Planeación de Tijuana (IMPLAN Tijuana)

