



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

ZONAS DE RIESGO POR INUNDACIÓN Y CORRIENTES A CAUSA DE TSUNAMIS SINTÉTICOS EN ACAPULCO, GRO.

Rodolfo Ramírez Xicotencatl
Manuel Mendoza Grande
María de Lourdes Méndez Reyes
Edy Nelson Sánchez Blanco

Publicación Técnica No. 695
Sanfandila, Gro.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por el Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl y en coautoría de M. en I. Manuel Mendoza Grande, Ing. Arq. María de Lourdes Méndez Reyes y Top. Edy Nelson Sánchez Blanco.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-02/22 Estudio en modelos numéricos para definir zonas de riesgo de inundación y corrientes generadas por efecto de tsunamis en la zona costera de Acapulco, Gro.

Contenido

	Página
Índice de figuras	v
Índice de tablas	xxiii
Sinopsis.....	xxv
Abstract	xxvii
Resumen ejecutivo.....	xxix
Introducción.....	1
1. Recopilación de información topobatimétrica.....	3
1.1 Modelo del relieve mundial ETOPO 1	3
1.2 Modelo Digitales de batimetría (INEGI).....	4
1.3 Modelo Digitales de Elevación (INEGI)	5
2. Cálculo de tsunamis hipotéticos.....	9
2.1 Sismicidad en México.....	9
2.2 Brecha Sísmica de Guerrero.....	11
2.3 Los tsunamis en México.....	12
2.4 Cálculo de tsunamis sintéticos	13
3. Modelaciones numéricas de la propagación de los tsunamis	21
3.1 Modelo numérico.....	21
3.1.1 Malla de cálculo	22
3.1.2 Condiciones iniciales	24
3.1.3 Resultados.....	24
4. Elaboración de mapas de riesgo.....	123

Conclusiones.....	189
Bibliografía	199

Índice de figuras

Figura 1. 1. Información batimétrica del Modelo del relieve Mundial de la Superficie de la Tierra, ETOPO 1	3
Figura 1. 2. Información batimétrica del Modelo Digital Batimétrico (MDB) de INEGI	5
Figura 1. 3. Esquema que representa los dos tipos de Modelo Digital de Elevación (DEM)	6
Figura 1. 4. Información topográfica del Modelo Digital de Terreno (MDT) de INEGI	7
Figura 2. 1. Cinturón de Fuego del Pacífico	9
Figura 2. 2. Placas tectónicas de México	10
Figura 2. 3. Zonas sísmicas de México	10
Figura 2. 4. Mapa de sismicidad en México	11
Figura 2. 5. Generación de un tsunami por efecto de un sismo	13
Figura 2. 6. Dislocaciones cosísmicas para diferentes longitudes de planos de falla (90 a 180 km) y magnitudes de sismos (7.5 a 8.9).....	15
Figura 2. 7. Dislocaciones cosísmicas para diferentes longitudes de planos de falla (210 a 300 km) y magnitudes de sismos (7.5 a 8.9).....	15
Figura 2. 8. Localización donde se fue ubicando el centro de los planos de falla .	16
Figura 2. 9. Parámetros que definen el movimiento de una falla.....	17
Figura 2. 10. Deformación vertical de la superficie producto de una falla inversa con dislocación de 2.6 m, magnitud del sismo $M = 8.0$, plano de falla de 90 x 90 km.....	17
Figura 3. 1. Definición de la malla de cálculo	23
Figura 3. 2. Malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la propagación de los tsunamis.....	23

Figura 3. 3. Resultados de la propagación de un tsunami posterior a la generación del sismo. a) 4 minutos, b) 10 minutos, c) 20 minutos y d) 30 minutos	24
Figura 3. 4. Ubicación de puntos de control para obtener las alturas de ola del tsunami y las velocidades de las corrientes	25
Figura 3. 5. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	26
Figura 3. 6. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	26
Figura 3. 7. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo.....	27
Figura 3. 8. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	27
Figura 3. 9. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo.....	28
Figura 3. 10. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	28
Figura 3. 11. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	29
Figura 3. 12. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	29
Figura 3. 13. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	30
Figura 3. 14. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	30
Figura 3. 15. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	31
Figura 3. 16. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	31
Figura 3. 17. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	32
Figura 3. 18. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	32

Figura 3. 19. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	33
Figura 3. 20. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	33
Figura 3. 21. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	34
Figura 3. 22. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	34
Figura 3. 23. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	35
Figura 3. 24. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	35
Figura 3. 25. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	36
Figura 3. 26. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	36
Figura 3. 27. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	37
Figura 3. 28. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	37
Figura 3. 29. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	38
Figura 3. 30. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	38
Figura 3. 31. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	39
Figura 3. 32. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	39
Figura 3. 33. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	40
Figura 3. 34. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	40

Figura 3. 35. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	41
Figura 3. 36. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	41
Figura 3. 37. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	42
Figura 3. 38. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	42
Figura 3. 39. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	43
Figura 3. 40. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	43
Figura 3. 41. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	44
Figura 3. 42. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	44
Figura 3. 43. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	45
Figura 3. 44. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	45
Figura 3. 45. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	46
Figura 3. 46. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	46
Figura 3. 47. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	47
Figura 3. 48. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	47
Figura 3. 49. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	48
Figura 3. 50. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	48

Figura 3. 51. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	49
Figura 3. 52. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	49
Figura 3. 53. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	50
Figura 3. 54. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	50
Figura 3. 55. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	51
Figura 3. 56. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	51
Figura 3. 57. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	52
Figura 3. 58. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	52
Figura 3. 59. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	53
Figura 3. 60. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	53
Figura 3. 61. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	54
Figura 3. 62. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	54
Figura 3. 63. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	55
Figura 3. 64. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	55
Figura 3. 65. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	56
Figura 3. 66. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	56

Figura 3. 67. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	57
Figura 3. 68. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	57
Figura 3. 69. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	58
Figura 3. 70. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	58
Figura 3. 71. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	59
Figura 3. 72. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	59
Figura 3. 73. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	60
Figura 3. 74. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	60
Figura 3. 75. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	61
Figura 3. 76. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	61
Figura 3. 77. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	62
Figura 3. 78. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	62
Figura 3. 79. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	63
Figura 3. 80. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	63
Figura 3. 81. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	64
Figura 3. 82. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	64

Figura 3. 83. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	65
Figura 3. 84. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	65
Figura 3. 85. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	66
Figura 3. 86. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	66
Figura 3. 87. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	67
Figura 3. 88. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	67
Figura 3. 89. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	68
Figura 3. 90. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	68
Figura 3. 91. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	69
Figura 3. 92. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	69
Figura 3. 93. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	70
Figura 3. 94. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco.....	70
Figura 3. 95. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	71
Figura 3. 96. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	71
Figura 3. 97. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	72
Figura 3. 98. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	72

Figura 3. 99. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	73
Figura 3. 100. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	73
Figura 3. 101. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	74
Figura 3. 102. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	74
Figura 3. 103. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	75
Figura 3. 104. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	75
Figura 3. 105. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	76
Figura 3. 106. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	76
Figura 3. 107. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	77
Figura 3. 108. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	77
Figura 3. 109. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	78
Figura 3. 110. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	78
Figura 3. 111. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	79
Figura 3. 112. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	79
Figura 3. 113. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	80
Figura 3. 114. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	80

Figura 3. 115. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	81
Figura 3. 116. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	81
Figura 3. 117. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	82
Figura 3. 118. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	82
Figura 3. 119. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	83
Figura 3. 120. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	83
Figura 3. 121. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	84
Figura 3. 122. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	84
Figura 3. 123. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	85
Figura 3. 124. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	85
Figura 3. 125. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	86
Figura 3. 126. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	86
Figura 3. 127. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	87
Figura 3. 128. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	87
Figura 3. 129. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	88
Figura 3. 130. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	88

Figura 3. 131. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	89
Figura 3. 132. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	89
Figura 3. 133. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	90
Figura 3. 134. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	90
Figura 3. 135. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	91
Figura 3. 136. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	91
Figura 3. 137. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	92
Figura 3. 138. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	92
Figura 3. 139. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	93
Figura 3. 140. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	93
Figura 3. 141. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	94
Figura 3. 142. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	94
Figura 3. 143. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	95
Figura 3. 144. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	95
Figura 3. 145. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	96
Figura 3. 146. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	96

Figura 3. 147. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	97
Figura 3. 148. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	97
Figura 3. 149. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	98
Figura 3. 150. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	98
Figura 3. 151. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	99
Figura 3. 152. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	99
Figura 3. 153. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	100
Figura 3. 154. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	100
Figura 3. 155. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	101
Figura 3. 156. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	101
Figura 3. 157. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	102
Figura 3. 158. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	102
Figura 3. 159. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	103
Figura 3. 160. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	103
Figura 3. 161. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	104
Figura 3. 162. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	104

Figura 3. 163. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	105
Figura 3. 164. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	105
Figura 3. 165. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	106
Figura 3. 166. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	106
Figura 3. 167. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	107
Figura 3. 168. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	107
Figura 3. 169. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	108
Figura 3. 170. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	108
Figura 3. 171. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	109
Figura 3. 172. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	109
Figura 3. 173. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$	110
Figura 3. 174. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	110
Figura 3. 175. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	111
Figura 3. 176. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	111
Figura 3. 177. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	112
Figura 3. 178. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	112

Figura 3. 179. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$	113
Figura 3. 180. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	113
Figura 3. 181. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	114
Figura 3. 182. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	114
Figura 3. 183. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	115
Figura 3. 184. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	115
Figura 3. 185. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$	116
Figura 3. 186. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	116
Figura 3. 187. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	117
Figura 3. 188. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	117
Figura 3. 189. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	118
Figura 3. 190. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	118
Figura 3. 191. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$	119
Figura 3. 192. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	119
Figura 3. 193. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	120
Figura 3. 194. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	120

Figura 3. 195. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo	121
Figura 3. 196. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco	121
Figura 4. 1. Superficie máxima de inundación generada por el tsunami (Caso 1)	124
Figura 4. 2. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 1)	125
Figura 4. 3. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 2)	126
Figura 4. 4. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 2)	127
Figura 4. 5. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 3)	128
Figura 4. 6. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 3)	129
Figura 4. 7. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 4)	130
Figura 4. 8. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 4)	131
Figura 4. 9. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 5)	132
Figura 4. 10. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 5)	133
Figura 4. 11. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 6)	134
Figura 4. 12. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 6)	135
Figura 4. 13. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 7)	136
Figura 4. 14. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 7)	137
Figura 4. 15. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 8)	138
Figura 4. 16. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 8)	139
Figura 4. 17. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 9)	140

Figura 4. 18. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 9).....	141
Figura 4. 19. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 10).....	142
Figura 4. 20. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 10).....	143
Figura 4. 21. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 11).....	144
Figura 4. 22. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 11).....	145
Figura 4. 23. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 12).....	146
Figura 4. 24. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 12).....	147
Figura 4. 25. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 13).....	148
Figura 4. 26. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 13).....	149
Figura 4. 27. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 14).....	150
Figura 4. 28. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 14).....	151
Figura 4. 29. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 15).....	152
Figura 4. 30. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 15).....	153
Figura 4. 31. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 16).....	154
Figura 4. 32. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 16).....	155
Figura 4. 33. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 17).....	156
Figura 4. 34. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 17).....	157
Figura 4. 35. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 18).....	158
Figura 4. 36. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 18).....	159
Figura 4. 37. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 19).....	160

Figura 4. 38. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 19).....	161
Figura 4. 39. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 20).....	162
Figura 4. 40. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 20).....	163
Figura 4. 41. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 21).....	164
Figura 4. 42. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 21).....	165
Figura 4. 43. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 22).....	166
Figura 4. 44. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 22).....	167
Figura 4. 45. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 23).....	168
Figura 4. 46. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 23).....	169
Figura 4. 47. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 24).....	170
Figura 4. 48. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 24).....	171
Figura 4. 49. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 25).....	172
Figura 4. 50. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 25).....	173
Figura 4. 51. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 26).....	174
Figura 4. 52. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 26).....	175
Figura 4. 53. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 27).....	176
Figura 4. 54. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 27).....	177
Figura 4. 55. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 28).....	178
Figura 4. 56. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 28).....	179
Figura 4. 57. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 29).....	180

Figura 4. 58. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 29).....	181
Figura 4. 59. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 30).....	182
Figura 4. 60. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 30).....	183
Figura 4. 61. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 31).....	184
Figura 4. 62. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 31).....	185
Figura 4. 63. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 32).....	186
Figura 4. 64. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 32).....	187
Figura C. 1. Rango de las máximas alturas de ola.....	190
Figura C. 2. Rango de tiempo de arribo de las máximas alturas de ola.....	191
Figura C. 3. Rango de las distancias máximas de inundación.....	192
Figura C. 4. Rango de las velocidades máximas de las corrientes.....	194
Figura C. 5. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 7.5.....	196
Figura C. 6. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.0.....	196
Figura C. 7. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.4.....	197
Figura C. 8. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.9.....	197

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Niveles de referencia de la marea para el puerto de Acapulco, Gro.	4
Tabla 2. 1. Condiciones iniciales de los sismos para la definición de los tsunamis sintéticos	14
Tabla 2. 2. Alturas de ola de tsunami, para las 5 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 90 x 90 km y para las 4 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 120 x 90 km	18
Tabla 2. 3. Alturas de ola de tsunami, para las 4 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 150 x 90 km, para las 3 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 180 x 90 km y para las 3 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 210 x 90 km	19
Tabla 2. 4. Alturas de ola de tsunami, para las 2 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 240 x 90 km, para las 2 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 270 x 90 km y para el plano de falla de 300 x 90 km	19
Tabla 4. 1. Resumen de las características de los casos que se presentan los mapas de inundación y de corrientes	123
Tabla C. 1. Índice y tipo de daño causando en las zonas portuarias, por las corrientes generadas por tsunamis	195

Sinopsis

La información histórica indica que, en la Brecha Sísmica de Guerrero que se extiende por 150 kilómetros en la costa Grande (desde Papanaoa hasta Acapulco), no se han presentado rompimientos por movimientos tectónicos por más de 110 años, razón por la cual, está latente la posibilidad de que se genere un sismo de gran magnitud.

En el presente estudio se definió un conjunto de 288 sismos hipotéticos que pudieran presentarse en dicha zona y mediante modelaciones numéricas de propagación de la superficie libre inicial del tsunami, se determinaron zonas de riesgo de inundación y de corrientes en la zona costera de Acapulco, Gro.

De conformidad con los resultados, se estimó que, para la bahía de Acapulco, el tiempo promedio de arribo de la máxima altura del tsunami es de 30 minutos, la cual llega a adentrarse hasta una distancia máxima de 800 m.

Los resultados contenidos en este documento tienen carácter consultivo u orientativo, por lo que en ningún caso el Instituto Mexicano del Transporte o la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes del Gobierno de México, se hará valedor o responsable de las consecuencias que se pudieran derivar de su uso.

Abstract

Historical information indicates that, in the Guerrero Seismic Gap that extends for 150 kilometers on the Costa Grande (from Papanaoa to Acapulco), there have been no ruptures due to tectonic movements for more than 110 years, which is why it is latent. the possibility of a large earthquake.

In the present study, a set of 288 hypothetical earthquakes that could occur in said area was defined and through numerical modeling of the propagation of the initial free surface of the tsunami, flood and current risk zones were determined in the coastal area of Acapulco, Gro.

In accordance with the results, it was estimated that, for the Acapulco Bay, the average arrival time of the maximum height of the tsunami is 30 minutes, reaching a maximum distance of 800 m.

The results contained in this paper are of an advisory or indicative nature, so that in no case will the Mexican Institute of Transport or the Ministry of Infrastructure, Communications and Transport of the Government of Mexico, will be held responsible or liable for the consequences that may arise from its use.

Resumen ejecutivo

Para definir las zonas de riesgo de inundación y de corrientes generadas por efecto del impacto de un tsunami en la zona costera de Acapulco, el IMT realizó lo siguiente:

Se definió un conjunto de 288 sismos en la Brecha Sísmica de Guerrero con magnitudes de 7.5 a 8.9, en los que se hicieron variar las dimensiones y ubicación del plano de falla y las dislocaciones cosísmicas.

Con el programa de cómputo COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model), se calculó la superficie libre inicial del tsunami para los 288 sismos, en el que se consideró para tal efecto las siguientes características del mecanismo focal de la falla.

- Rumbo de la falla = 291°
- Echado de la falla = 15°
- Deslizamiento de la falla = 93°
- Profundidad focal = 15 km

Se realizó la propagación de los 288 tsunamis, mediante la aplicación del modelo hidrodinámico Flow Model FM del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, para un período de simulación de 10 horas. Como resultado del trabajo realizado, se obtuvo la siguiente información:

- Alturas de la primera ola de tsunami, de las máximas alturas de ola de tsunami y de las velocidades máximas de las corrientes, así como sus respectivos tiempos de arribo en 24 sitios de la zona costera de Acapulco, distribuidos desde playa Pie de la Cuesta hasta playa Diamante.
- Series de tiempo de las alturas del tsunami y de las velocidades de las corrientes, en playa Pie de la Cuesta, bahía de Acapulco, Puerto Marqués y playa Diamante.
- Mapas de la superficie de inundación en la zona costera de Acapulco.
- Mapas del patrón de circulación de las máximas corrientes generadas por el tsunami.

Introducción

Un tsunami es una secuencia de olas que se producen por terremotos en el fondo marino; por deslizamientos submarinos, erupciones de volcanes sumergidos y con menor frecuencia por el impacto de meteoritos, las cuales se desplazan a velocidades de aproximadamente 700 km/h y al aproximarse a la costa se desaceleran y se contraen, lo que origina un incremento en su altura y se conserva casi toda su energía, por lo que, entender su mecanismo de generación, como se propaga hacia la zona costera y las consecuencias del impacto en una comunidad costera, es fundamental para la mitigación de los riesgos, principalmente para reducir la pérdida de vidas y de bienes.

Los tsunamis se clasifican, en el lugar de arribo a la costa, según la distancia (o el tiempo de viaje) desde su lugar de origen, en:

- Tsunamis Locales: si el lugar de arribo en la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación (delimitada por el área de dislocación del fondo marino) del tsunami, o a menos de una hora de tiempo de viaje desde su origen.
- Tsunamis Regionales: si el lugar de arribo en la costa está a no más de 1000 km de distancia de la zona de generación, o a pocas horas de tiempo de viaje desde esa zona.
- Tsunamis Lejanos (o Remotos, o Trans-Pacíficos o Tele-tsunamis), si el lugar de arribo está en costas extremo-opuestas a través del Océano Pacífico, a más de 1000 km de distancia de la zona de generación, y a aproximadamente medio día o más de tiempo de viaje del tsunami desde esa zona.

La información histórica registra el arribo de más de 60 tsunamis a la costa occidental de México en los últimos 284 años. Los tsunamis de origen lejano han generado olas de hasta 2.5 m de altura y los de origen local han generado olas de 5 m en promedio y excepcionalmente olas de hasta 10 m de altura, en la historia reciente no se tiene conocimiento de que en México hayan ocurrido tsunamis tan destructivos, sin embargo, existen evidencias de que en 1787 ocurrió un gran terremoto de magnitud 8.4 en San Sixto, Oaxaca, que generó un tsunami local sumamente destructivo (Núñez, Ortiz y Sánchez, 2008).

Las costas del Pacífico mexicano, que suman 9744 kilómetros, conforman una zona considerada de alto riesgo. Dentro de esta área se encuentra la Brecha Sísmica de Guerrero que se extiende por 150 kilómetros en la costa Grande (desde Papanoa a Acapulco), sección que desde hace 110 años no ha presentado rompimientos por movimientos tectónicos y que, por esta razón, está latente la posibilidad de que se

genere un temblor de gran magnitud, posiblemente mayor al del 19 de septiembre de 1985.

Finalmente, los conocimientos científicos sobre sismología son insuficientes para realizar predicciones de cuando y donde se producirá un sismo y si este va a generar un tsunami, sin embargo, las recientes investigaciones y el desarrollo de metodologías para estimar las alturas y el tiempo de arribo de los tsunamis a las costas, permite contribuir a la mitigación de sus efectos en las zonas costeras, como medidas de prevención y autoprotección.

1. Recopilación de información topobatimétrica

Para el presente estudio, se recopiló la información topobatimétrica de las siguientes fuentes:

1.1 Modelo del relieve mundial ETOPO 1

Información batimétrica del modelo del relieve mundial de la superficie de la tierra ETOPO 1 de la National Geophysical Data Center de los Estados Unidos de Norteamérica, el cual es un modelo de relieve global de 1 minuto de arco de la superficie de la Tierra que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica, referenciado verticalmente al nivel medio del mar y horizontalmente al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84). Dicho modelo fue construido a partir de conjuntos de datos globales y regionales que se cambiaron a datos comunes horizontales y verticales, para luego evaluarlos y editarlos según fuera necesario.

De esta fuente de información, se obtuvieron las profundidades de la zona comprendida entre las coordenadas 12° de latitud Norte, 110° de longitud Oeste y 21° de latitud Norte, 92° de longitud Oeste (ver figura 1.1).

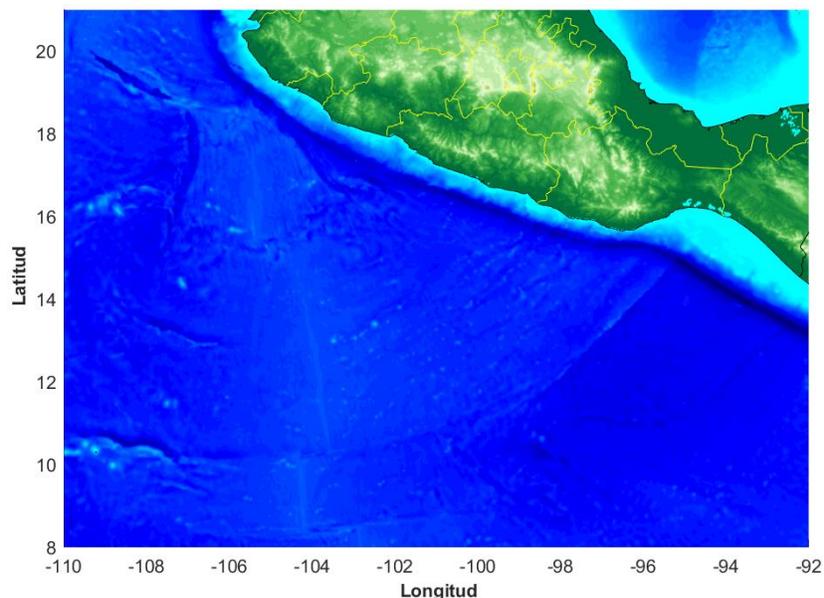


Figura 1. 1. Información batimétrica del Modelo del relieve Mundial de la Superficie de la Tierra, ETOPO 1

Cabe señalar que, debido a que las profundidades están referidas al N. M. M., fue necesario referirlas al Nivel de Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.), para lo cual, se tomó como base los planos de marea para el puerto de Acapulco, publicadas por la Secretaría de Marina, a través de la Red Mareográfica Nacional, determinados a partir de los registros del nivel del mar medidos de febrero de 1999 a diciembre de 2020, en dichas tablas se indica que, la pleamar máxima y la bajamar mínima registradas obedecen al período de observaciones correspondientes a los años 2002 – 2020 (ver Tabla 1.1).

Tabla 1. 1. Niveles de referencia de la marea para el puerto de Acapulco, Gro.

Nivel de referencia	Elevación referida al N. B. M. I.
Pleamar máxima registrada	1.160 m
Nivel de pleamar media superior	0.590 m
Nivel de pleamar media	0.484 m
Nivel medio del mar	0.280 m
Nivel de bajamar media	0.070 m
Nivel de bajamar media inferior	0.000 m
Bajamar mínima registrada	-0.620 m

Fuente: Red Mareográfica Nacional de la Secretaría de Marina

1.2 Modelo Digitales de batimetría (INEGI)

La información batimétrica obtenida de la ETOPO 1, se complementó con la información de los Modelos Digitales Batimétricos (MDB) que se indican a continuación, los cuales fueron desarrollados por el INEGI con una resolución de 400 metros por pixel a una escala de 1:1'000,000 (ver figura 1.2).

- **MODELOS DIGITALES BATIMÉTRICOS CON RESOLUCIÓN DE 400 METROS DE RELIEVE SUBMARINO.** Modelo Digital de Elevación Batimétrica de la Carta Batimétrica de la Zona Económica Exclusiva de México CBII-06 escala 1: 1 000 000
- **MODELOS DIGITALES BATIMÉTRICOS CON RESOLUCIÓN DE 400 METROS DE RELIEVE SUBMARINO.** Modelo Digital de Elevación Batimétrica de la Carta Batimétrica de la Zona Económica Exclusiva de México CBII-07 escala 1: 1 000 000
- **MODELOS DIGITALES BATIMÉTRICOS CON RESOLUCIÓN DE 400 METROS DE RELIEVE SUBMARINO.** Modelo Digital de Elevación Batimétrica de la Carta Batimétrica de la Zona Económica Exclusiva de México CBII-08 escala 1: 1 000 000

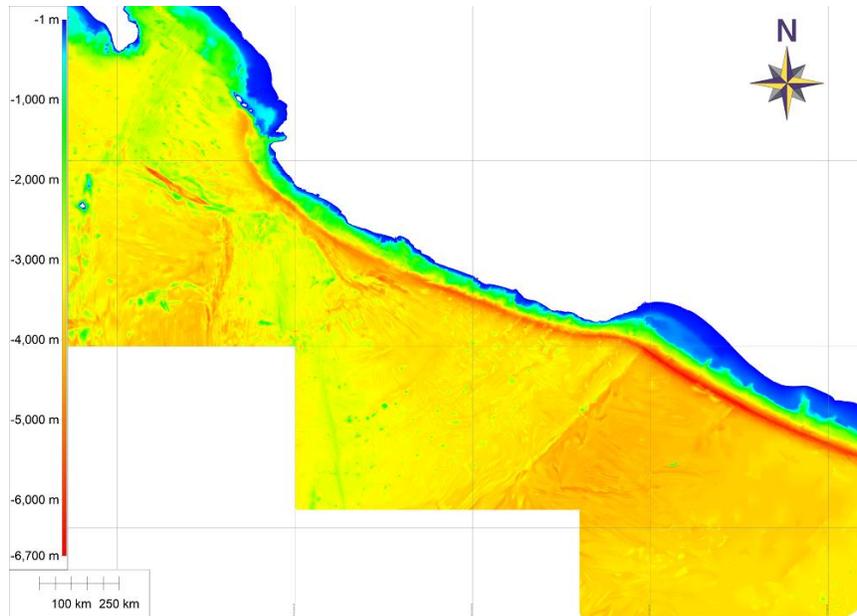


Figura 1. 2. Información batimétrica del Modelo Digital Batimétrico (MDB) de INEGI

Dicha información batimétrica fue complementada con la información contenida en el portulano No. 21401 denominado “Acapulco” editado por la National Imagery and Mapping Agency de los Estados Unidos de Norteamérica en el año 1997.

1.3 Modelo Digitales de Elevación (INEGI)

Por otra parte, la Información topográfica de la zona de estudio, fue obtenida de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) desarrollados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Un MDE es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al Nivel Medio del Mar (N. M. M.), que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (ver figura 1.3). Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera con un equipo de cómputo y software especializados. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían depende del método que se emplea para generarlos.

Los MDE que produce el INEGI son de dos tipos:

- Modelo digital de superficie (MDS) que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente).

- Modelo digital del terreno (MDT), que recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

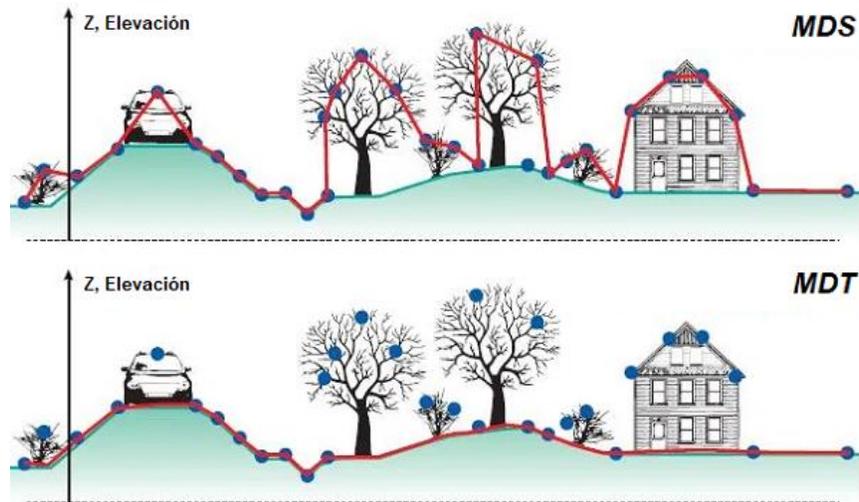


Figura 1. 3. Esquema que representa los dos tipos de Modelo Digital de Elevación (DEM)

De esta fuente de información, se obtuvieron las elevaciones de los MDT que se indican a continuación:

- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57A3
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57A4
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57B3
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57B4
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57D2
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57E1
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57E2
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57E3

- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57E4
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57F1
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57F3
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C57F4
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C67C1
- Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. GRID. E14C67C2

De igual forma, debido a que las elevaciones de esta fuente de información están referidas al N. M. M., fue necesario referirlas al Nivel de Bajamar Media Inferior (N. B. M. I.), con base a los planos de marea para el puerto de Acapulco indicados en la Tabla 1.1.

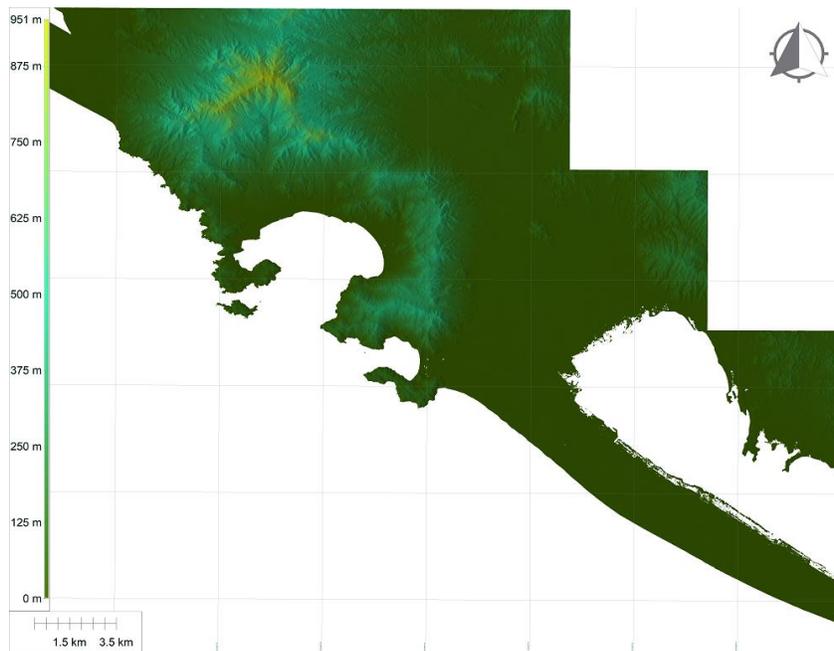


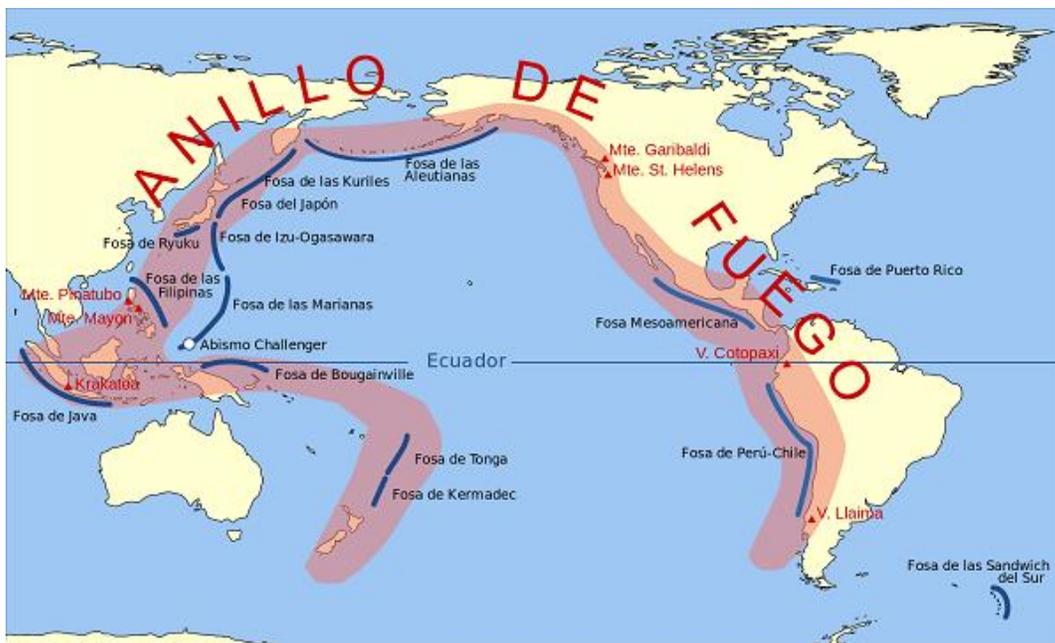
Figura 1. 4. Información topográfica del Modelo Digital de Terreno (MDT) de INEGI

La información topobatimétrica antes señalada (ver figura 1.4), fue procesada con software para sistemas de información geográfica (SIG) a fin de crear un archivo de texto con las coordenadas X, Y y elevaciones y profundidades Z, información que se utilizó para generar la malla de cálculo para la propagación de los tsunamis.

2. Cálculo de tsunamis hipotéticos

2.1 Sismicidad en México

Por sus características geológicas, México está catalogado como un país con zonas altamente sísmicas, enclavado dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta, pues ahí se origina el 80% de los terremotos con mayor magnitud y el 90% de los sismos del planeta, tal como se muestra en la figura 2.1.



Fuente: <https://goo.gl/7aqn3m>

Figura 2. 1. Cinturón de Fuego del Pacífico

La alta sismicidad en el país, se debe principalmente a que, el territorio mexicano está situado sobre cinco placas litosféricas: placa de Norteamérica, placa de Cocos, placa del Pacífico, placa de Rivera y placa del Caribe, en cuyos límites encontramos trincheras, centros de expansión y fallas transformantes. (ver Figura 2.2) y a la interacción entre ellas: las placas de Norteamérica, que se desplaza hacia el Suroeste; la de Cocos, que se desplaza hacia el Noreste; la del Pacífico, que va hacia el Noroeste; la de Rivera hacia el Noreste; y la del Caribe, que va hacia el Este; así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, provocando sismos.

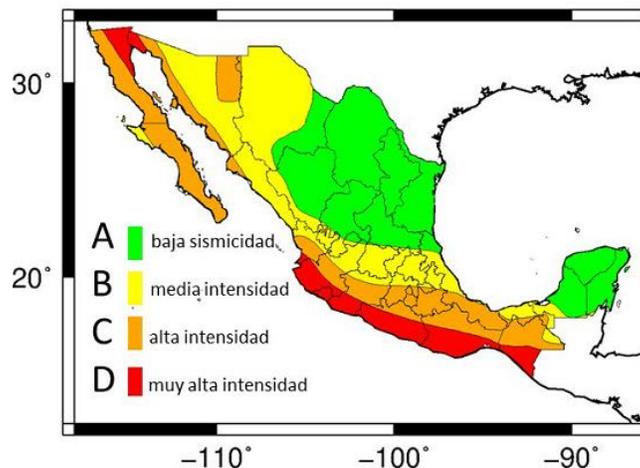


Fuente: <https://interactivo.eluniversal.com.mx/2019/terremotos-mexico/img/placas-mexico.jpg>

Figura 2. 2. Placas tectónicas de México

Con fines de diseño antisísmico, la República Mexicana está dividida en cuatro zonas sísmicas, (ver figura 2.3).

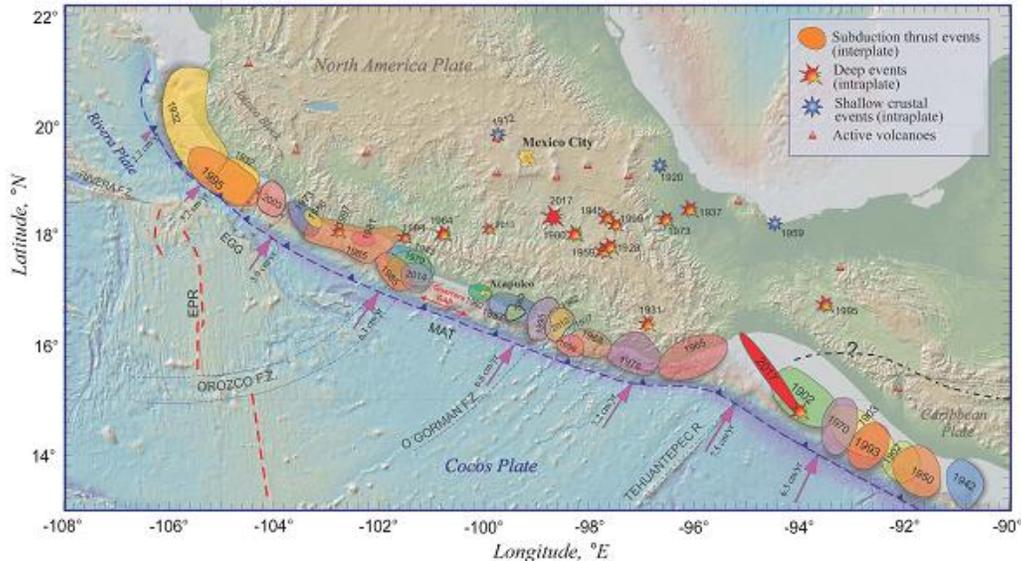
- La zona A es una zona donde no se tienen registros históricos de sismos, no se han reportado sismos en los últimos 80 años y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- Las zonas B y C son zonas intermedias, donde se registran sismos no tan frecuentemente o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.
- La zona D es una zona donde se han reportado grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.



Fuente: https://twitter.com/cnpc_mx/status/1126570302039887872

Figura 2. 3. Zonas sísmicas de México

De acuerdo con la historia sísmica de México, el sismo más grande que se registró en el siglo XX fue el del 3 de junio de 1932, ocurrido en las costas de Jalisco (ver figura 2.4). Este terremoto tuvo una magnitud de 8.2 en la escala de Richter y una longitud de ruptura de 280 km. Otro sismo importante, tanto por su tamaño como por los daños producidos fue el sismo de Michoacán del 19 de septiembre de 1985. Este sismo se reporta con una magnitud de 8.1 y tuvo una ruptura que cubrió casi toda la costa del estado de Michoacán (una longitud de 180 km).



Fuente: http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/images/EQ_map_2013_es_clear.jpg

Figura 2. 4. Mapa de sismicidad en México

En la costa occidental del Pacífico mexicano hay tres regiones donde no se tiene evidencia convincente de la ocurrencia de grandes sismos en los últimos años. Estas tres regiones se encuentran en el Graben el Gordo (GEG), frente a las costas de Colima; Costa Grande de Guerrero y en Tehuantepec, en el estado de Oaxaca. Estas regiones se denominan brechas sísmicas por su ausencia de grandes sismos.

2.2 Brecha Sísmica de Guerrero

Entre 1899 y 1911, la brecha de Guerrero fue el epicentro de cuatro sismos con magnitudes entre 7.5 y 7.8, lo que significa que han pasado más de 110 años desde el último sismo. La ausencia de grandes terremotos hace de este sitio, un lugar anómalo en la zona de subducción mexicana, (donde el tiempo que transcurre entre dos sismos grandes comúnmente varía entre 30 y 50 años), razón por la cual, tras más de un siglo sin producir terremotos considerables, la brecha de Guerrero es señalada como la región de la que vendrá el siguiente gran sismo en México, con afectaciones importantes para Acapulco, Coyuca, Chilpancingo, parte de la Tierra Caliente y la Ciudad de México.

La brecha sísmica de Guerrero, donde convergen la placa de Cocos y la Norteamericana se divide en dos: el primer segmento y más antiguo se extiende por 150 kilómetros desde Papanoa hasta Acapulco, donde el último gran sismo ocurrió en diciembre de 1911, con una magnitud de 7.5. El segundo segmento, se amplía desde Acapulco hasta Copala, en la frontera con Oaxaca, donde el terremoto más reciente (responsable de la caída del Ángel de la Independencia en CDMX) ocurrió en 1957.

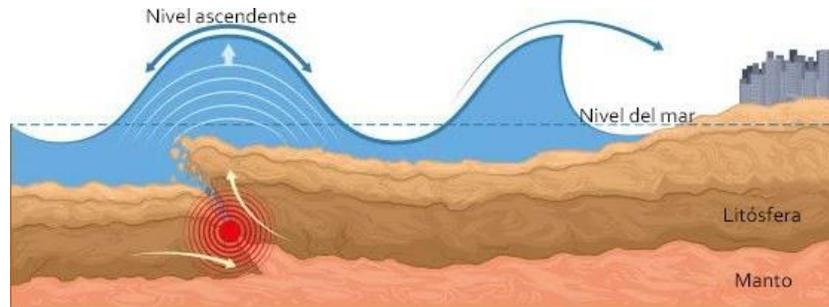
2.3 Los tsunamis en México

Un tsunami es una secuencia de olas que se producen cuando ocurre un sismo cerca del océano o en el fondo del mismo, y que pueden arribar con gran altura a las costas y tener efectos destructivos, principalmente pérdida de vidas y daños materiales. La gran mayoría de los tsunamis en México se originan por sismos que suceden en el contorno costero del océano Pacífico, en la zona de subsidencia de la Fosa Mesoamericana, situada en el océano y adyacente a menos de 80 kilómetros de la costa occidental de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. La información histórica registra más de 60 tsunamis en la costa occidental de México en los últimos 284 años. Los tsunamis de origen lejano han tenido olas de 2.5 m. de altura y los de origen local han tenido olas de 5 m. en promedio y excepcionalmente hasta 10 m. de altura.

En la historia reciente no se tiene conocimiento de que en México hayan ocurrido tsunamis tan destructivos como los de Chile de 1960 y del 2010; el de Alaska de 1964; el de Sumatra en 2004 y el de Japón en 2011. Sin embargo, no podemos descartar la posibilidad de que tsunamis como estos puedan ocurrir en la costa del Pacífico Mexicano. De hecho, existen evidencias de que en 1787 ocurrió un gran terremoto de magnitud 8.4 en San Sixto, Oaxaca, que generó un tsunami local sumamente destructivo (Núñez, Ortiz y Sánchez, 2008).

El estado actual del conocimiento científico sobre los tsunamis es insuficiente, no habiendo aún ningún modelo teórico ni método operacional totalmente satisfactorio que permita determinar si un sismo es tsunamigénico (que produce un tsunami) o no, ni de que "tamaño" (magnitud, intensidad, o altura de olas) será ese tsunami generado.

La etapa de generación de un tsunami incluye la formación inicial de la perturbación de la superficie del océano debido a los terremotos que provocan la deformación del fondo marino. Esta primera perturbación de la superficie del agua evoluciona para convertirse en una onda de gravedad de largo período originada por la fuente del terremoto (ver figura 2.5). La modelación numérica de la etapa inicial de la generación del tsunami está estrechamente vinculada a los estudios de los mecanismos del origen de los terremotos.



Fuente: <https://www.todosismo.com/2020/11/mecanismos-generadores-de-tsunamis.html>

Figura 2. 5. Generación de un tsunami por efecto de un sismo

2.4 Cálculo de tsunamis sintéticos

El proceso de generación de tsunamis se basa en un modelo de plano de falla del terremoto fuente (Gusiakov, 1978; Okada, 1985), el cual supone una capa de líquido incompresible sobre una capa subyacente elástica para caracterizar el espacio entre el océano y la corteza de la tierra. La aplicación de este modelo elástico de plano de falla (Titov, 1997) utiliza una fórmula para el cálculo de la deformación del fondo marino, condiciones iniciales requeridas para cálculos posteriores para la propagación de los tsunamis y para el cálculo de las inundaciones en la playa. En este trabajo se utilizó el algoritmo utilizado por Núñez-Cornú et al. (2008) para el caso de tsunamis de origen sismotectónico. Con este algoritmo se estimó el mecanismo de la fuente sísmica del tsunami.

La modelación avanzada de los registros de tsunamis generados por sismos que ocurrieron entre la costa occidental de México y la Trinchera Mesoamericana ha permitido emplear el método inverso para la determinación de áreas de ruptura de dislocaciones cosísmicas y la determinación de desplazamientos verticales de la costa (Ortiz et al., 2000). Sus resultados demuestran la relación entre la altura del tsunami y la estimación de los parámetros de la fuente sísmica; lo que permitió el empleo de funciones de Green para caracterizar la fuente sísmica en función de observaciones costeras del tsunami y de una segmentación adecuada del plano de falla (Satake, 1987; Ortiz y Bilham, 2003; Singht et al., 2006).

La condición inicial del tsunami consiste en prescribir una deformación vertical instantánea de la superficie del mar que se supone igual a la deformación vertical cosísmica del lecho marino. Esta hipótesis es válida siempre que la velocidad de propagación del tsunami sea mucho menor que la velocidad de propagación de la ruptura sísmica. A su vez, la deformación vertical cosísmica del lecho marino se calcula con expresiones analíticas que describen la deformación interna de un medio continuo debido al deslizamiento relativo en discontinuidades o fallas geológicas.

Para modelar la fuente sísmica se determinaron los valores que adquieren la dimensión del plano de falla, la magnitud del momento sísmico, y la dislocación cosísmica, que de acuerdo con Utsu y Seki, 1954; Wyss, 1979; Shigh et al., 1980, la magnitud del sismo cumple la siguiente relación con respecto al plano de falla.

$$M = \log_{10}(S) + 4.0 \quad (2.1)$$

Donde:

S Área de ruptura o plano de falla en km².

Con objeto de generar, una variedad de eventos tsunamigénicos, en primera instancia se determinó con la ecuación antes señalada, la magnitud del momento sísmico, y la dislocación cosísmica para diferentes planos de falla con longitudes de 90 a 300 km por 90 km de ancho, los resultados se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Condiciones iniciales de los sismos para la definición de los tsunamis sintéticos

<i>Longitud de la falla (km)</i>	<i>Ancho de la falla (km)</i>	<i>Magnitud del sismo</i>	<i>Dislocación cosísmica (m)</i>
90	90	7.9	3.2
120	90	8.0	3.6
150	90	8.1	3.9
180	90	8.2	4.2
210	90	8.3	4.4
240	90	8.3	4.7
270	90	8.4	4.9
300	90	8.4	5.1

A fin de estimar de forma más adecuada la condición inicial de los tsunamis sintéticos, el área total del plano de falla en el método para determinar la fuente sísmica se dividió en segmentos de 30 x 30 km, se calculó el momento sísmico en cada uno de ellos con la siguiente relación.

$$M_o = \mu S \Delta u \quad (2.2)$$

Donde:

M_o Momento sísmico en el segmento del plano de falla.

Δu Dislocación cosísmica.

μ módulo de rigidez del medio, μ = 4.5x10¹¹ dina-cm².

Finalmente, la magnitud del sismo al considerar los diferentes segmentos de falla con dislocaciones independientes, se determinó con la siguiente ecuación (Hanks and Kanamori, 1979).

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} Mo_i - 10.7 \quad (2.3)$$

Con base en lo anterior, para los diferentes planos de falla señalados en la tabla 2.1, se prescribieron diferentes magnitudes de la dislocación cosísmica, esto para generar un total de 96 sismos hipotéticos originados en la brecha de Guerrero con magnitudes que van de 7.5 a 8.9. En las figuras 2.6 – 2.7 se muestran gráficas con los resultados que relacionan las diferentes magnitudes de los sismos con las longitudes de los planos de falla y las dislocaciones cosísmicas.

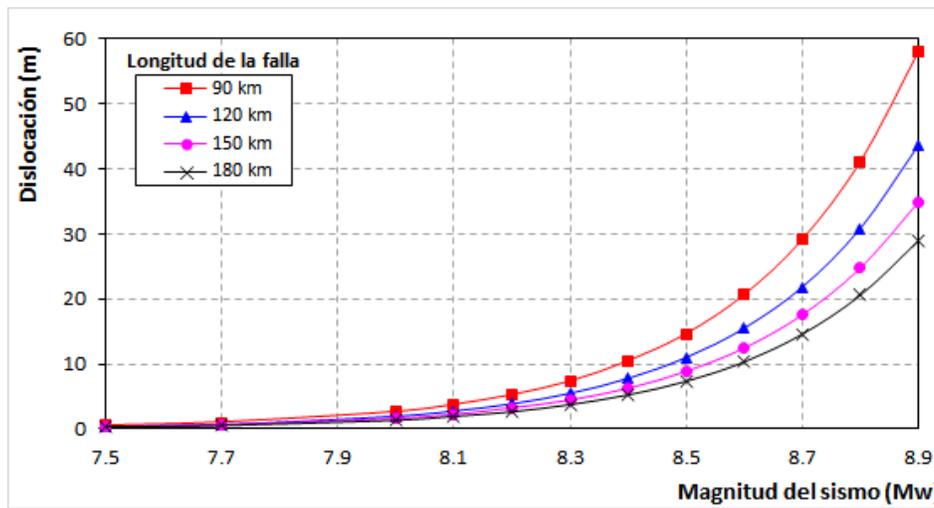


Figura 2. 6. Dislocaciones cosísmicas para diferentes longitudes de planos de falla (90 a 180 km) y magnitudes de sismos (7.5 a 8.9)

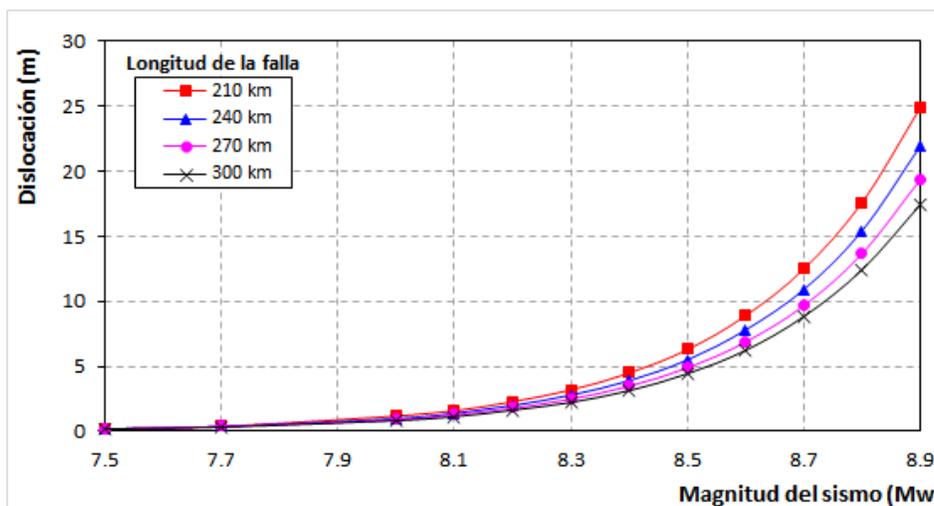


Figura 2. 7. Dislocaciones cosísmicas para diferentes longitudes de planos de falla (210 a 300 km) y magnitudes de sismos (7.5 a 8.9)

Una vez determinadas las dimensiones de los planos de falla, las magnitudes de los sismos y las dislocaciones cosísmicas, se establecieron diferentes ubicaciones de los planos de falla, para tener un total de 288 sismos hipotéticos, para lo cual, se tomó en consideración que el centro del área de los planos de falla siempre se localizará sobre la brecha de Guerrero, tal como se muestra en la figura 2.8.

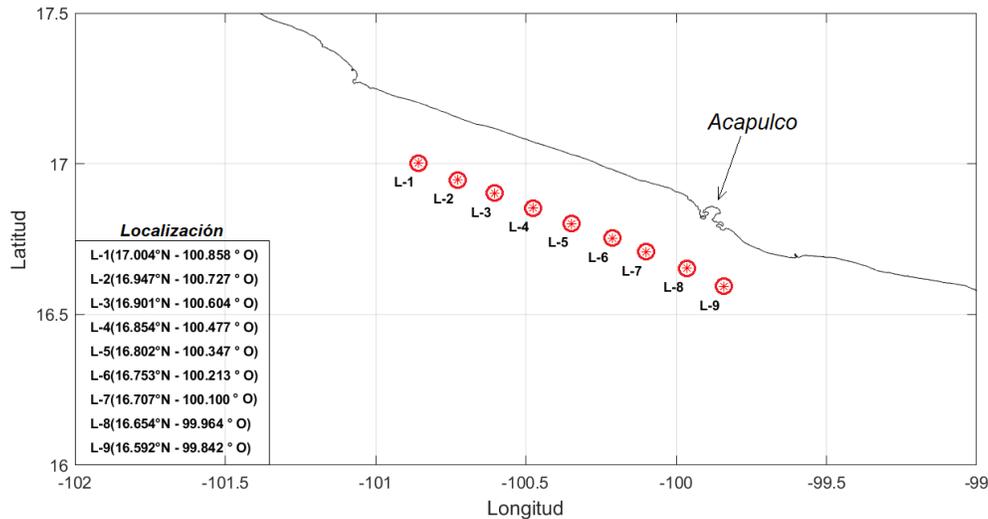


Figura 2. 8. Localización donde se fue ubicando el centro de los planos de falla

Para cada uno de los 288 sismos, se calculó la superficie libre inicial del tsunami con el programa de cómputo COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model), en el cual, la deformación vertical cosísmica del lecho marino (condición inicial del tsunami) correspondiente al plano de falla se obtiene con el modelo de dislocación cosísmica de Mansinha y Smylie (1971), que consiste en considerar un medio continuo isotrópico donde el deslizamiento o dislocación es uniforme en el área de ruptura, suponiendo un mecanismo focal puramente inverso en cada uno de los segmentos del plano de falla. En este modelo de deformación se establecen la magnitud y la dirección de la dislocación sobre un plano de falla rectangular, así como el rumbo, el echado y la profundidad del extremo superior de la falla, tal como se indica en la figura 2.9, donde L y W indican en largo y ancho del plano de falla, H es la profundidad del plano de falla desde la superficie. El vector U indica la magnitud y dirección de la dislocación sobre el plano de falla. El echado (inclinación del plano de falla) se mide en dirección perpendicular al rumbo.

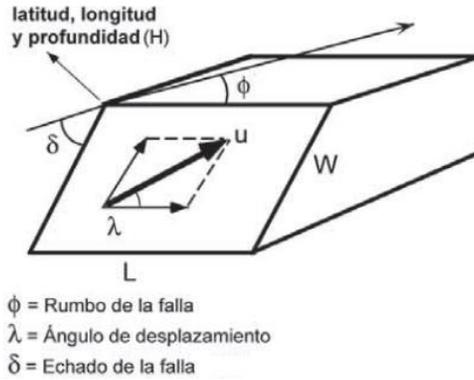


Figura 2. 9. Parámetros que definen el movimiento de una falla

En la figura 2.10 se muestra a manera de ejemplo, la superficie libre inicial de tsunami obtenidas del modelo COMCOT para un sismo de magnitud 8, plano de falla de 90 x 90 km y una dislocación cosísmica de 2.6 m. Cabe señalar que las características del mecanismo focal utilizados para los 288 sismos interplaca generados fueron los siguientes:

- Rumbo de la falla = 291°
- Echado de la falla = 15°
- Deslizamiento de la falla = 93°
- Profundidad focal = 15 km

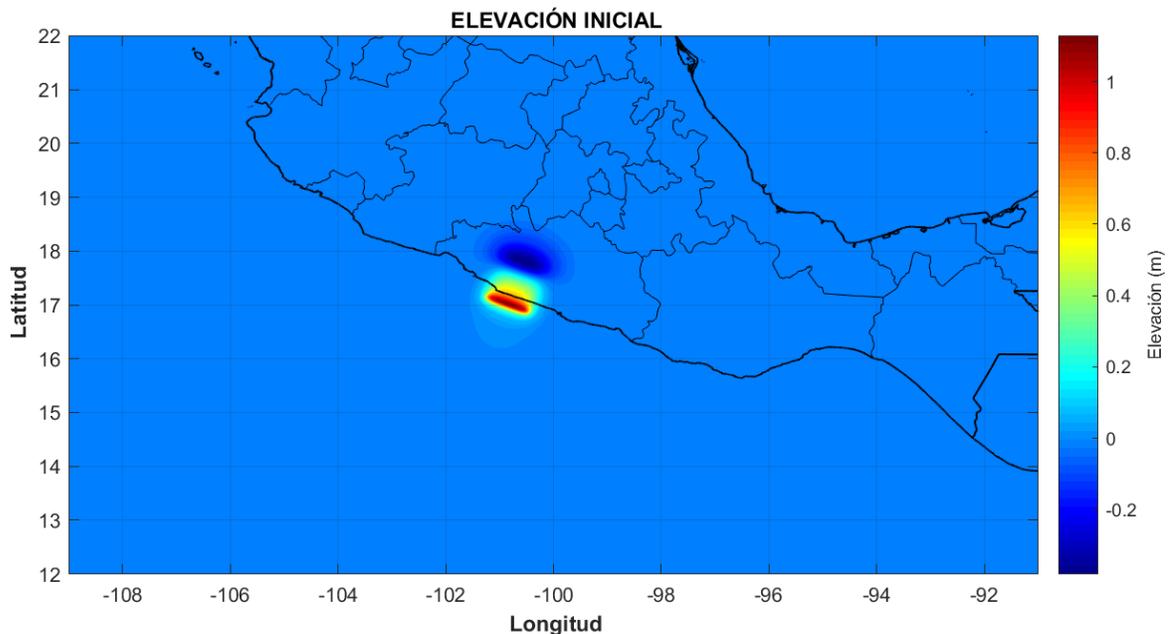


Figura 2. 10. Deformación vertical de la superficie producto de una falla inversa con dislocación de 2.6 m, magnitud del sismo $M = 8.0$, plano de falla de 90 x 90 km

Con objeto de seleccionar los eventos que pudieran tener mayor impacto en Acapulco, se estimaron las alturas de ola de arribo del tsunami para los 288 sismos, a partir de la superposición lineal de un grupo de funciones de Green o tsunami sintético, las cuales son calculadas con las ecuaciones lineales del modelo de aguas someras (Pedlosky, J., 1979).

$$G_{ij}(t)x_j = b_i(t) \quad (2.4)$$

Donde:

$G_{ij}(t)$ función de Green en la localidad, generada por la función impulso en el segmento j del plano de falla.

x_j magnitud de la dislocación del plano de falla en el segmento j .

$b_i(t)$ tsunami sintético en la localidad.

Los resultados se indican en las tablas 2.2 – 2.4, en las cuales se puede apreciar que, al alejar el plano de falla hacia el Noroeste de Acapulco, las alturas de ola de los tsunamis sintéticos van disminuyendo, de igual forma, para una misma magnitud de sismo, a mayor área del plano de falla es menor la altura de ola del tsunami.

Tabla 2. 2. Alturas de ola de tsunami, para las 5 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 90 x 90 km y para las 4 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 120 x 90 km

Magnitud del sismo	Altura de ola del tsunami								
	90 x 90 km					120 x 90 km			
	L-1	L-3	L-5	L-7	L-9	L-2	L-4	L-6	L-8
7.5	0.13	0.16	0.16	0.21	0.21	0.13	0.13	0.18	0.23
7.7	0.26	0.32	0.31	0.43	0.41	0.23	0.22	0.31	0.41
8	0.66	0.84	0.81	1.11	1.07	0.65	0.63	0.89	1.17
8.1	0.95	1.20	1.15	1.58	1.52	0.91	0.88	1.24	1.64
8.2	1.33	1.68	1.62	2.22	2.14	1.27	1.22	1.73	2.28
8.3	1.87	2.36	2.27	3.12	3.00	1.79	1.73	2.44	3.21
8.4	2.66	3.36	3.23	4.45	4.27	2.54	2.45	3.46	4.56
8.5	3.73	4.76	4.54	6.24	6.00	3.58	3.45	4.88	6.42
8.6	5.26	6.66	6.41	8.81	8.47	5.04	4.87	6.88	9.05
8.7	7.44	9.41	9.05	12.44	11.96	7.09	6.85	9.67	12.73
8.8	10.50	13.30	12.78	17.57	16.89	10.02	9.67	13.67	17.99
8.9	14.82	18.76	18.04	24.80	23.84	14.15	13.66	19.30	25.40

Tabla 2. 3. Alturas de ola de tsunami, para las 4 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 150 x 90 km, para las 3 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 180 x 90 km y para las 3 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 210 x 90 km

Magnitud del sismo	Altura de ola del tsunami									
	150 x 90 km				180 x 90 km			210 x 90 km		
	L-3	L-5	L-7	L-9	L-4	L-6	L-8	L-5	L-7	L-9
7.5	0.09	0.13	0.18	0.18	0.13	0.18	0.19	0.12	0.13	0.13
7.7	0.19	0.27	0.36	0.36	0.22	0.30	0.32	0.24	0.25	0.25
8	0.50	0.71	0.97	0.97	0.58	0.79	0.82	0.73	0.76	0.76
8.1	0.69	0.98	1.33	1.34	0.85	1.15	1.20	0.97	1.02	1.02
8.2	1.01	1.43	1.93	1.94	1.16	1.58	1.64	1.39	1.46	1.46
8.3	1.38	1.96	2.66	2.67	1.65	2.24	2.34	1.94	2.03	2.04
8.4	1.95	2.76	3.74	3.77	2.32	3.15	3.28	2.73	2.86	2.86
8.5	2.77	3.92	5.31	5.35	3.25	4.43	4.61	3.82	4.00	4.01
8.6	3.90	5.52	7.49	7.53	4.59	6.24	6.50	5.40	5.65	5.66
8.7	5.50	7.80	10.57	10.63	6.50	8.85	9.22	7.58	7.93	7.95
8.8	7.76	11.00	14.91	15.01	9.17	12.49	13.01	10.67	11.17	11.19
8.9	10.94	15.50	21.01	21.14	12.91	17.58	18.31	15.10	15.80	15.84

Tabla 2. 4. Alturas de ola de tsunami, para las 2 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 240 x 90 km, para las 2 diferentes ubicaciones de los planos de falla de 270 x 90 km y para el plano de falla de 300 x 90 km

Magnitud del sismo	Altura de ola del tsunami				
	240 x 90 km		270 x 90 km		300 x 90 km
	L-6	L-8	L-7	L-9	L-8
7.5	0.13	0.13	0.13	0.13	0.10
7.7	0.25	0.26	0.26	0.26	0.19
8	0.63	0.64	0.58	0.58	0.51
8.1	0.89	0.89	0.83	0.83	0.70
8.2	1.27	1.28	1.15	1.15	1.02
8.3	1.78	1.79	1.60	1.60	1.41
8.4	2.48	2.49	2.24	2.24	1.98
8.5	3.49	3.51	3.13	3.13	2.82
8.6	4.95	4.98	4.41	4.41	3.97
8.7	6.92	6.97	6.20	6.21	5.63
8.8	9.78	9.84	8.76	8.76	7.94
8.9	13.90	13.99	12.40	12.41	11.14

3. Modelaciones numéricas de la propagación de los tsunamis

3.1 Modelo numérico

La propagación de los tsunamis sintéticos se realizó con el modelo hidrodinámico Flow Model FM del software MIKE 21 desarrollado por el Danish Hydraulic Institute, el cual emplea el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones promediadas de Reynolds y Navier Stokes (RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes, por sus siglas en inglés) incompresibles, sujetas a las suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática. Las ecuaciones que describen los flujos y las variaciones del nivel del mar son las siguientes:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) \right] - \Omega_p = 0 \quad (3.3)$$

Donde:

$h(x, y, t)$ Profundidad del agua (m).

$\zeta(x, y, t)$ Superficie de elevación (m).

$p, q(x, y, t)$ Flujos de densidad en las direcciones x, y ($m^3/s/m$) = (uh, vh) .

u, v Velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x, y .

C Resistencia de Chezy ($m^{1/2}/s$).

g Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Ω Parámetro de Coriolis dependiente de la latitud.

ρ_w Densidad del agua (kg/m^3).

x, y Coordenadas cartesianas (m).

t Tiempo.

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ Componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

La fricción en el fondo se determina por medio de la siguiente ley cuadrática.

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\rho_w} = C_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (3.4)$$

Donde:

U_b Velocidad del flujo por encima del fondo.

C_f Coeficiente de arrastre, en términos del número de Manning.

$$C_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \quad (3.5)$$

M Número de Manning, definido como.

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (3.6)$$

k_s Rugosidad del fondo.

3.1.1 Malla de cálculo

Para implementar el modelo numérico, se definió una malla de cálculo (ver figura 3.1), mediante el método de mallas flexibles no estructuradas con elementos triangulares, el cual permite la distribución óptima de los nodos de cálculo mediante la adaptación de la resolución de las celdas a las características físicas del lugar y a las zonas de interés dentro del modelo numérico, lo que permite focalizar la mayor resolución a la zona de estudio y al resto del dominio con un espaciamiento amplio, para mejorar con ello el rendimiento computacional.

De acuerdo con lo anterior, la malla de cálculo cubre un área aproximada de 1'312,673 km², constituida por 318174 celdas que van desde la línea de costa hasta la profundidad de -4000 m, la malla se dividió en 7 zonas con diferente tamaño de celdas, la primera que corresponde a la zona de aguas profundas con un tamaño máximo de celda de 22 km de longitud, la segunda zona con 7 km m de longitud máxima, la tercera zona con celdas de 2430 m, la cuarta zona con celdas de 810 m, la quinta zona con tamaño de celdas de 270 m, la sexta zona con celdas de 90 m y la séptima zona con celdas de 30 m.

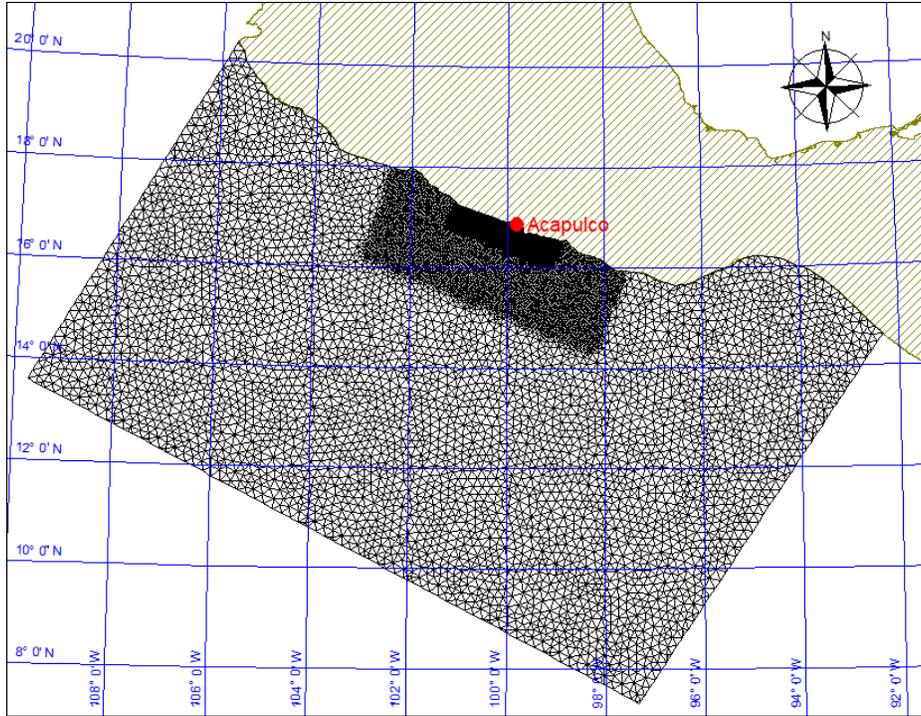


Figura 3. 1. Definición de la malla de cálculo

Una vez definida la malla de cálculo, se realizó la incorporación de los datos de profundidades y elevaciones en cada nodo de la misma (Figura 3.2), la cual corresponde a la información topo-batimétrica indicada en el capítulo 1.

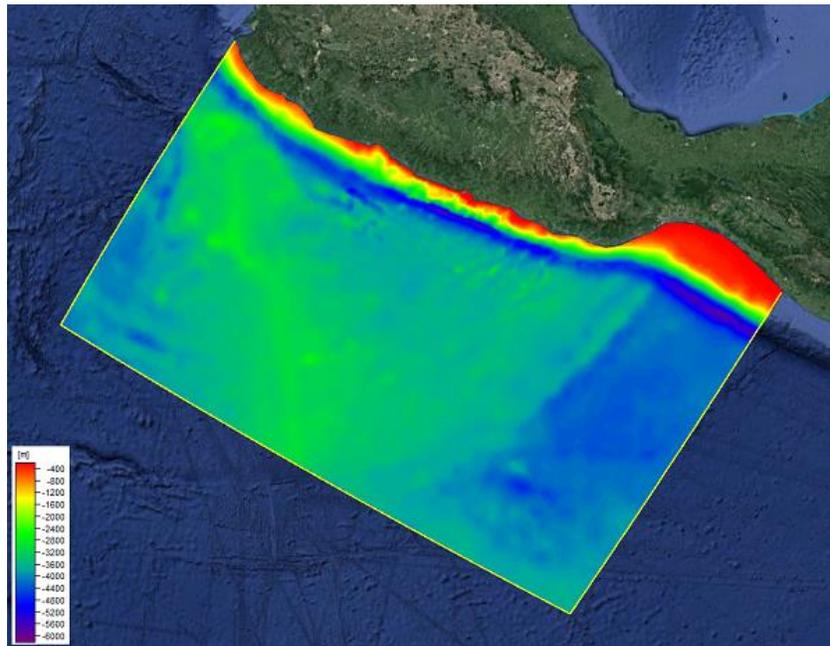


Figura 3. 2. Malla de cálculo con profundidades y elevaciones, utilizada para las modelaciones numéricas de la propagación de los tsunamis

3.1.2 Condiciones iniciales

Para las condiciones iniciales de las modelaciones numéricas se tomaron los resultados del cálculo de la superficie libre inicial del tsunami, obtenidos a partir de las dimensiones y localización de los planos de falla, magnitudes de los sismos y las dislocaciones cosísmicas (ver capítulo 2), así como las siguientes características del mecanismo focal.

- Rumbo de la falla = 291°
- Echado de la falla = 15°
- Deslizamiento de la falla = 93°
- Profundidad focal = 15 km

3.1.3 Resultados

Con la superficie libre inicial se realizaron las modelaciones numéricas de la propagación de los 288 tsunamis sintéticos, y en cada caso se simuló un período de 10 horas. A manera de ejemplo, en la figura 3.3 se muestran los resultados de la propagación de un tsunami a los 4, 10, 20 y 30 minutos posteriores a la generación del sismo.

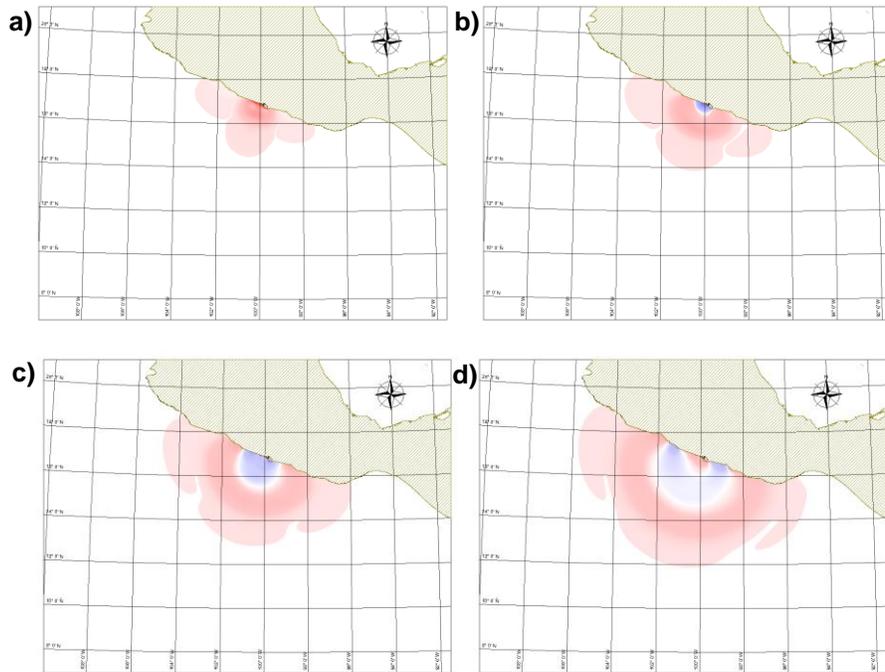


Figura 3. 3. Resultados de la propagación de un tsunami posterior a la generación del sismo. a) 4 minutos, b) 10 minutos, c) 20 minutos y d) 30 minutos

De los resultados obtenidos se identificaron los tiempos y las alturas de ola de arribo de la primera ola del tsunami, así como las alturas de ola máximas y su tiempo de arribo, en los 24 sitios que se indican en la figura 3.4.



Figura 3. 4. Ubicación de puntos de control para obtener las alturas de ola del tsunami y las velocidades de las corrientes

Cabe señalar que, por razones de simplicidad, en el presente estudio solamente se presentan los resultados de 32 tsunamis, para lo cual, se seleccionaron los casos en los que el centro del plano de falla estuviera frente a Acapulco, y para el caso de los sismos de menor magnitud ($M_w = 7.5$), de mayor magnitud ($M_w = 8.9$), y dos sismos de magnitud intermedia ($M_w = 8$ y $M_w = 8.4$), para cada sismo, los resultados (figuras 3.5 – 3.196) que se presentan son:

- Superficie libre inicial en el plano de falla.
- Gráficas de las alturas de la primera ola de tsunami, de las máximas alturas de ola de tsunami y de las velocidades máximas de las corrientes en los 24 puntos de control, en dichas gráficas se indica el respectivo tiempo de arribo.
- Series de tiempo de las alturas del tsunami, en playa Pie de la Cuesta, bahía de Acapulco, Puerto Marqués y playa Diamante, cabe señalar que las discontinuidades en las series de tiempo se deben a que en ese punto y en ese momento el nivel del mar retrocedió hasta secar la playa.
- Series de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami, en playa Pie de la Cuesta, bahía de Acapulco, Puerto Marqués y playa Diamante.

- **Caso 1:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.5 m.

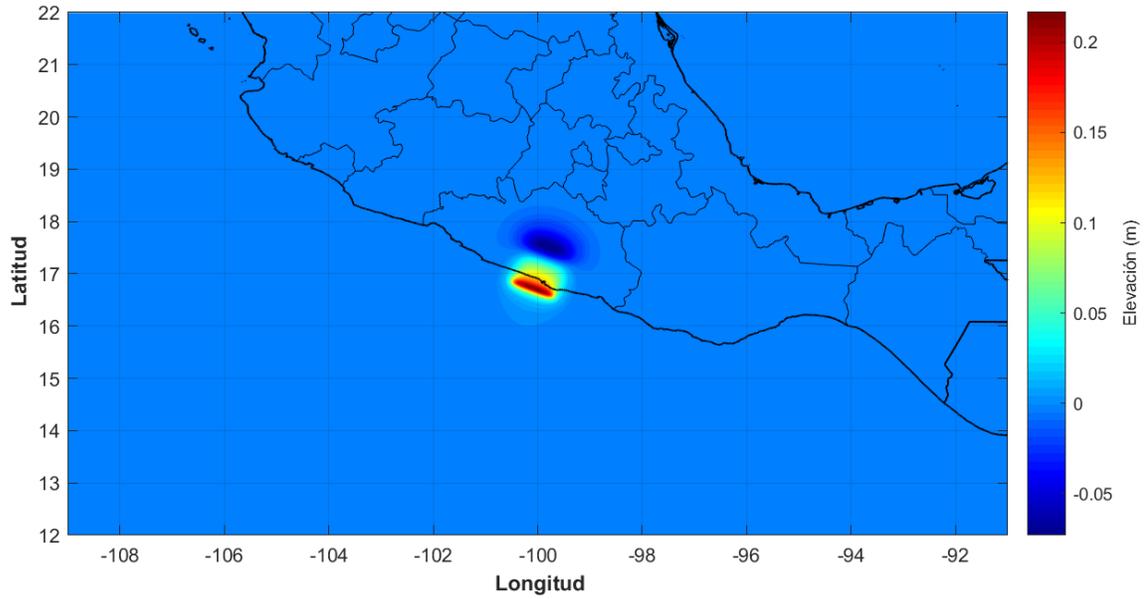


Figura 3. 5. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

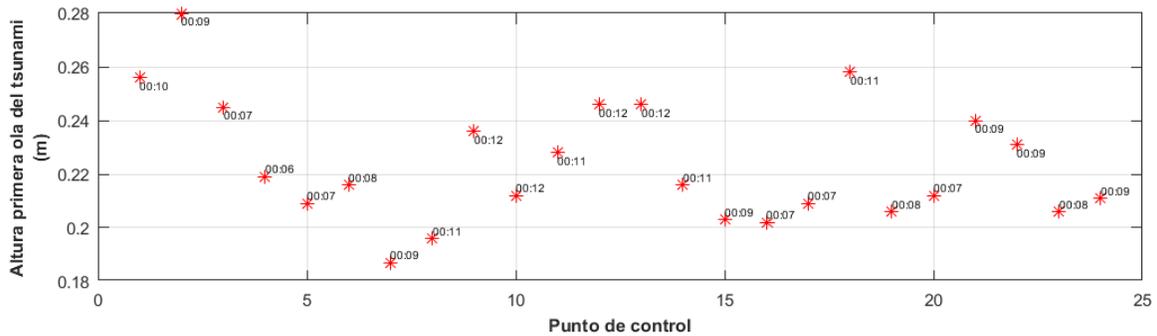


Figura 3. 6. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

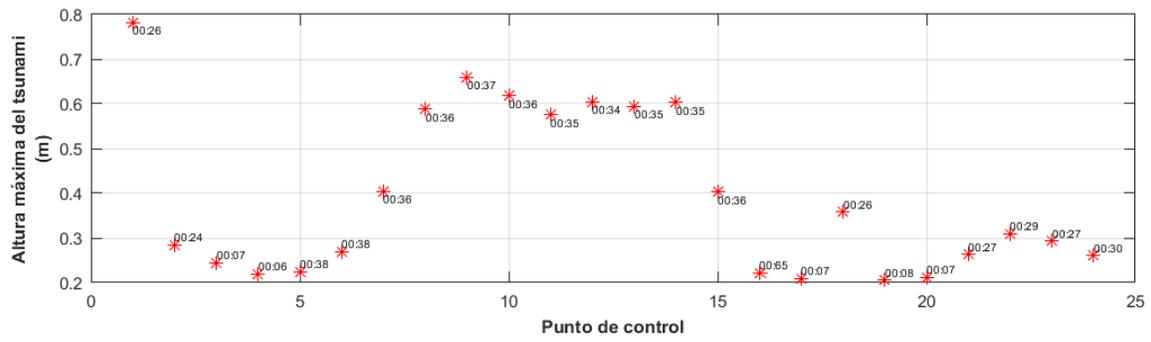


Figura 3. 7. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

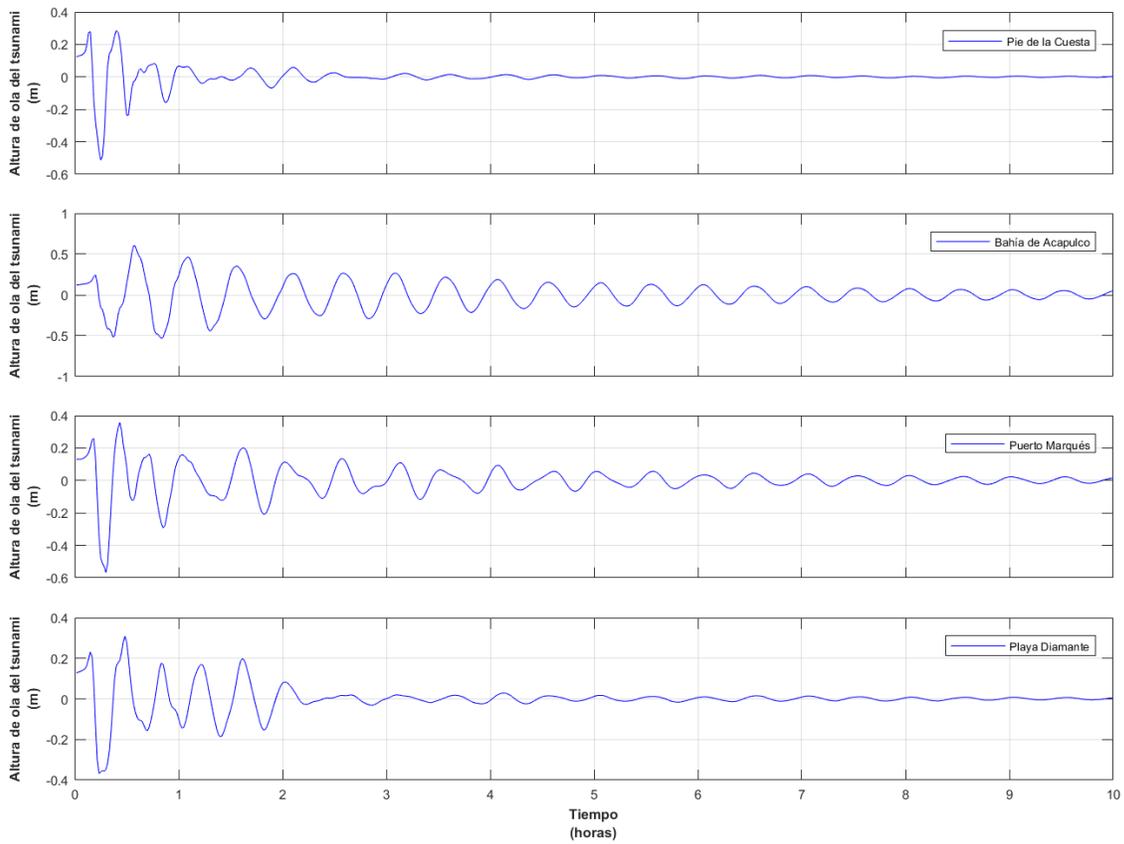


Figura 3. 8. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

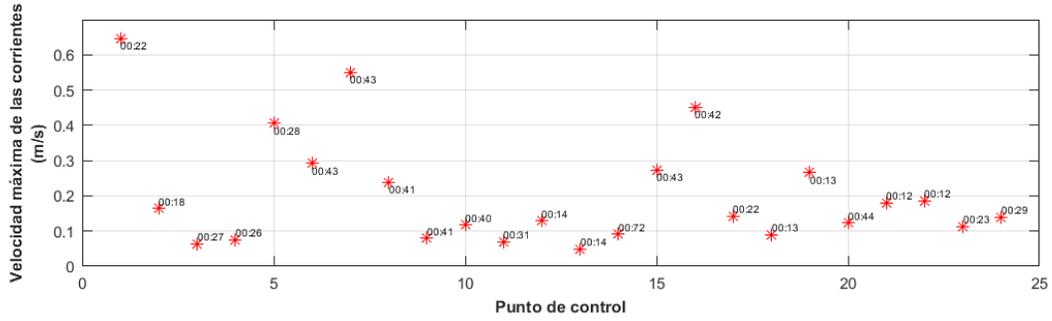


Figura 3. 9. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

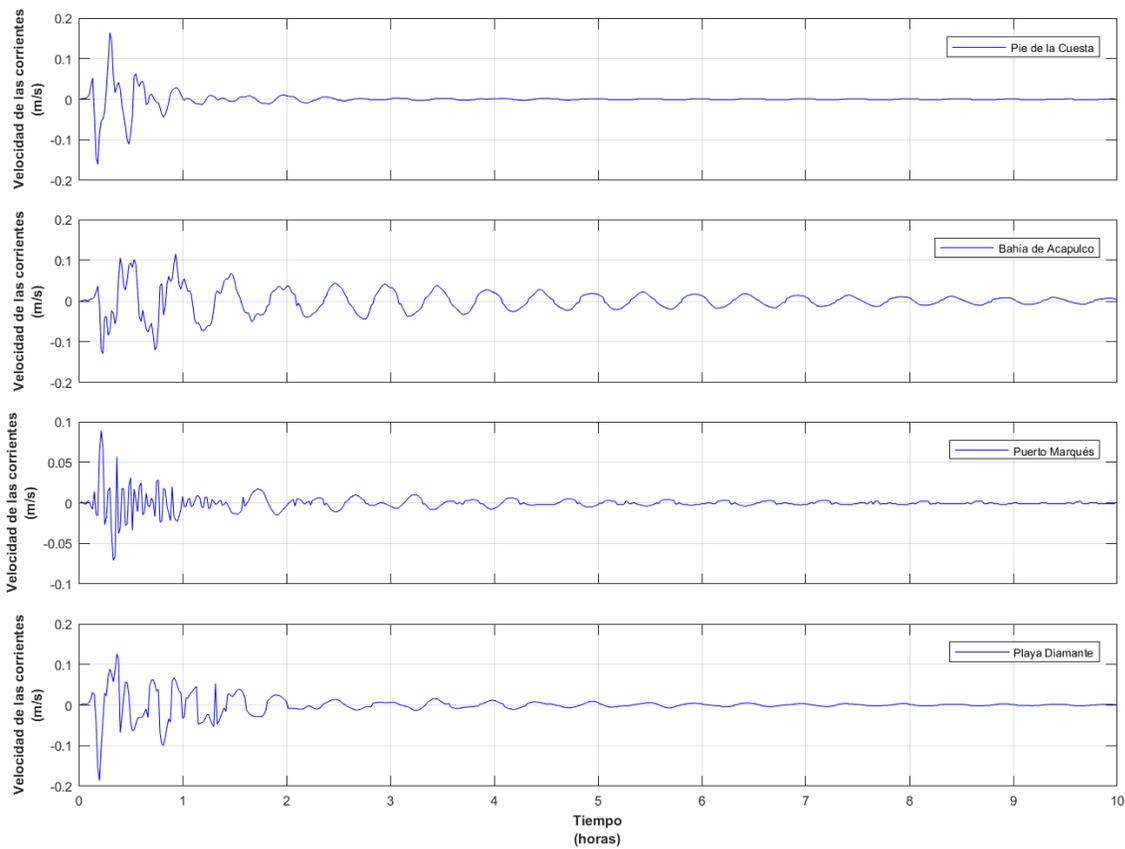


Figura 3. 10. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 2:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 2.6 m.

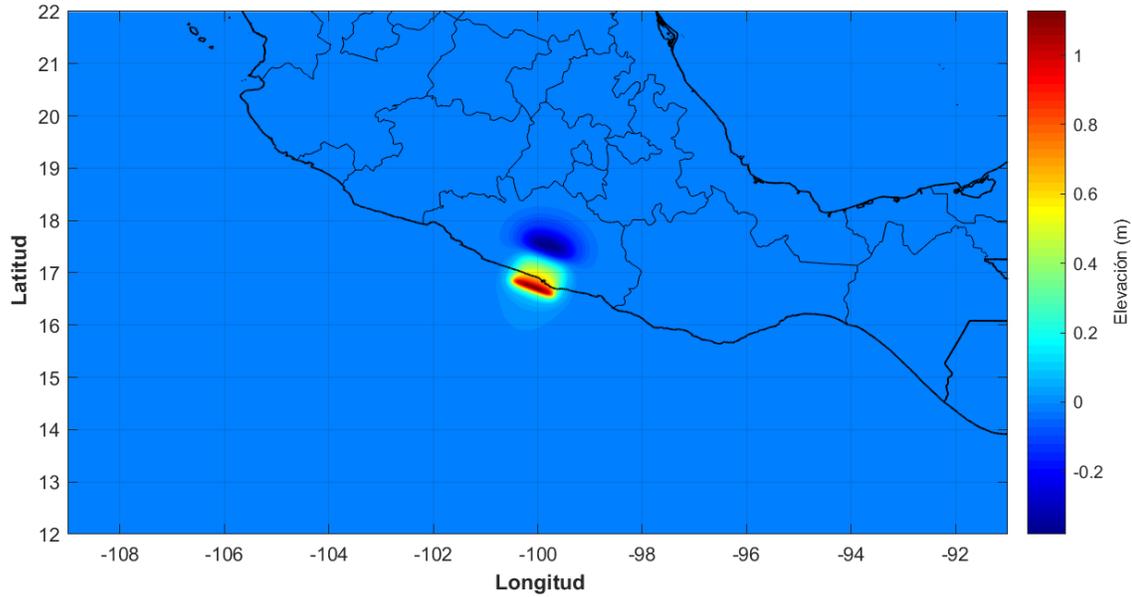


Figura 3. 11. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

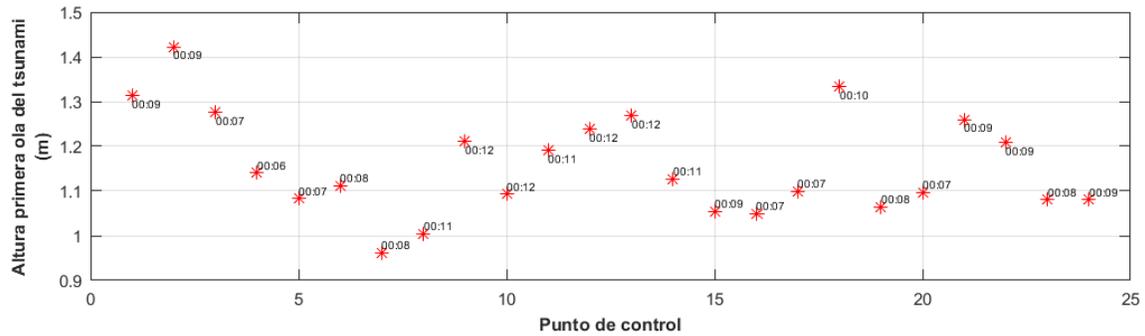


Figura 3. 12. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

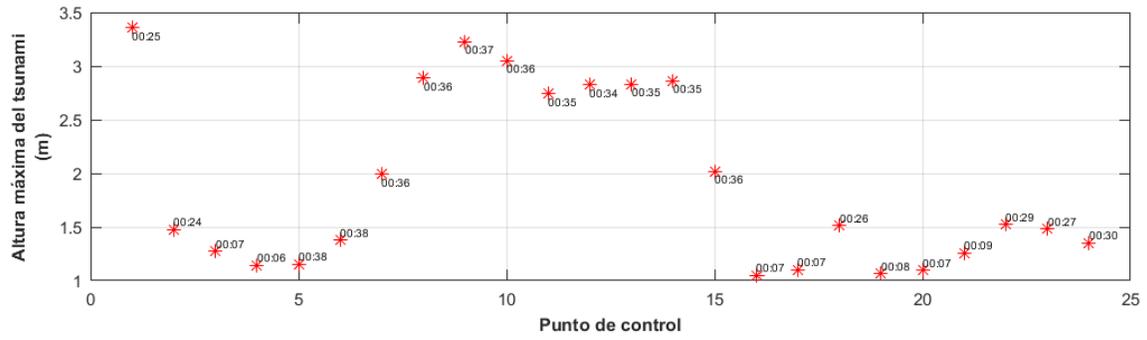


Figura 3. 13. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

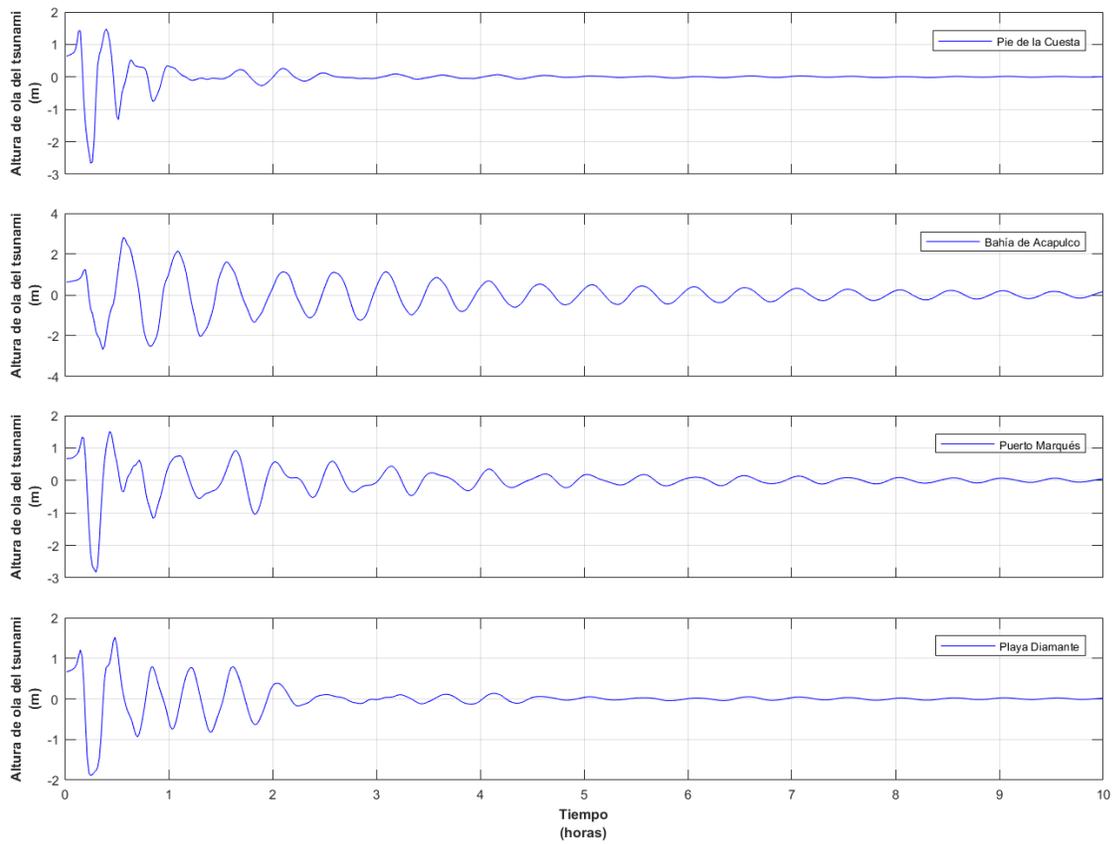


Figura 3. 14. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

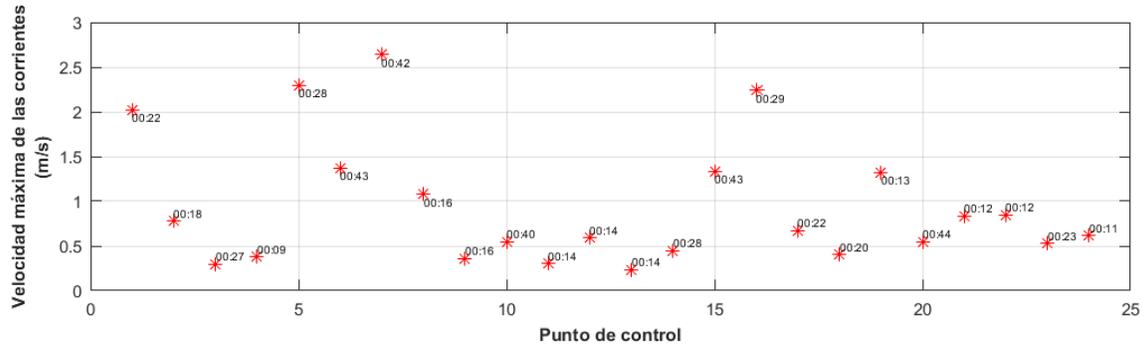


Figura 3. 15. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

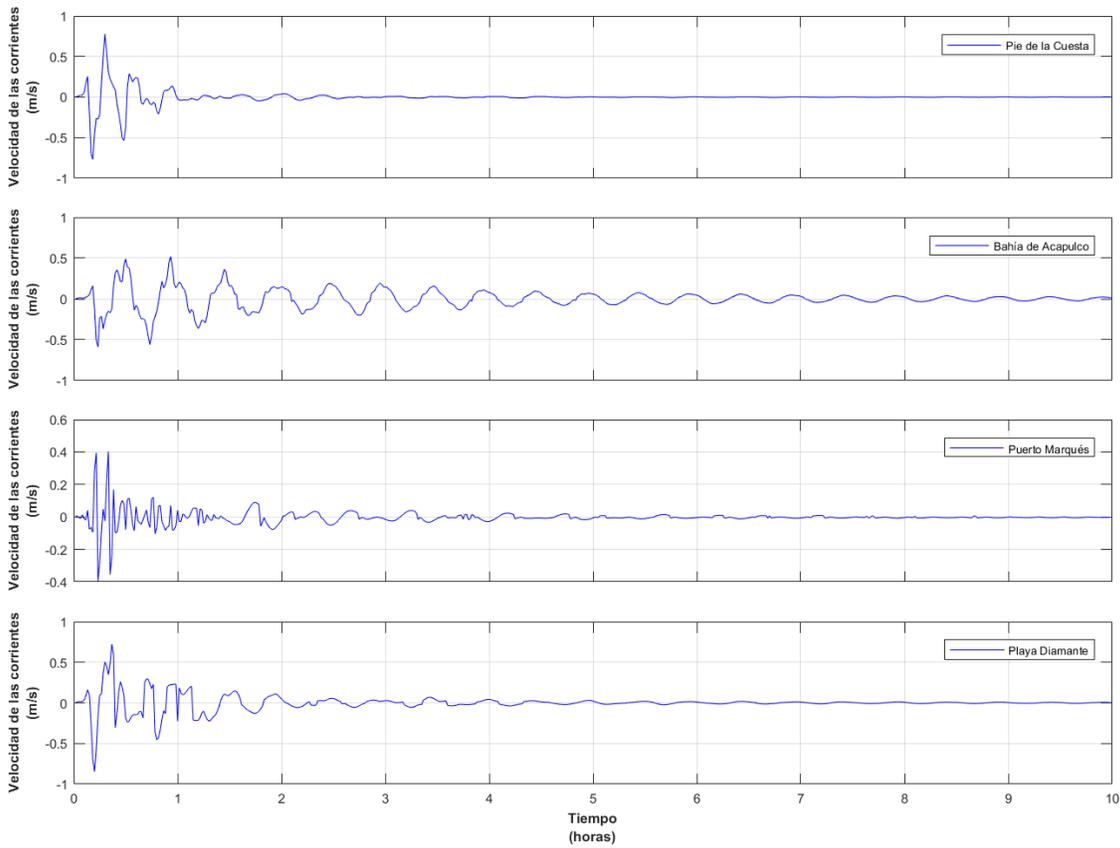


Figura 3. 16. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 3:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 10.4 m.

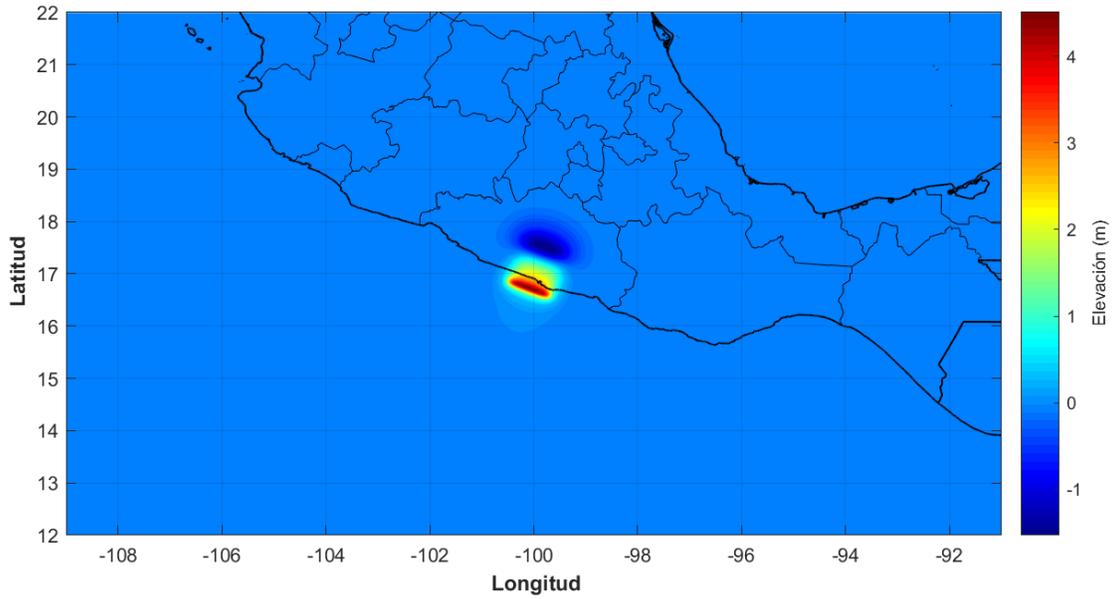


Figura 3. 17. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

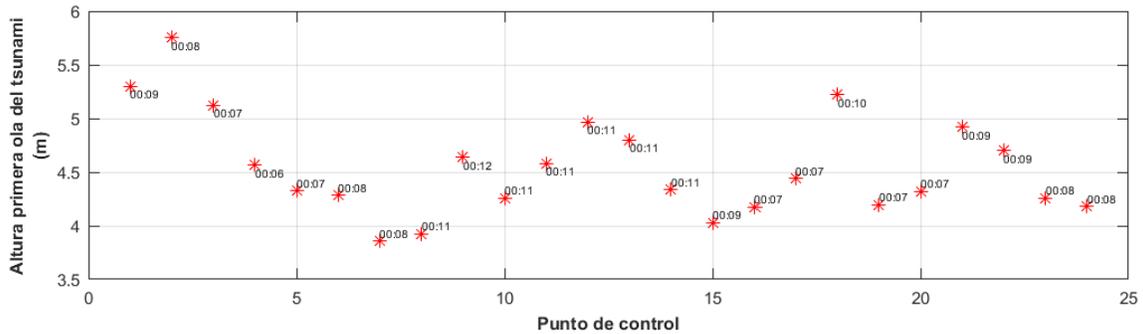


Figura 3. 18. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

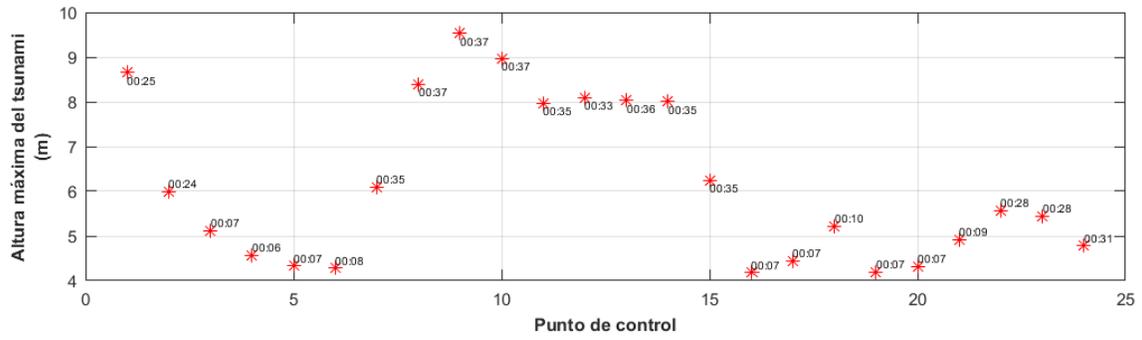


Figura 3. 19. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

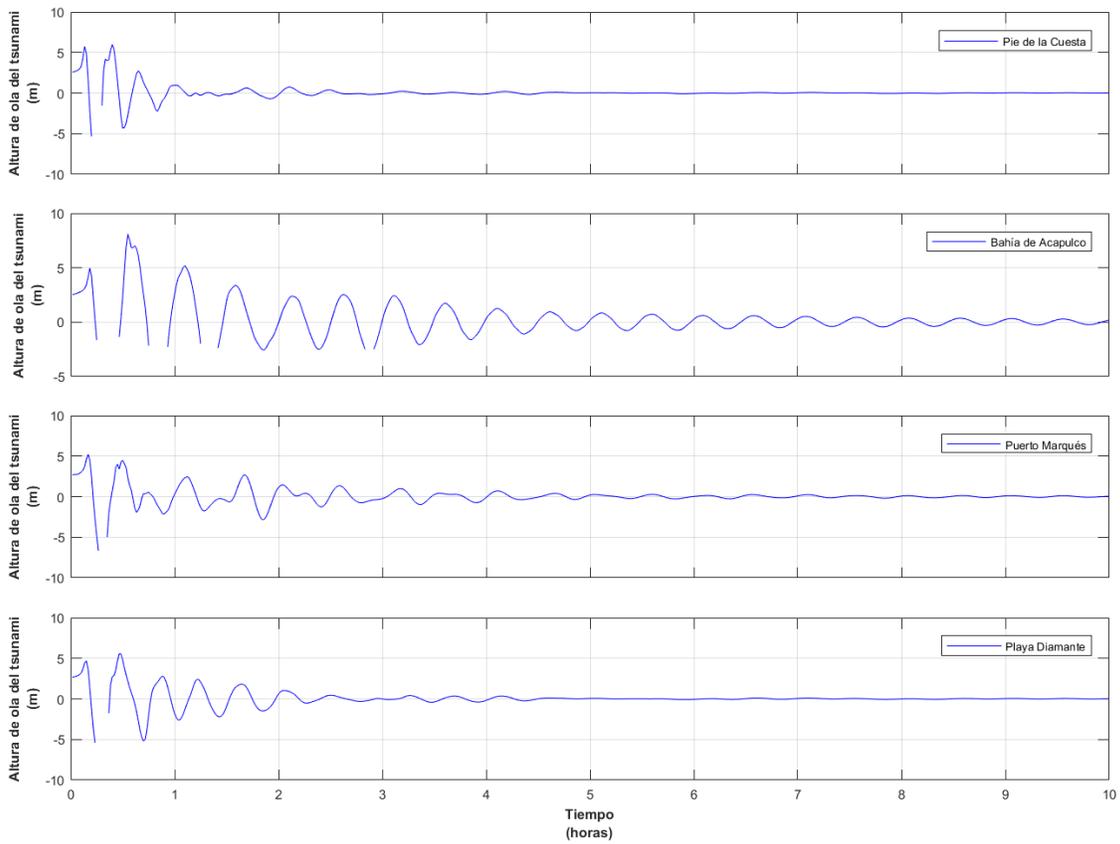


Figura 3. 20. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

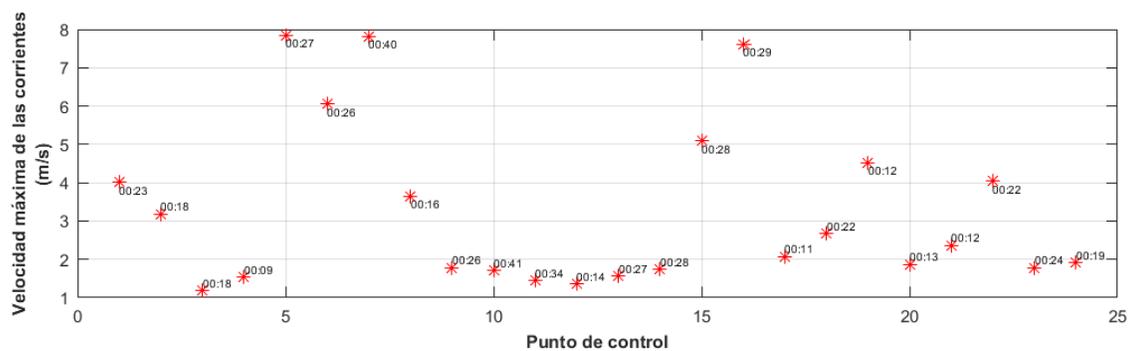


Figura 3. 21. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

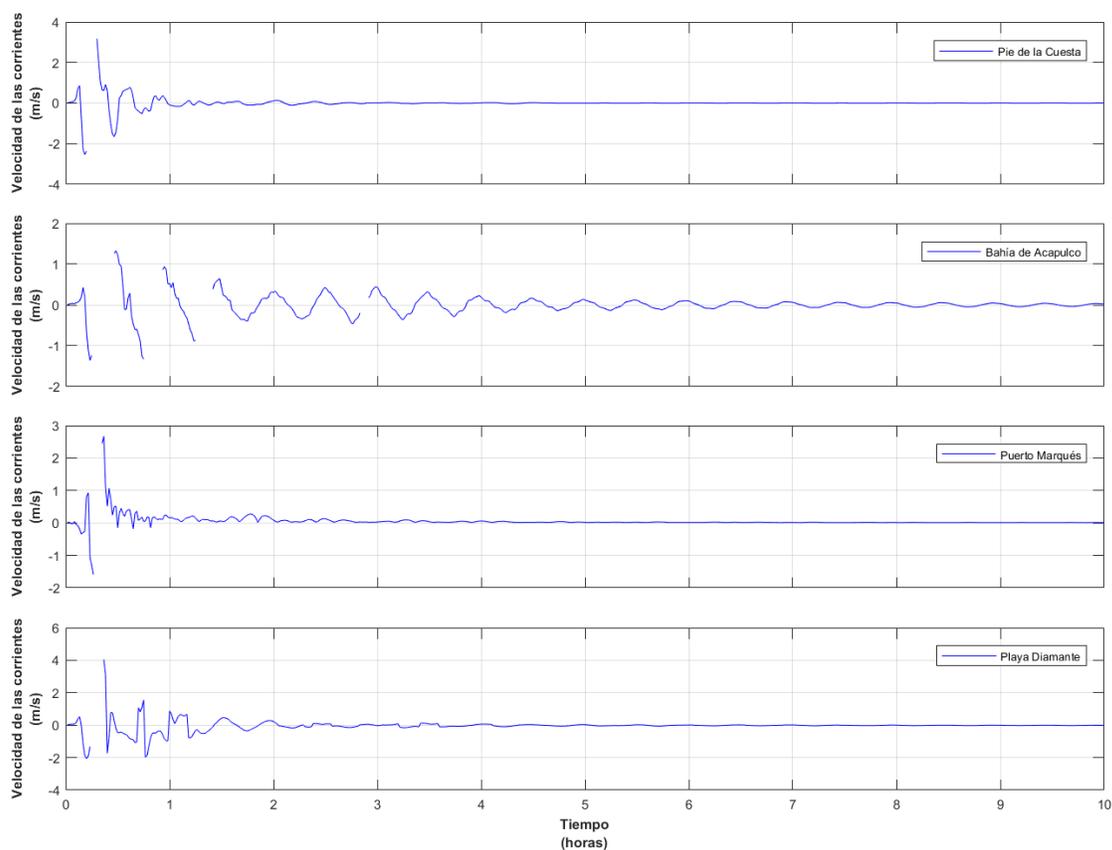


Figura 3. 22. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 4:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 58 m.

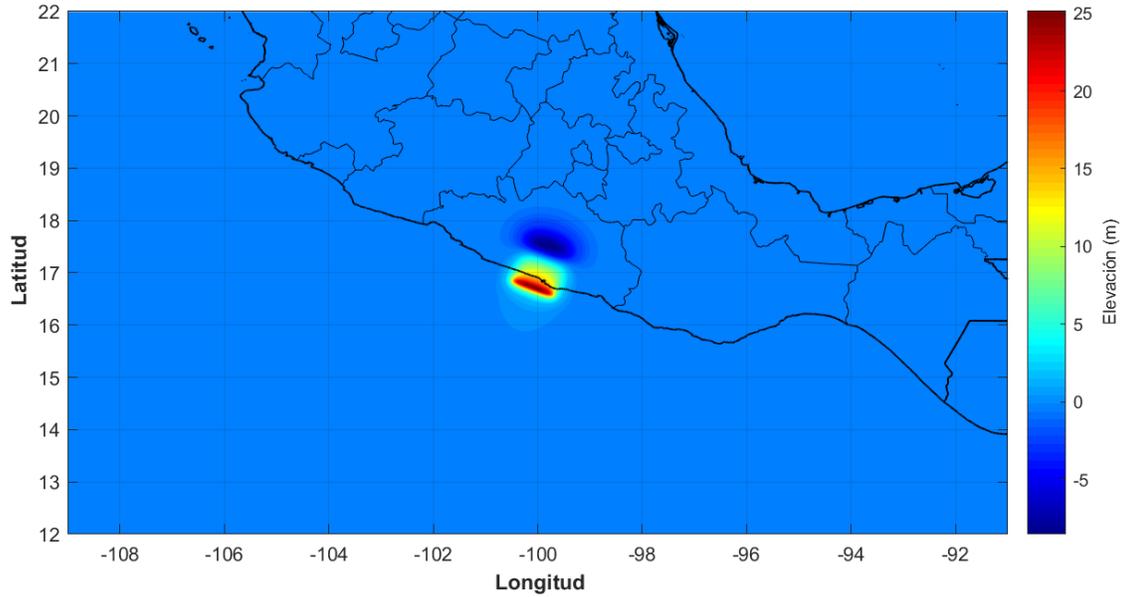


Figura 3. 23. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

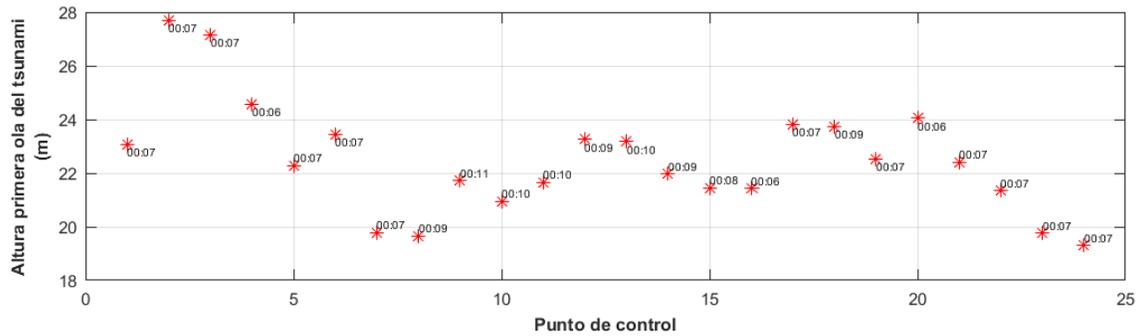


Figura 3. 24. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

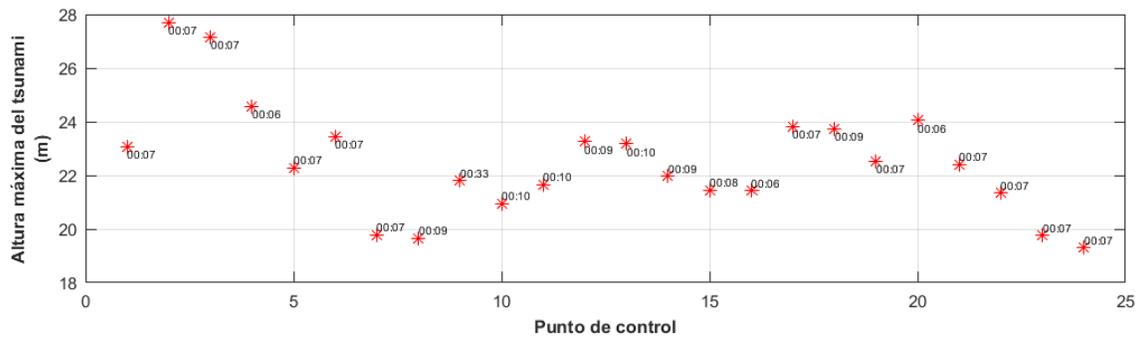


Figura 3. 25. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

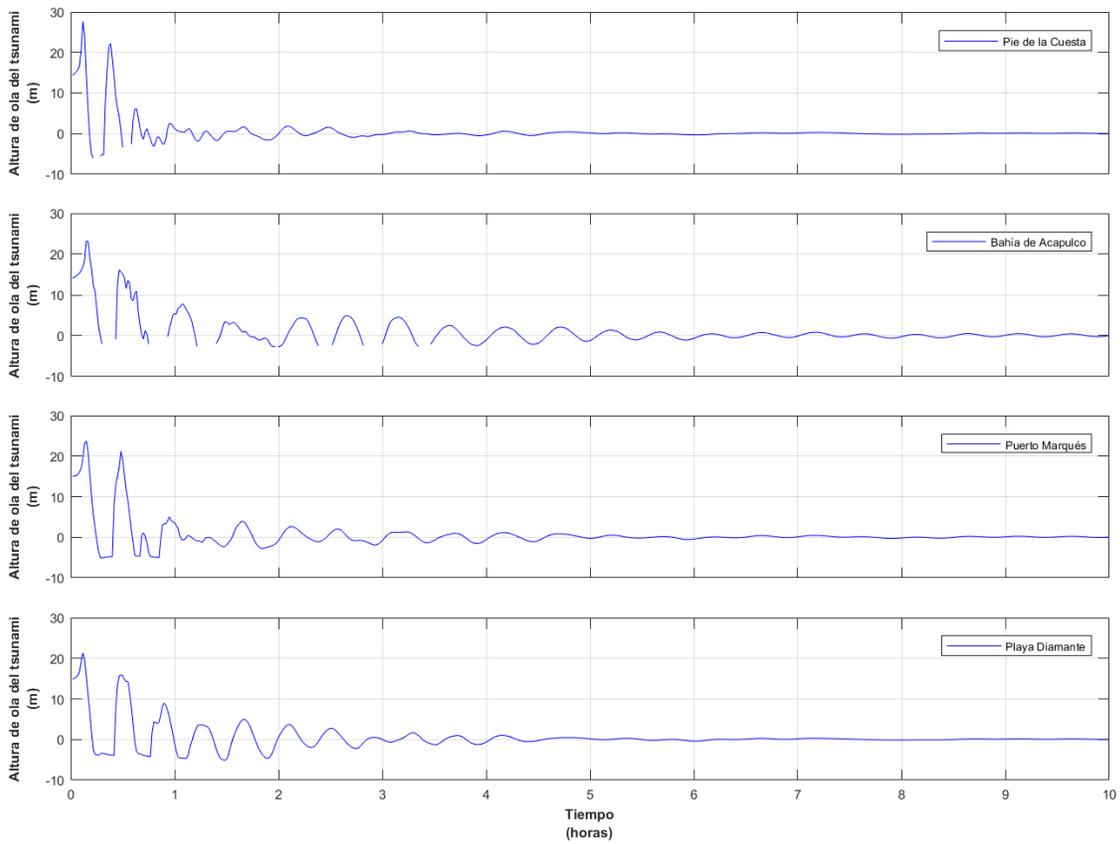


Figura 3. 26. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

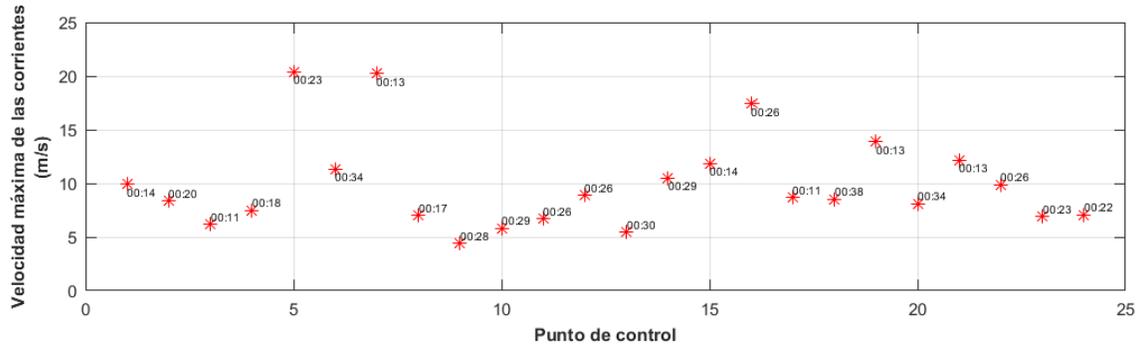


Figura 3. 27. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

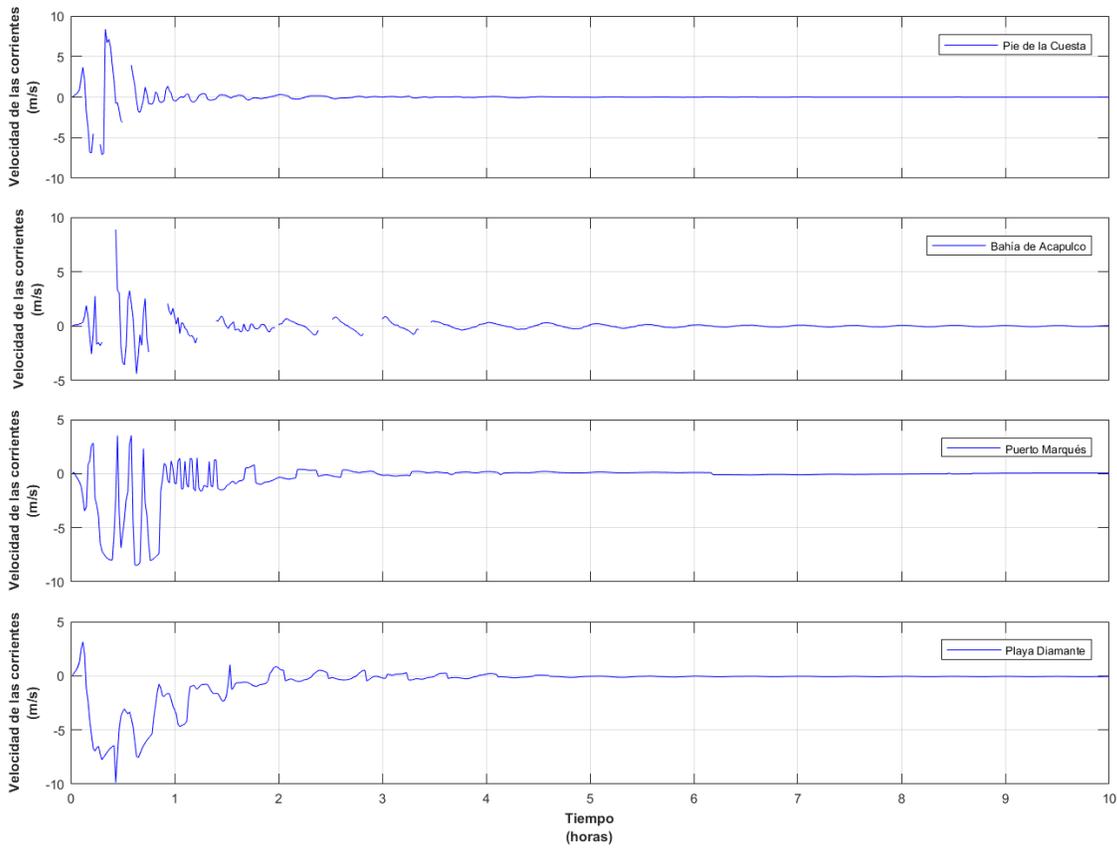


Figura 3. 28. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 5:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.4 m.

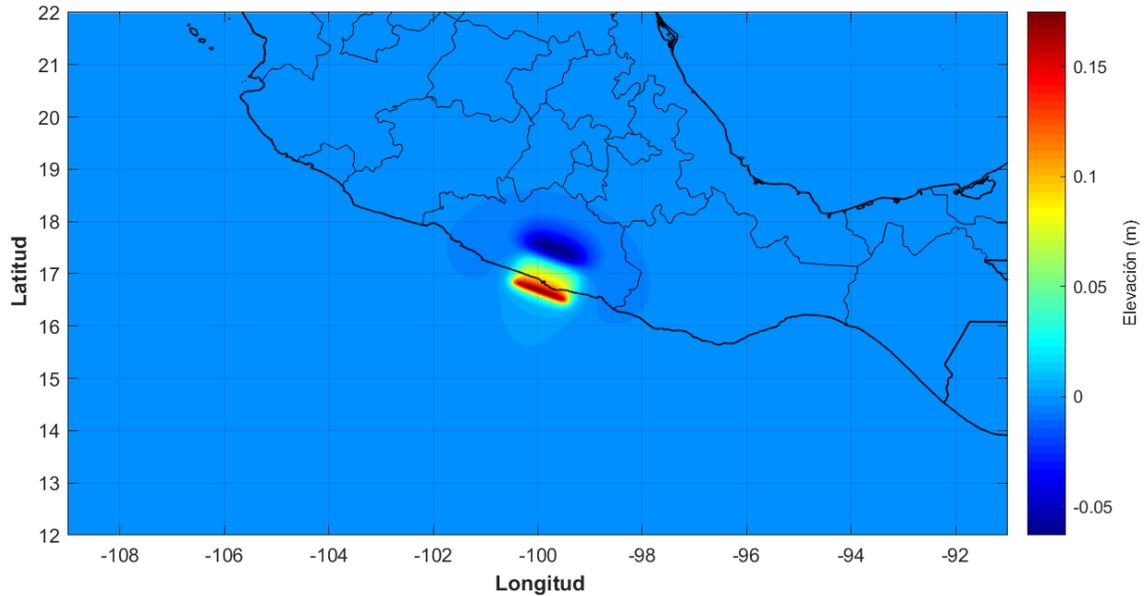


Figura 3. 29. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

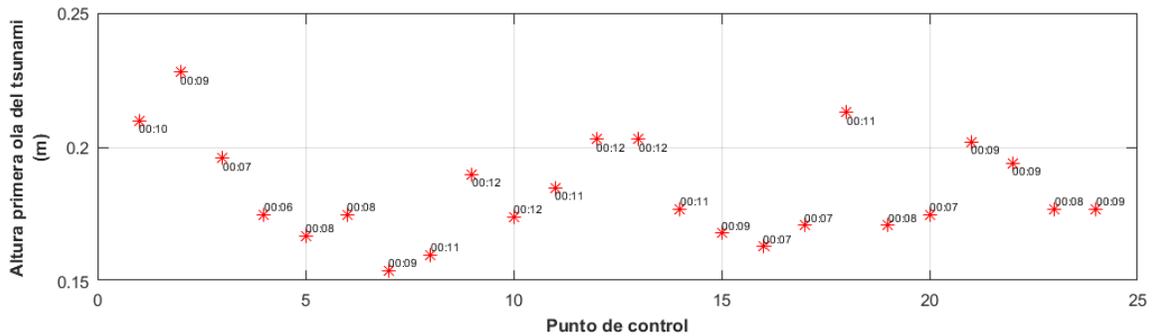


Figura 3. 30. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

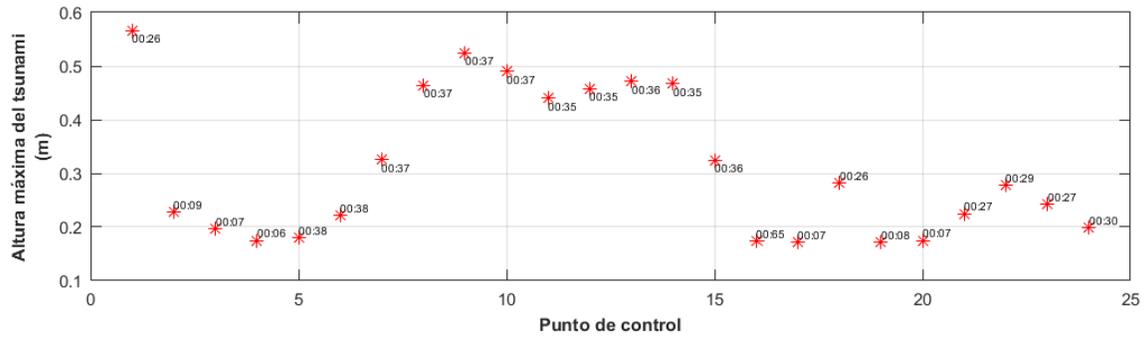


Figura 3. 31. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

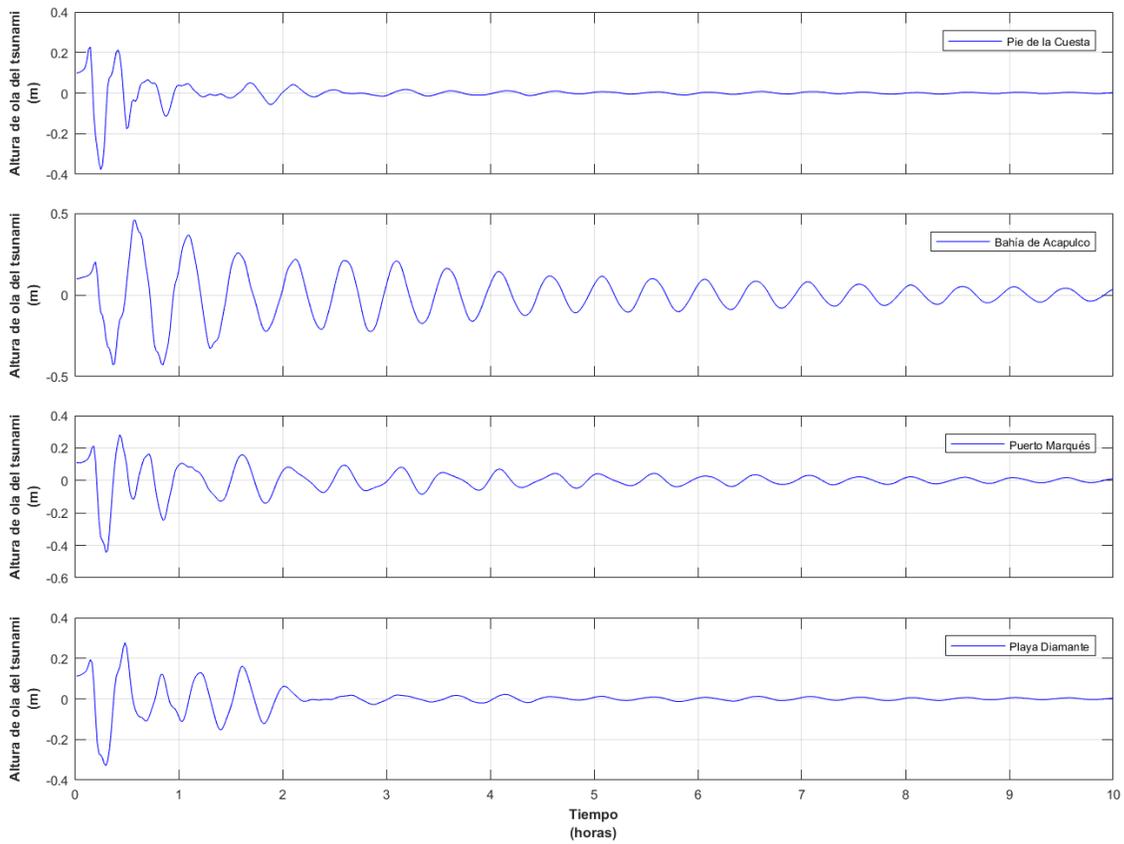


Figura 3. 32. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

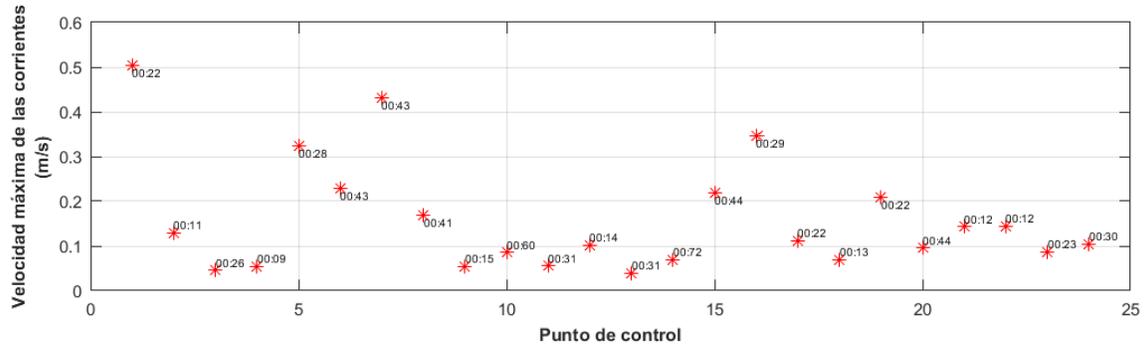


Figura 3. 33. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

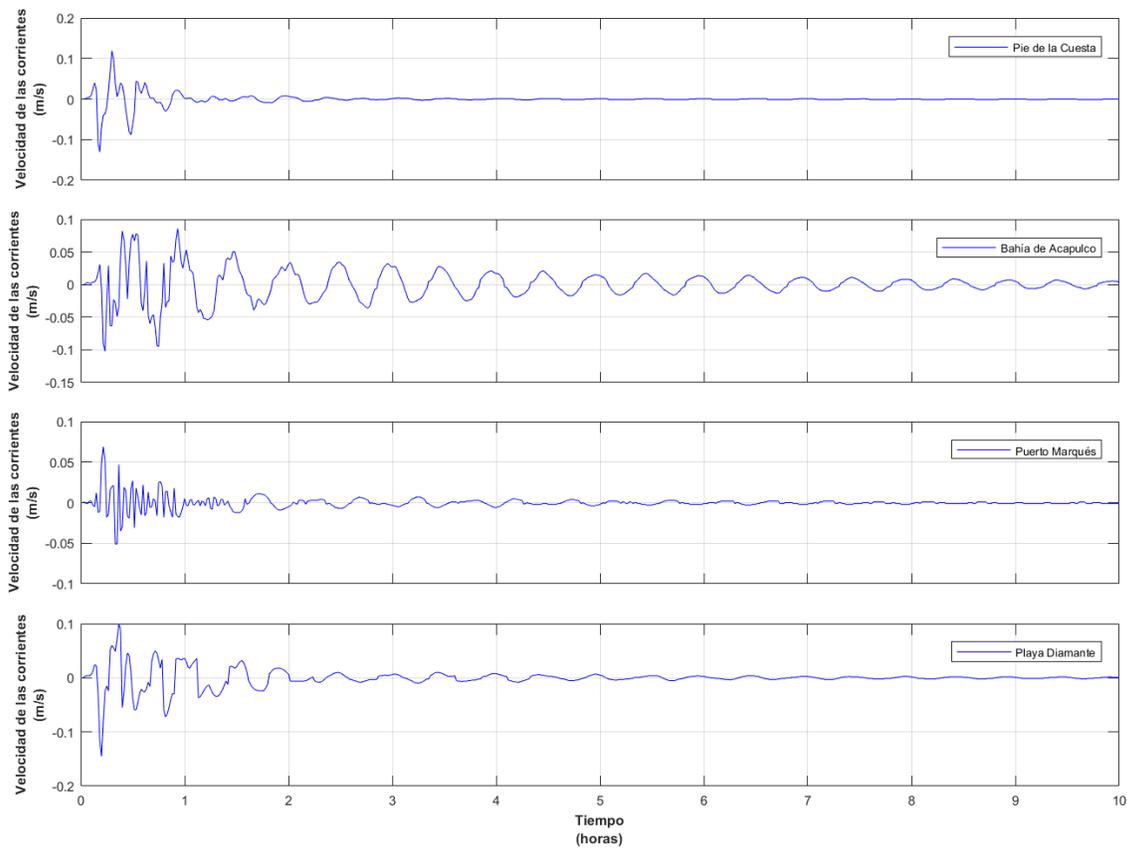


Figura 3. 34. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 6:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 2.0 m.

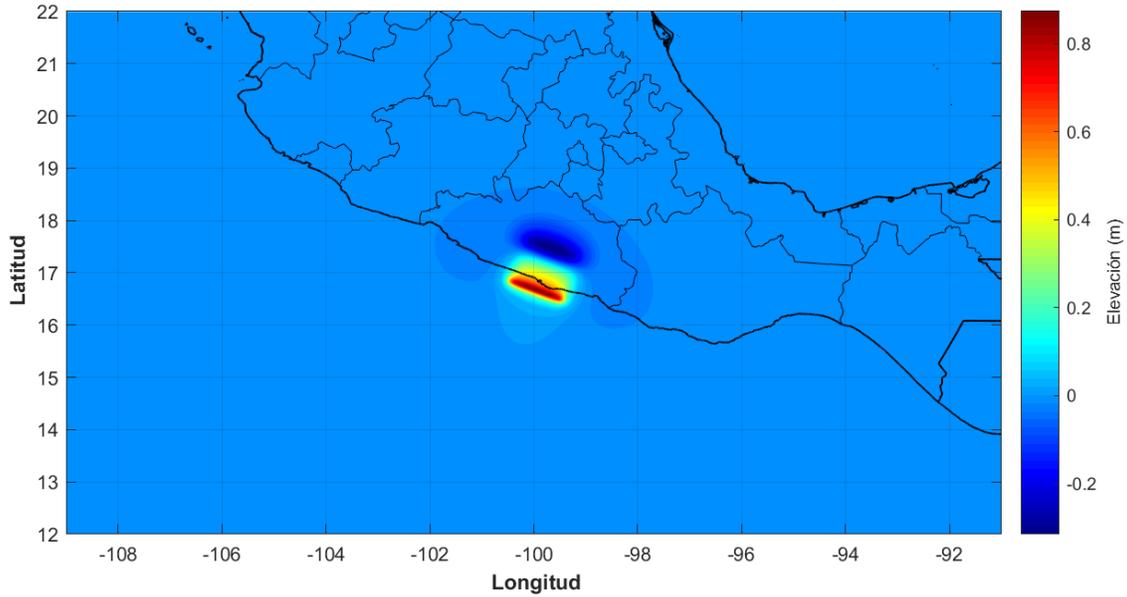


Figura 3. 35. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

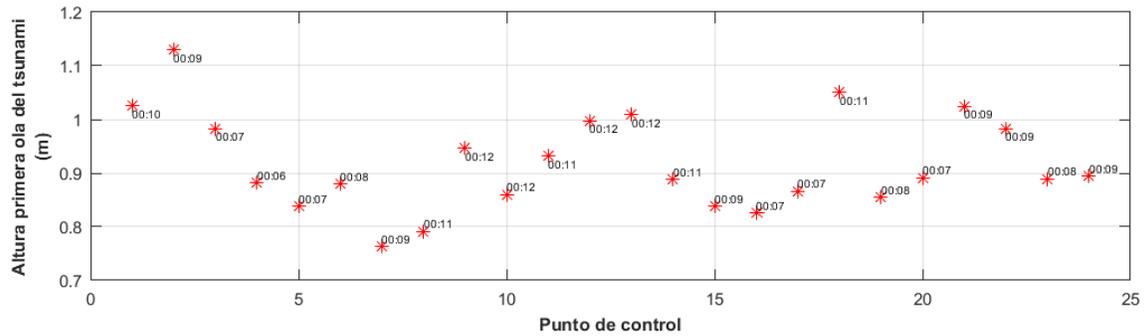


Figura 3. 36. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

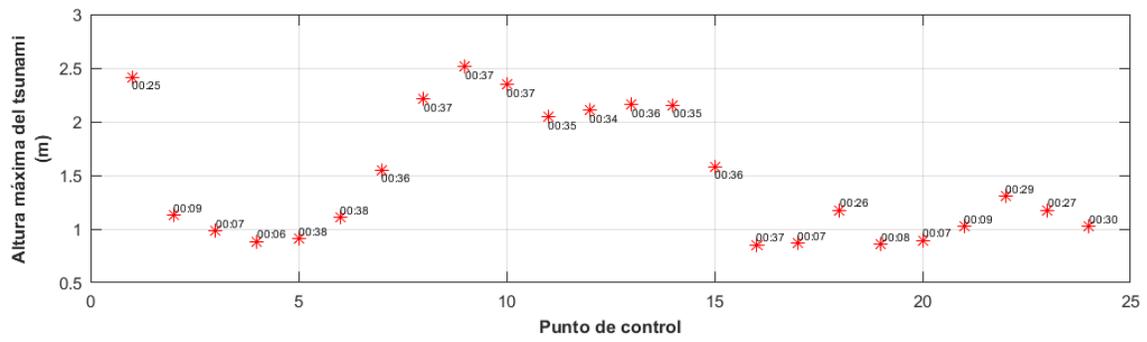


Figura 3. 37. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

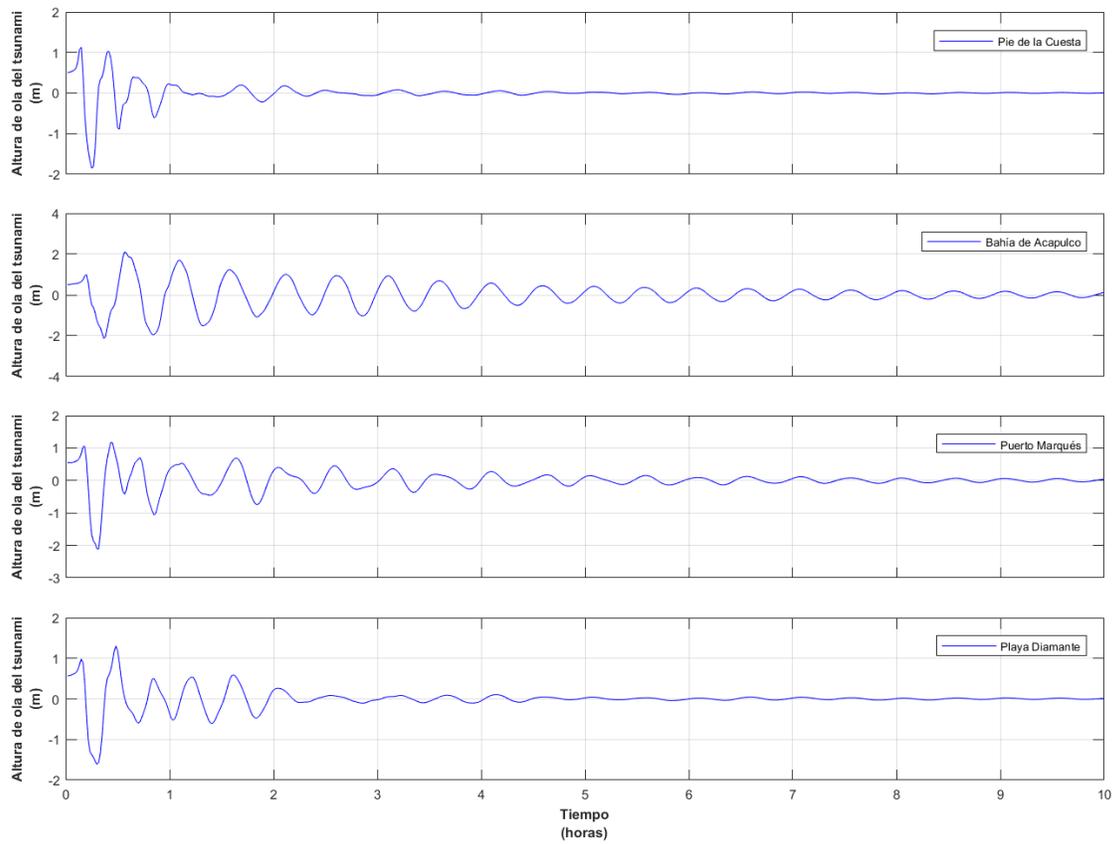


Figura 3. 38. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

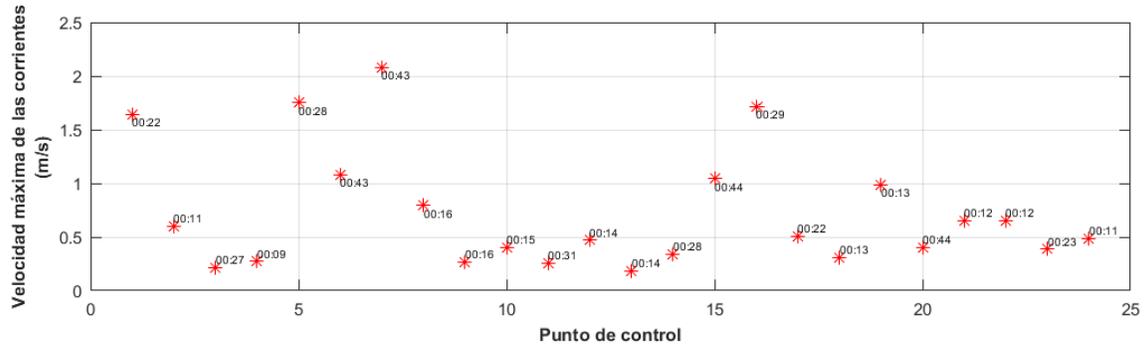


Figura 3. 39. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

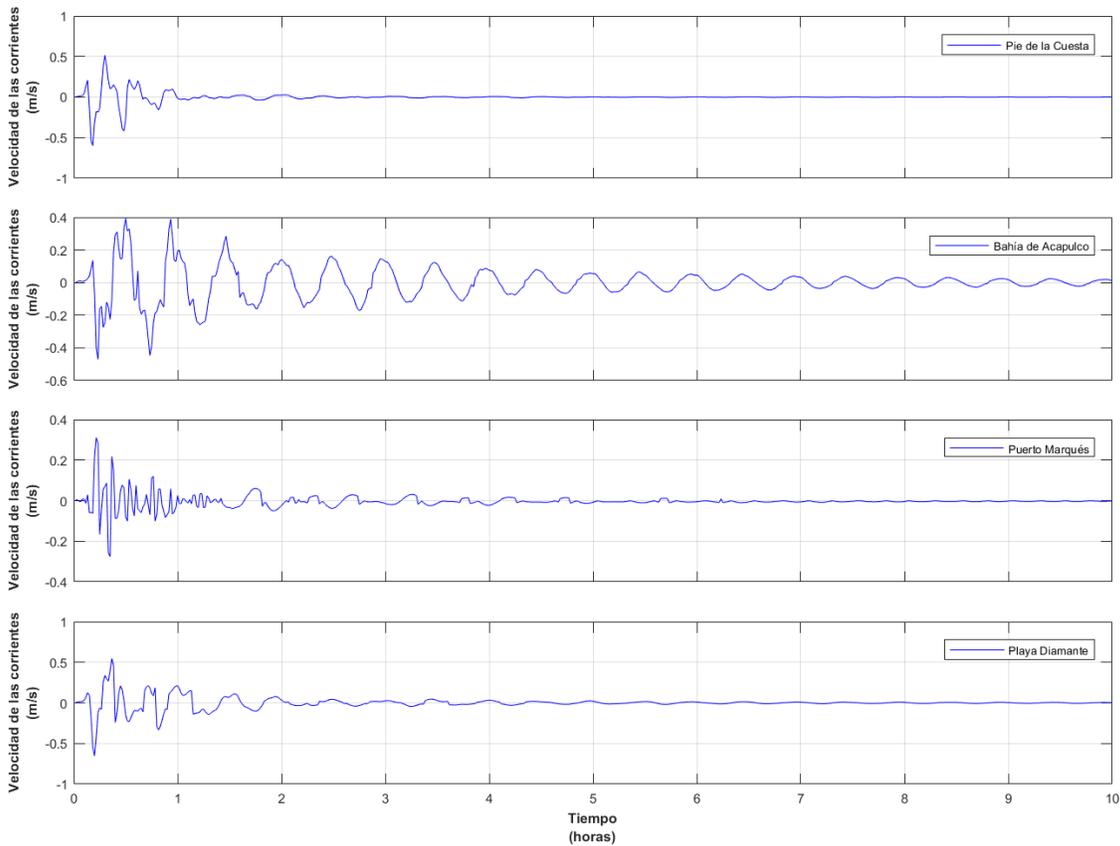


Figura 3. 40. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 7:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 7.8 m.

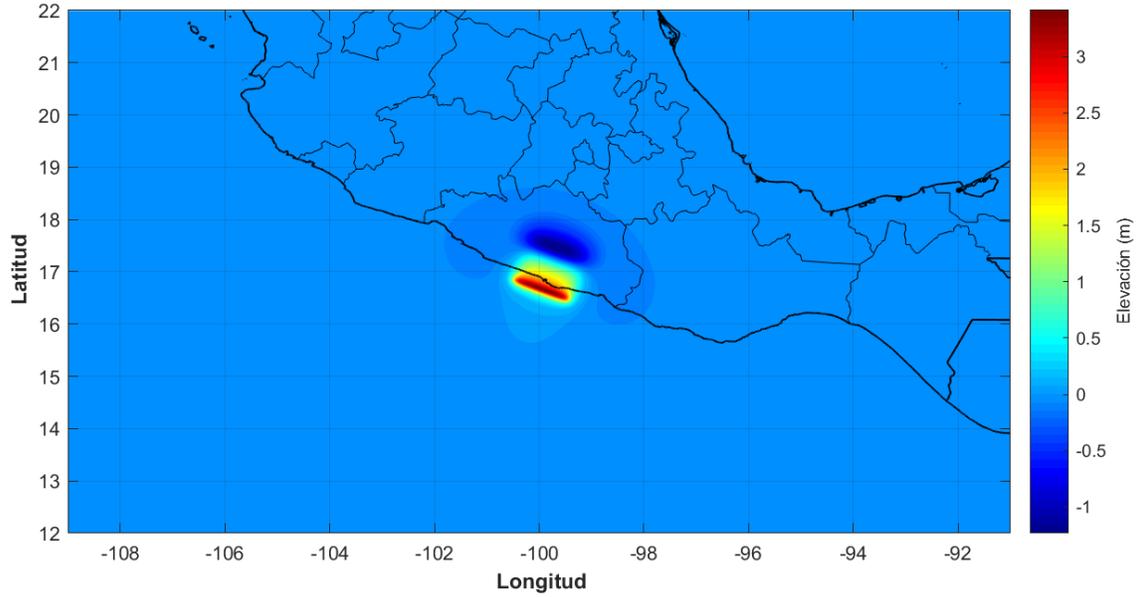


Figura 3. 41. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

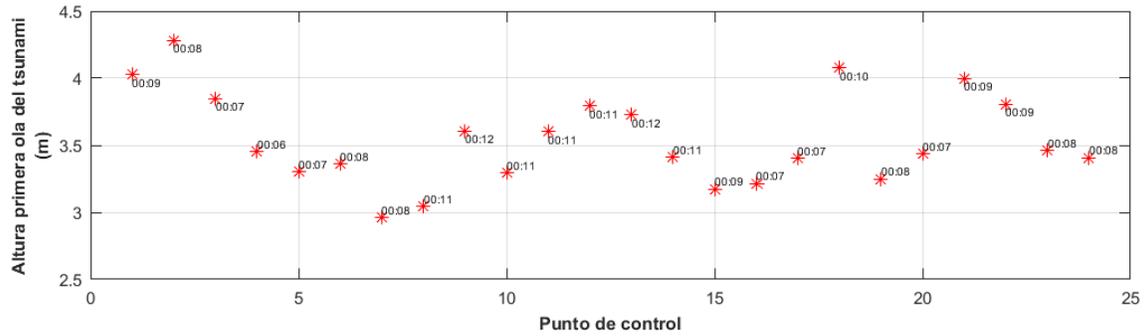


Figura 3. 42. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

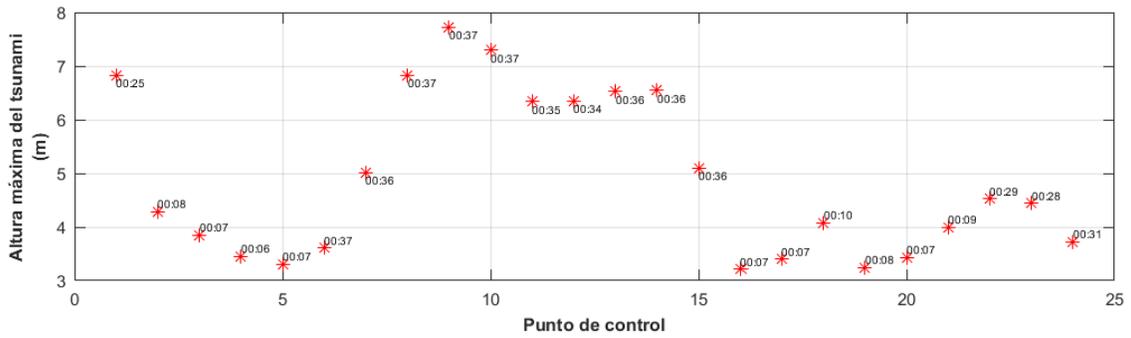


Figura 3. 43. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

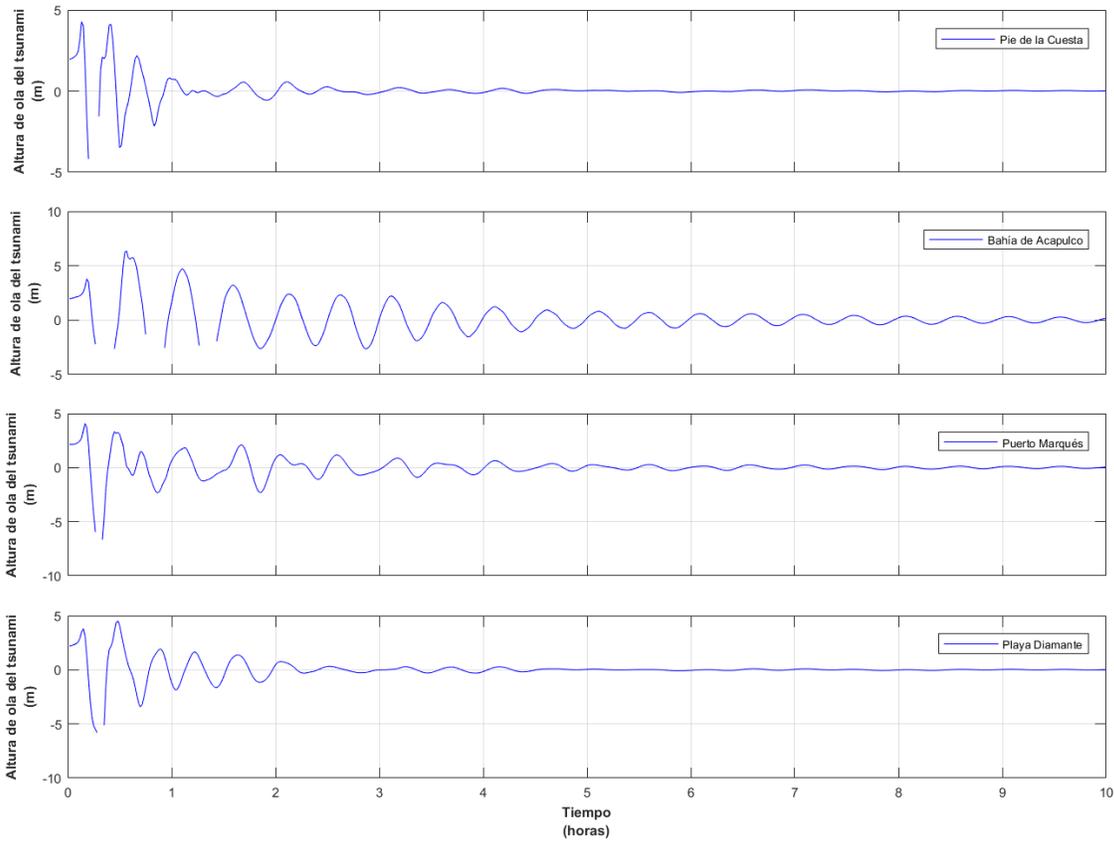


Figura 3. 44. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

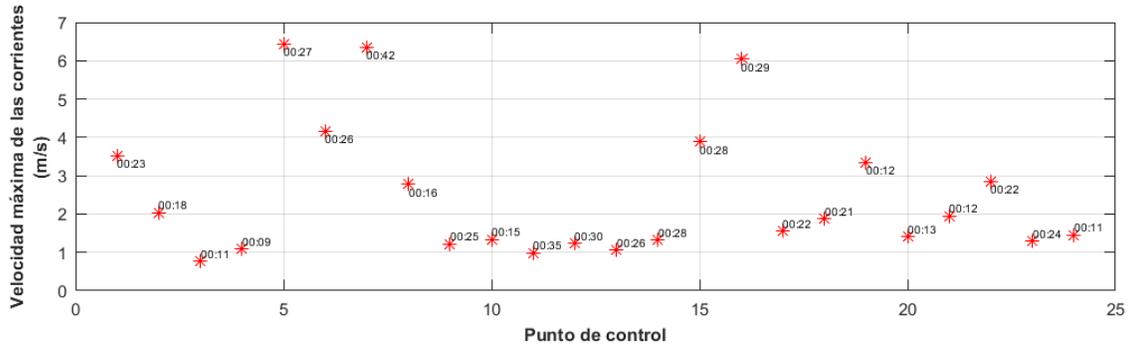


Figura 3. 45. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

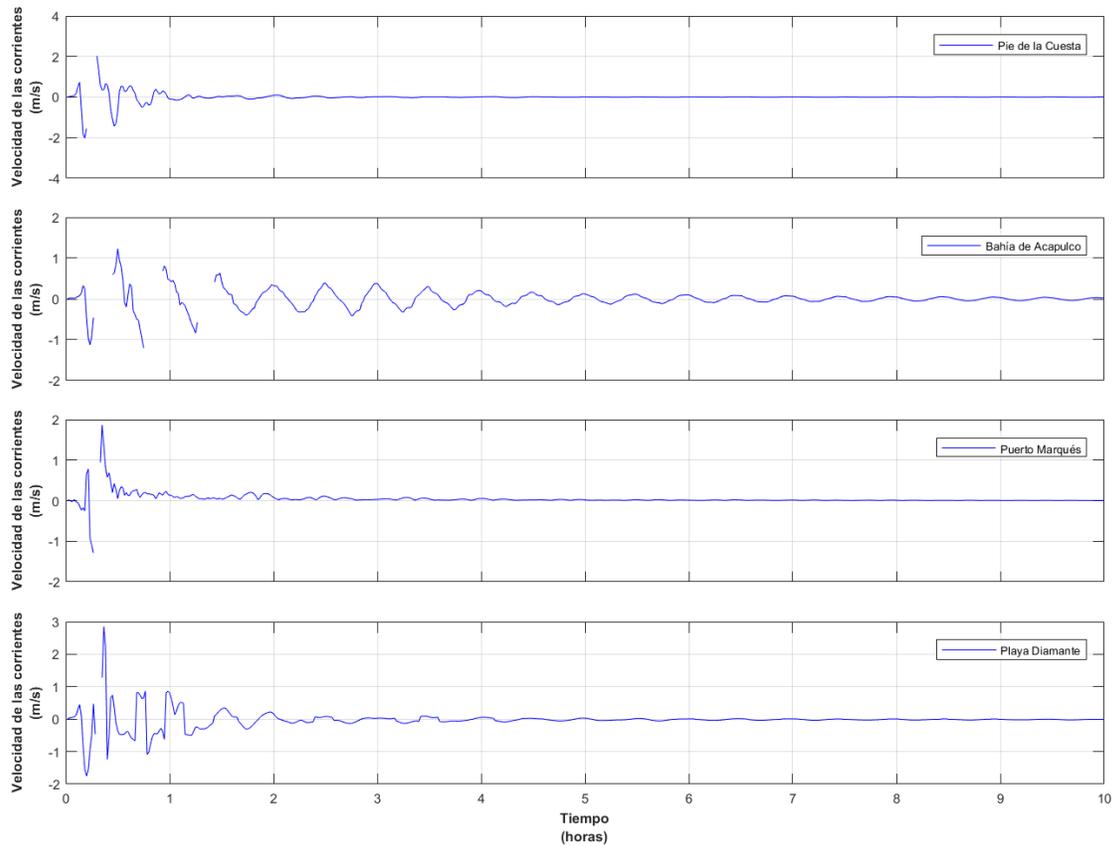


Figura 3. 46. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 8:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 43.5 m.

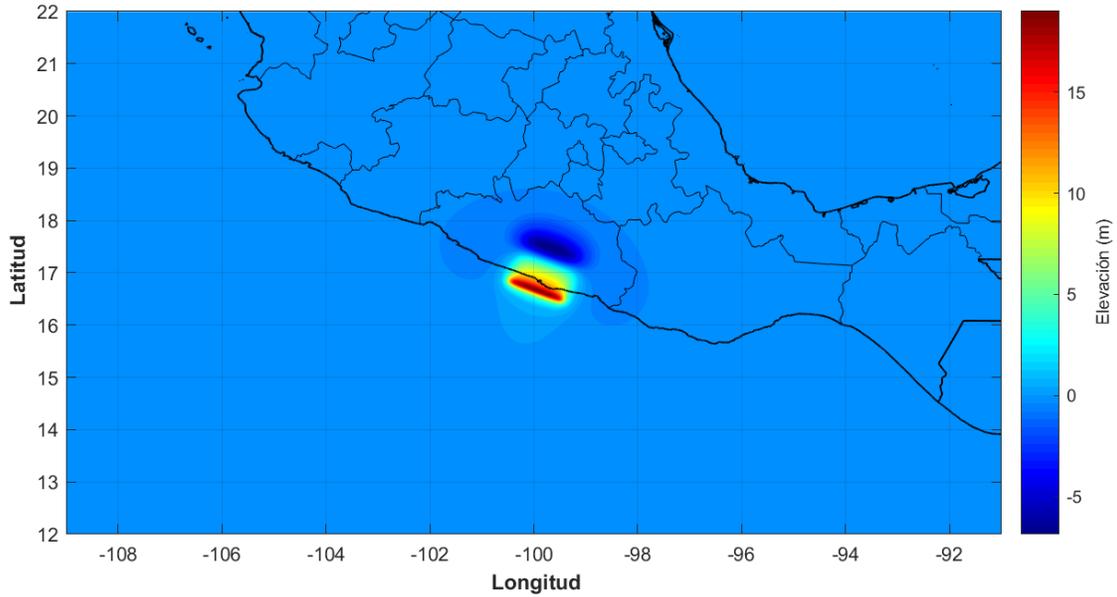


Figura 3. 47. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

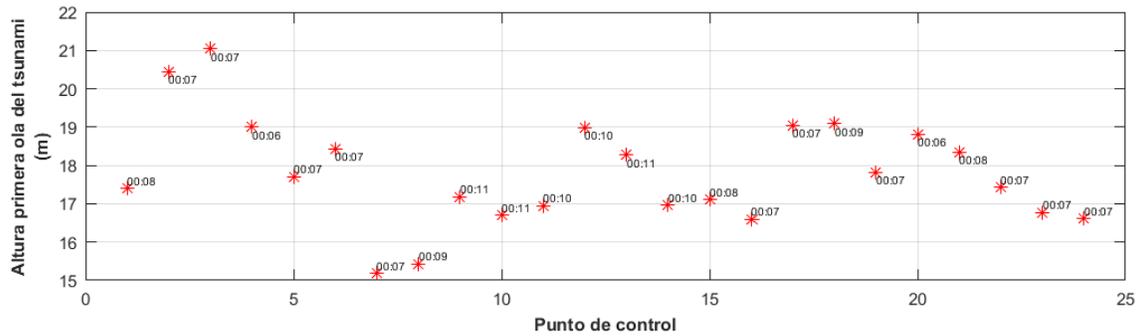


Figura 3. 48. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

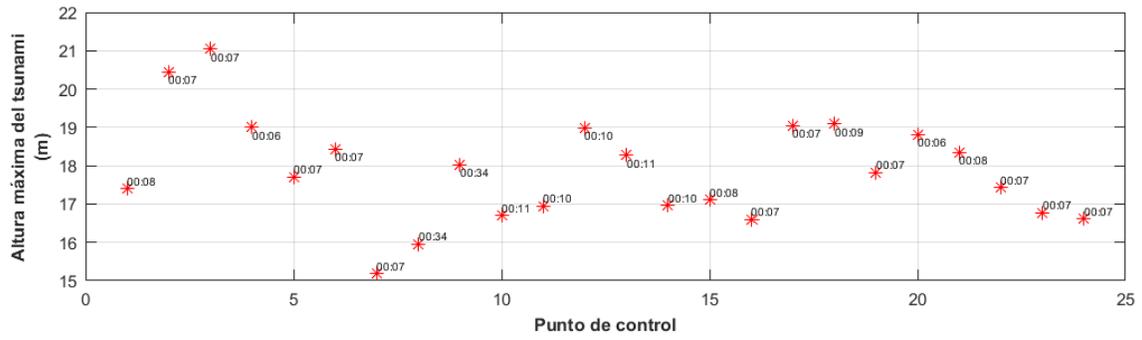


Figura 3. 49. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

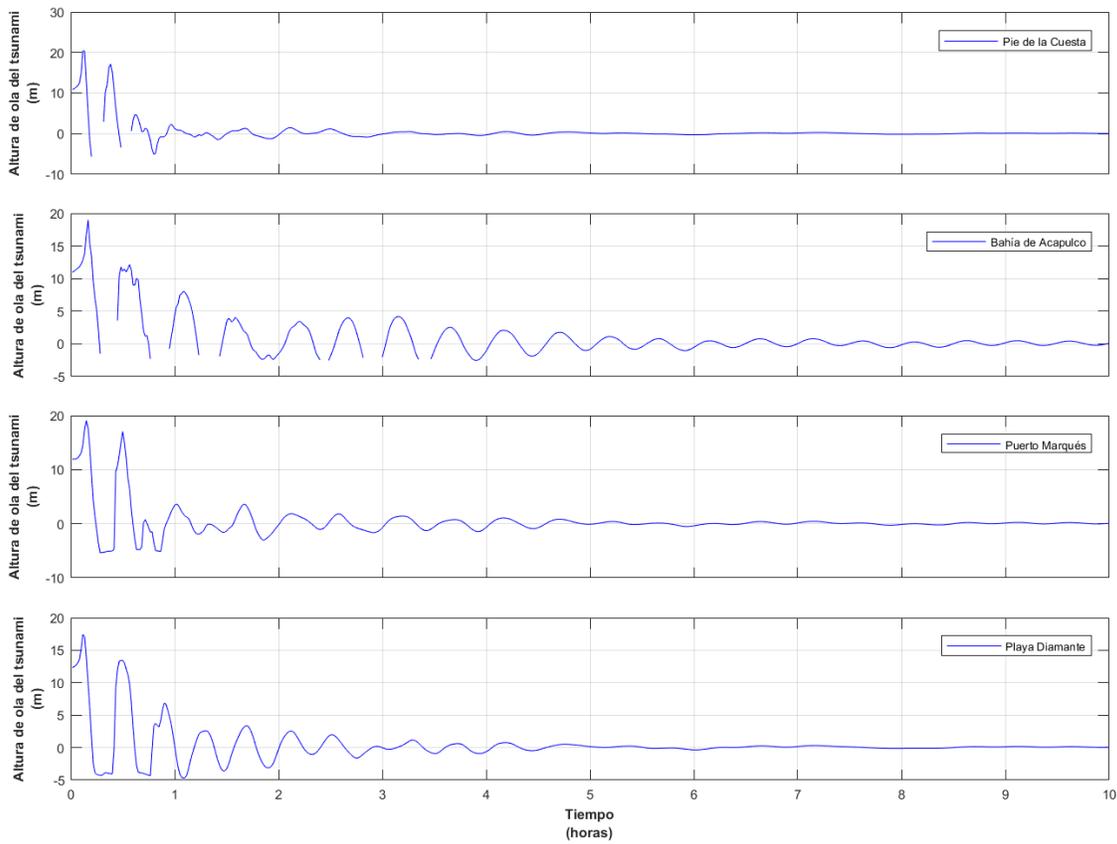


Figura 3. 50. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

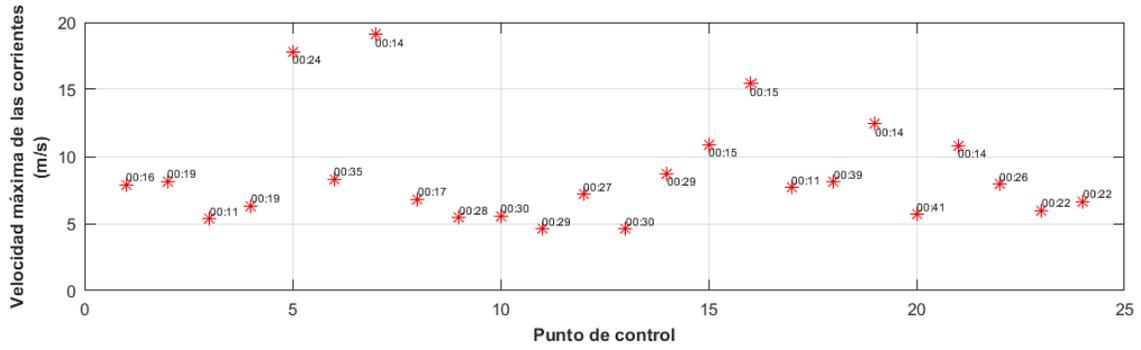


Figura 3. 51. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

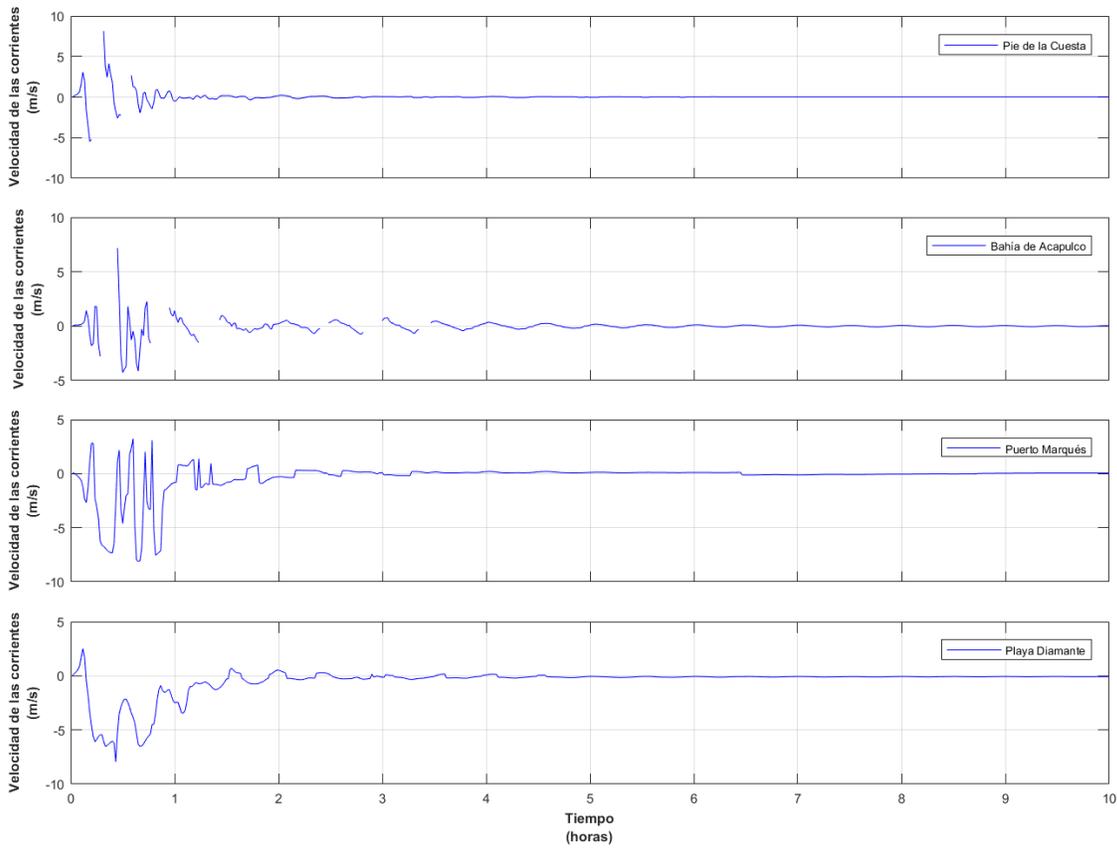


Figura 3. 52. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 9:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.3 m.

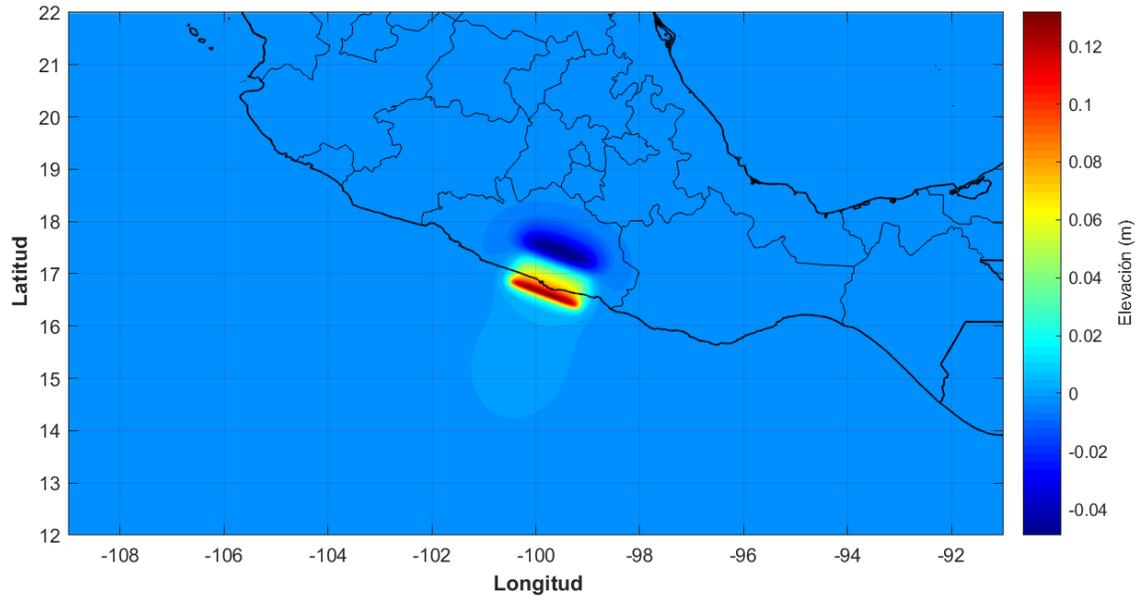


Figura 3. 53. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

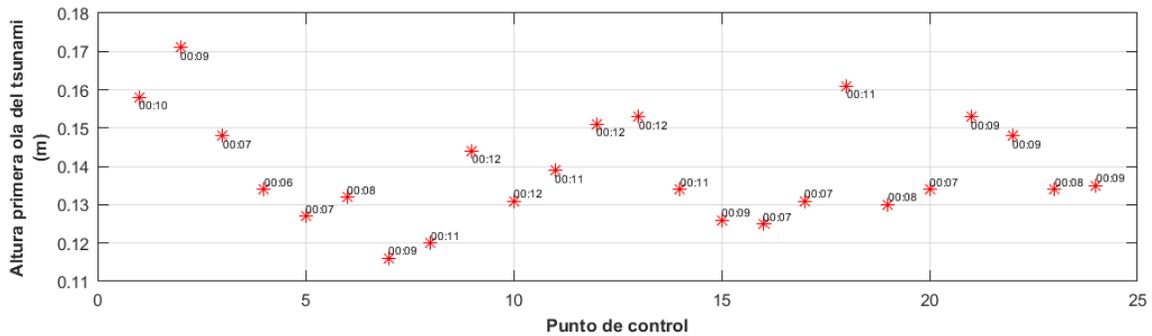


Figura 3. 54. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

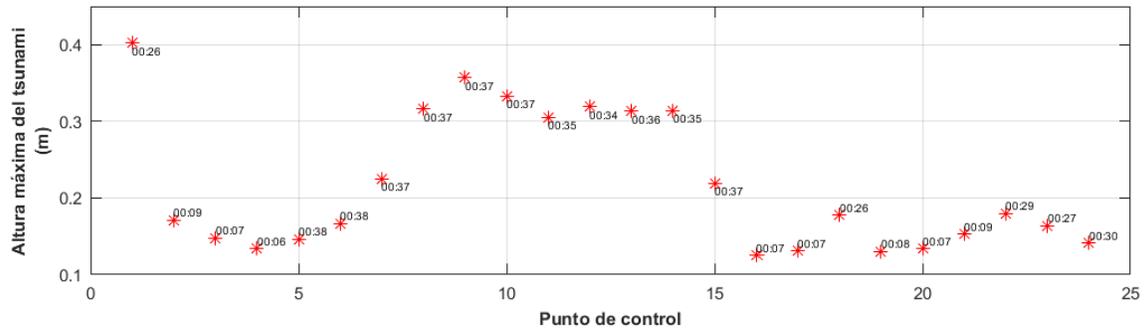


Figura 3. 55. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

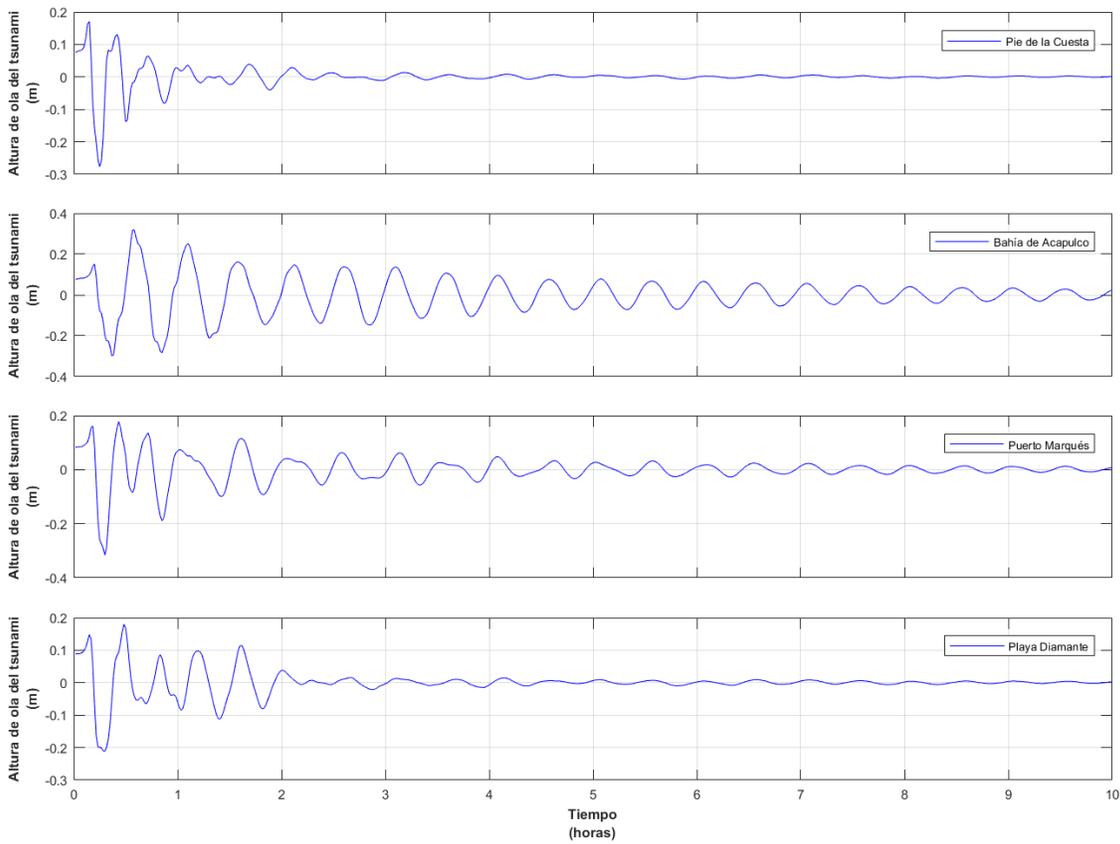


Figura 3. 56. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

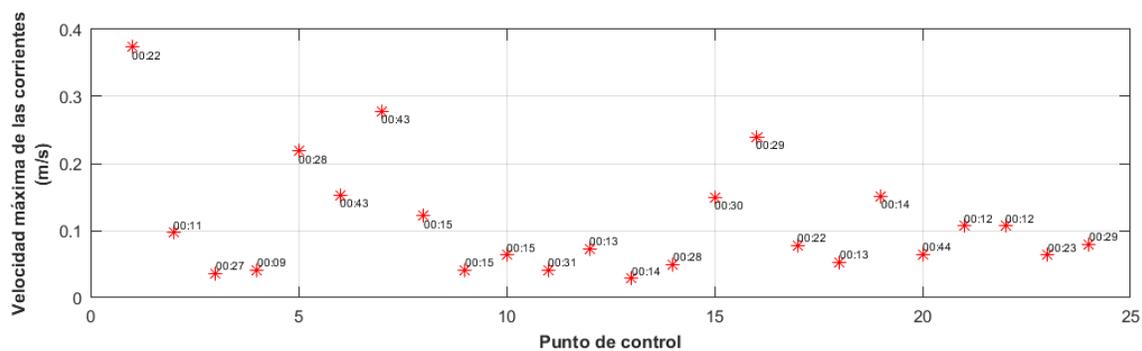


Figura 3. 57. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

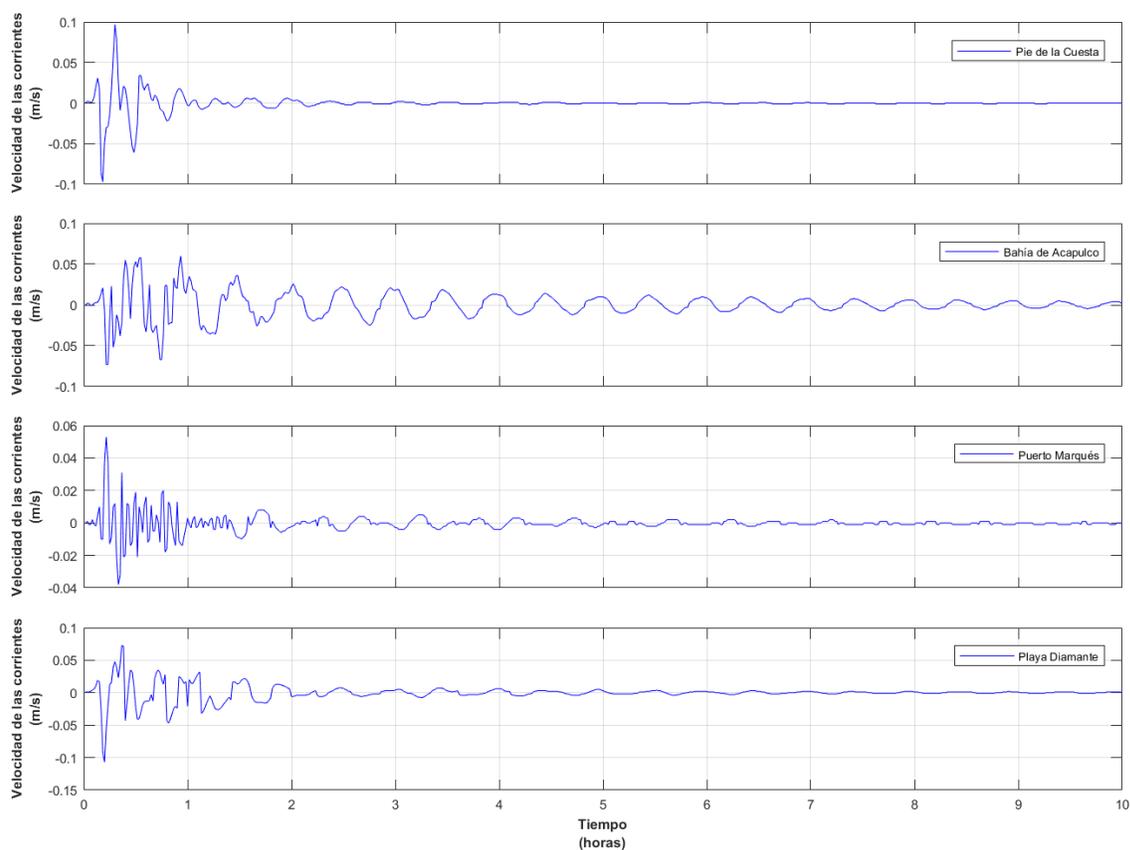


Figura 3. 58. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 10:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.6 m.

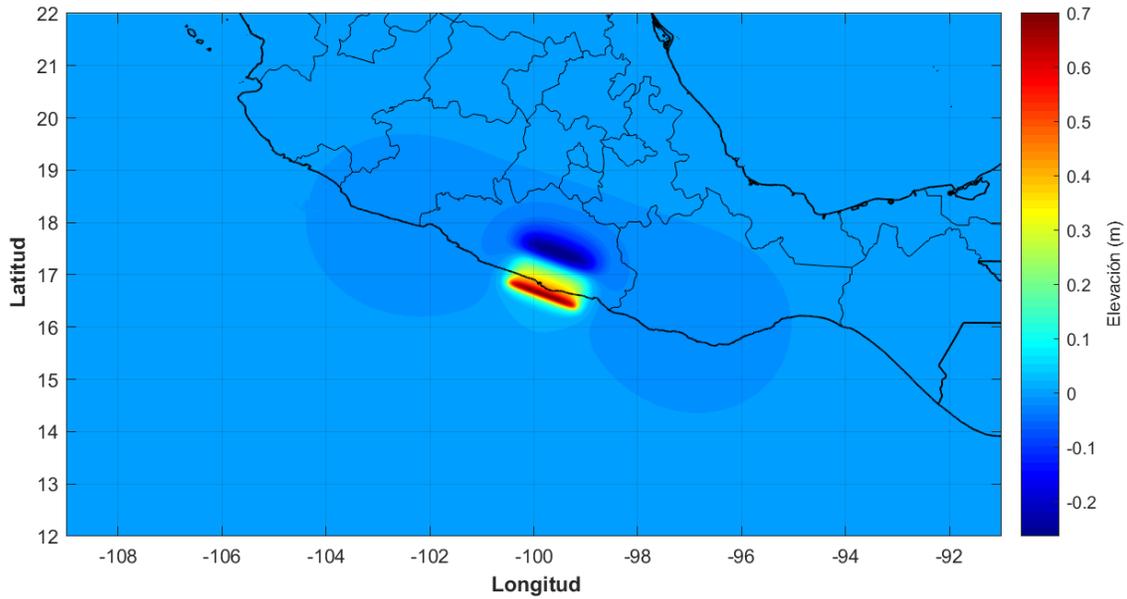


Figura 3. 59. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

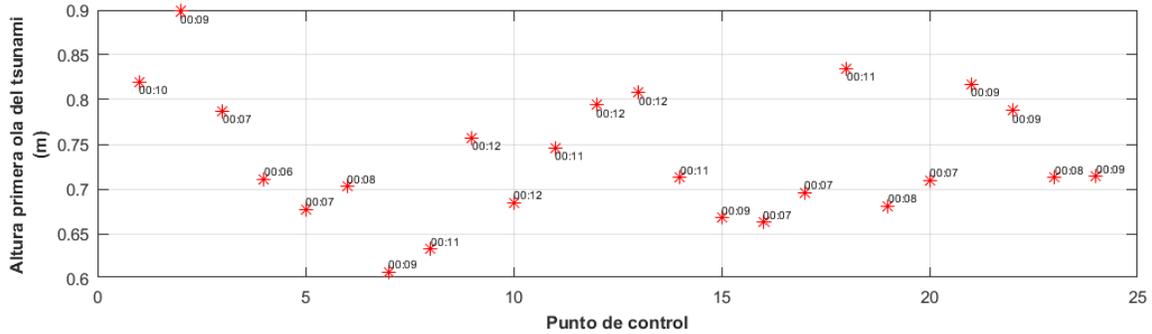


Figura 3. 60. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

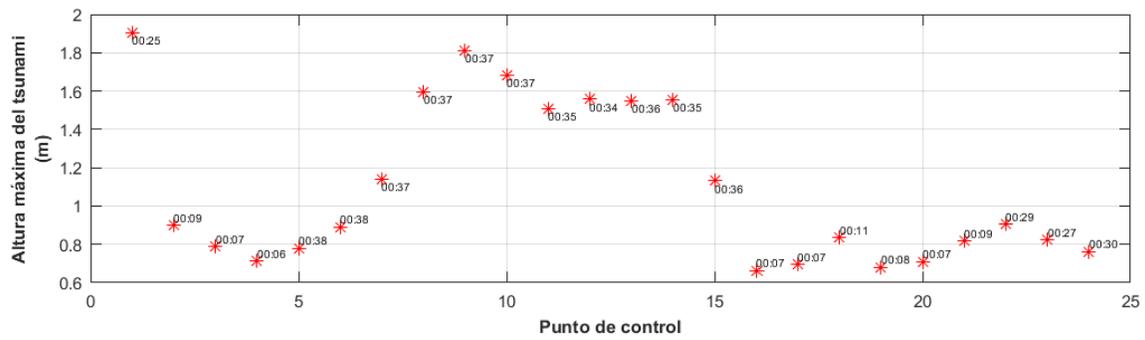


Figura 3. 61. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

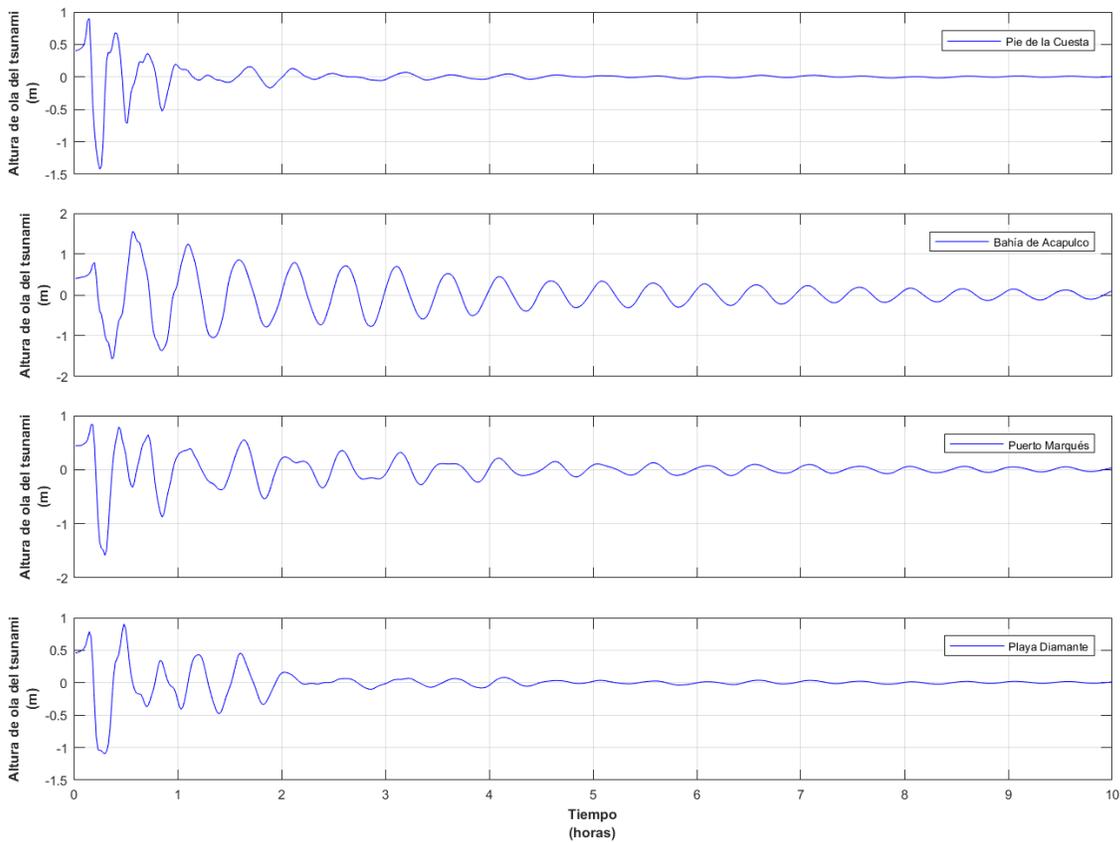


Figura 3. 62. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

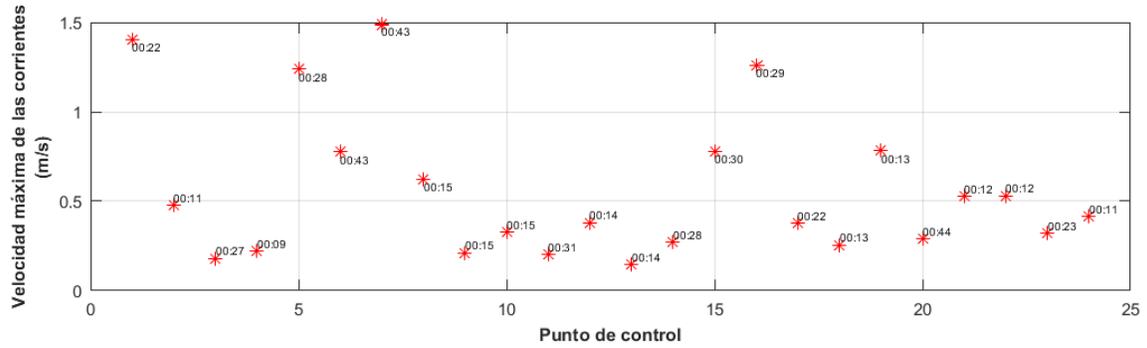


Figura 3. 63. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

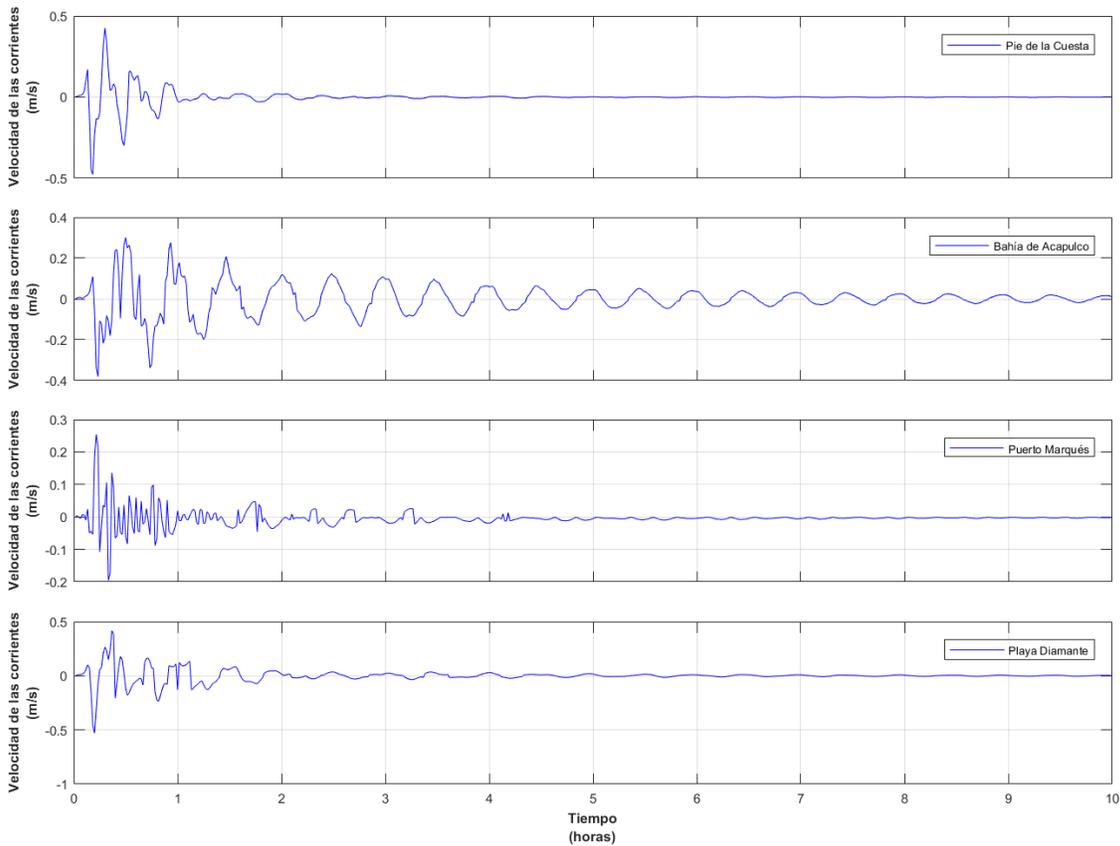


Figura 3. 64. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 11:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 6.2 m.

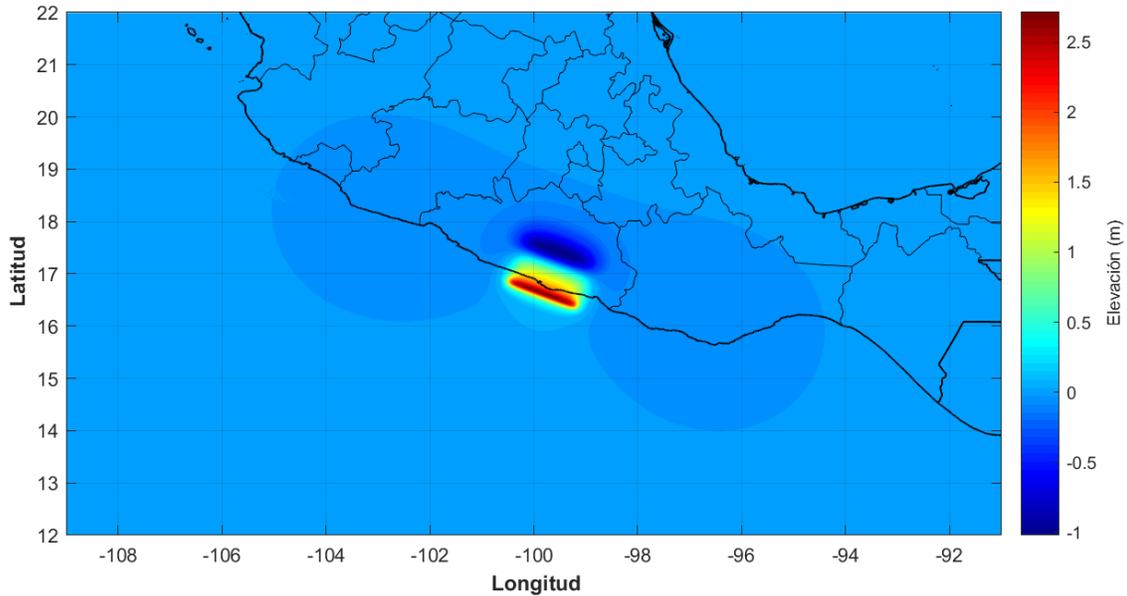


Figura 3. 65. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

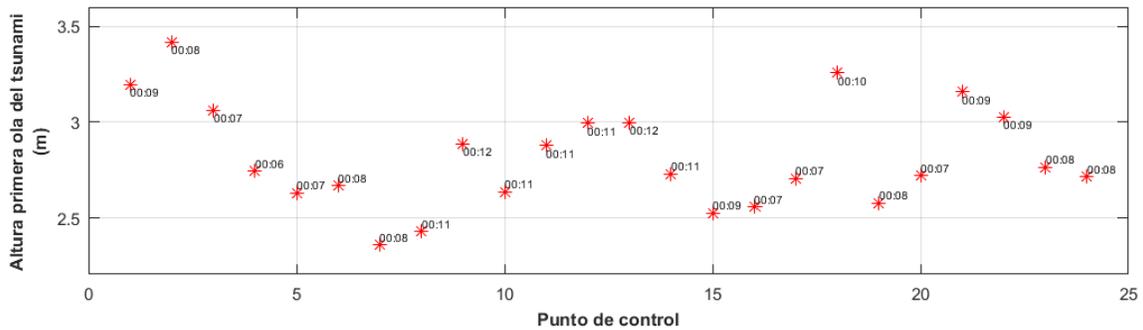


Figura 3. 66. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

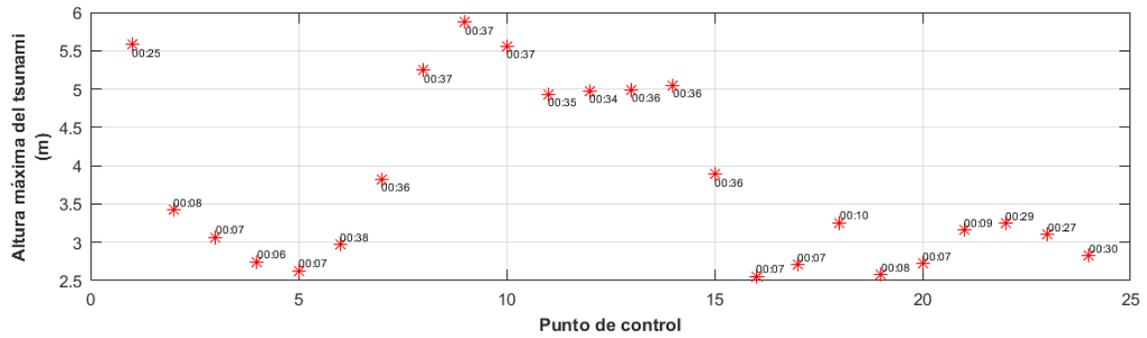


Figura 3. 67. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

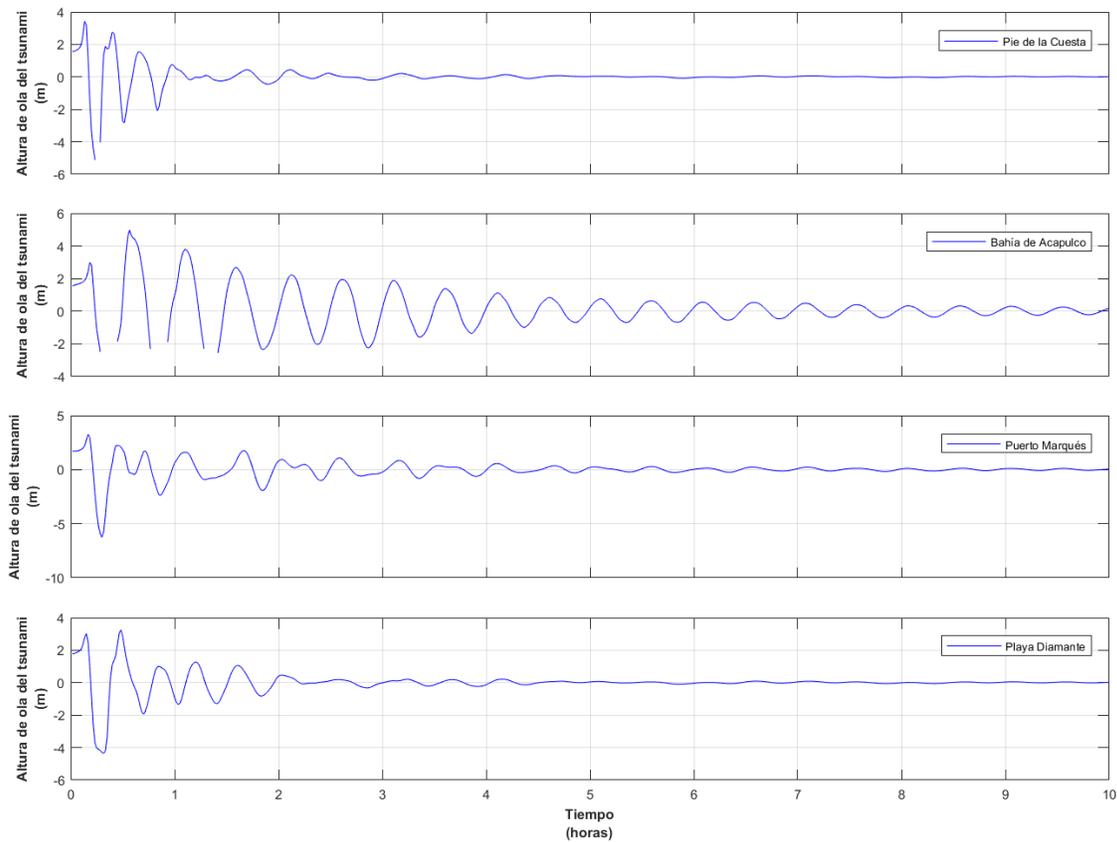


Figura 3. 68. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

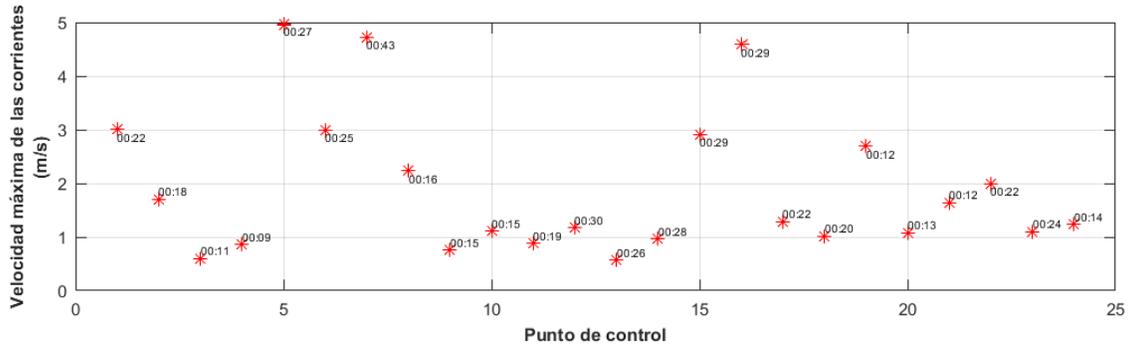


Figura 3. 69. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

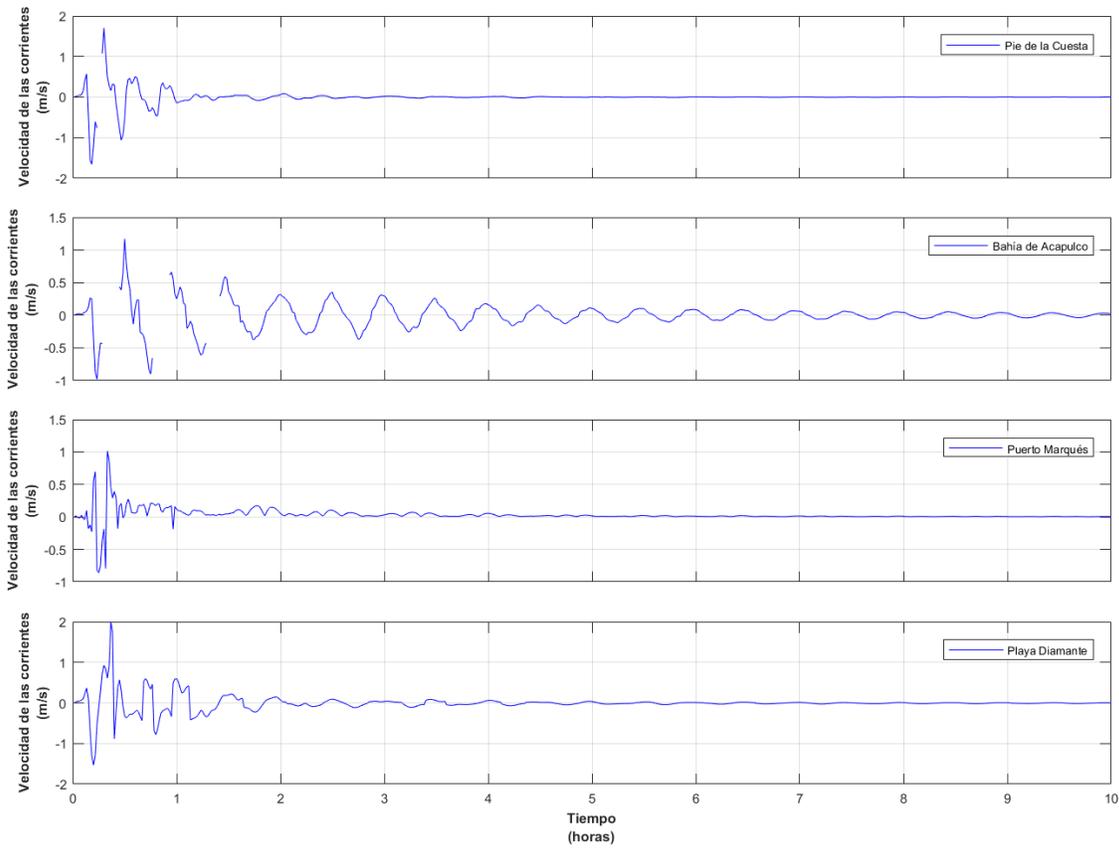


Figura 3. 70. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 12:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 34.8 m.

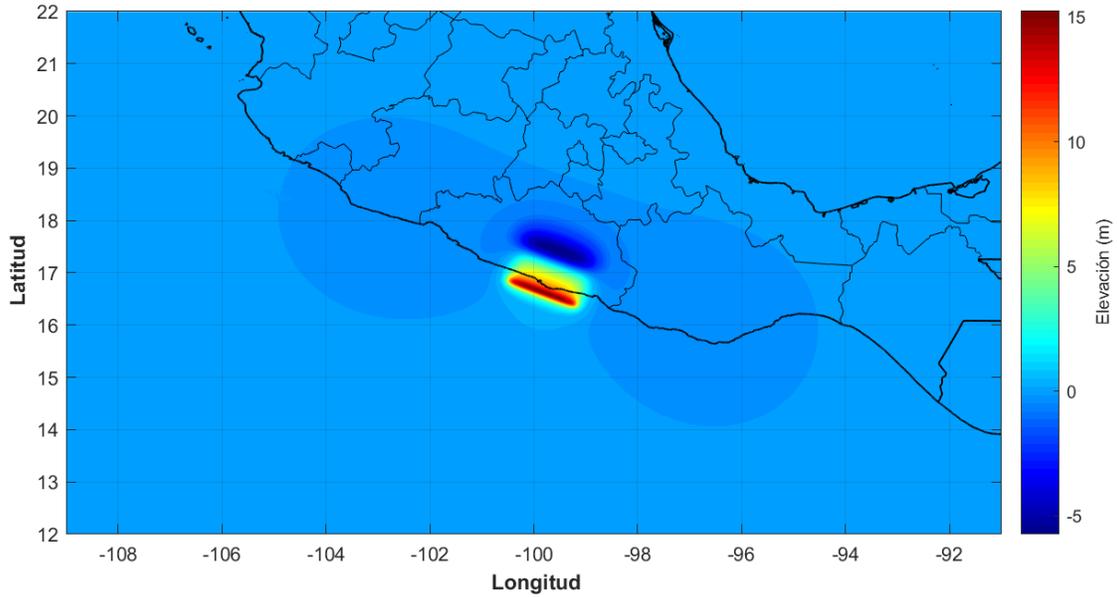


Figura 3. 71. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

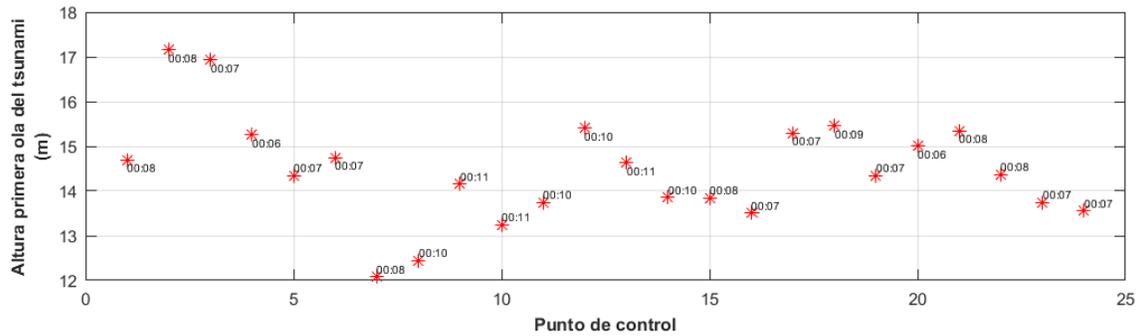


Figura 3. 72. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

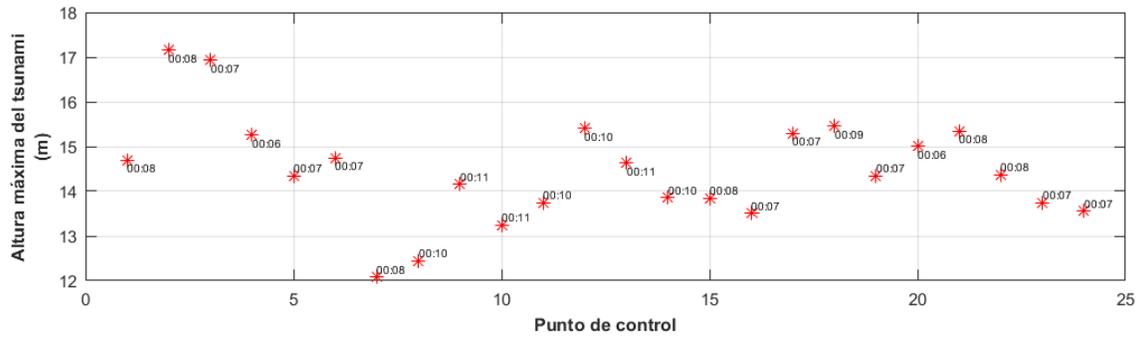


Figura 3. 73. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

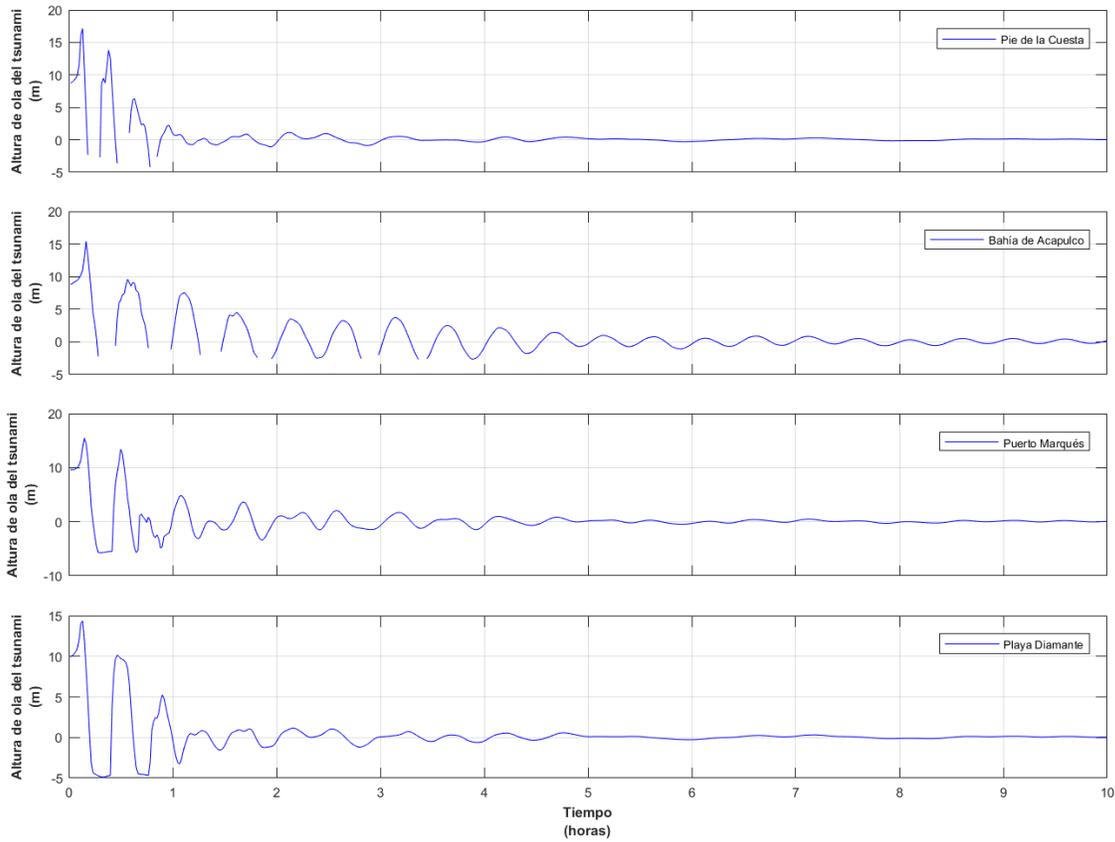


Figura 3. 74. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

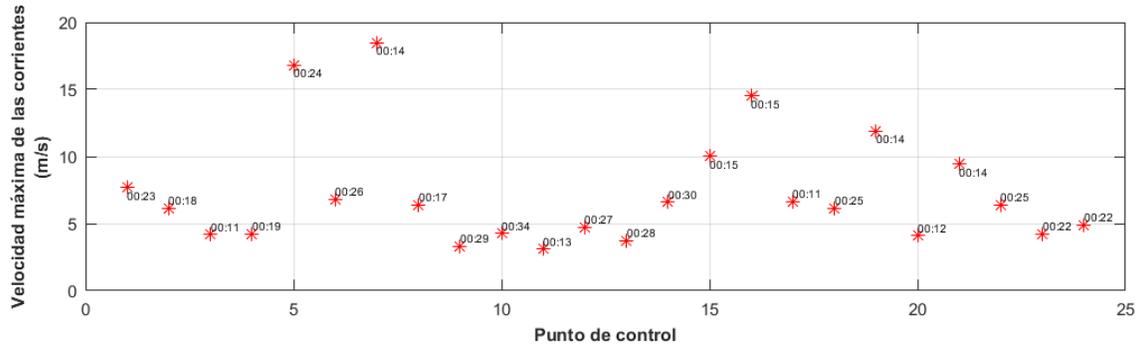


Figura 3. 75. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

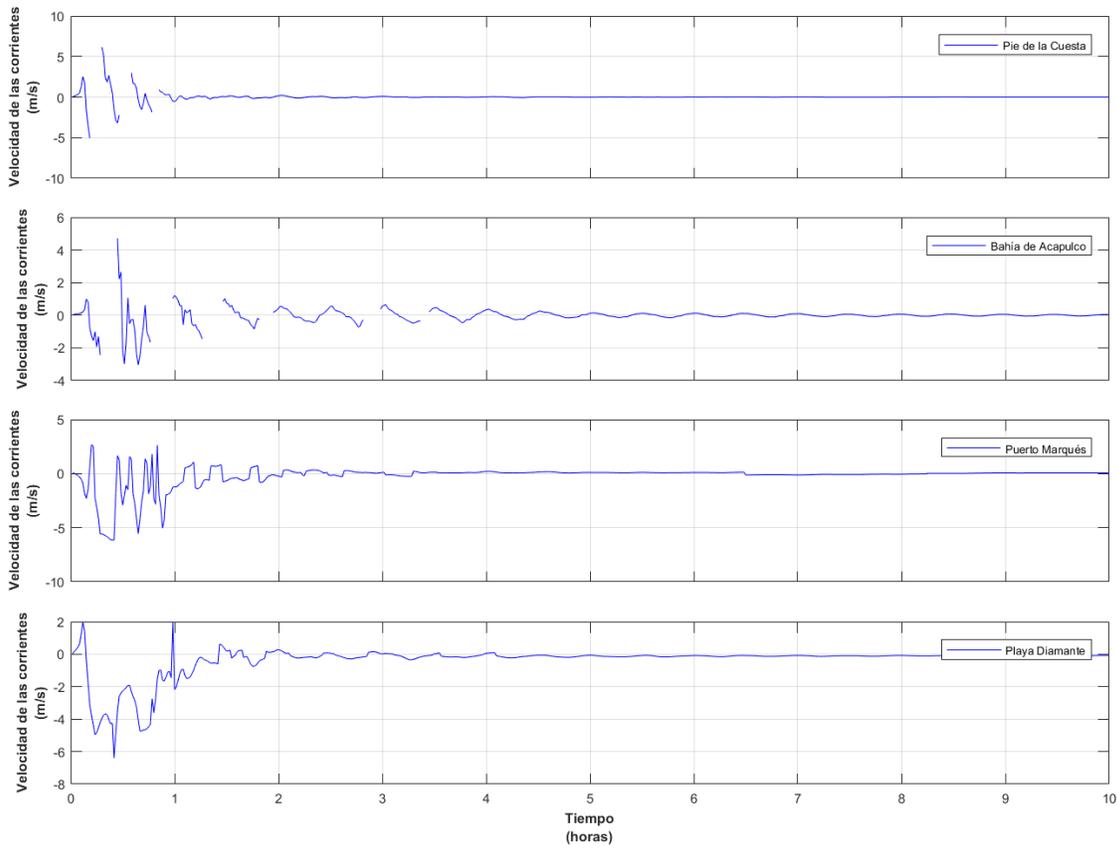


Figura 3. 76. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 13:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.3 m.

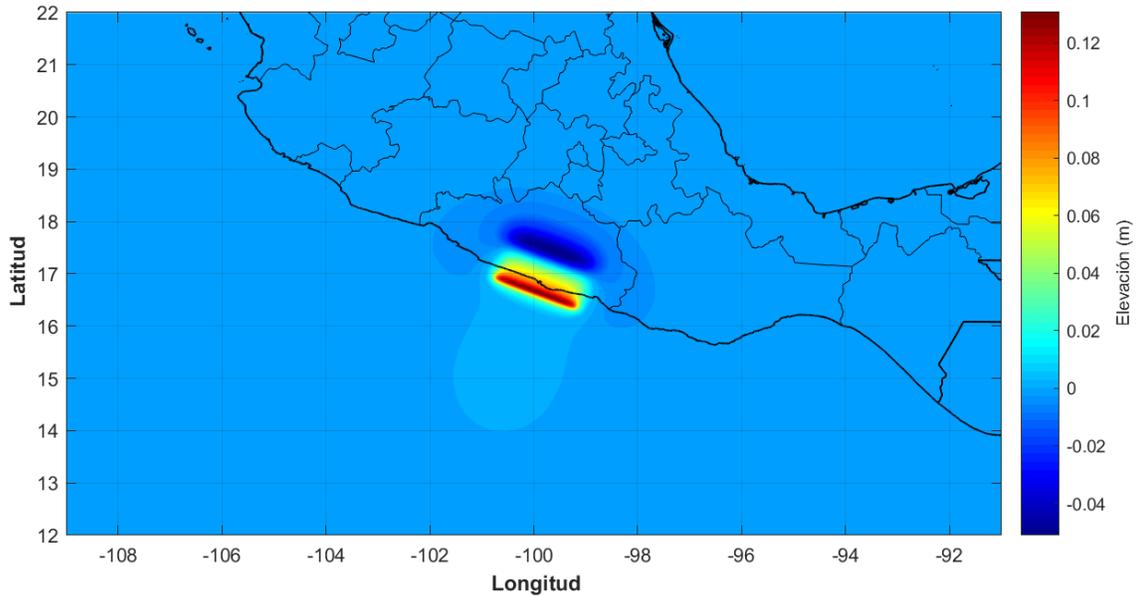


Figura 3. 77. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

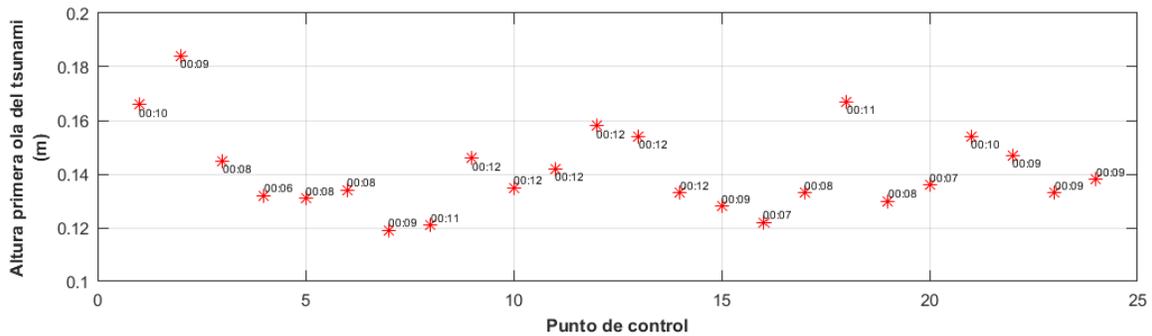


Figura 3. 78. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

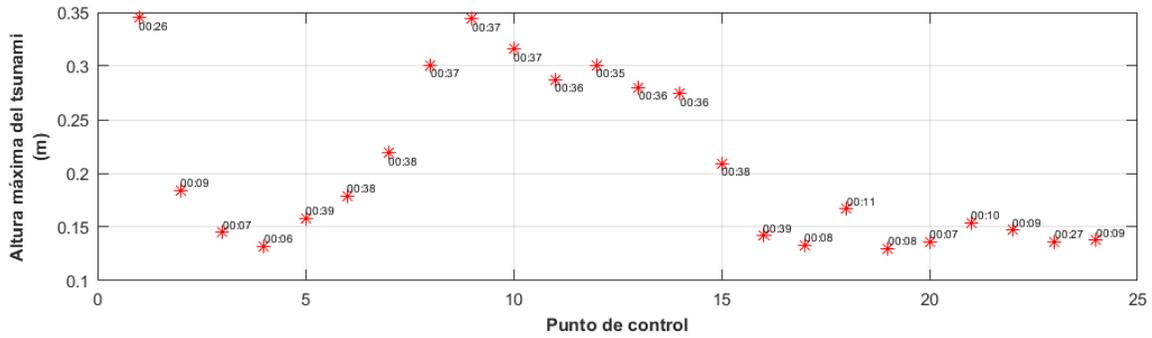


Figura 3. 79. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

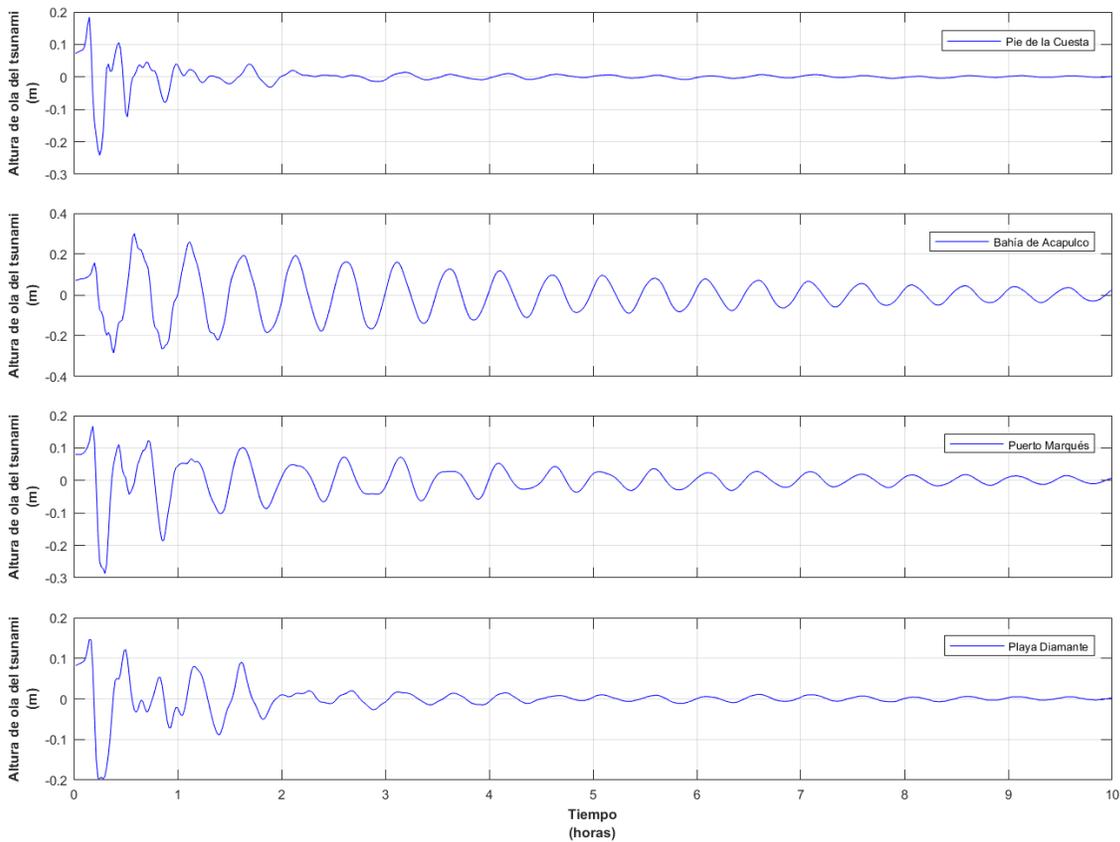


Figura 3. 80. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

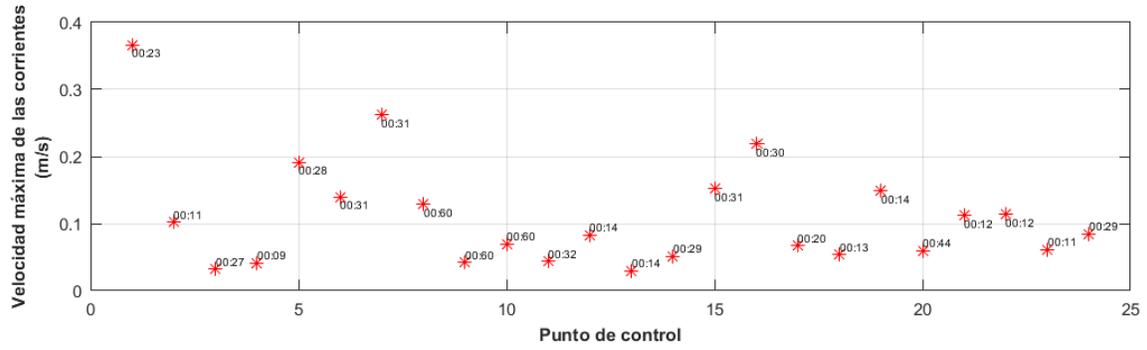


Figura 3. 81. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

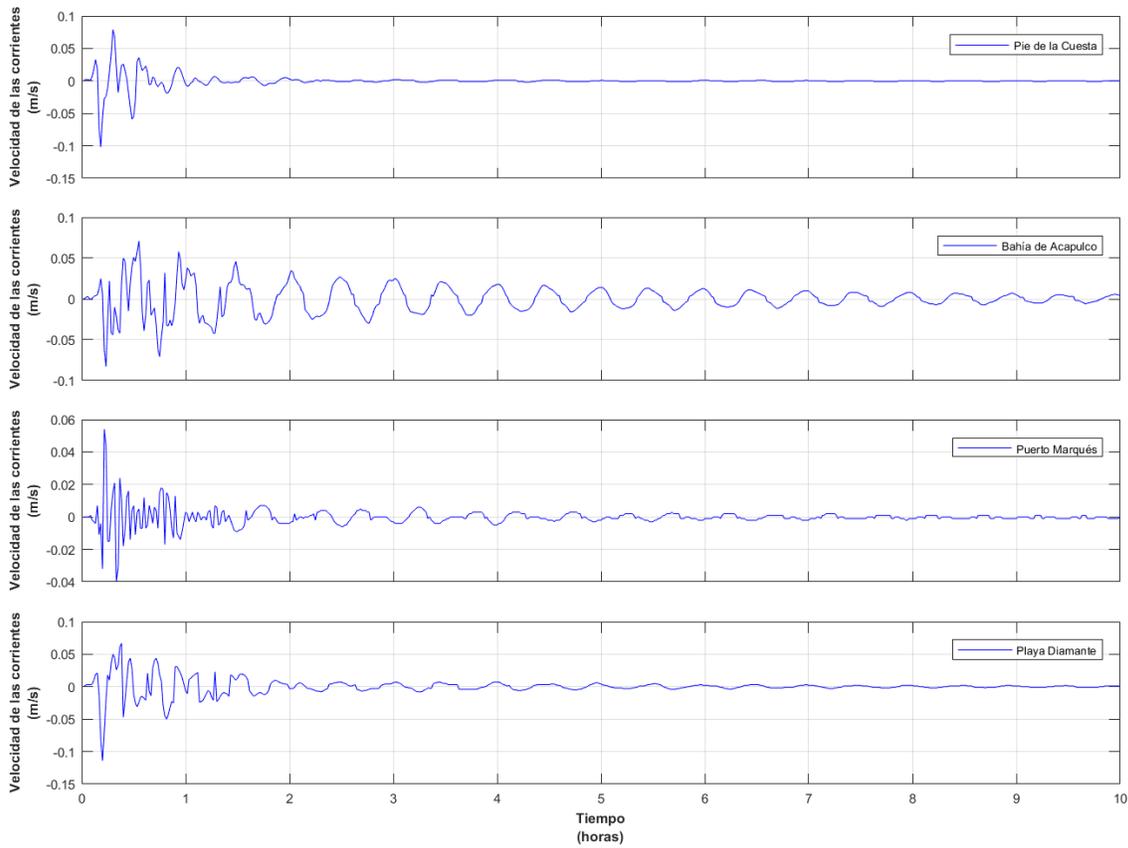


Figura 3. 82. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 14:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.3 m.

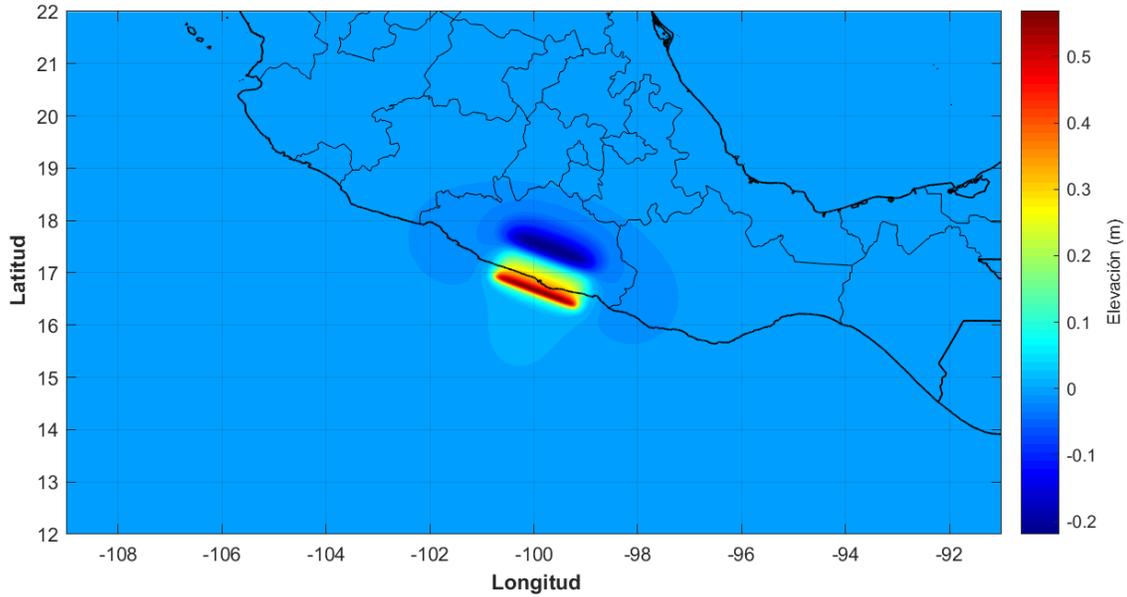


Figura 3. 83. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

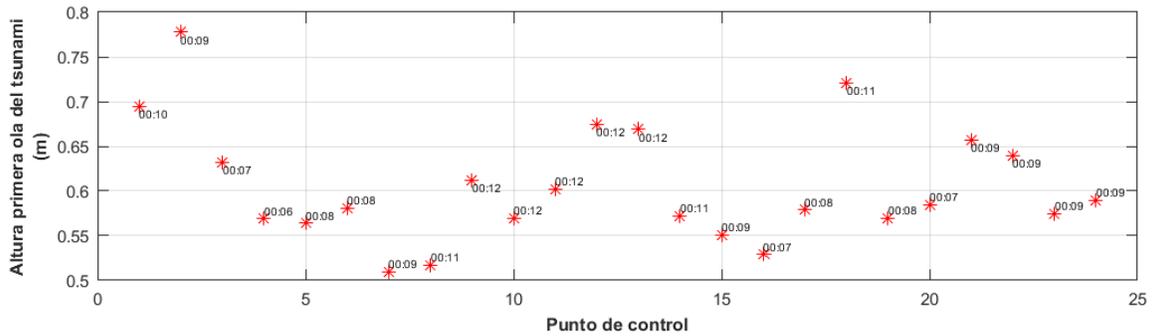


Figura 3. 84. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

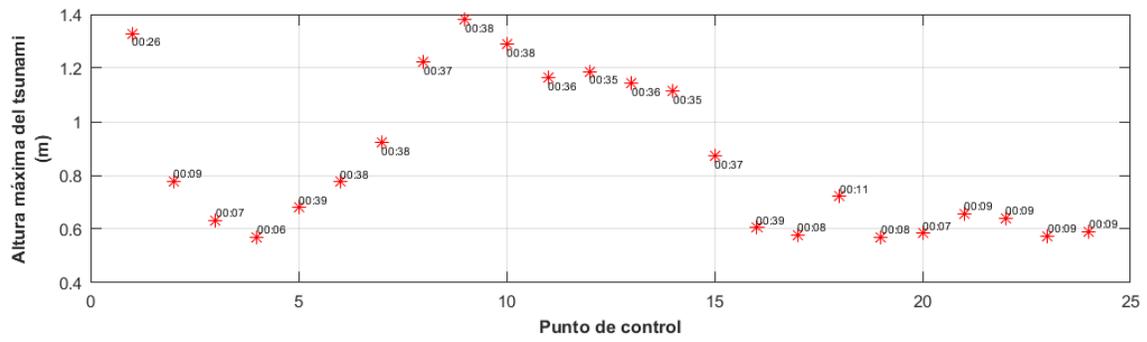


Figura 3. 85. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

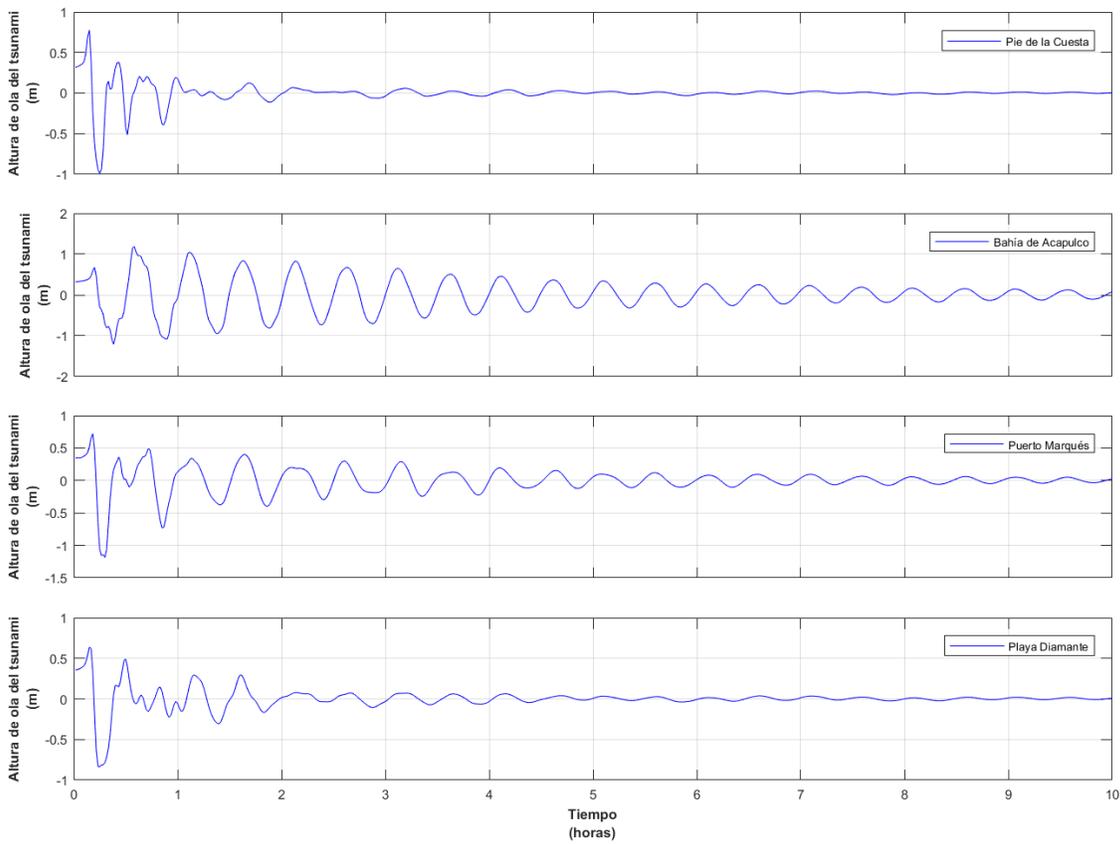


Figura 3. 86. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

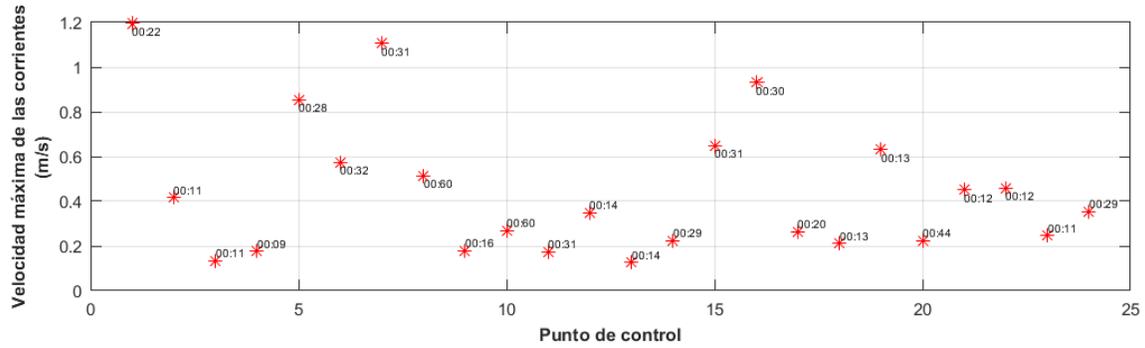


Figura 3. 87. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

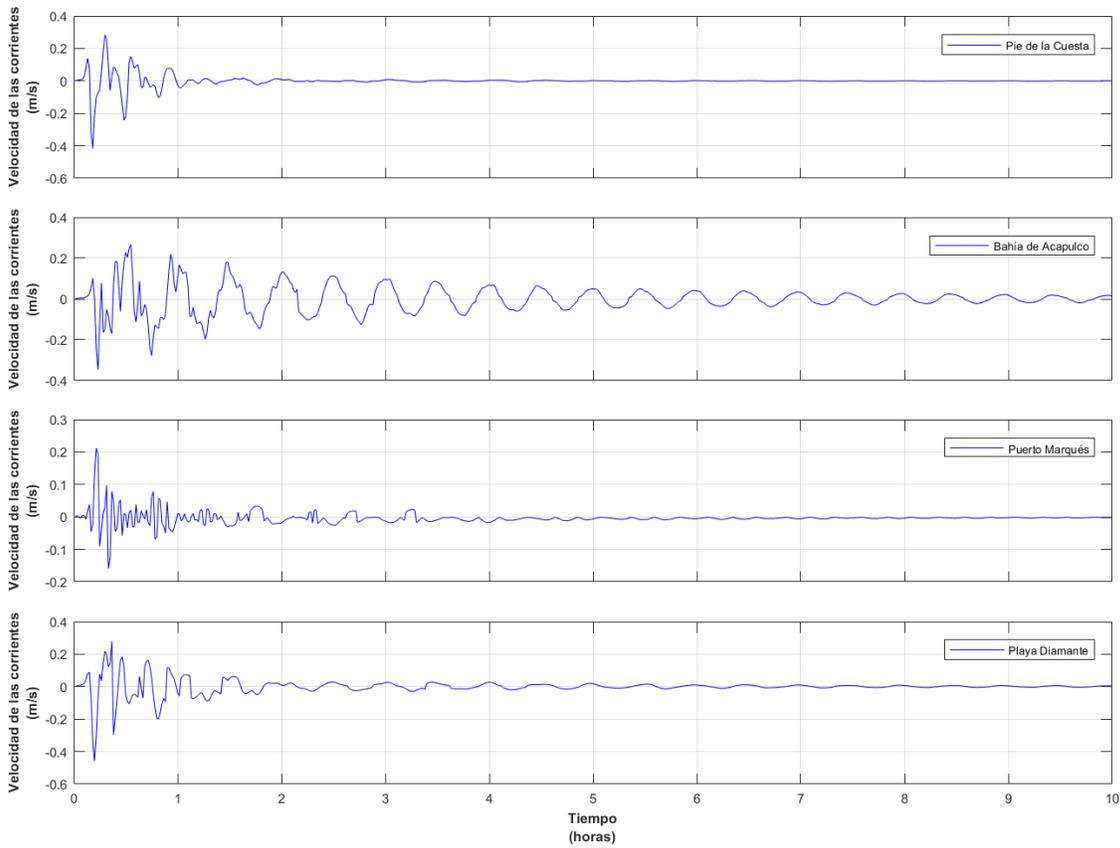


Figura 3. 88. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 15:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 5.2 m.

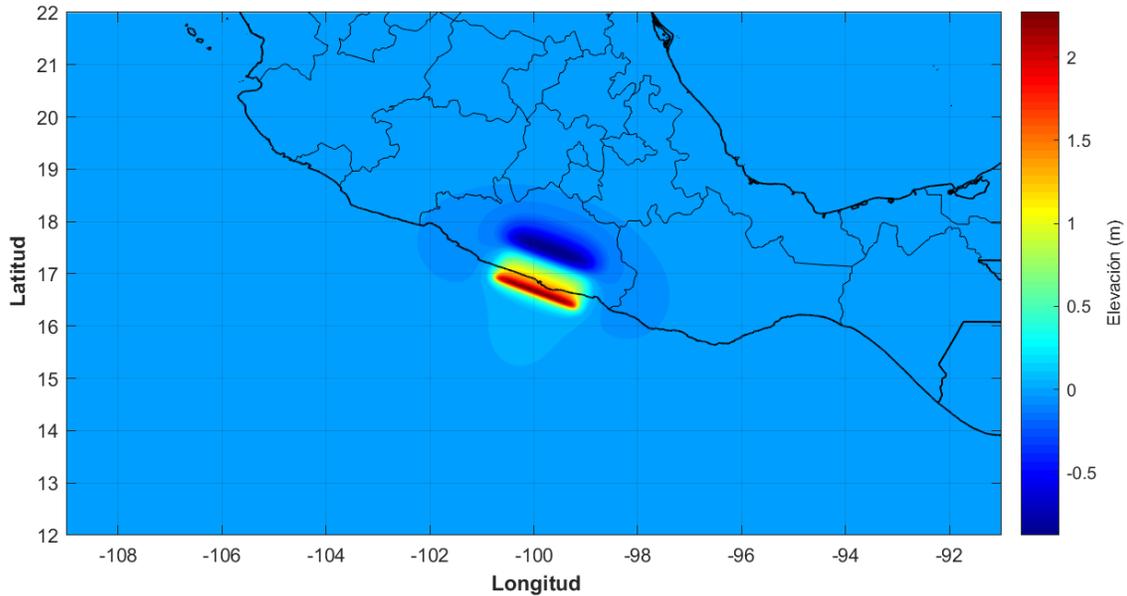


Figura 3. 89. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

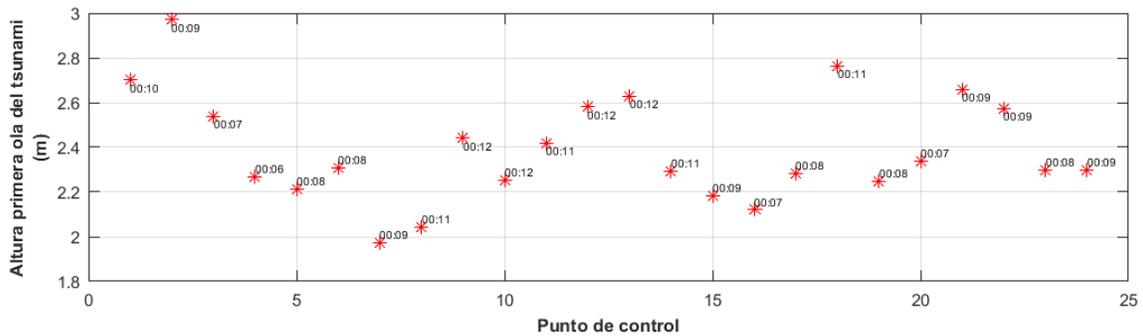


Figura 3. 90. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

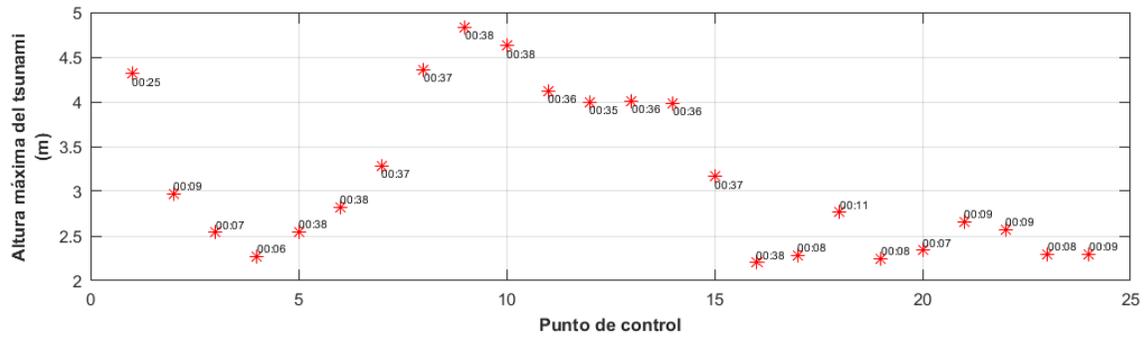


Figura 3. 91. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

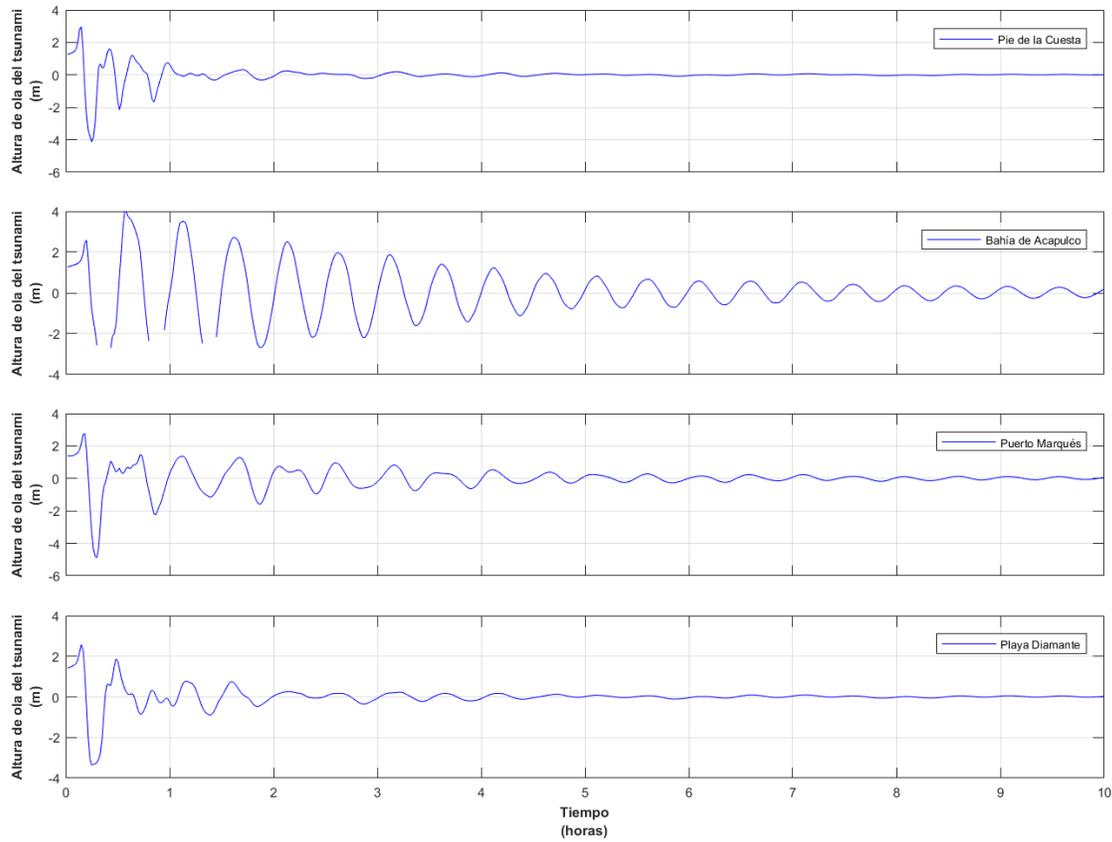


Figura 3. 92. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

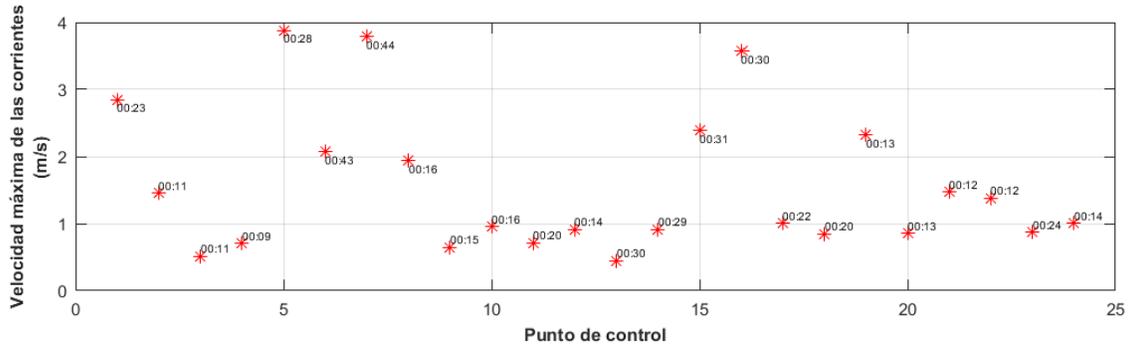


Figura 3. 93. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

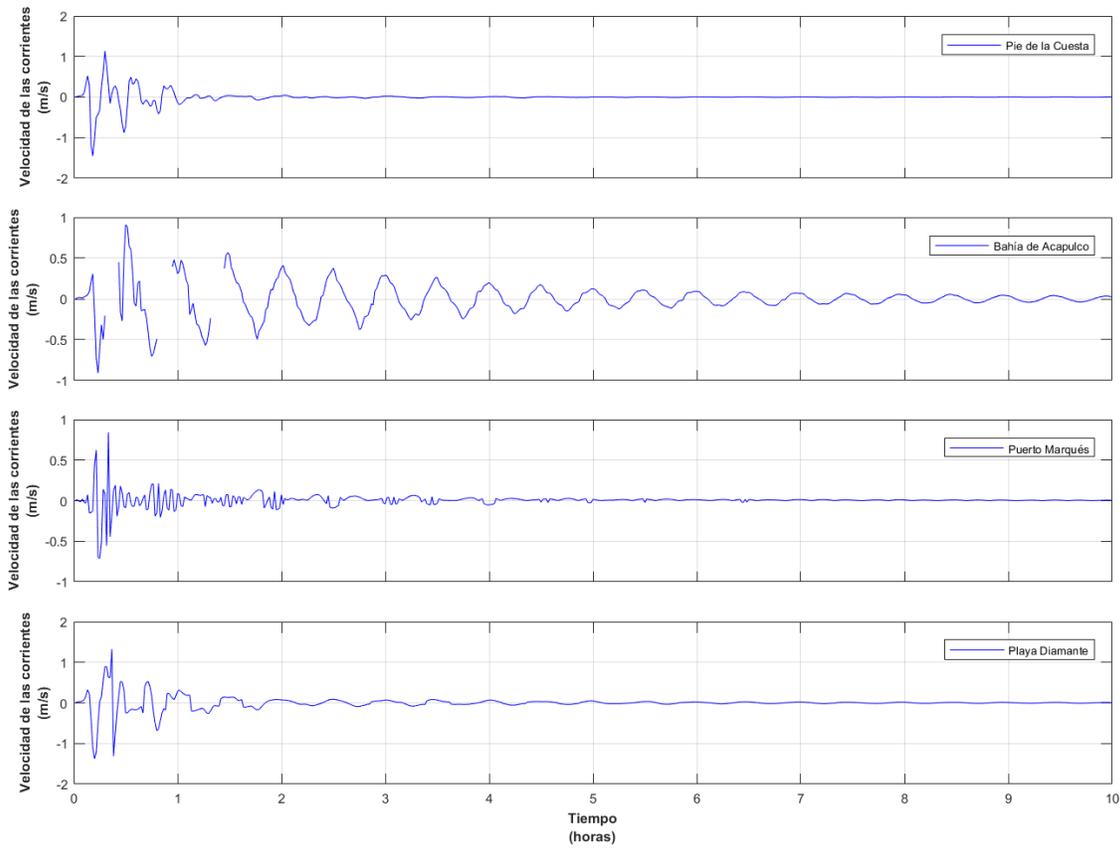


Figura 3. 94. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 16:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 29 m.

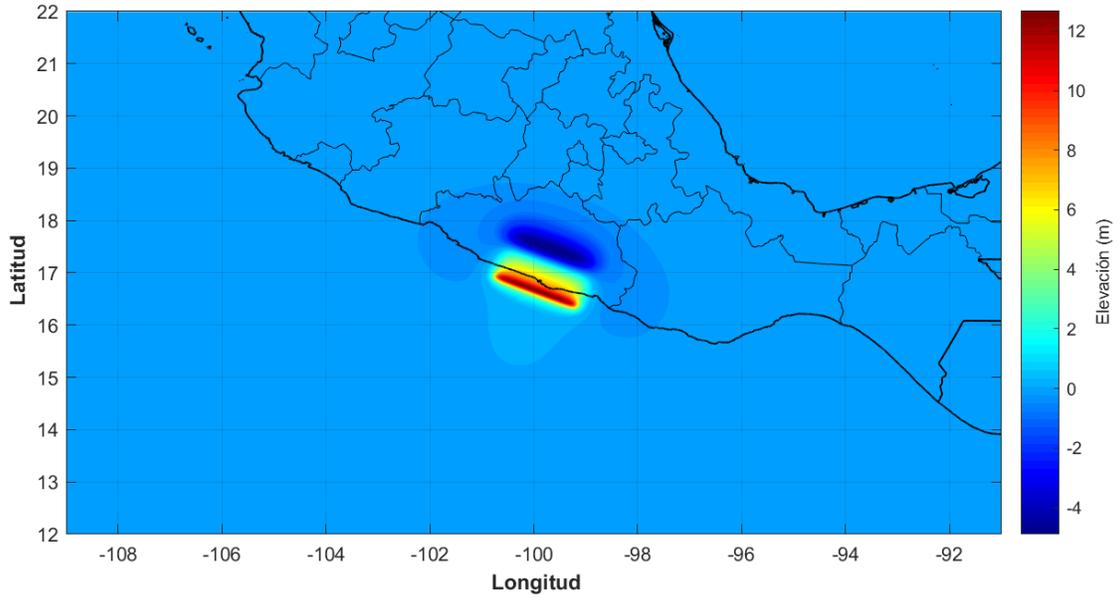


Figura 3. 95. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

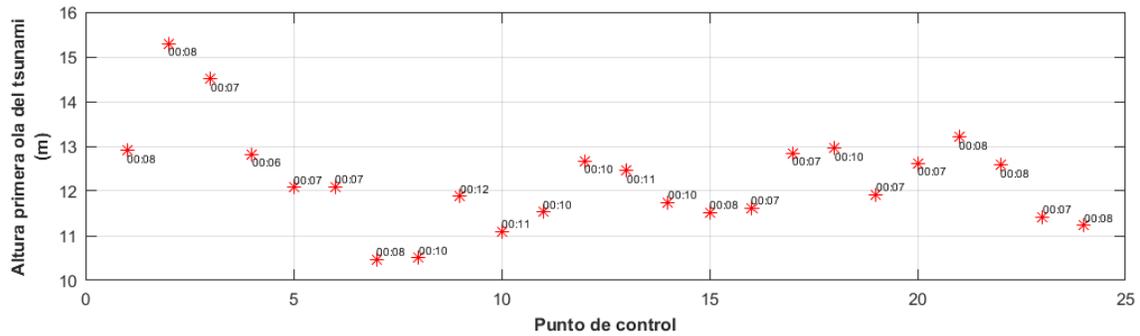


Figura 3. 96. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

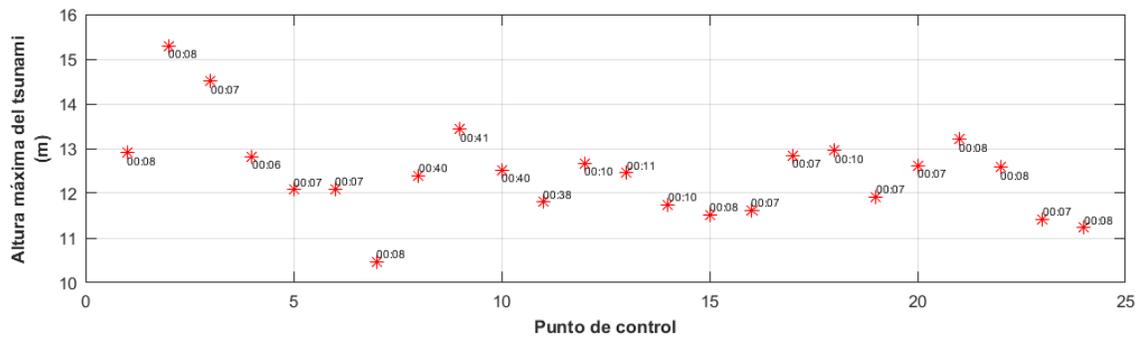


Figura 3. 97. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

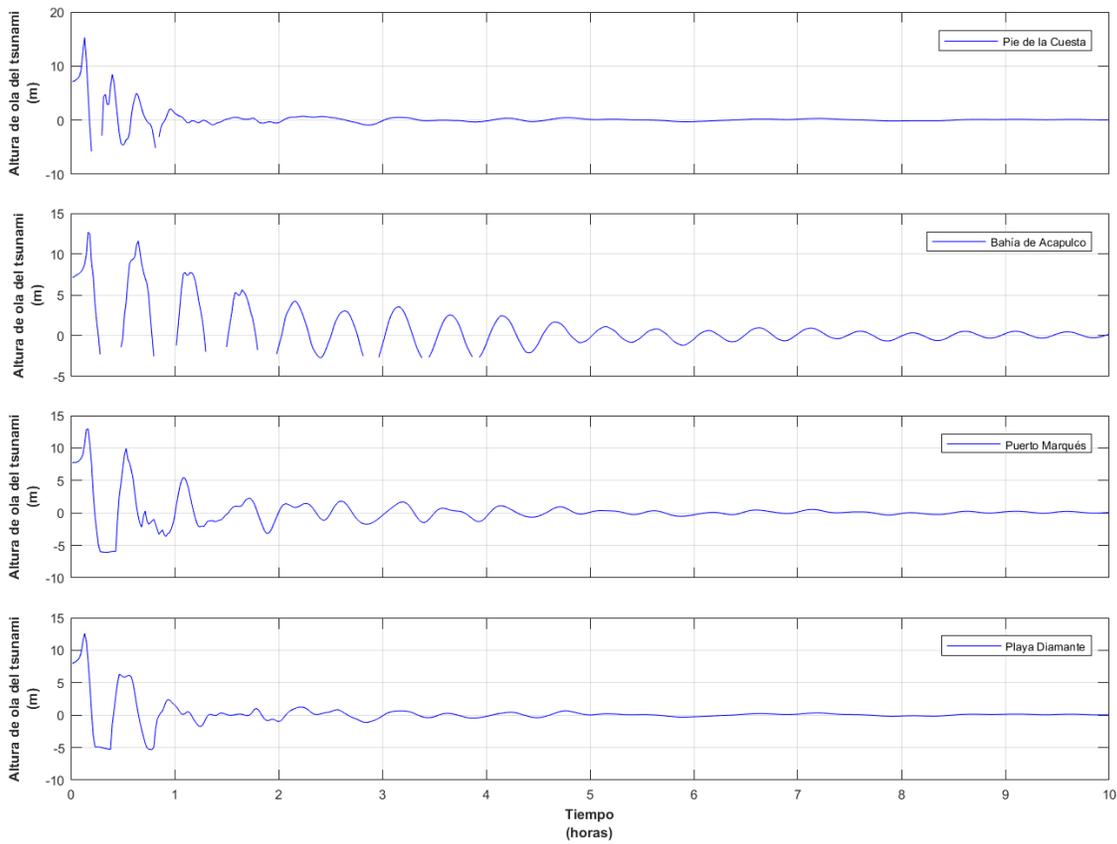


Figura 3. 98. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

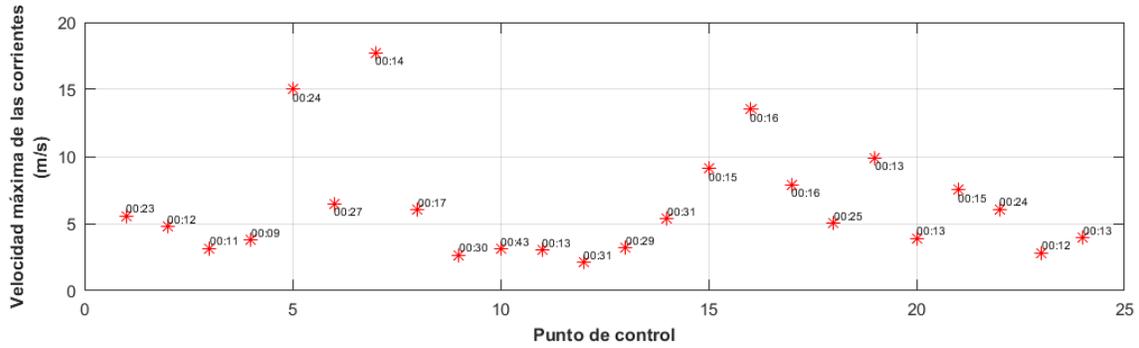


Figura 3. 99. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

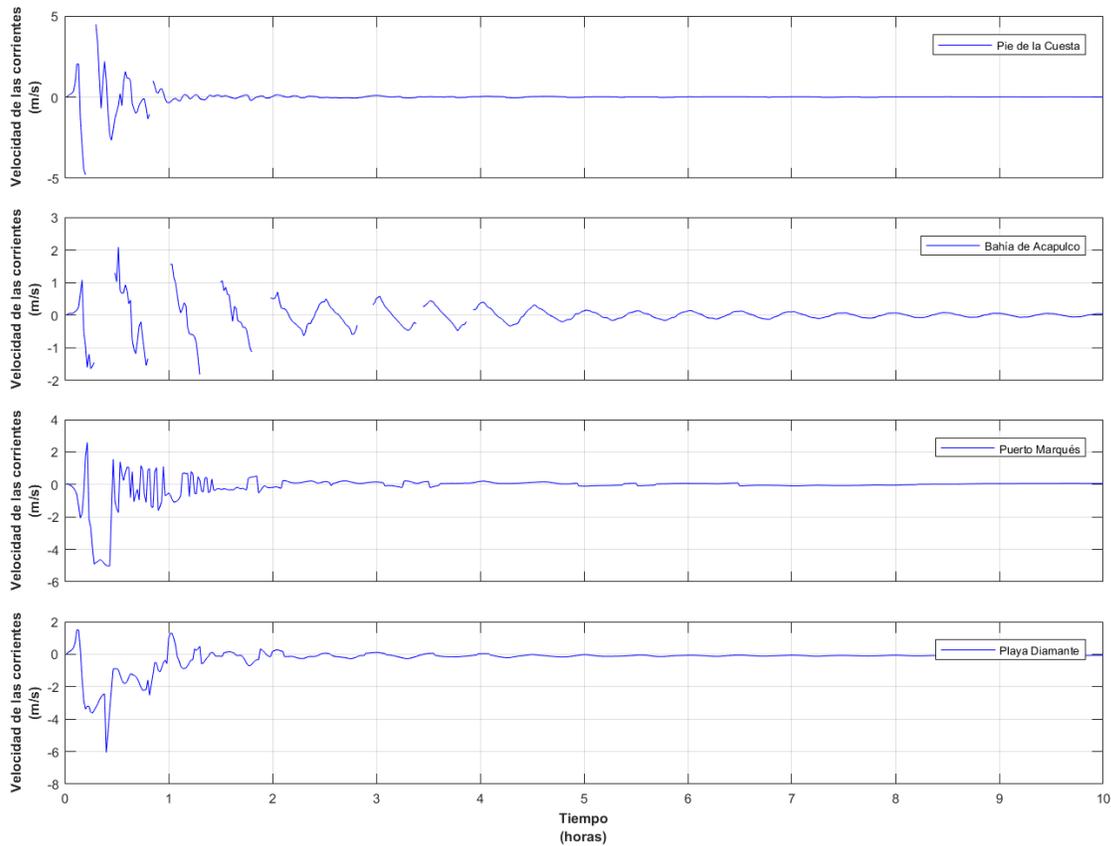


Figura 3. 100. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 17:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

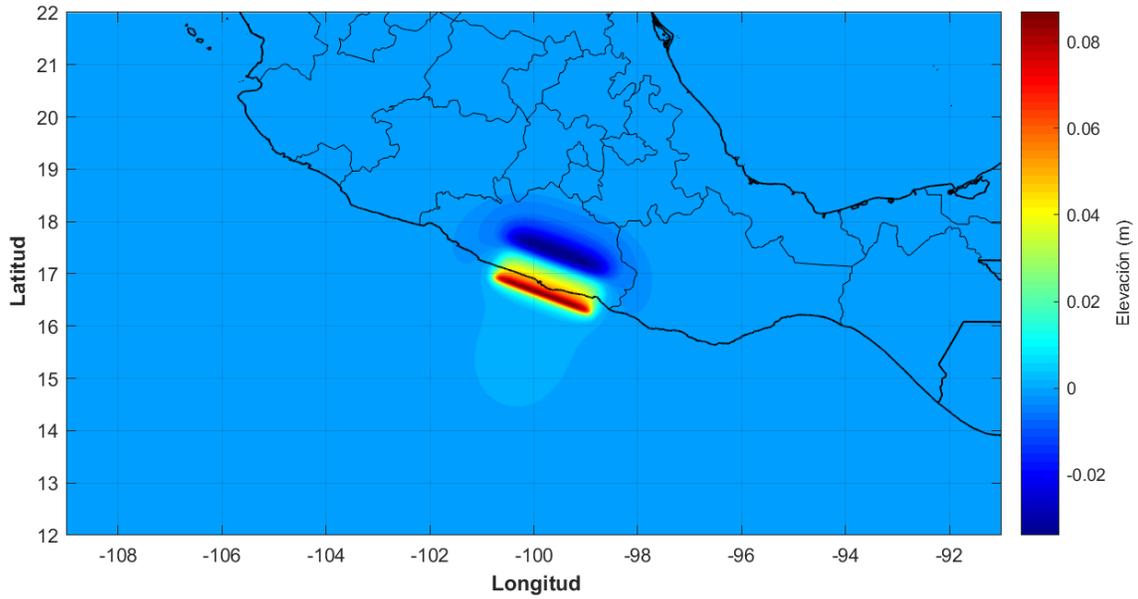


Figura 3. 101. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

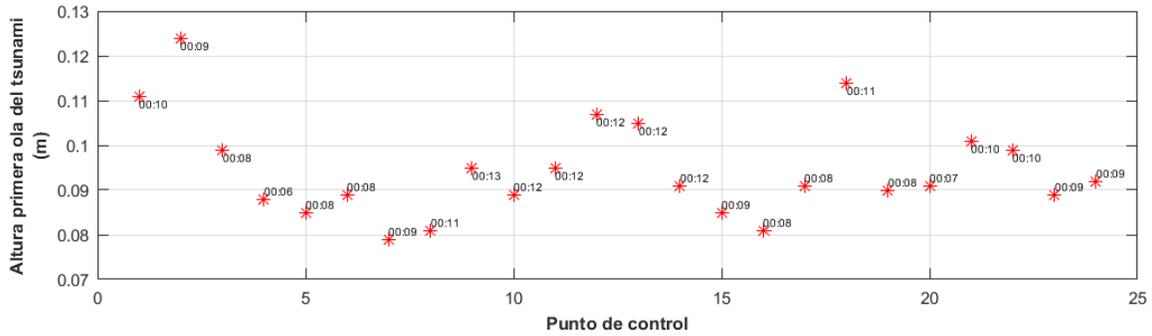


Figura 3. 102. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

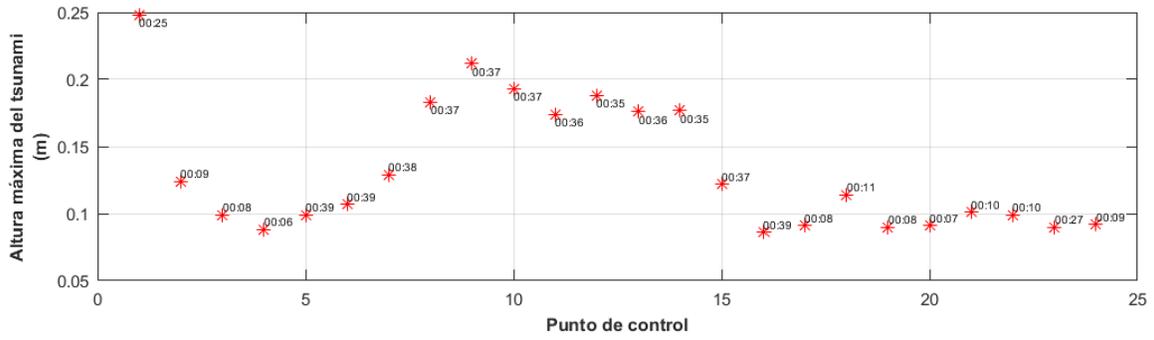


Figura 3. 103. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

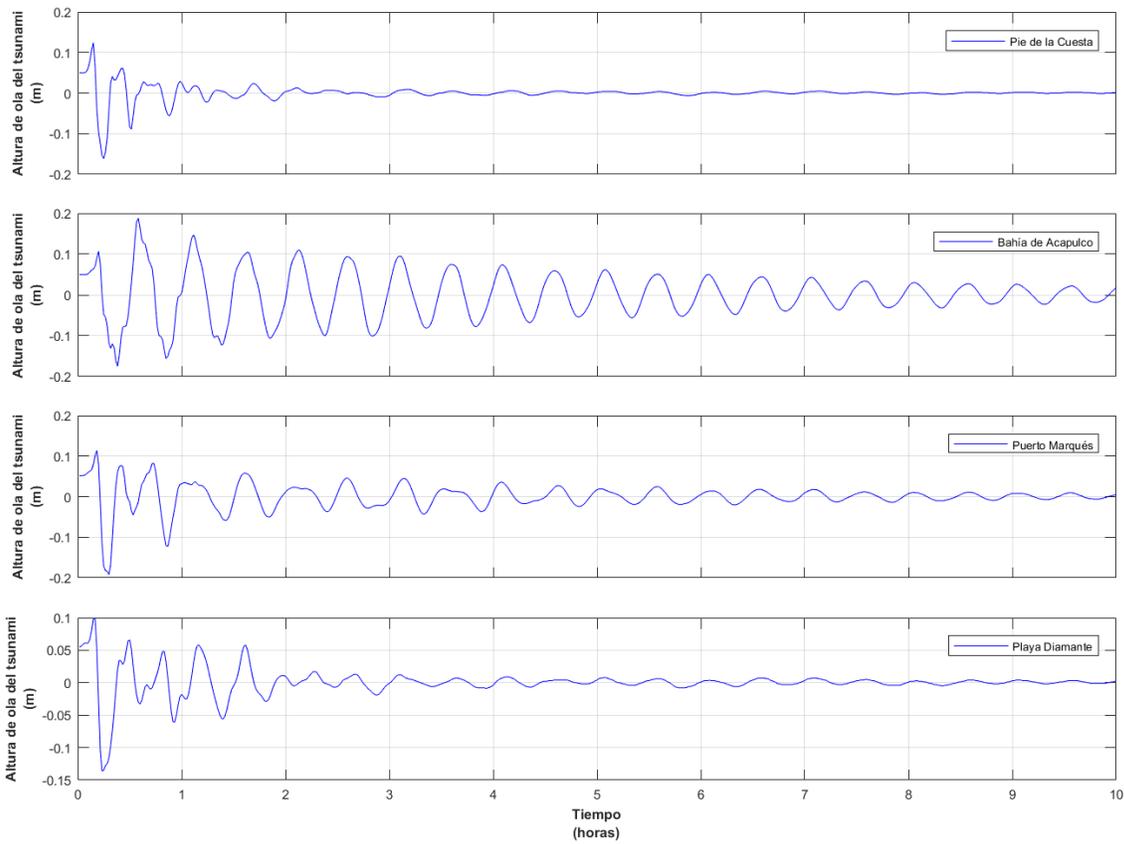


Figura 3. 104. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

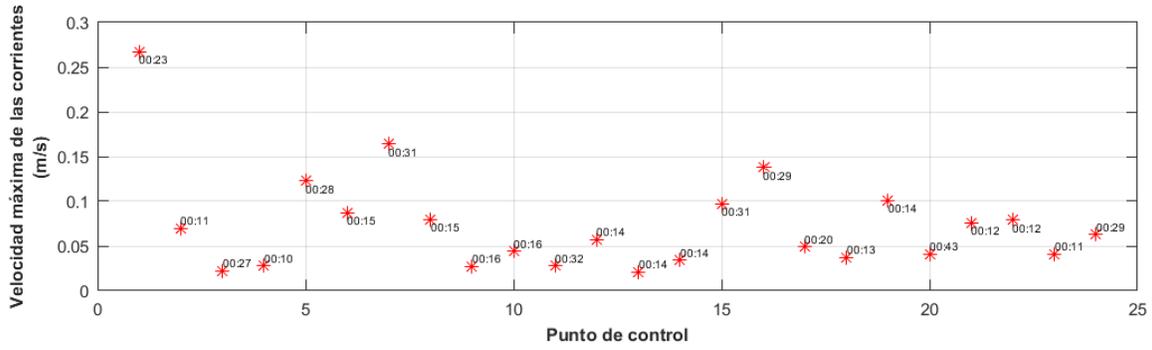


Figura 3. 105. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

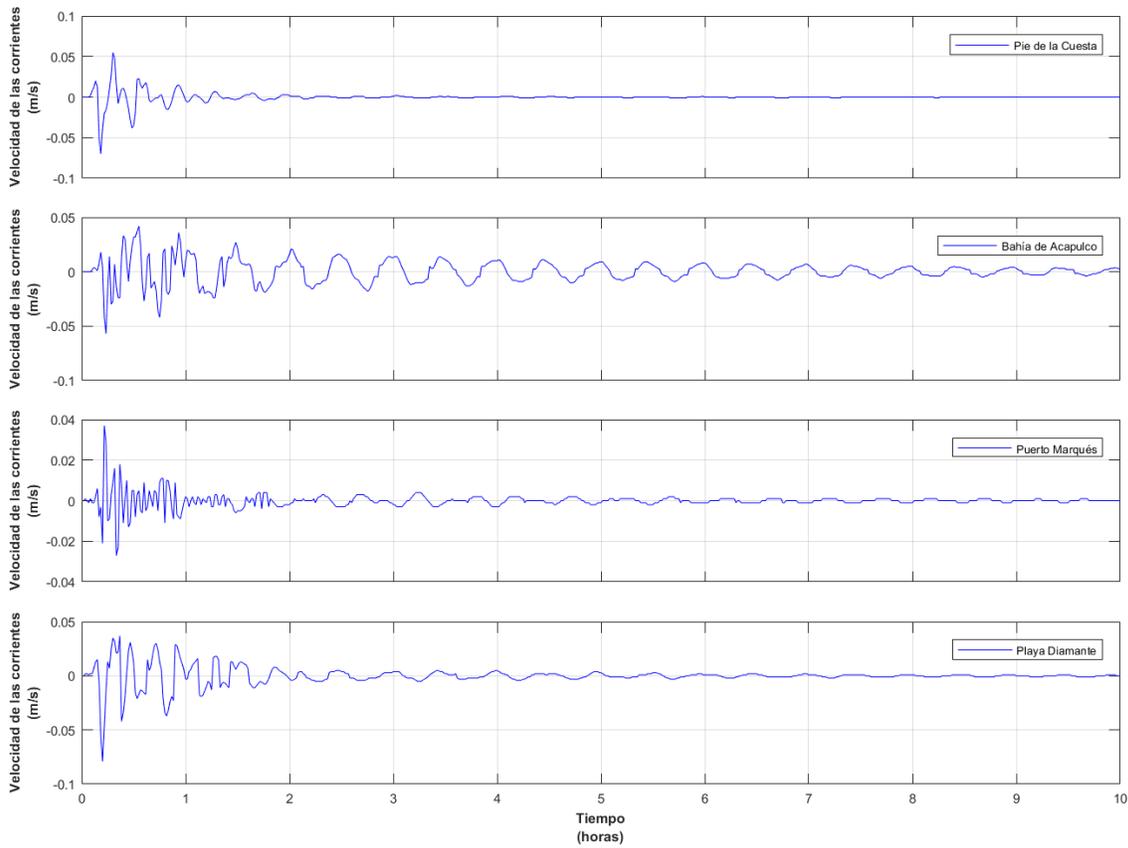


Figura 3. 106. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 18:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.2 m.

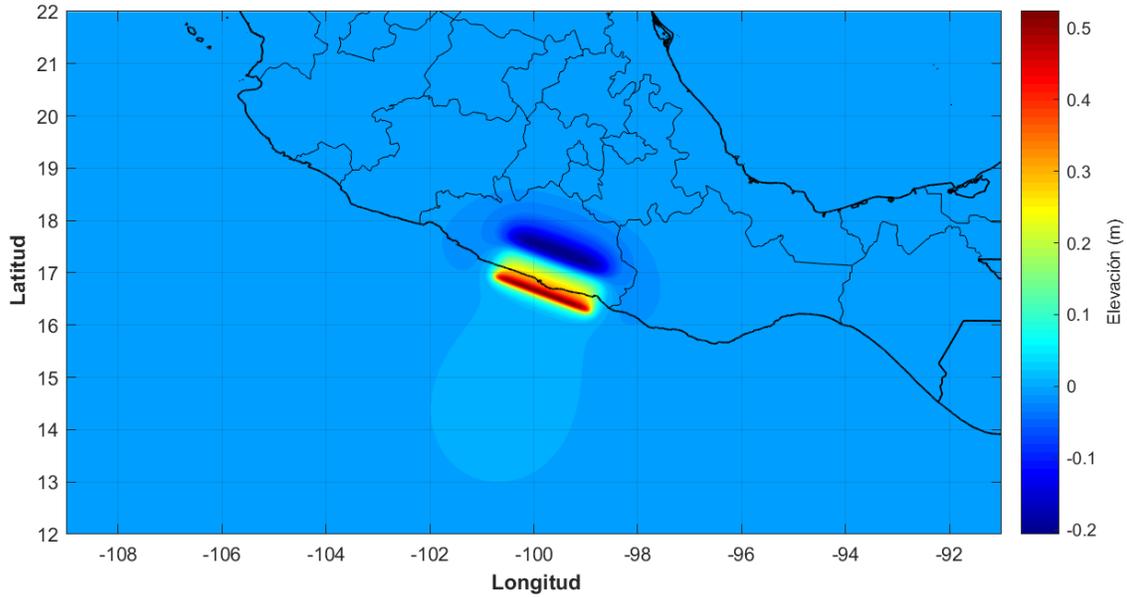


Figura 3. 107. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

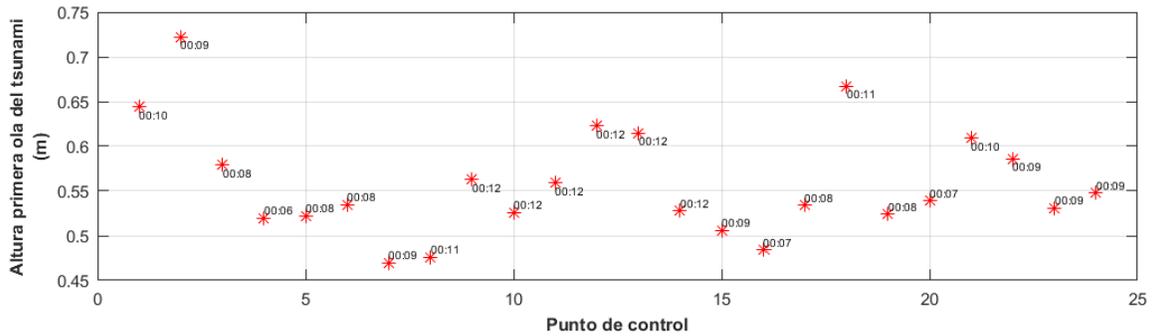


Figura 3. 108. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

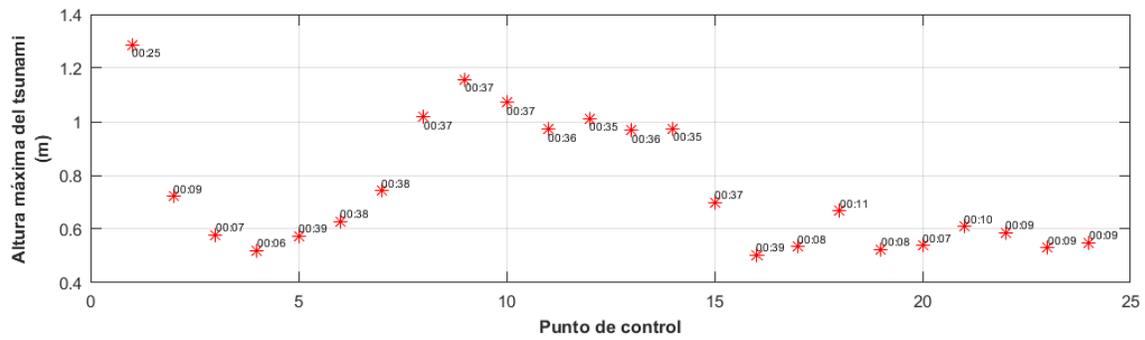


Figura 3. 109. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

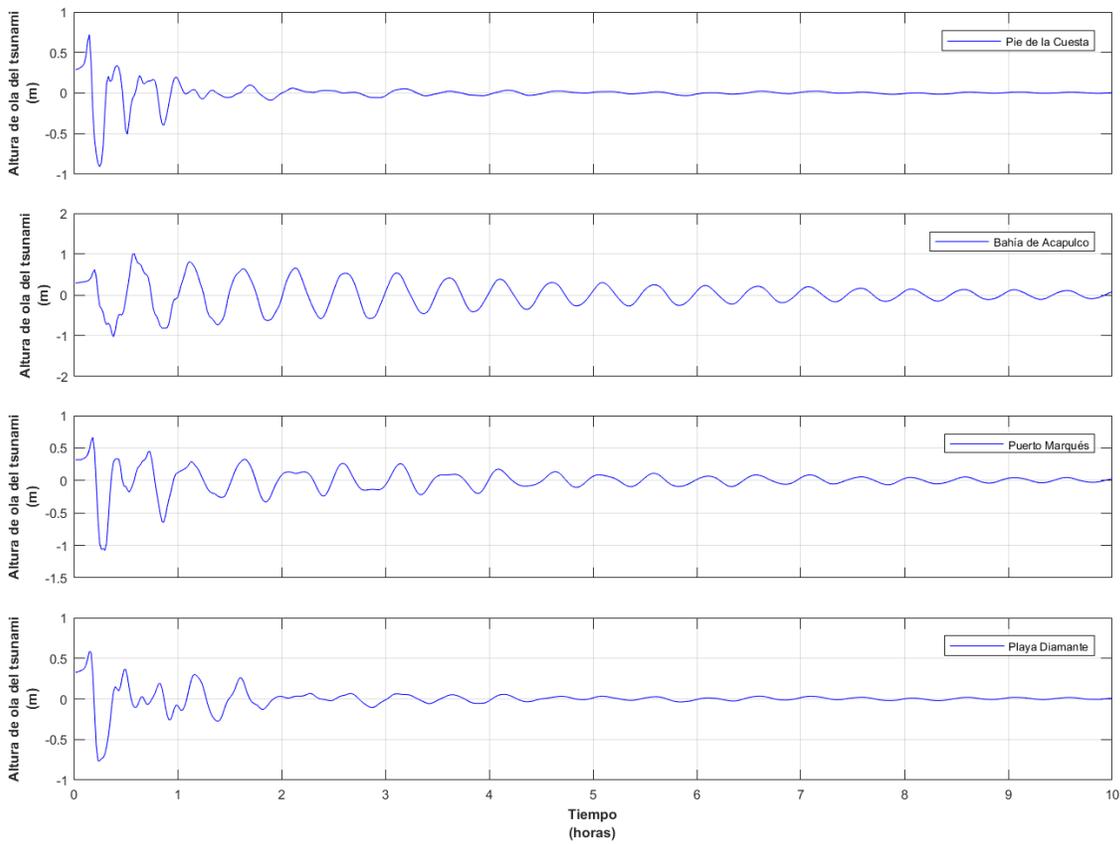


Figura 3. 110. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

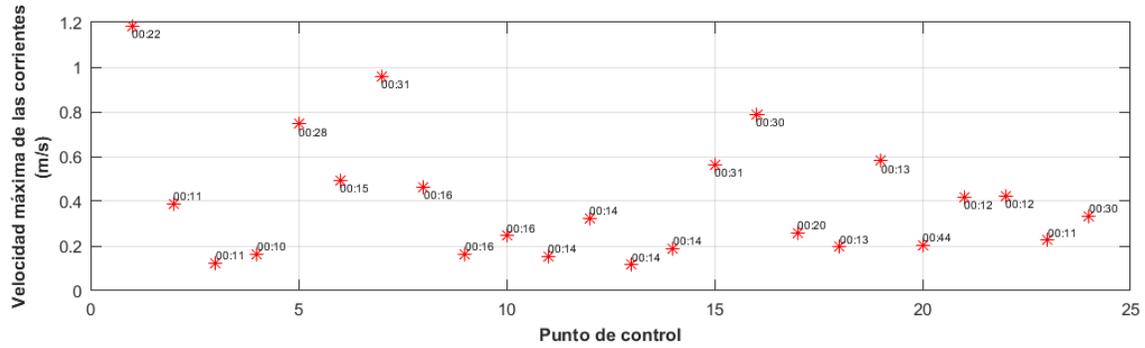


Figura 3. 111. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

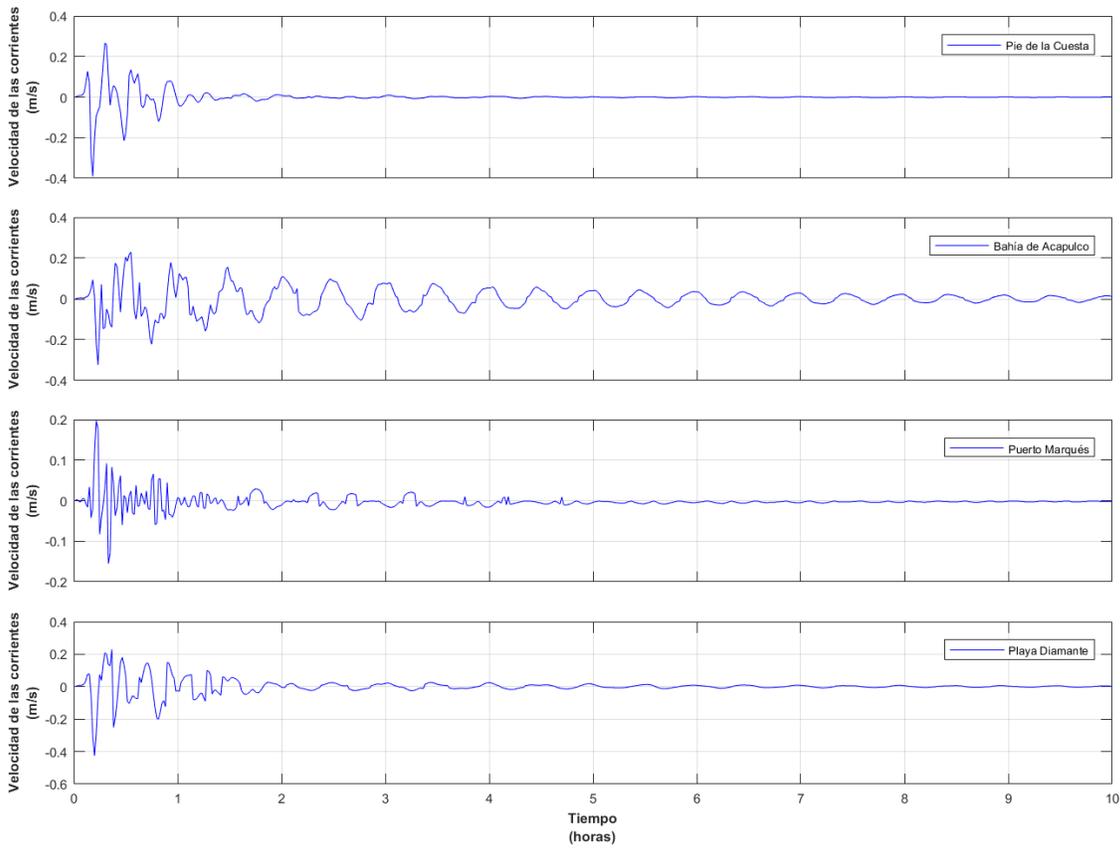


Figura 3. 112. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 19:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 4.5 m.

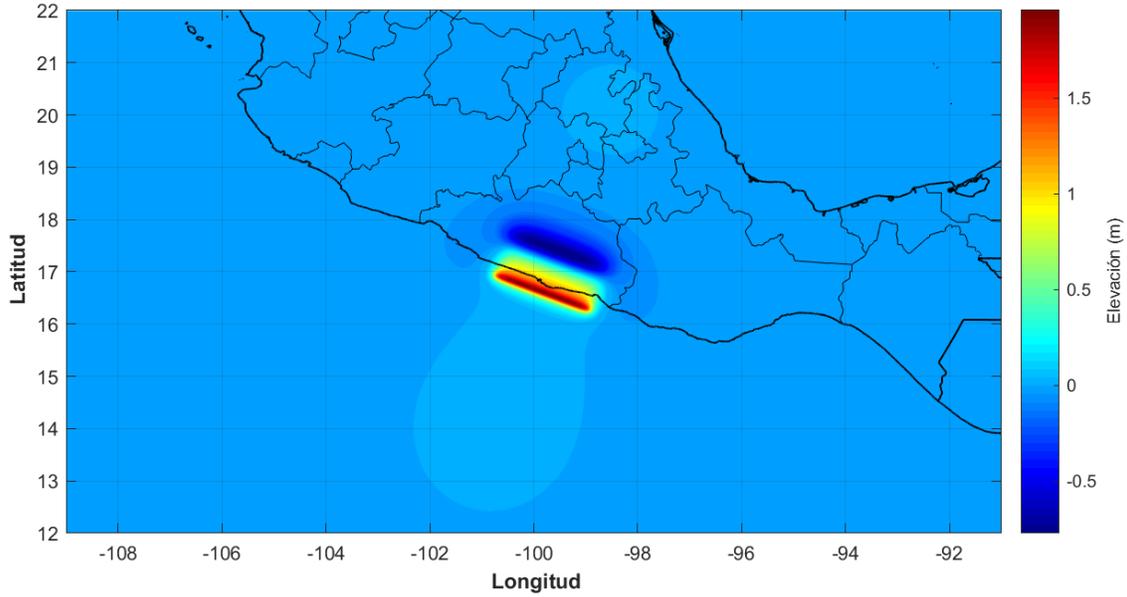


Figura 3. 113. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

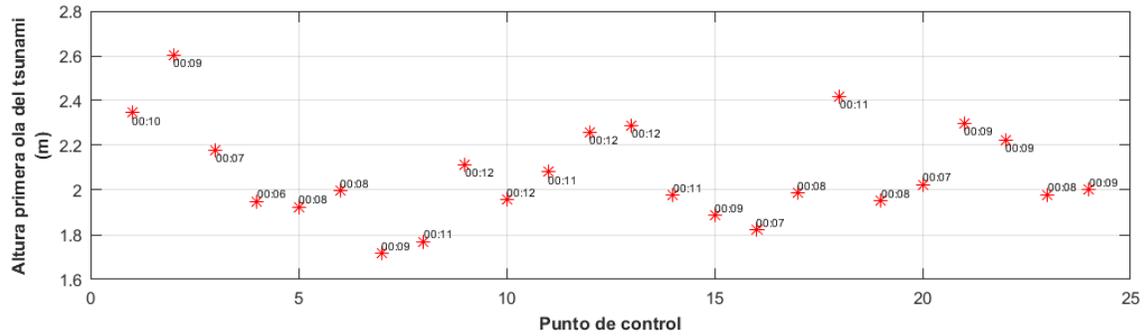


Figura 3. 114. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

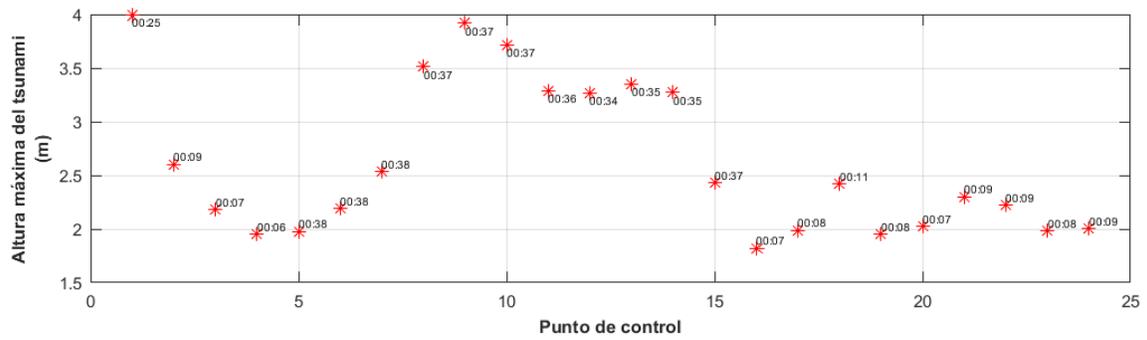


Figura 3. 115. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

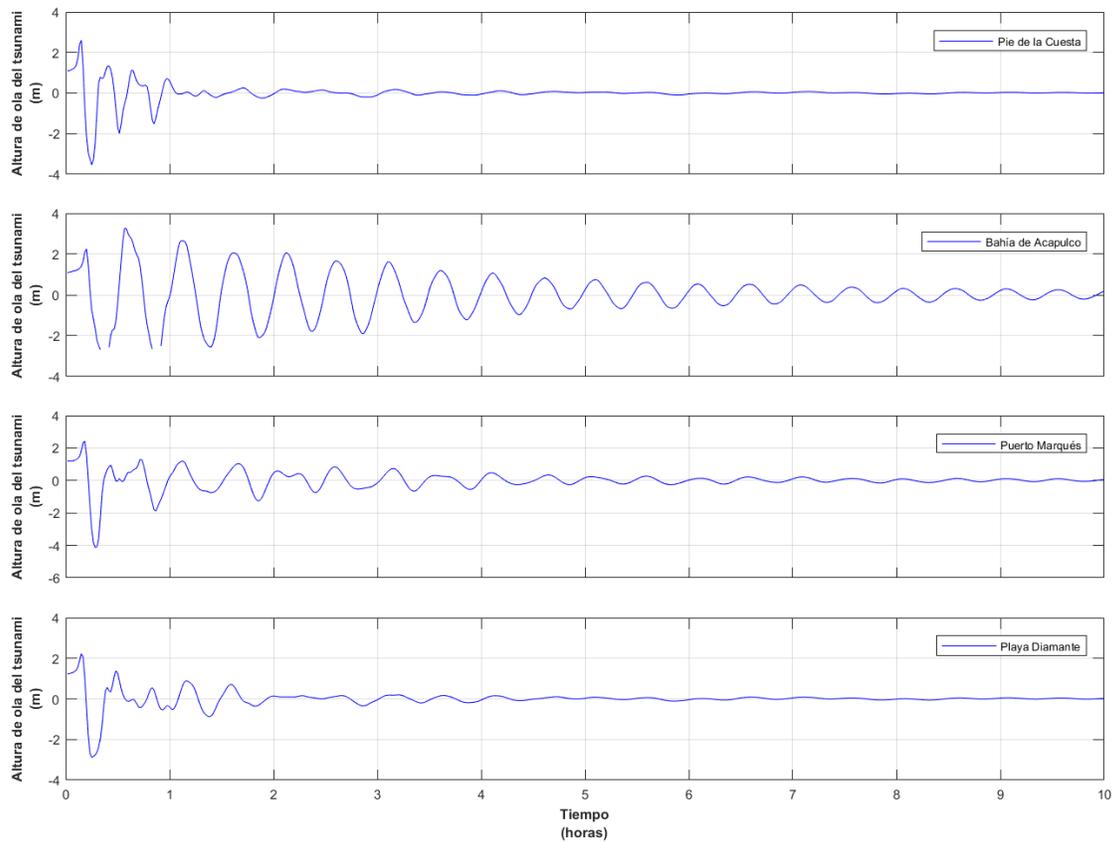


Figura 3. 116. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

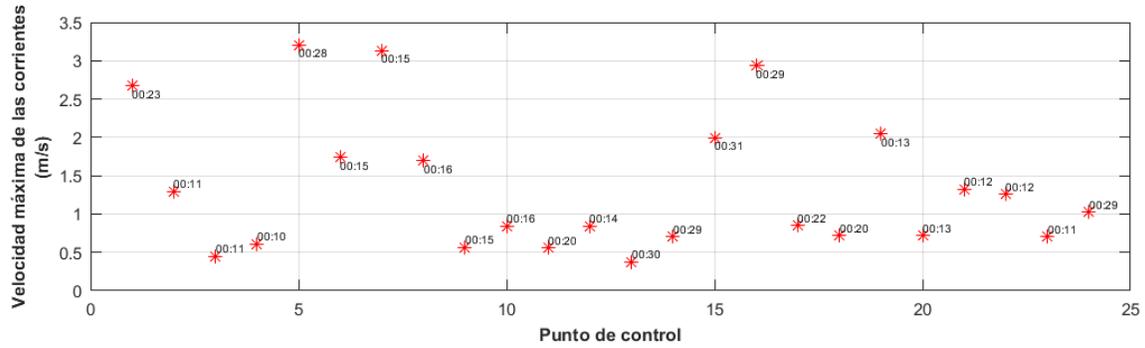


Figura 3. 117. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

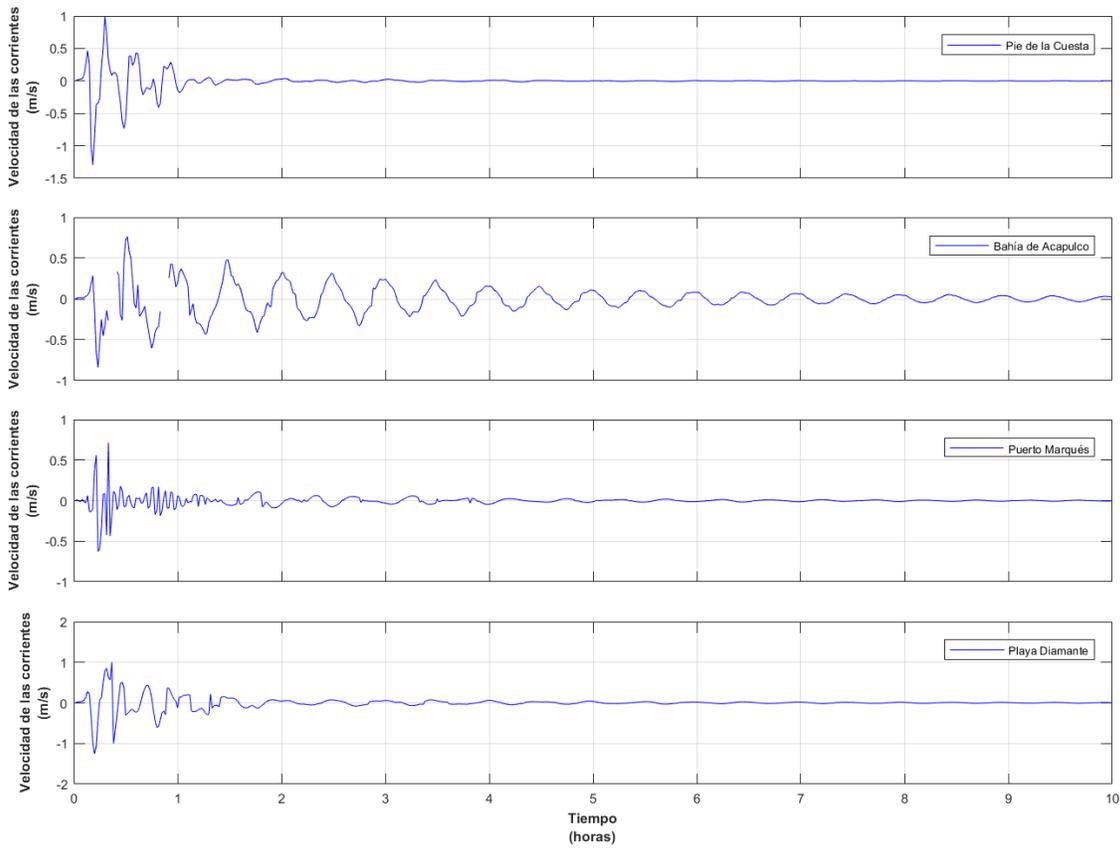


Figura 3. 118. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 20:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 24.9 m.

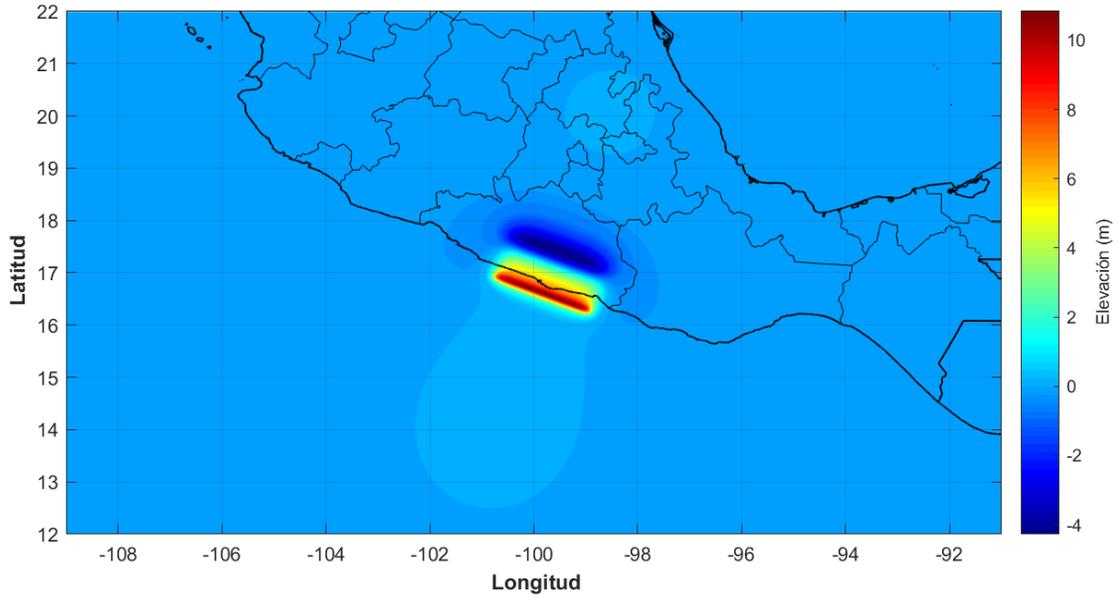


Figura 3. 119. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

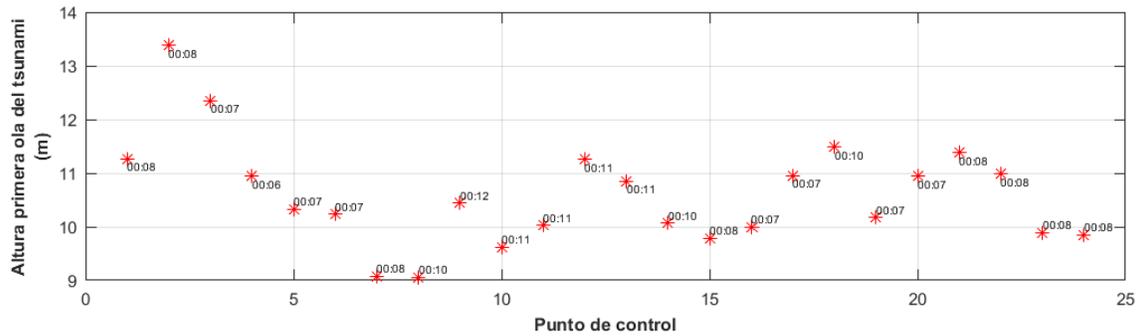


Figura 3. 120. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

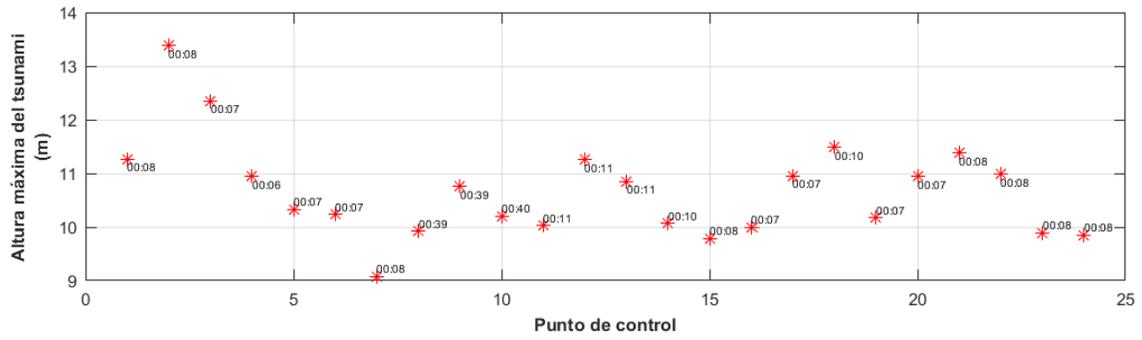


Figura 3. 121. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

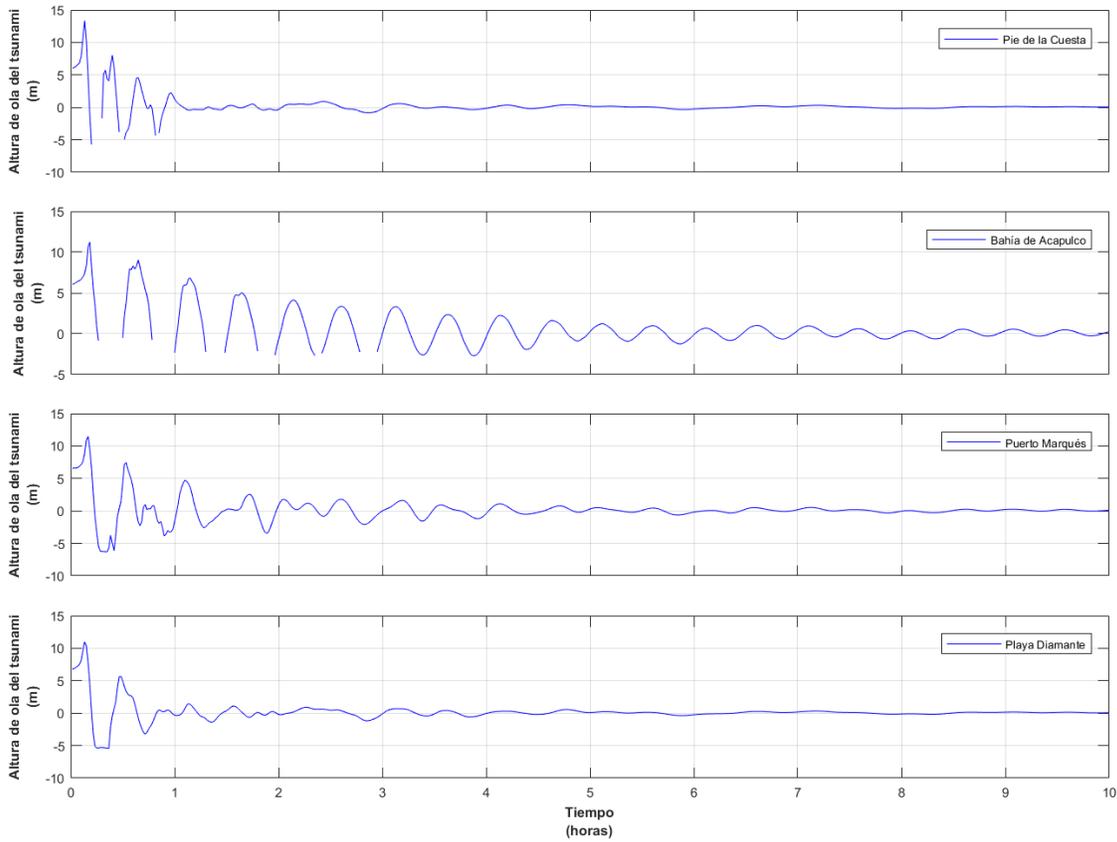


Figura 3. 122. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

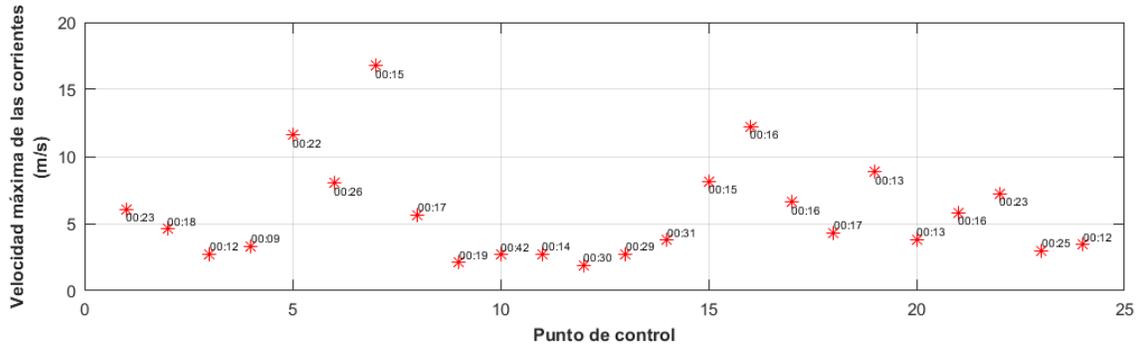


Figura 3. 123. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

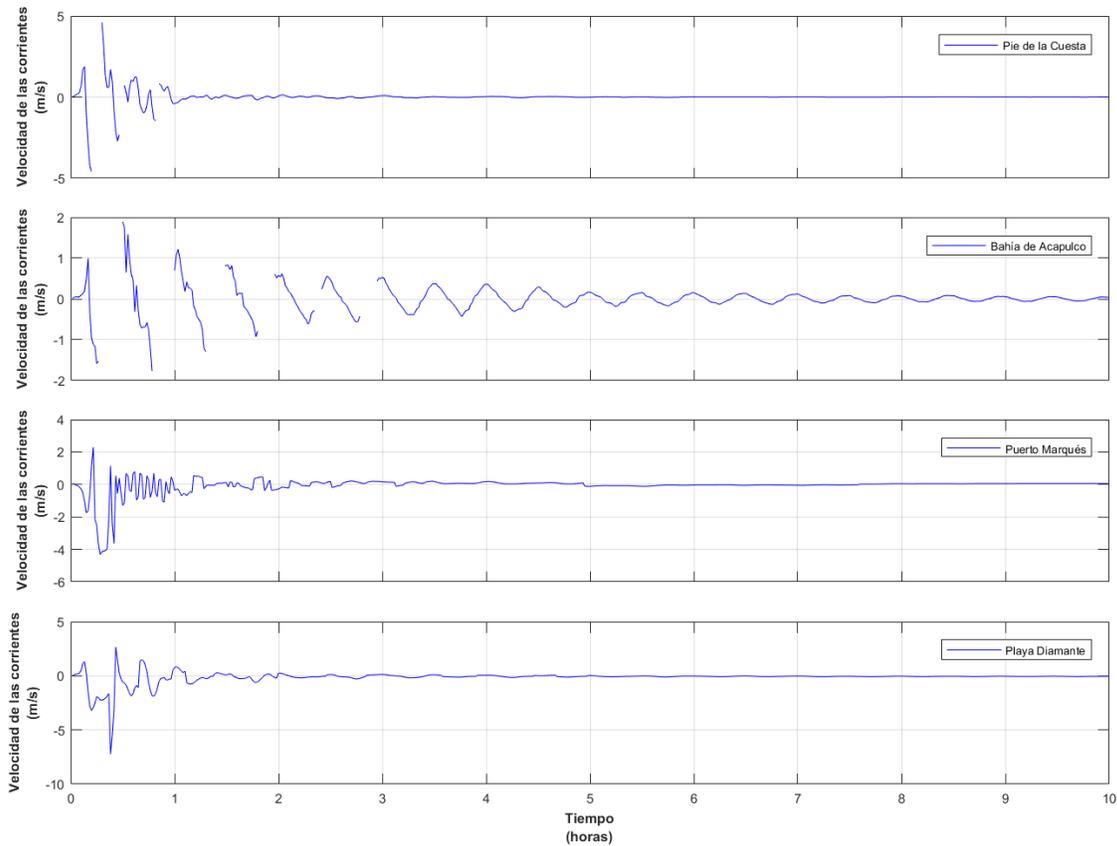


Figura 3. 124. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 21:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

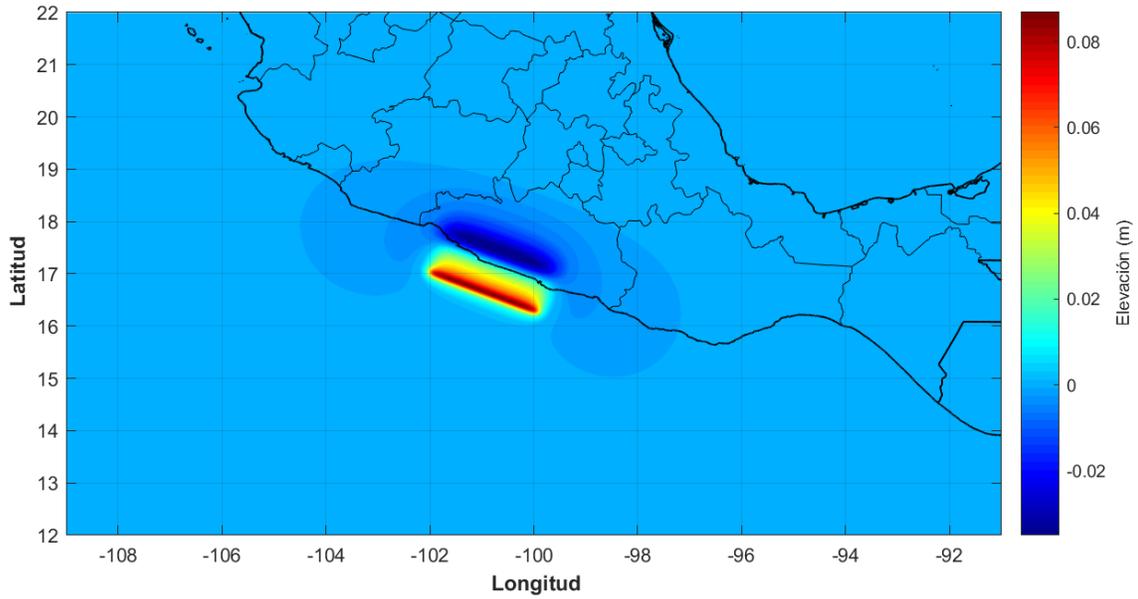


Figura 3. 125. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

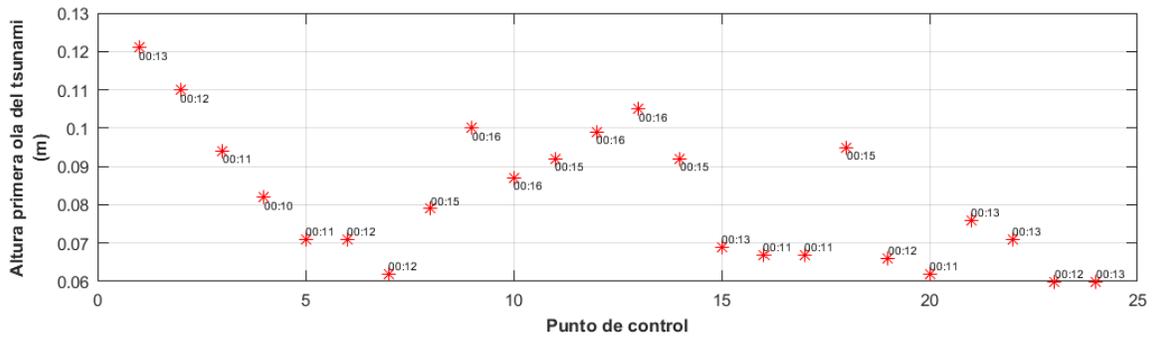


Figura 3. 126. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

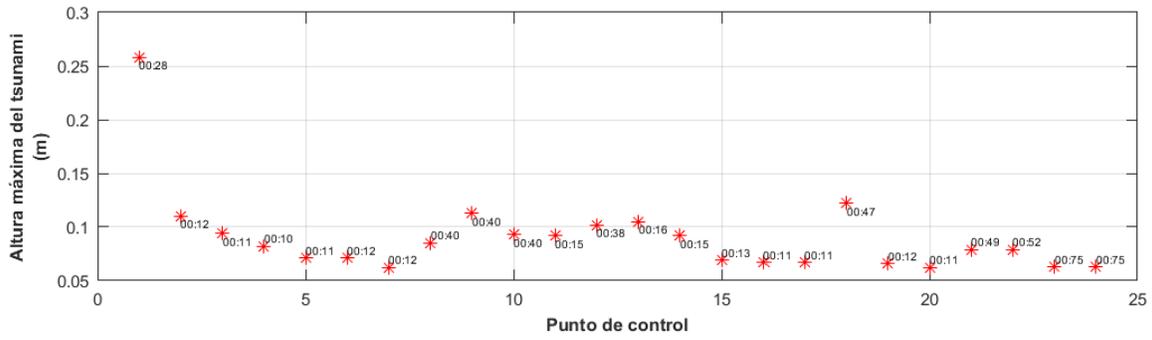


Figura 3. 127. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

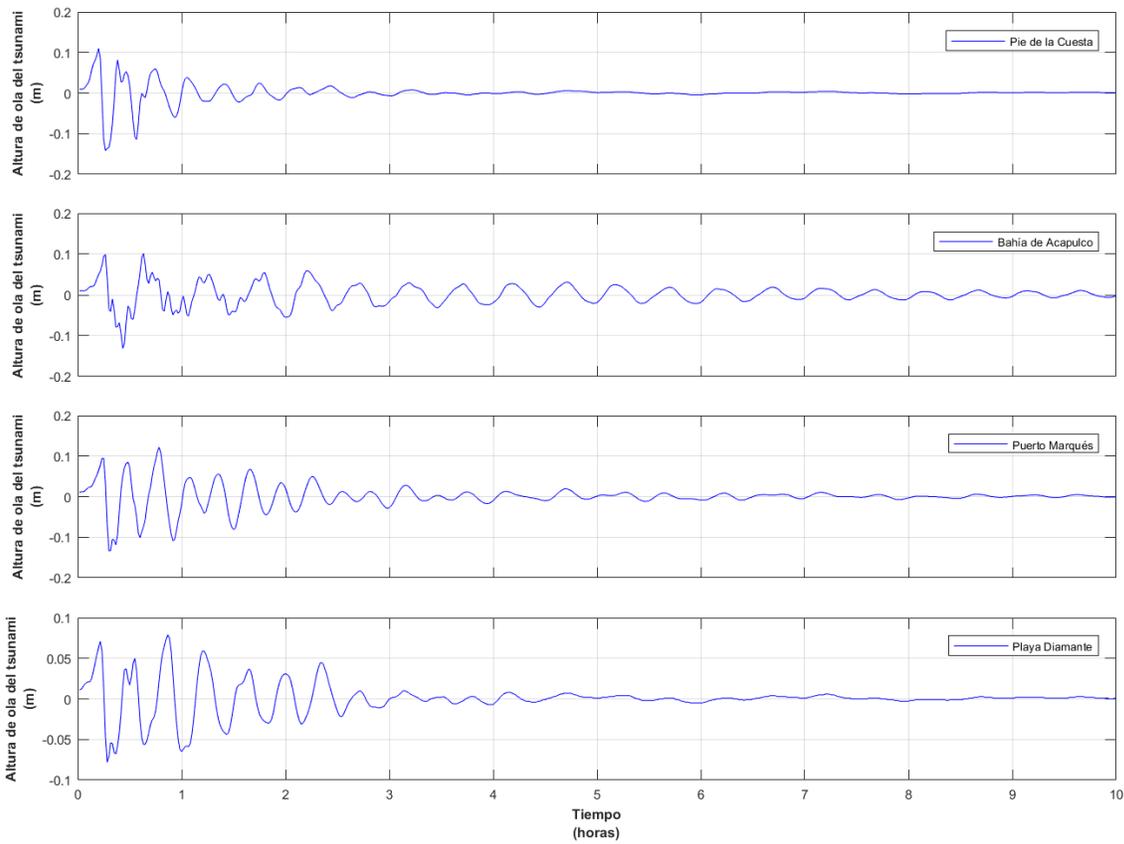


Figura 3. 128. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

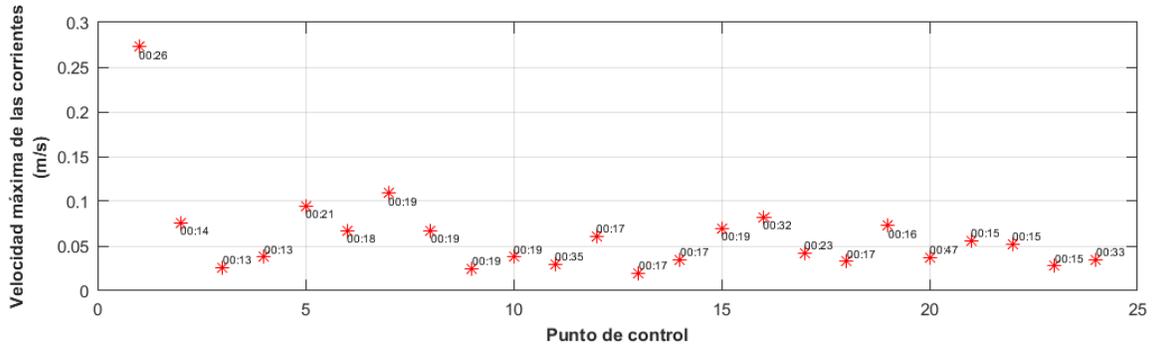


Figura 3. 129. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

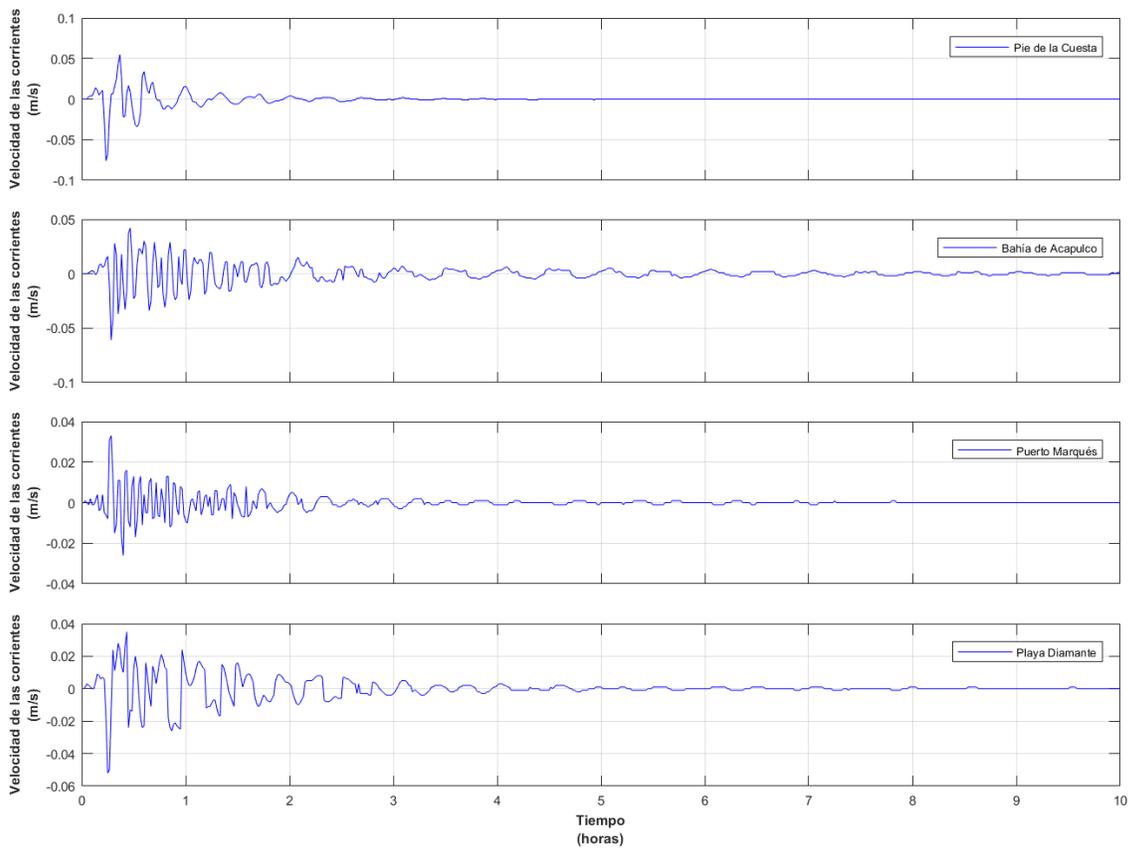


Figura 3. 130. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 22:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.0 m.

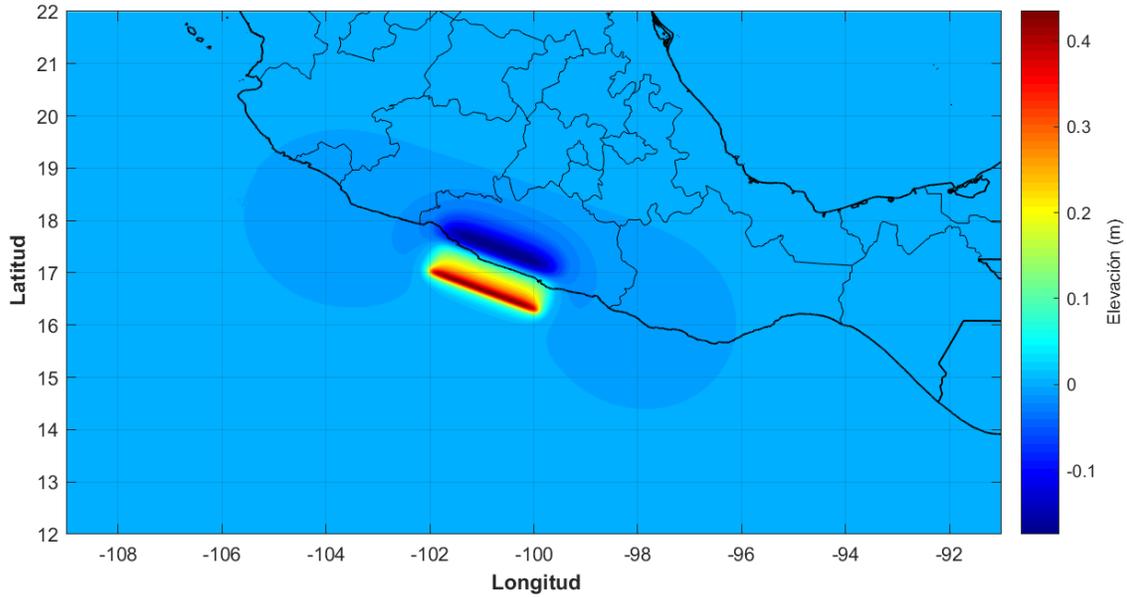


Figura 3. 131. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

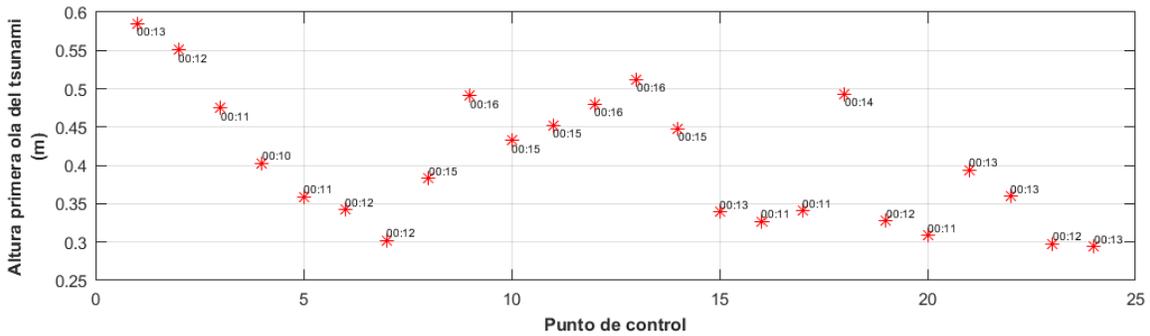


Figura 3. 132. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

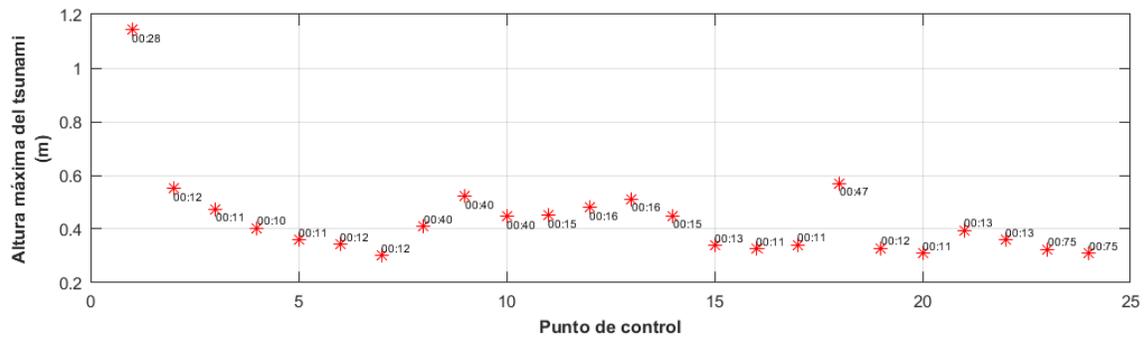


Figura 3. 133. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

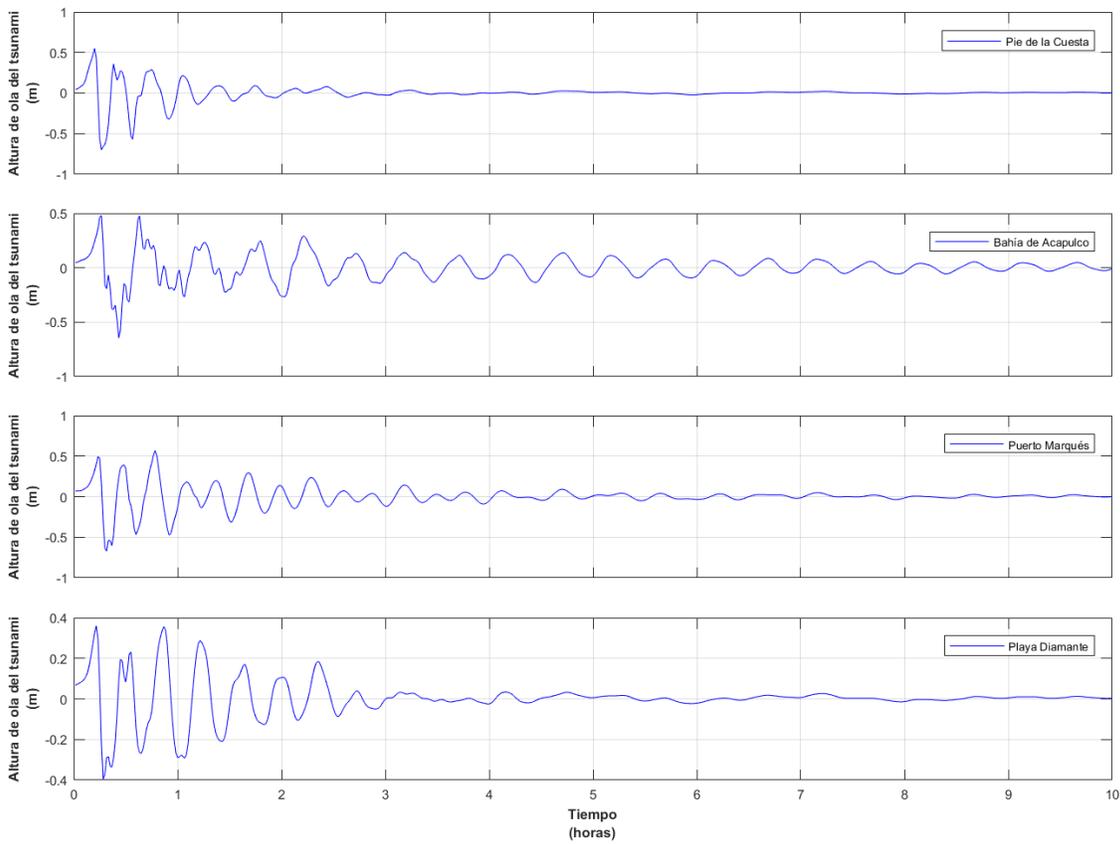


Figura 3. 134. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

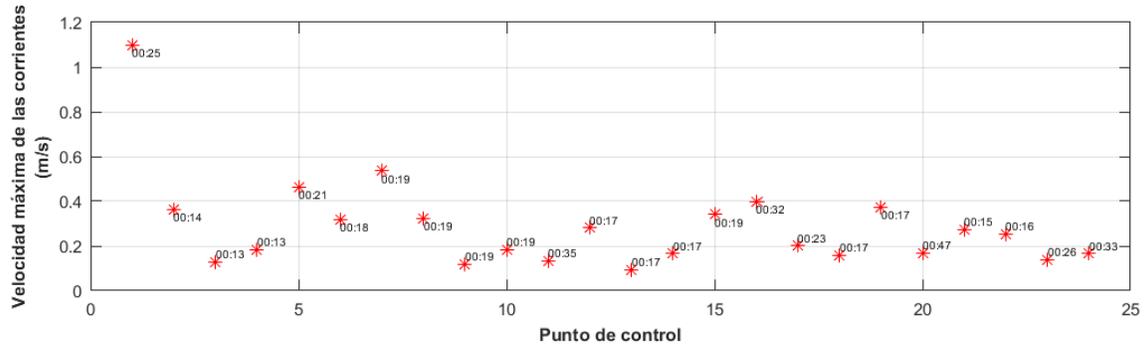


Figura 3. 135. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

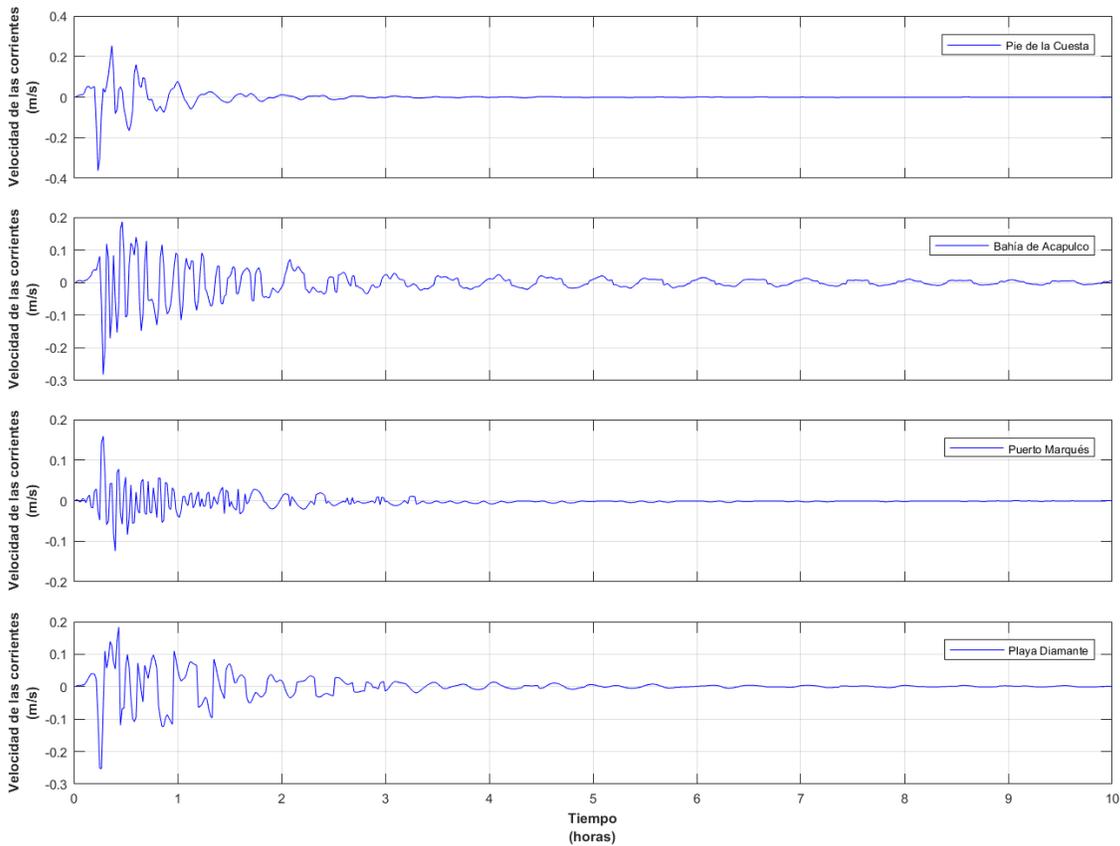


Figura 3. 136. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 23:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.9 m.

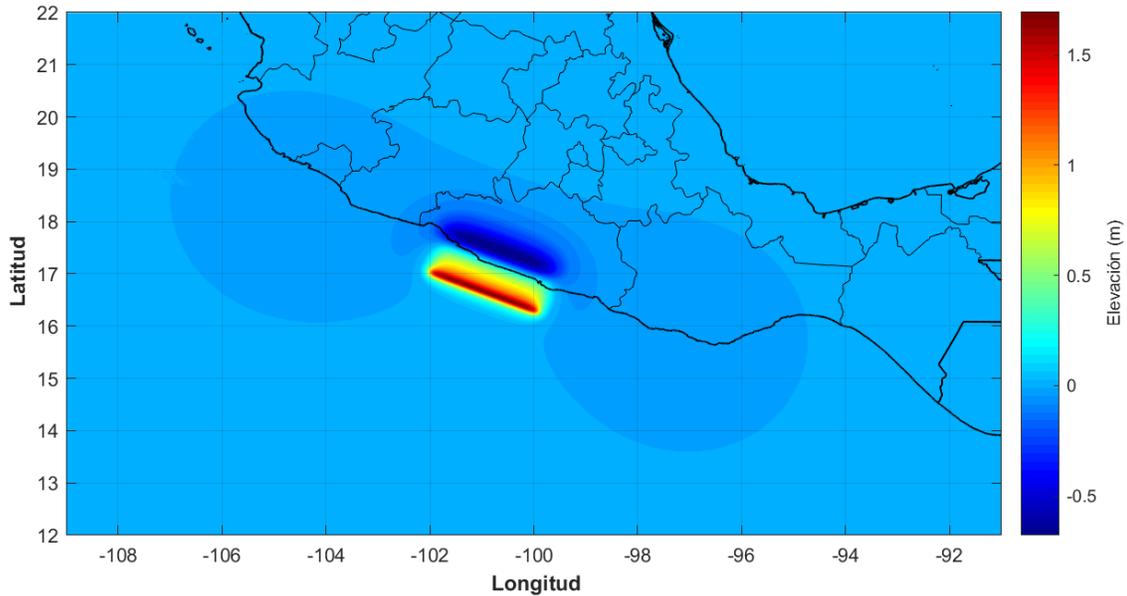


Figura 3. 137. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

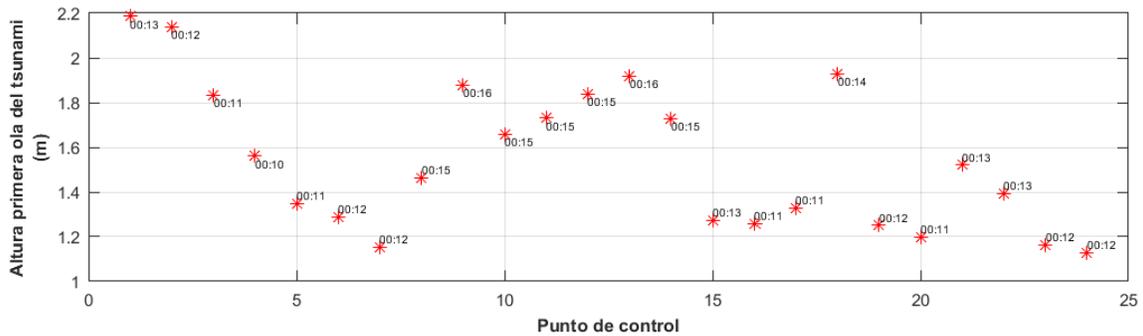


Figura 3. 138. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

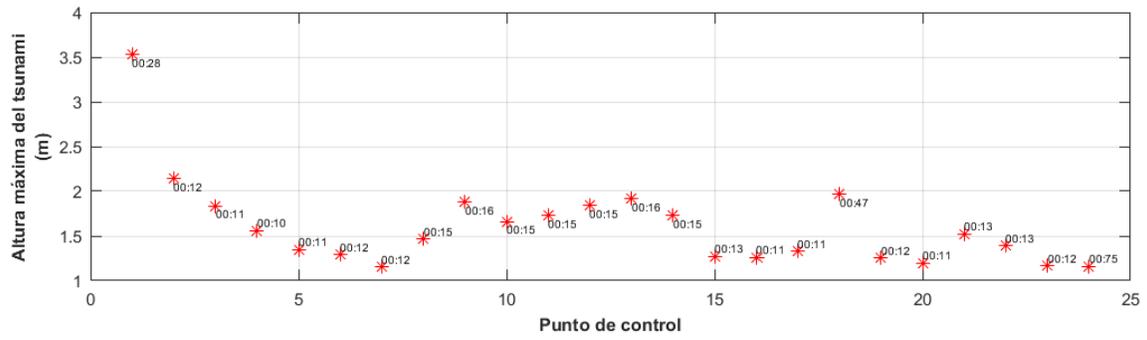


Figura 3. 139. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

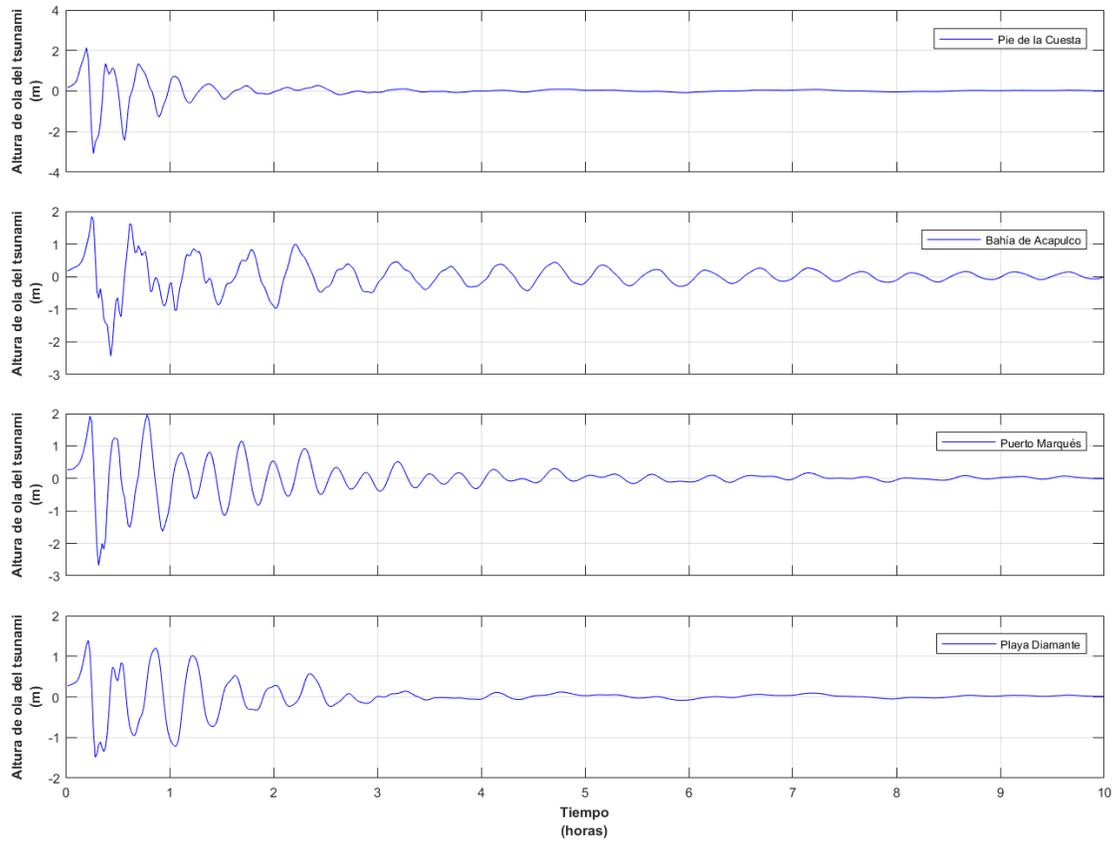


Figura 3. 140. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

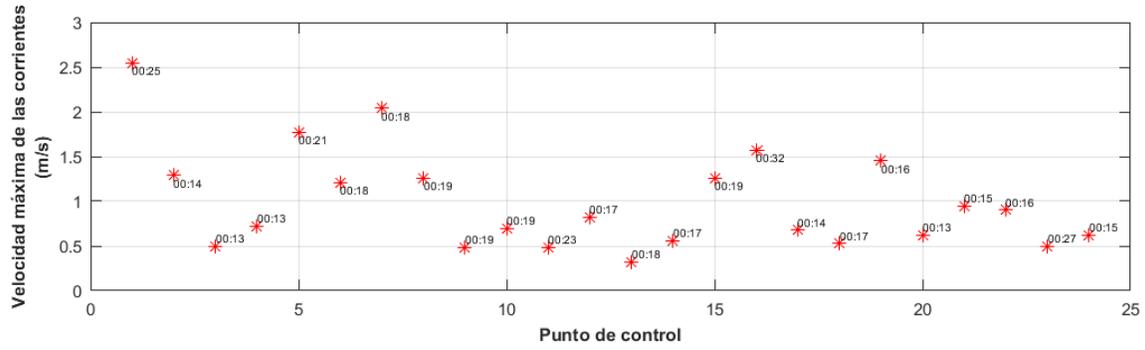


Figura 3. 141. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

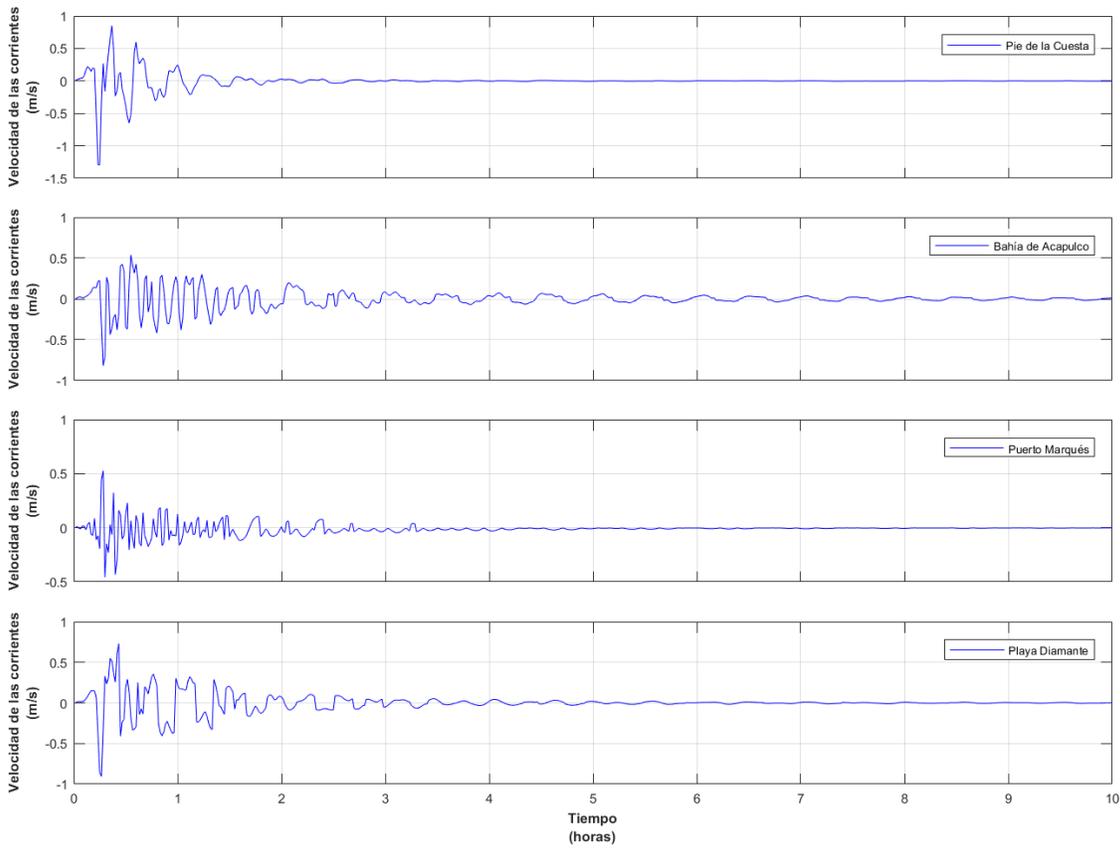


Figura 3. 142. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 24:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 21.9 m.

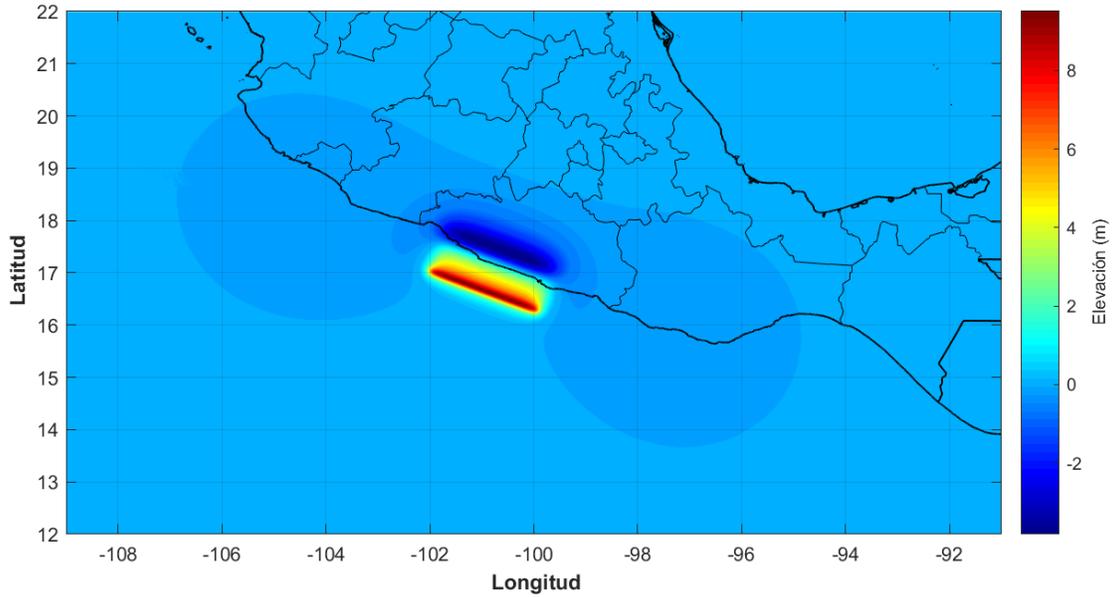


Figura 3. 143. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

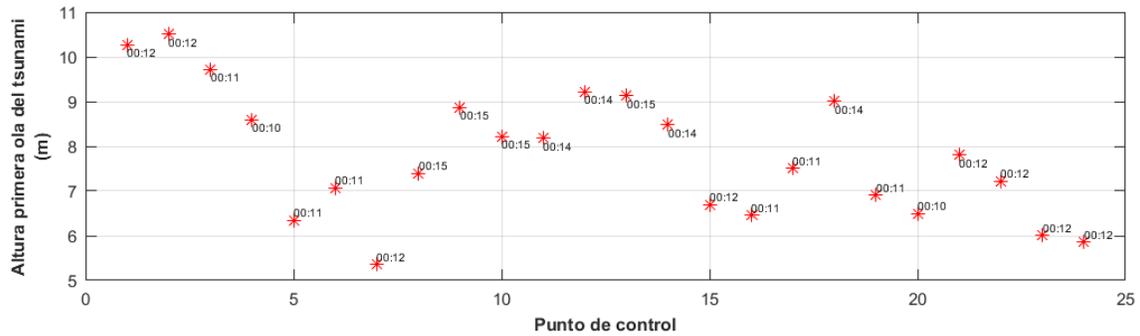


Figura 3. 144. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

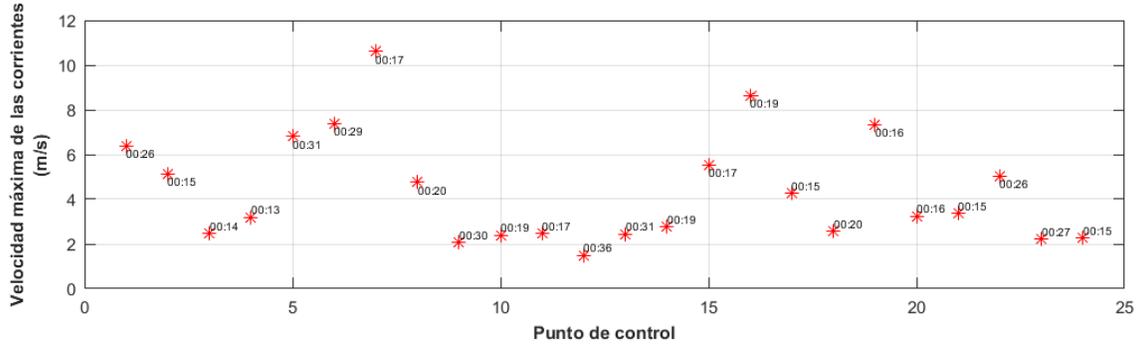


Figura 3. 147. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

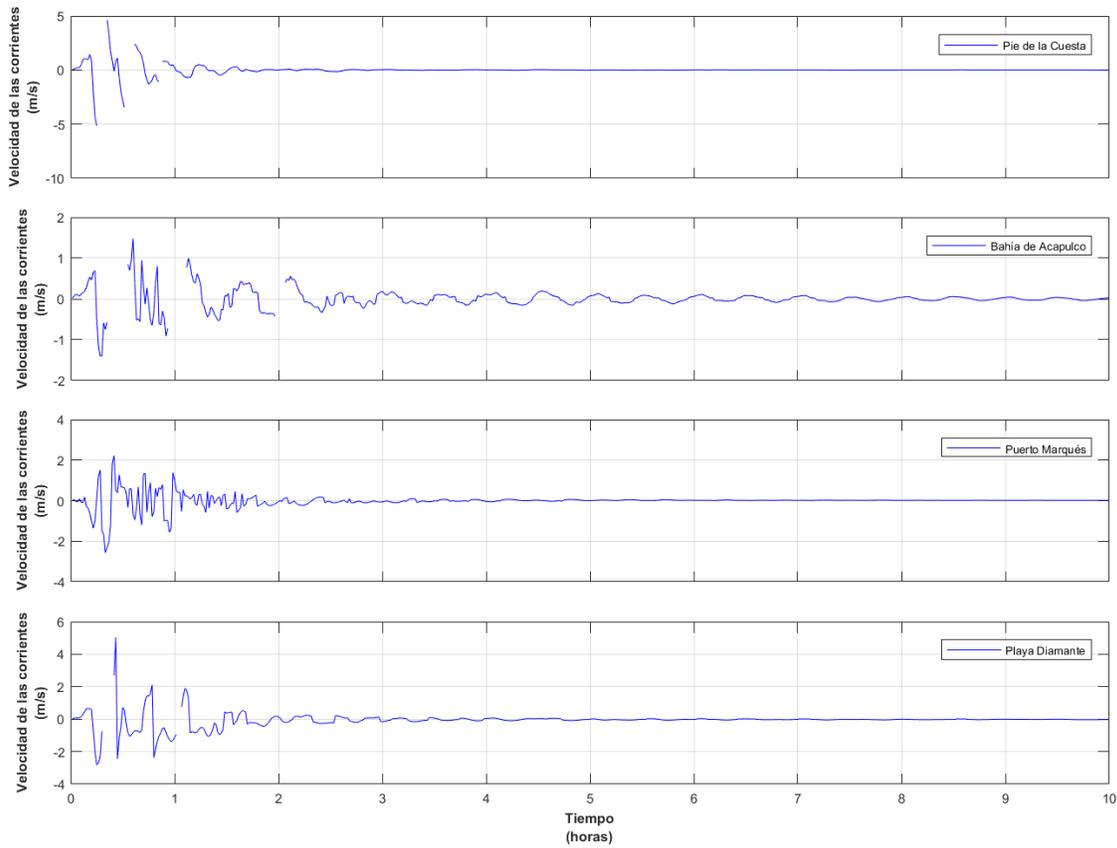


Figura 3. 148. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 25:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

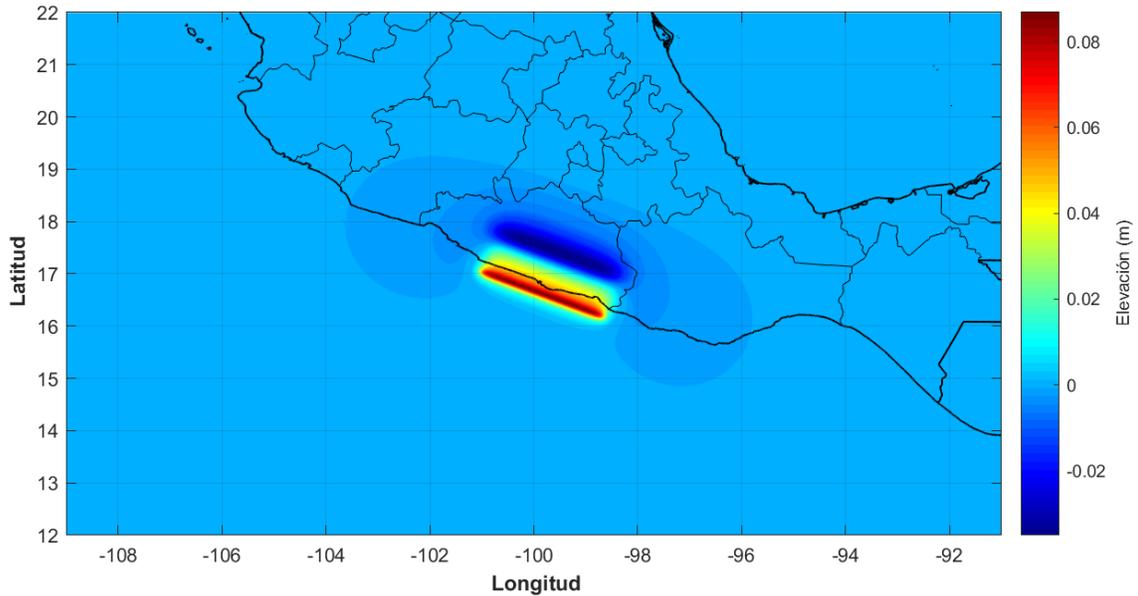


Figura 3. 149. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

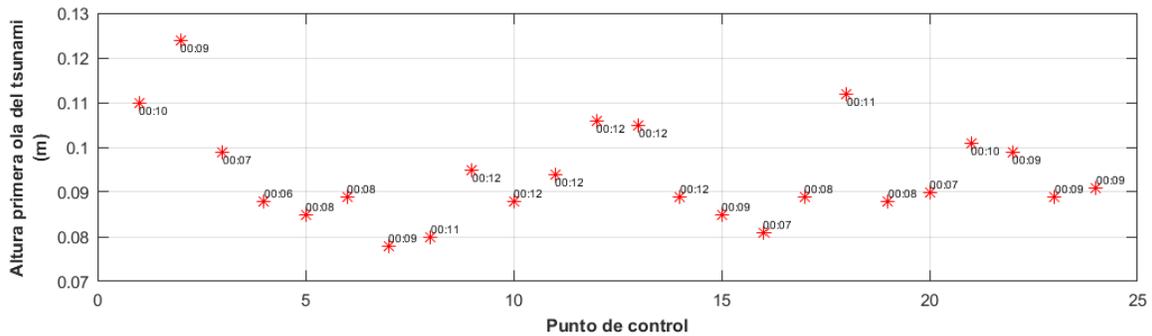


Figura 3. 150. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

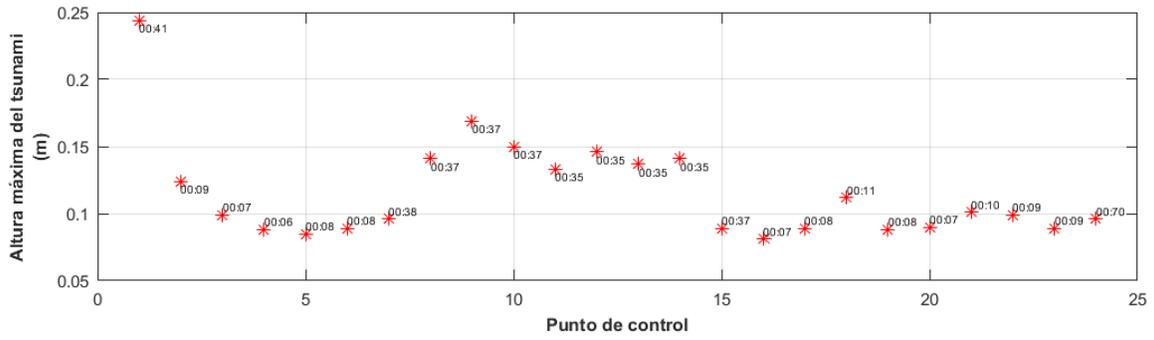


Figura 3. 151. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

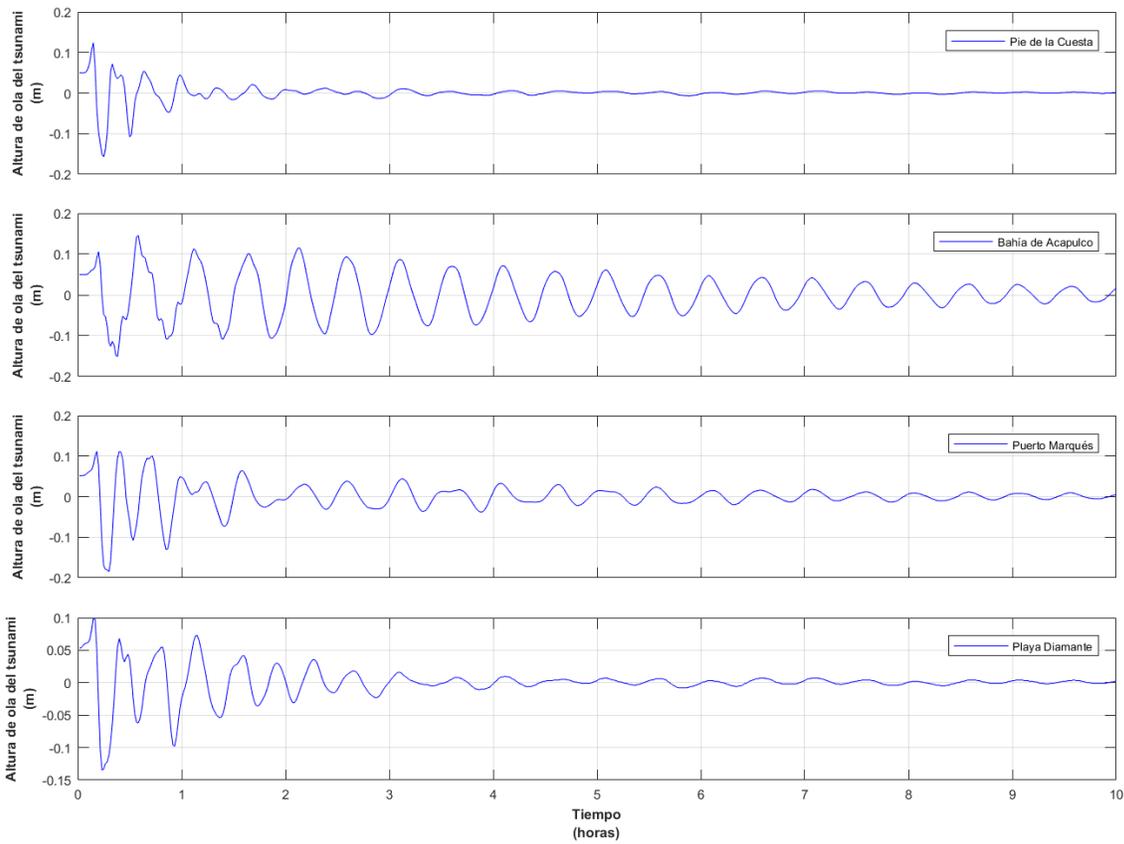


Figura 3. 152. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

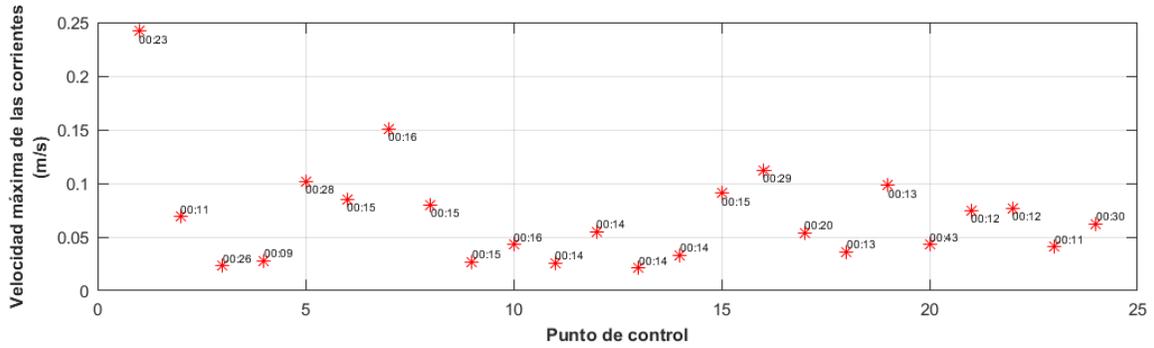


Figura 3. 153. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

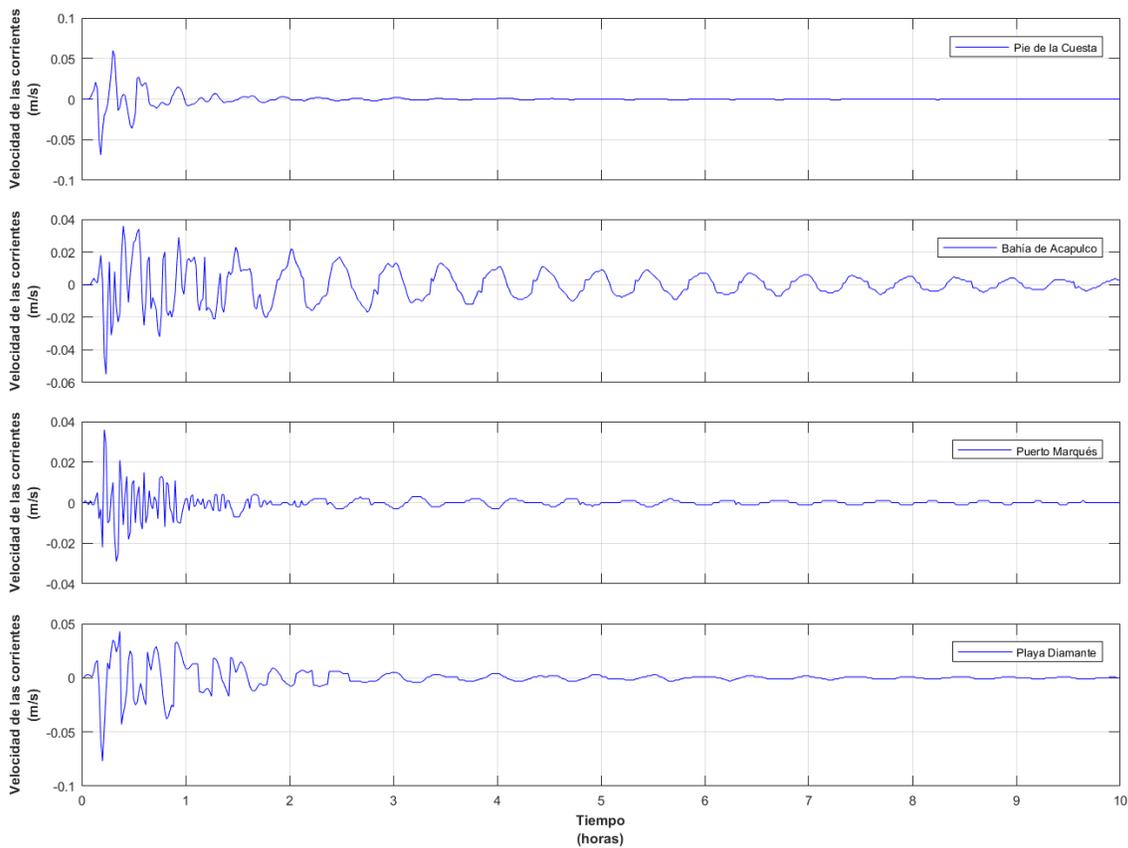


Figura 3. 154. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 26:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 0.9 m.

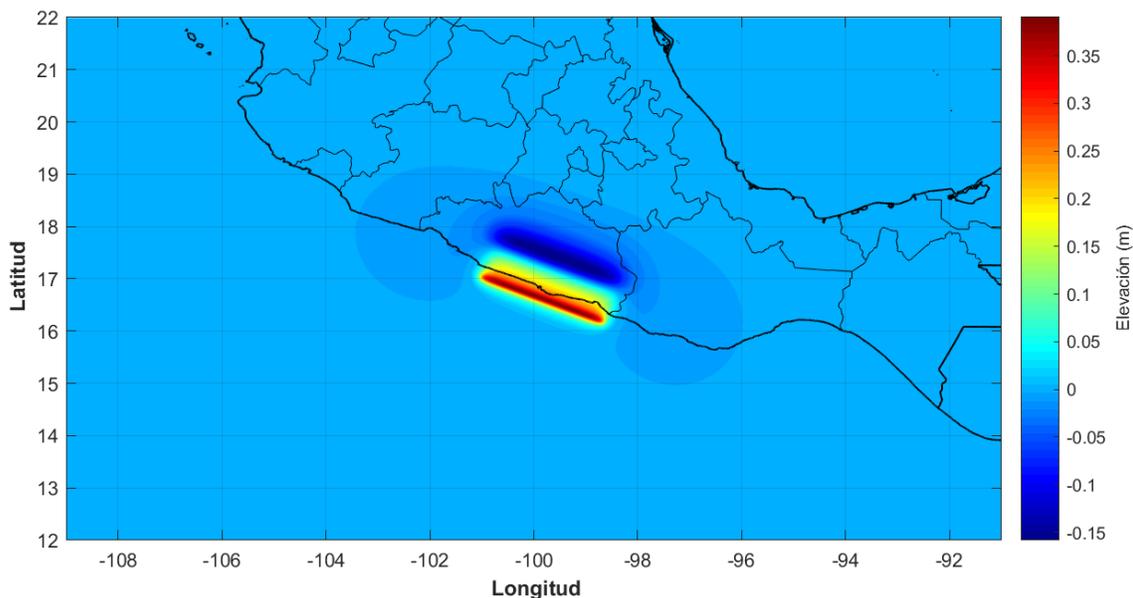


Figura 3. 155. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

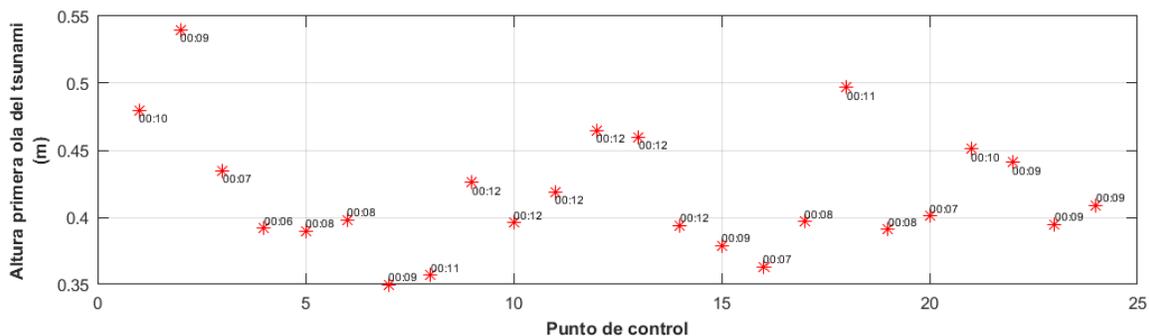


Figura 3. 156. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

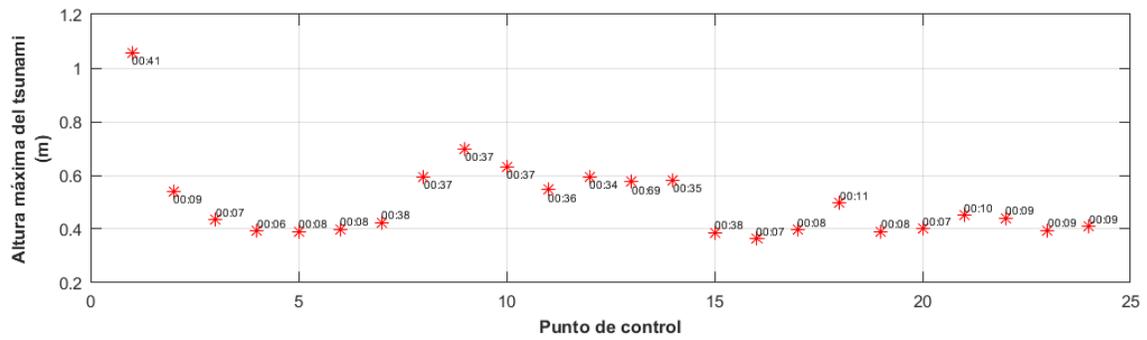


Figura 3. 157. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

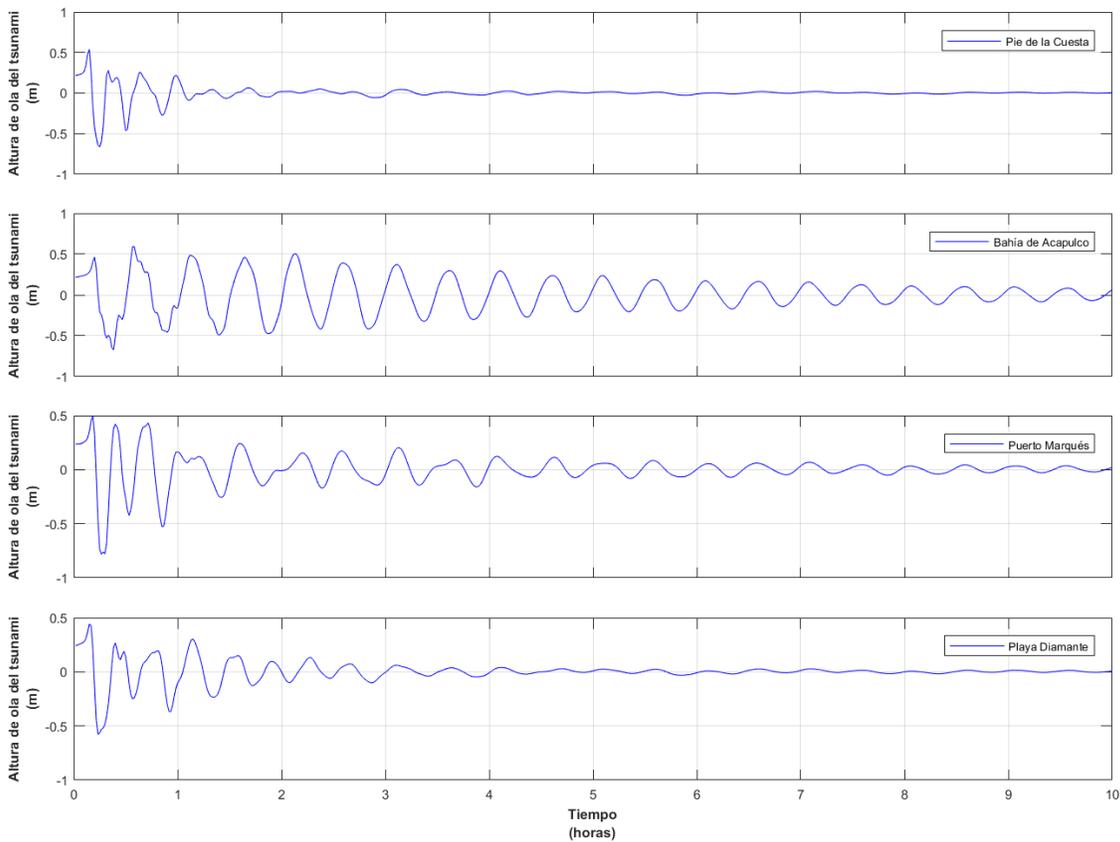


Figura 3. 158. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

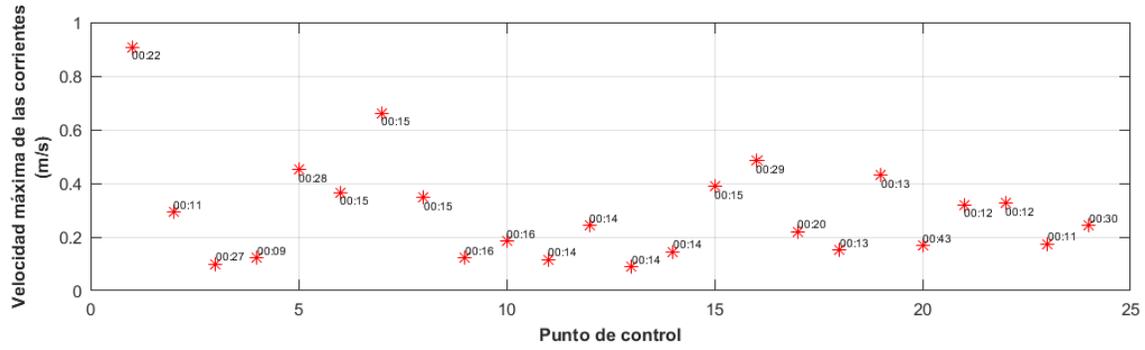


Figura 3. 159. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

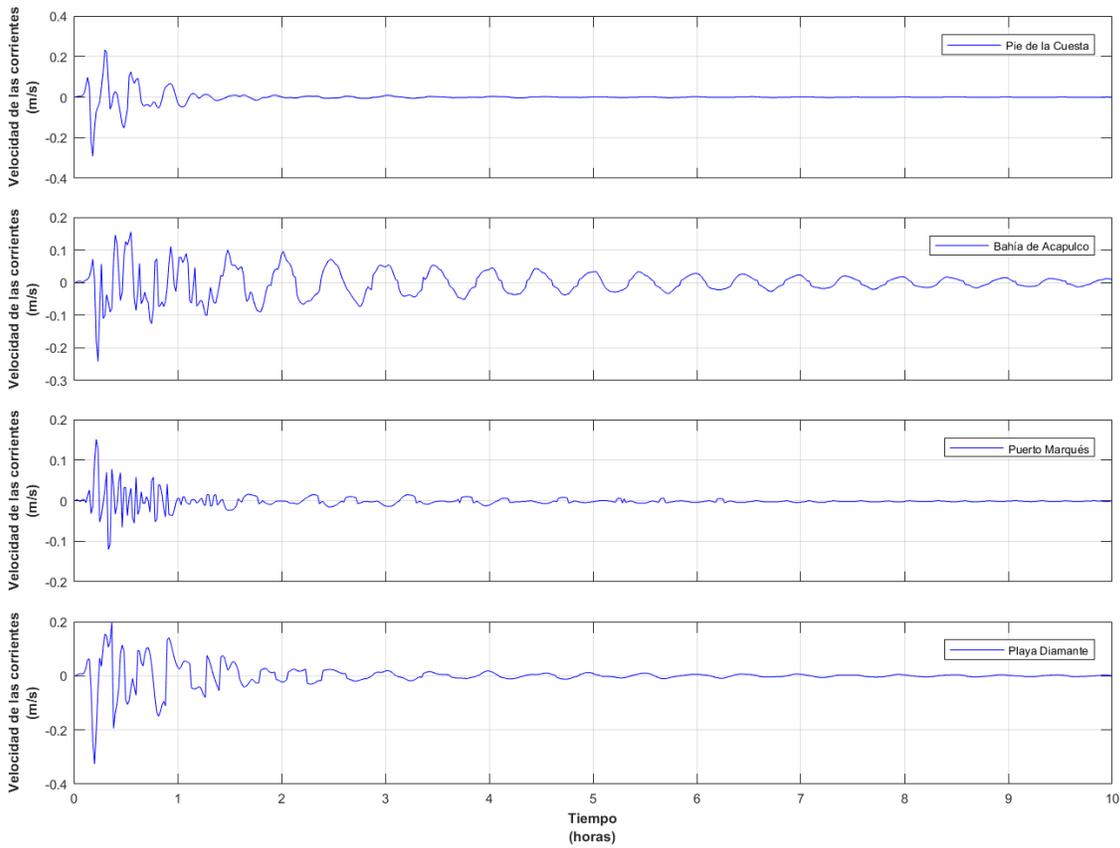


Figura 3. 160. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 27:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.5 m.

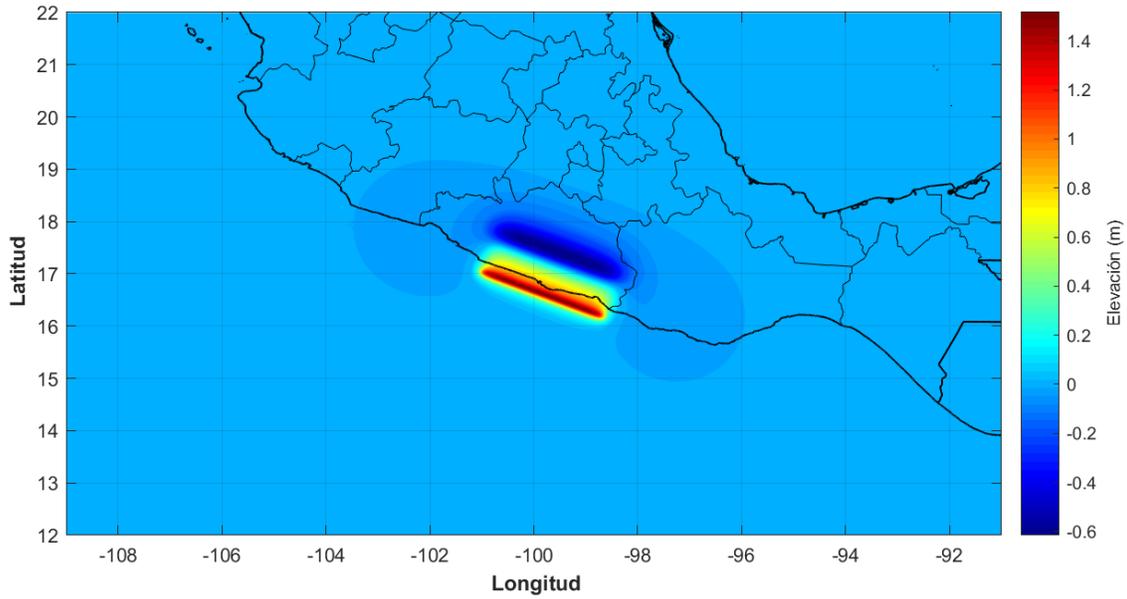


Figura 3. 161. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

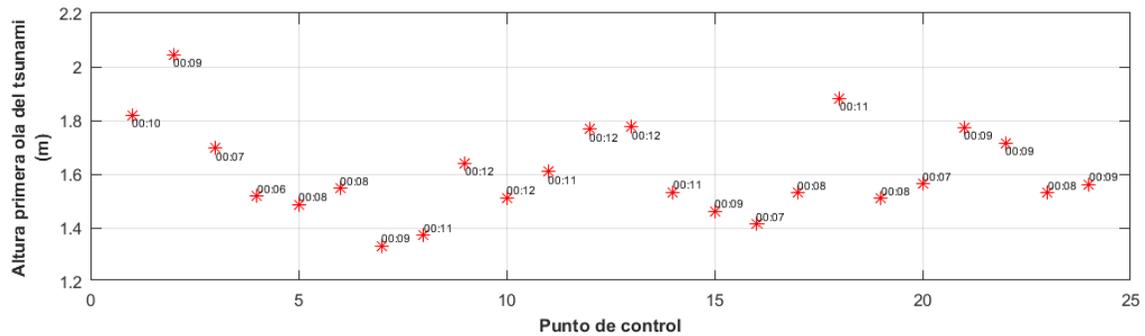


Figura 3. 162. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

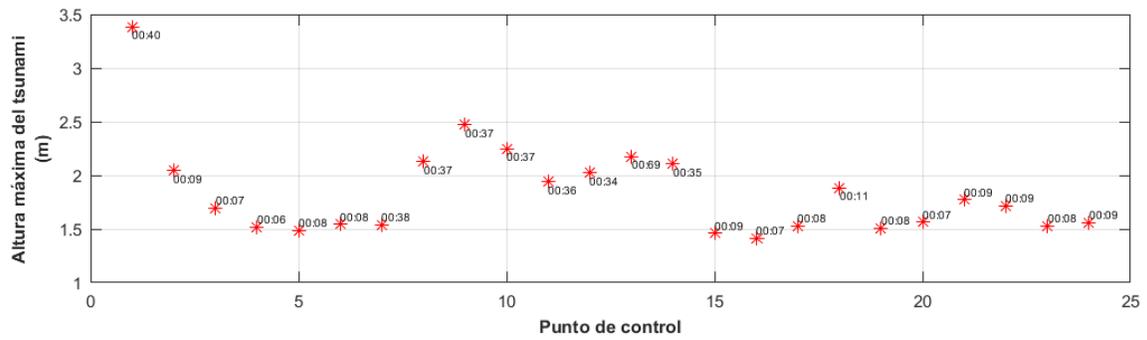


Figura 3. 163. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

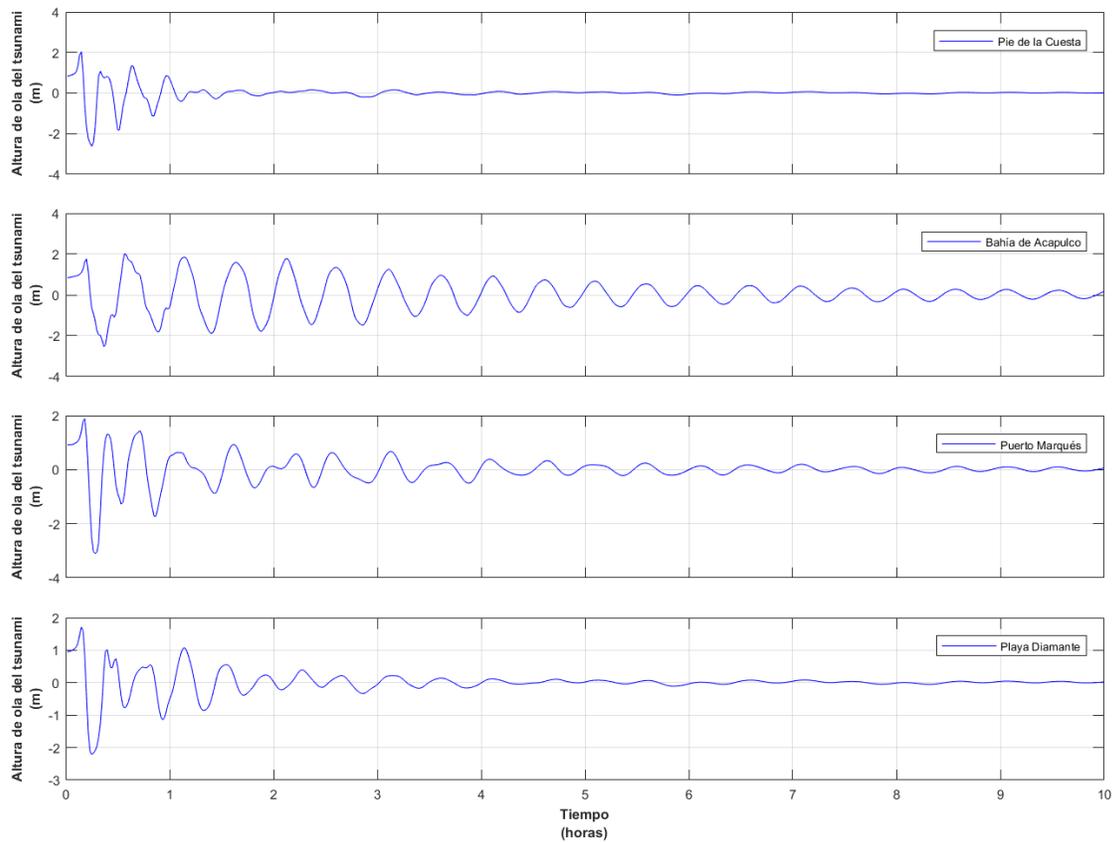


Figura 3. 164. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

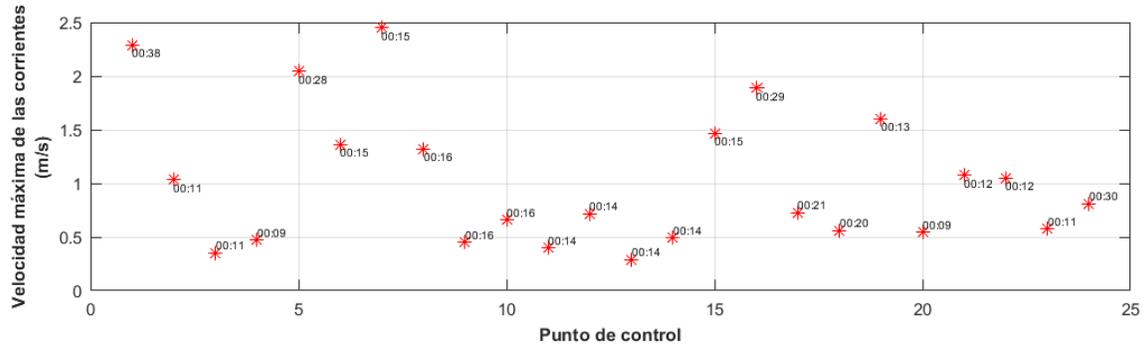


Figura 3. 165. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

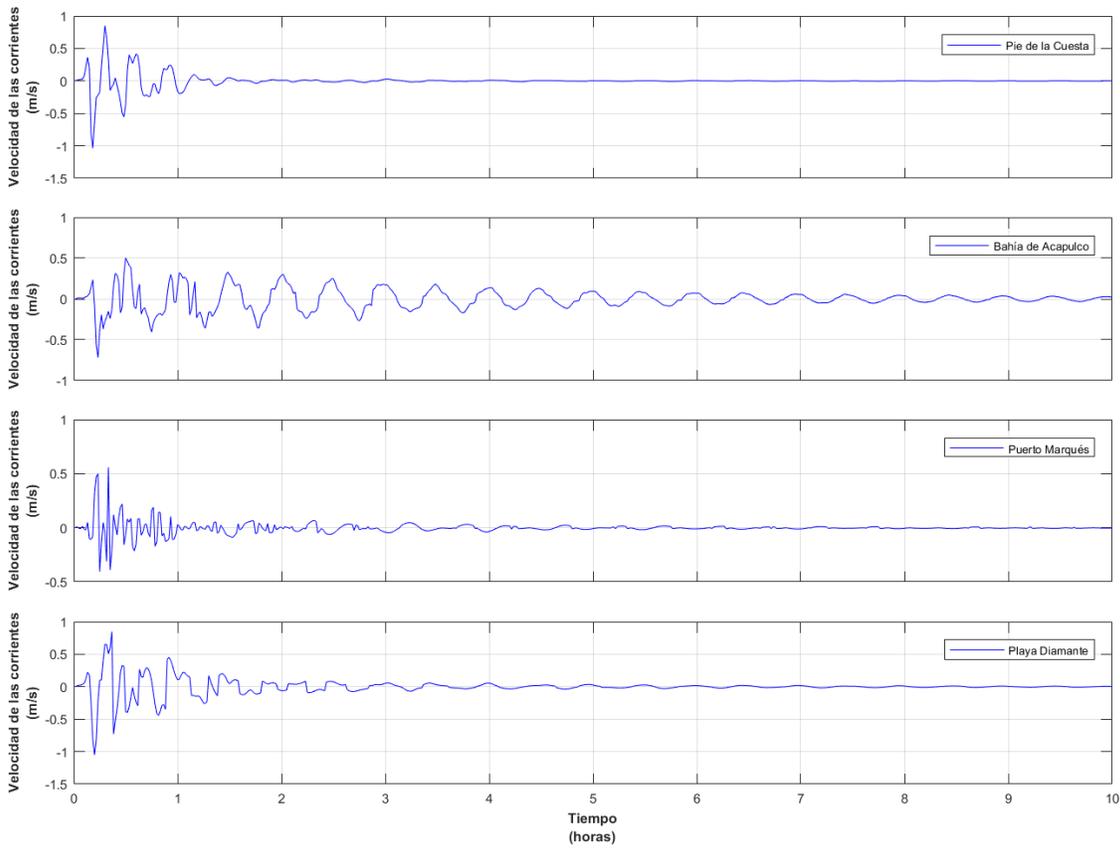


Figura 3. 166. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 28:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 19.4 m.

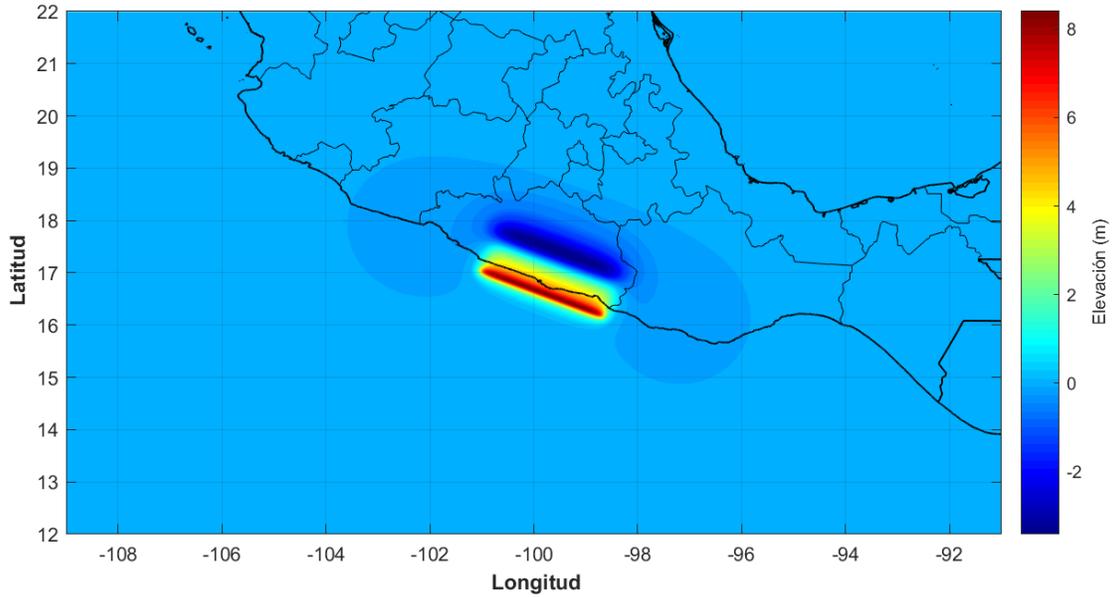


Figura 3. 167. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

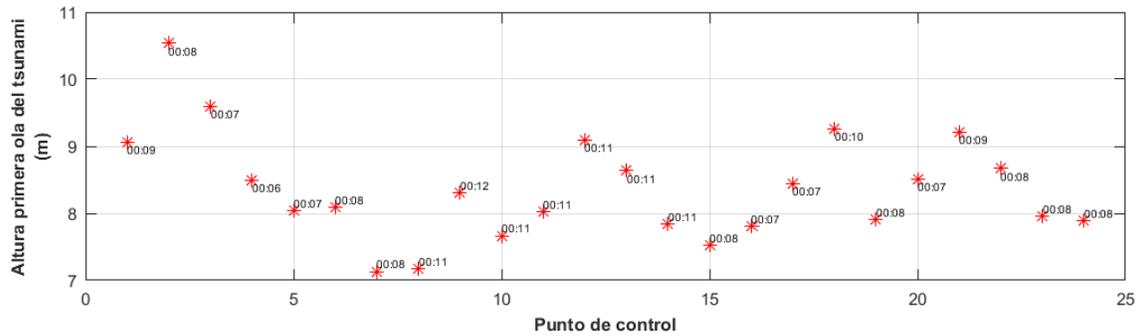


Figura 3. 168. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

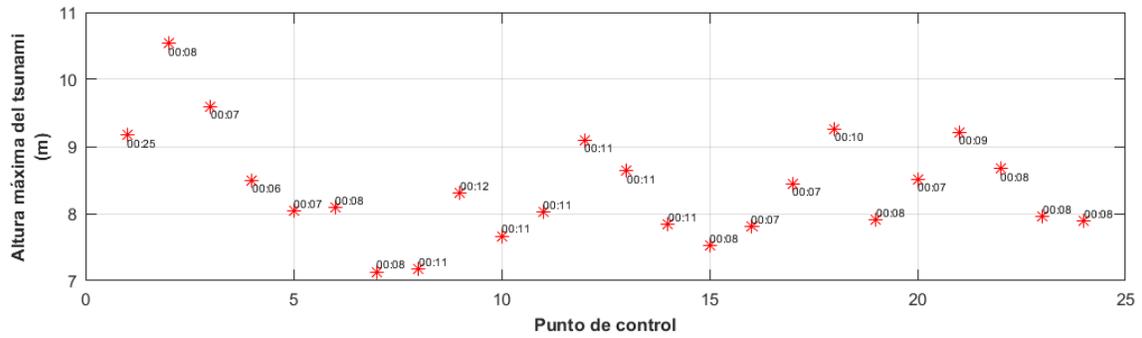


Figura 3. 169. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

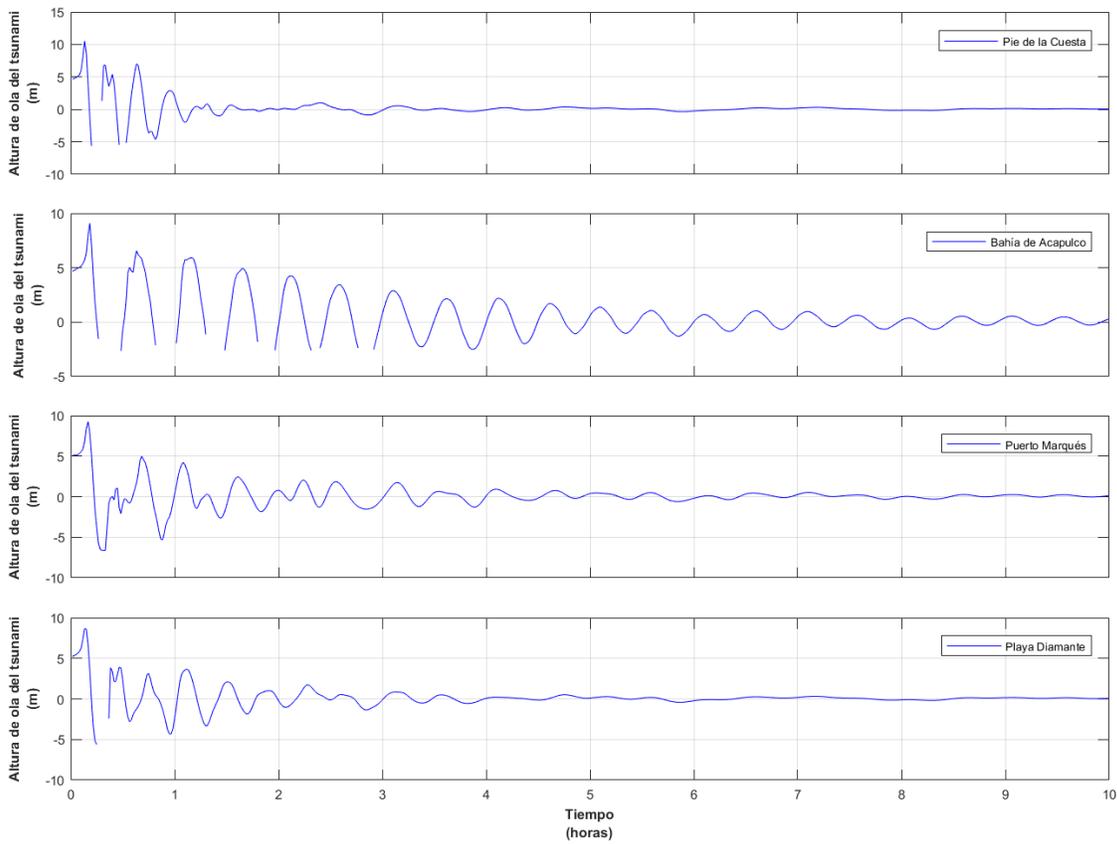


Figura 3. 170. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

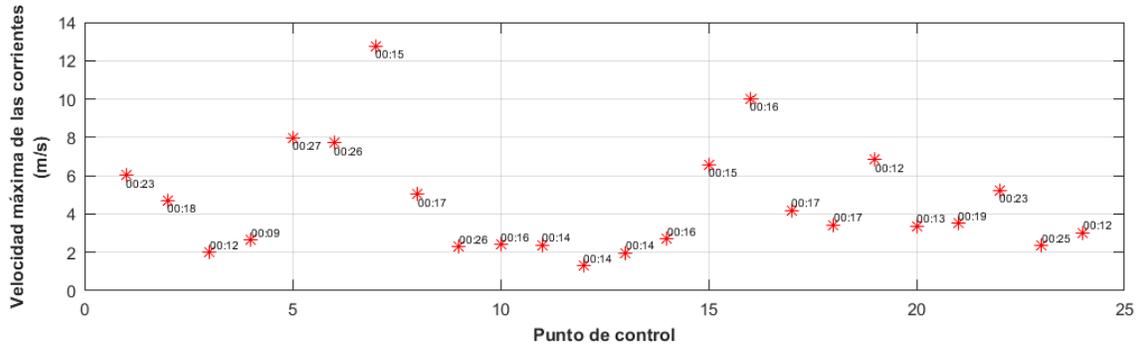


Figura 3. 171. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

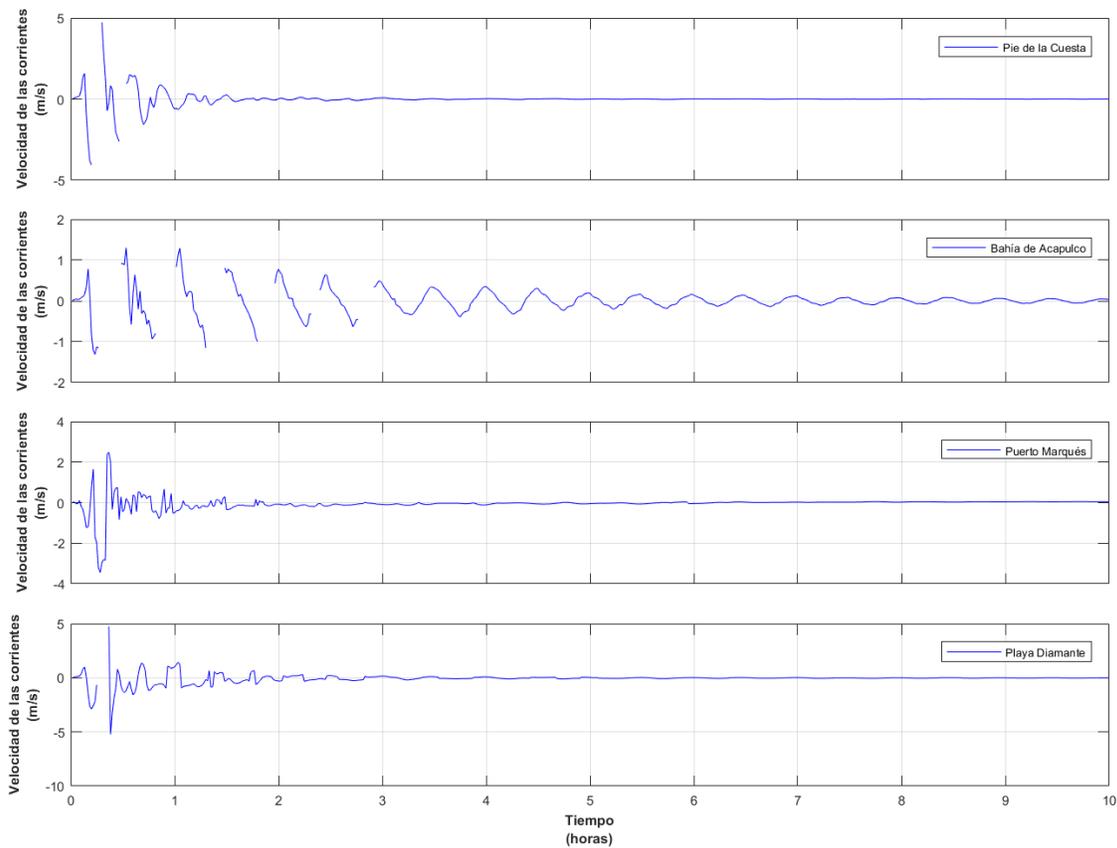


Figura 3. 172. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 29:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.15 m.

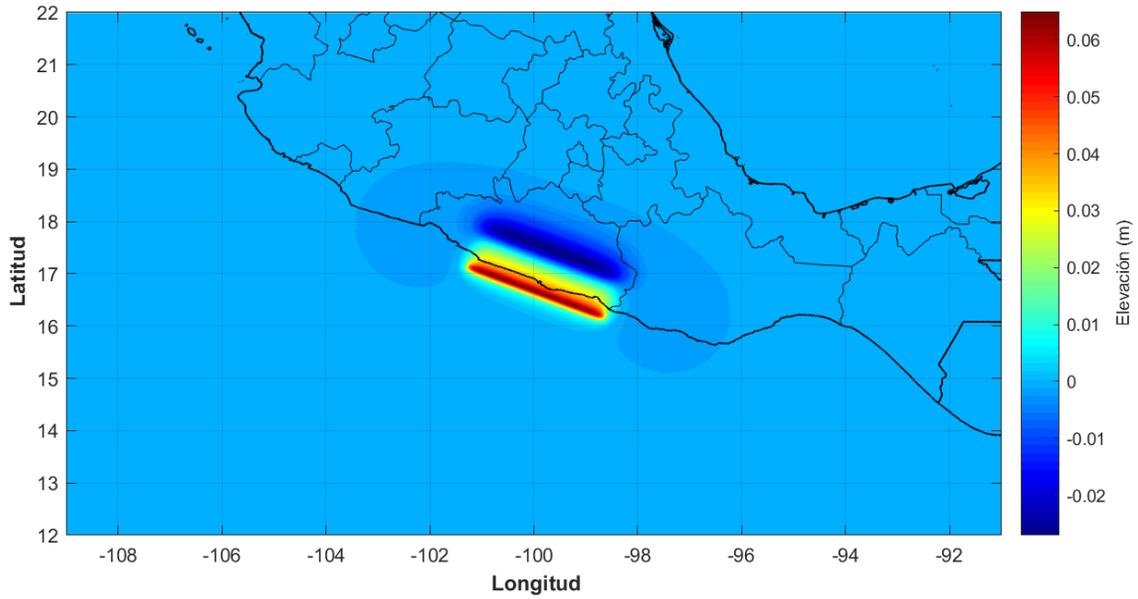


Figura 3. 173. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 7.5$

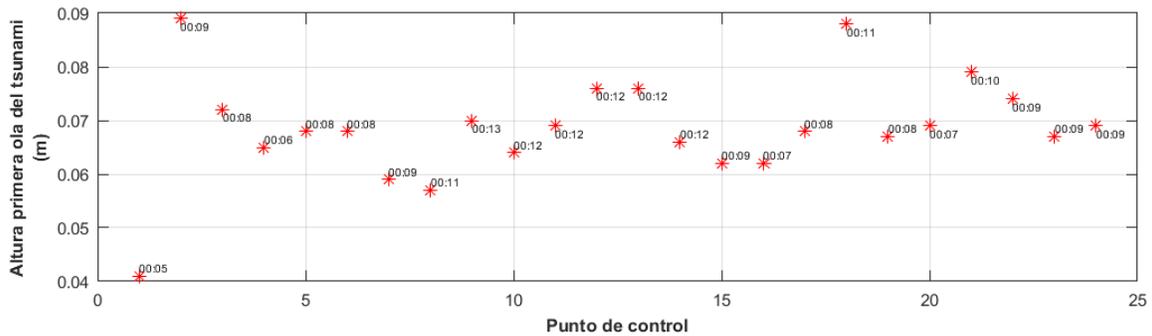


Figura 3. 174. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

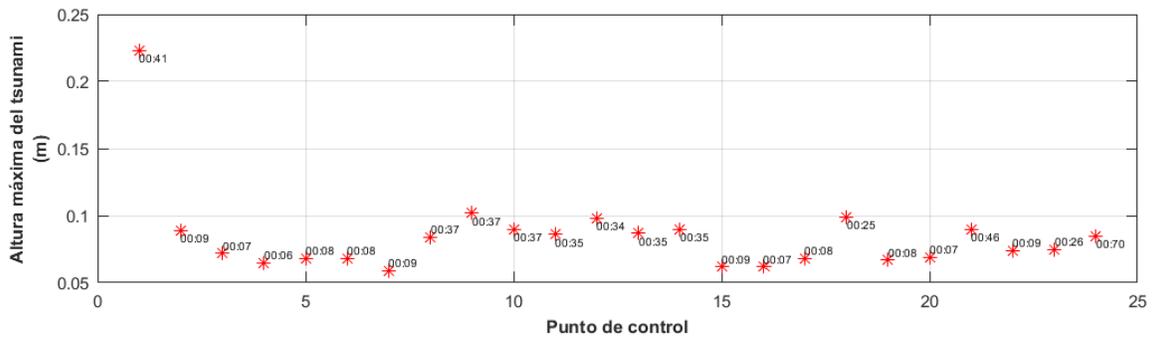


Figura 3. 175. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

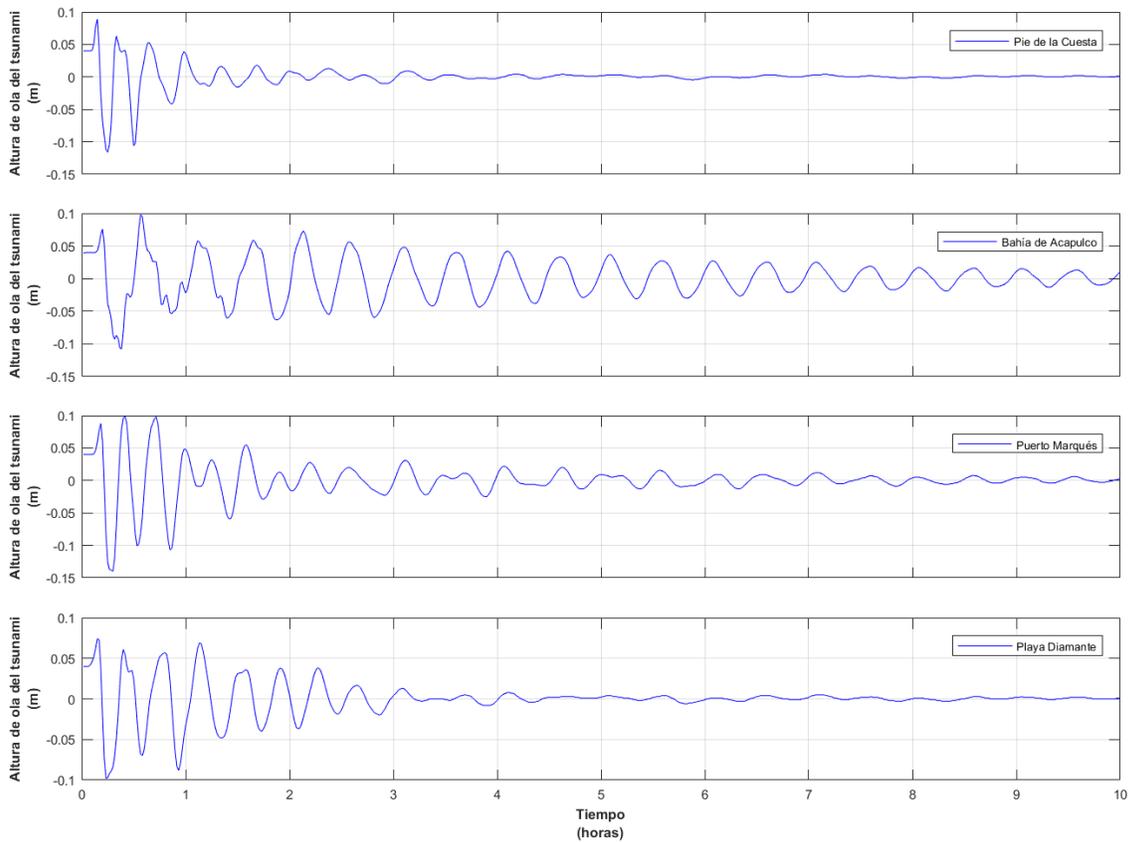


Figura 3. 176. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

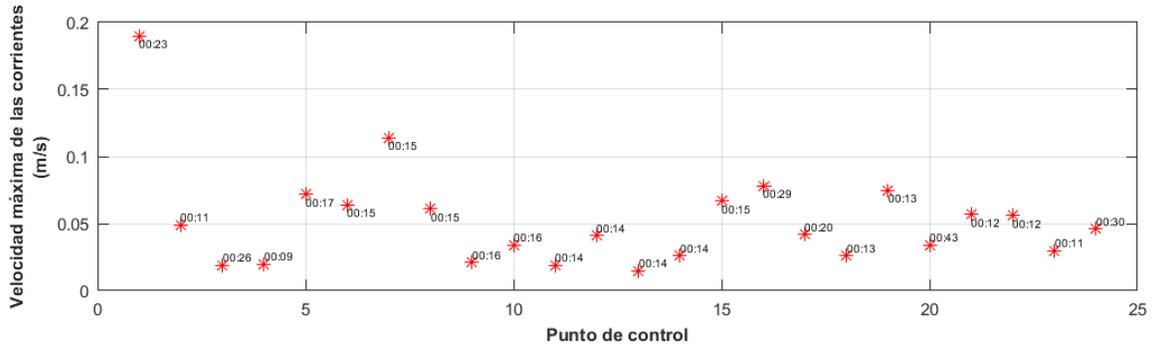


Figura 3. 177. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

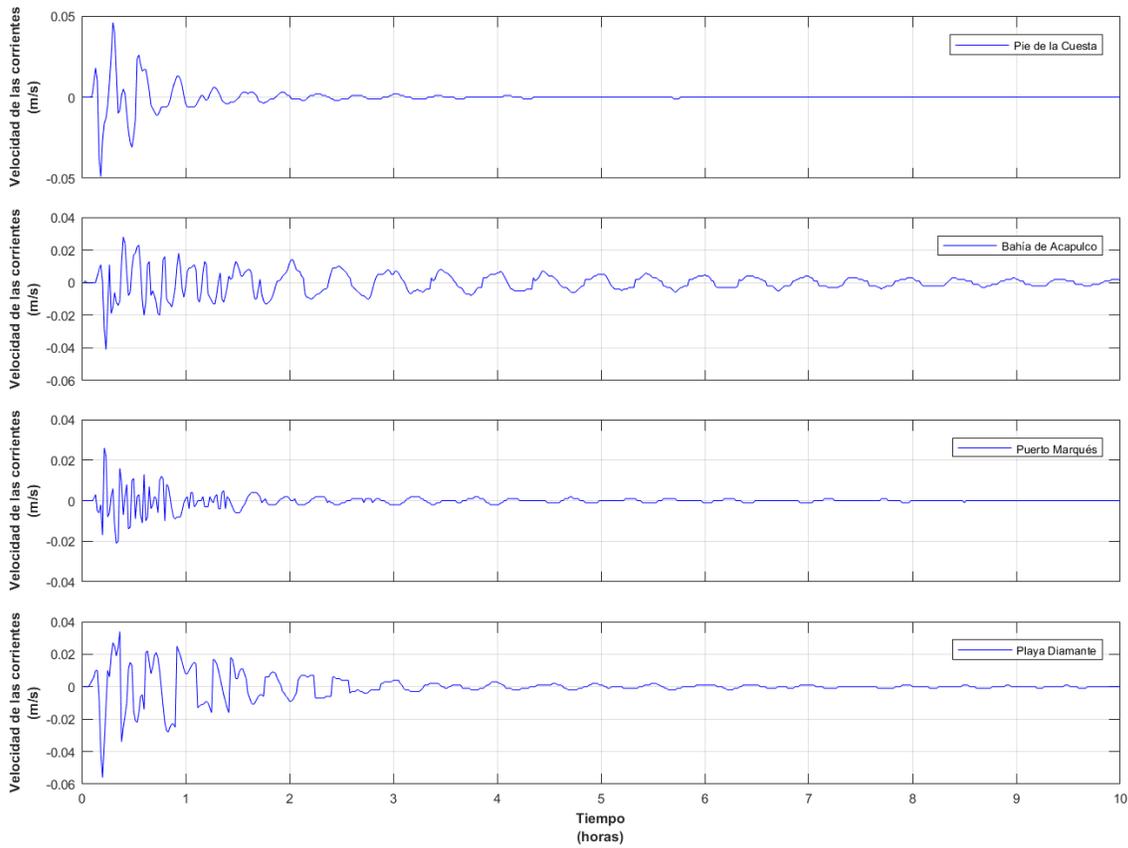


Figura 3. 178. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 30:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 0.8 m.

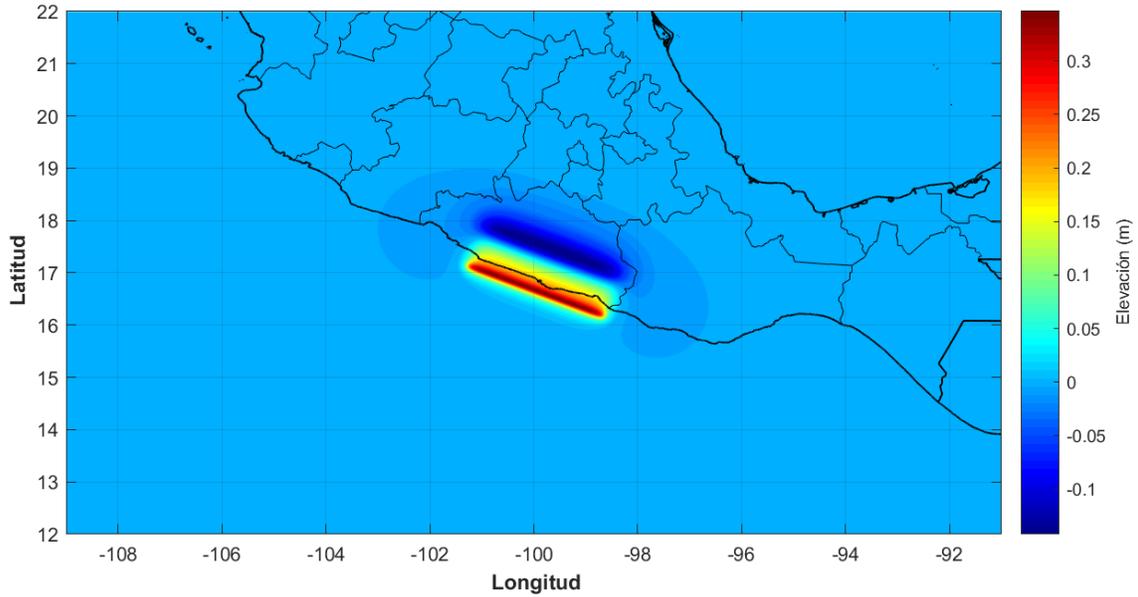


Figura 3. 179. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.0$

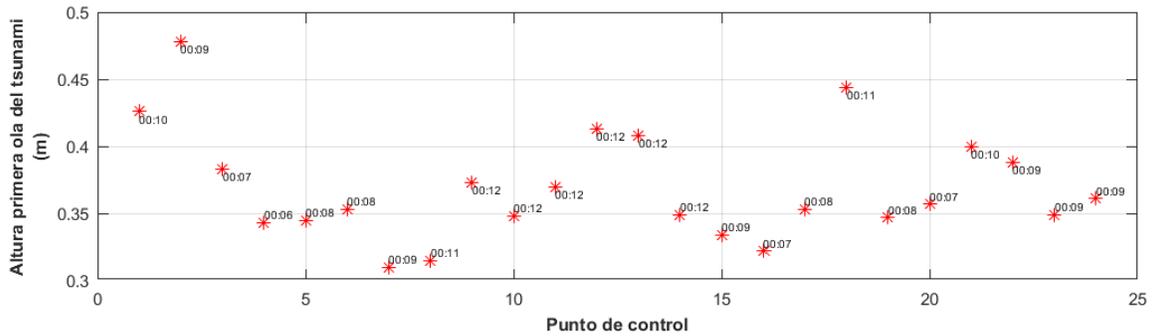


Figura 3. 180. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

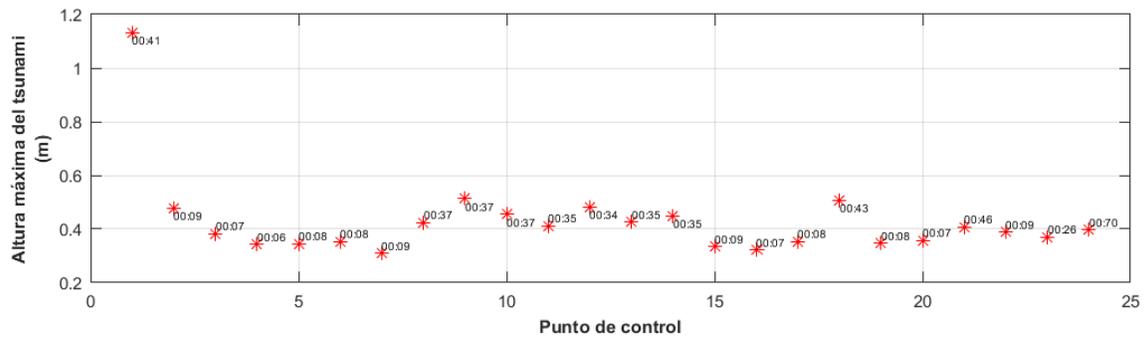


Figura 3. 181. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

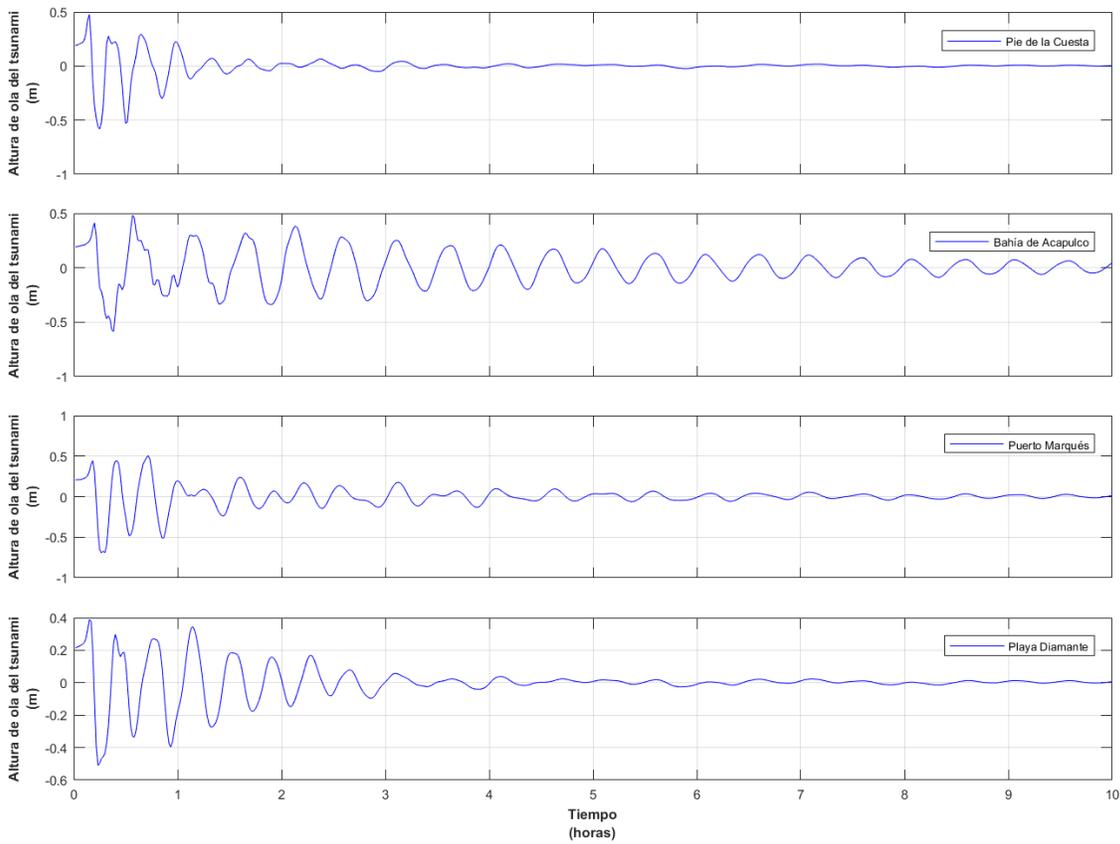


Figura 3. 182. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

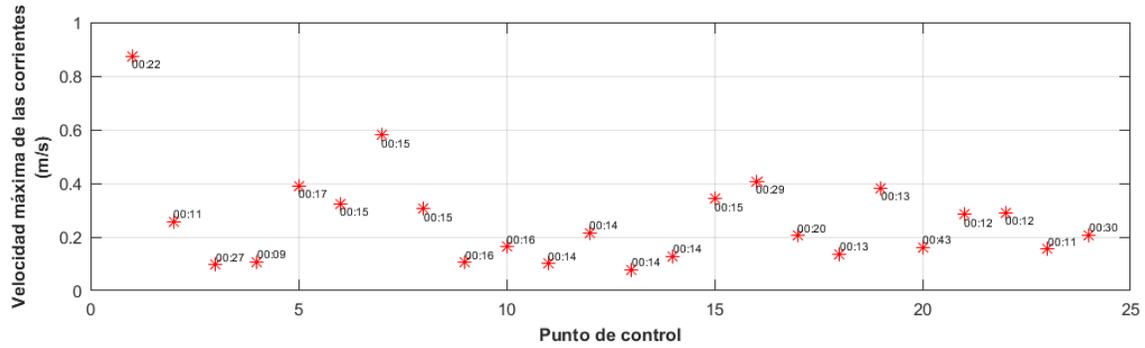


Figura 3. 183. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

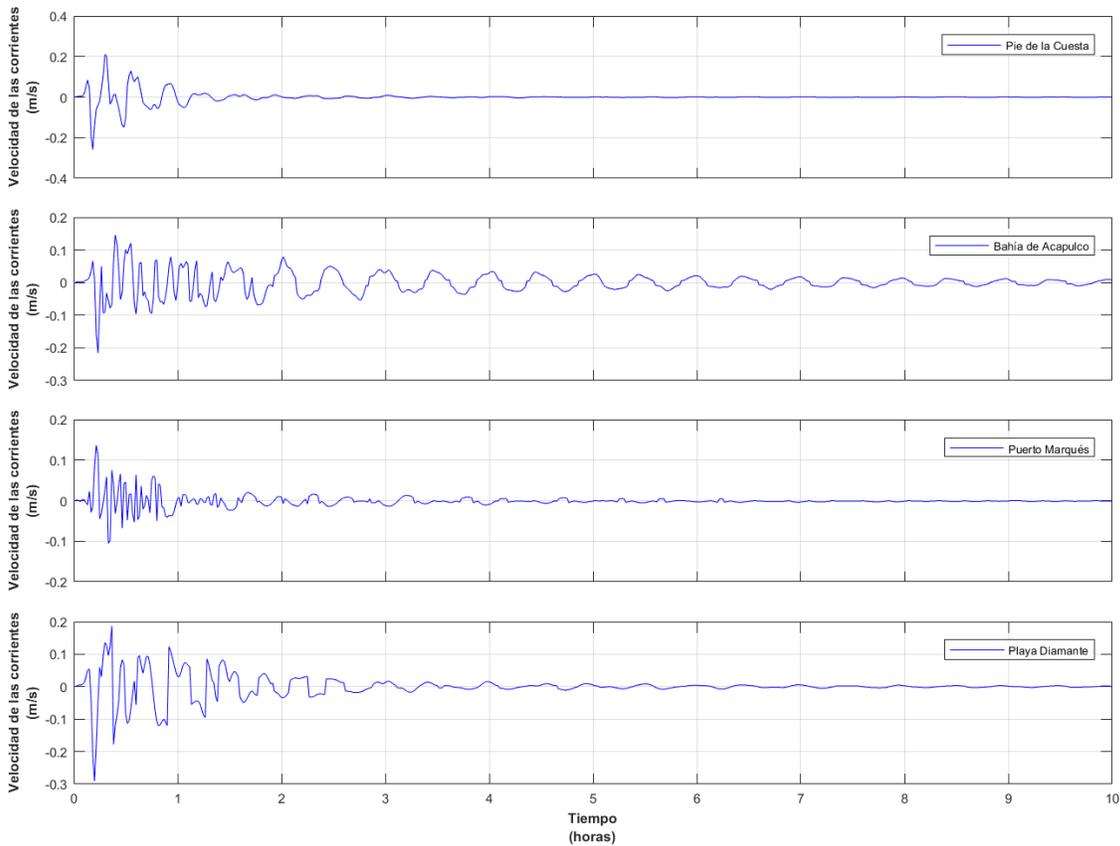


Figura 3. 184. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 31:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.1 m.

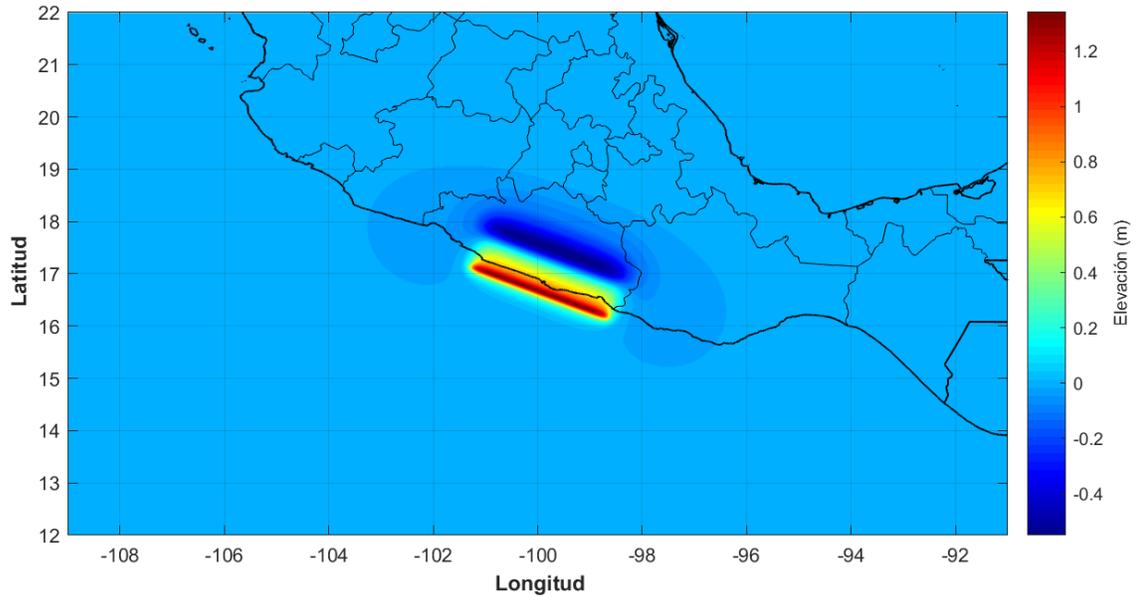


Figura 3. 185. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.4$

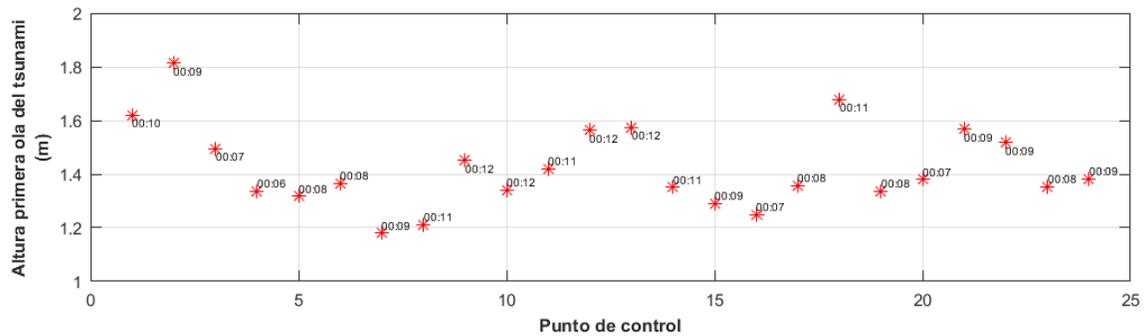


Figura 3. 186. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

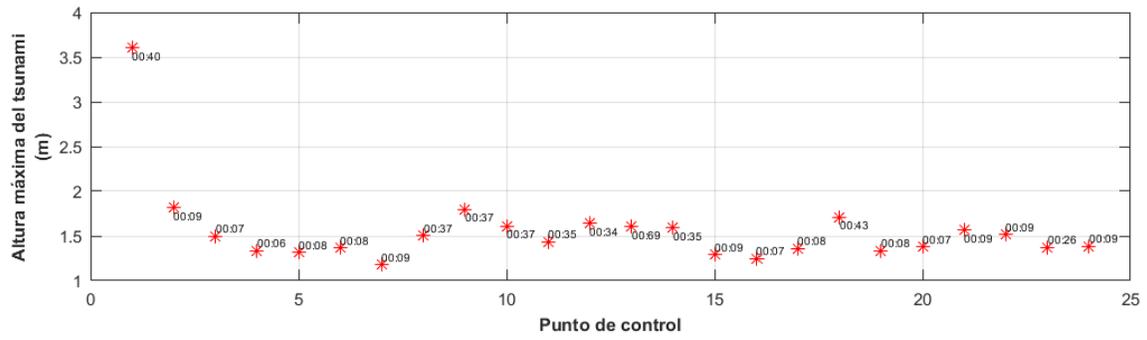


Figura 3. 187. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

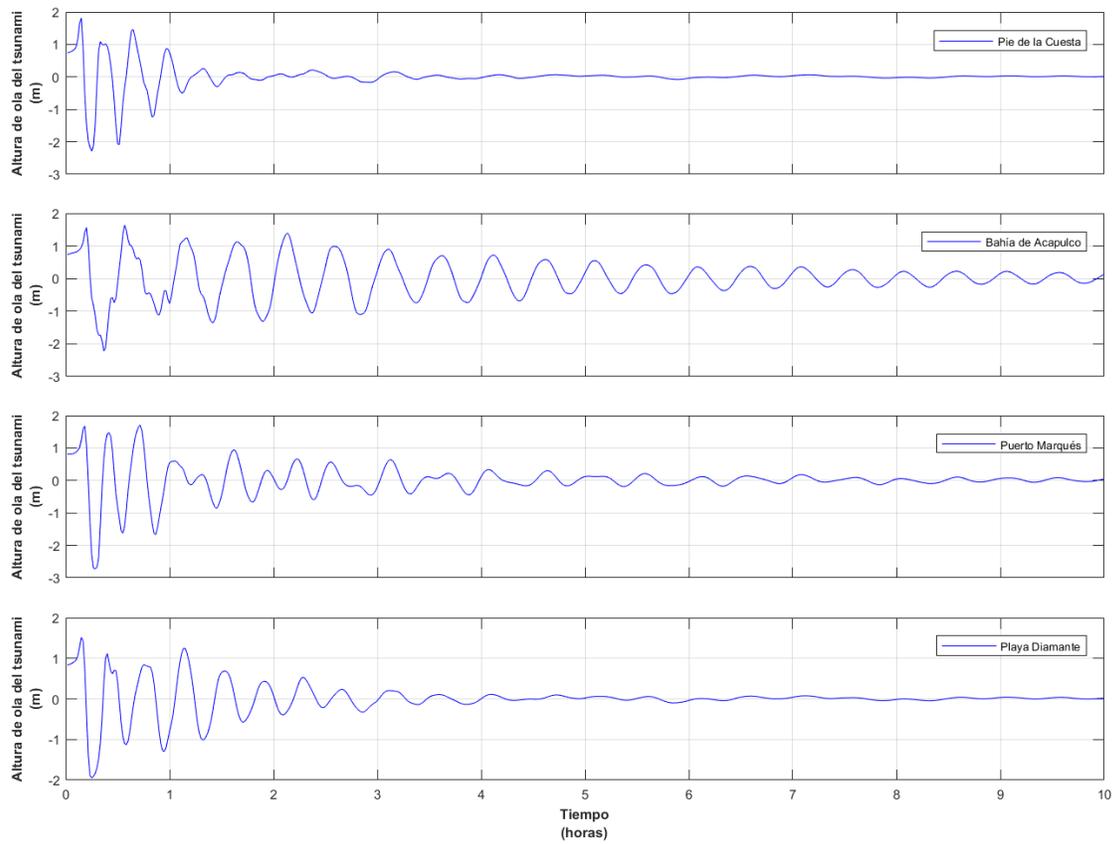


Figura 3. 188. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

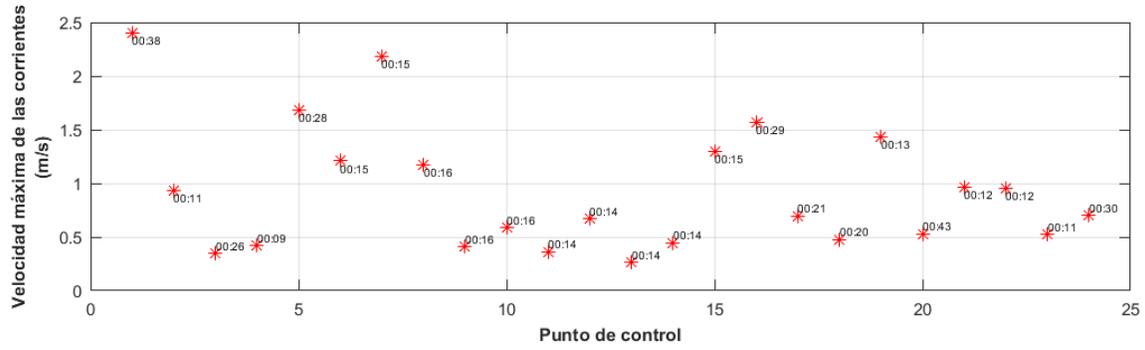


Figura 3. 189. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

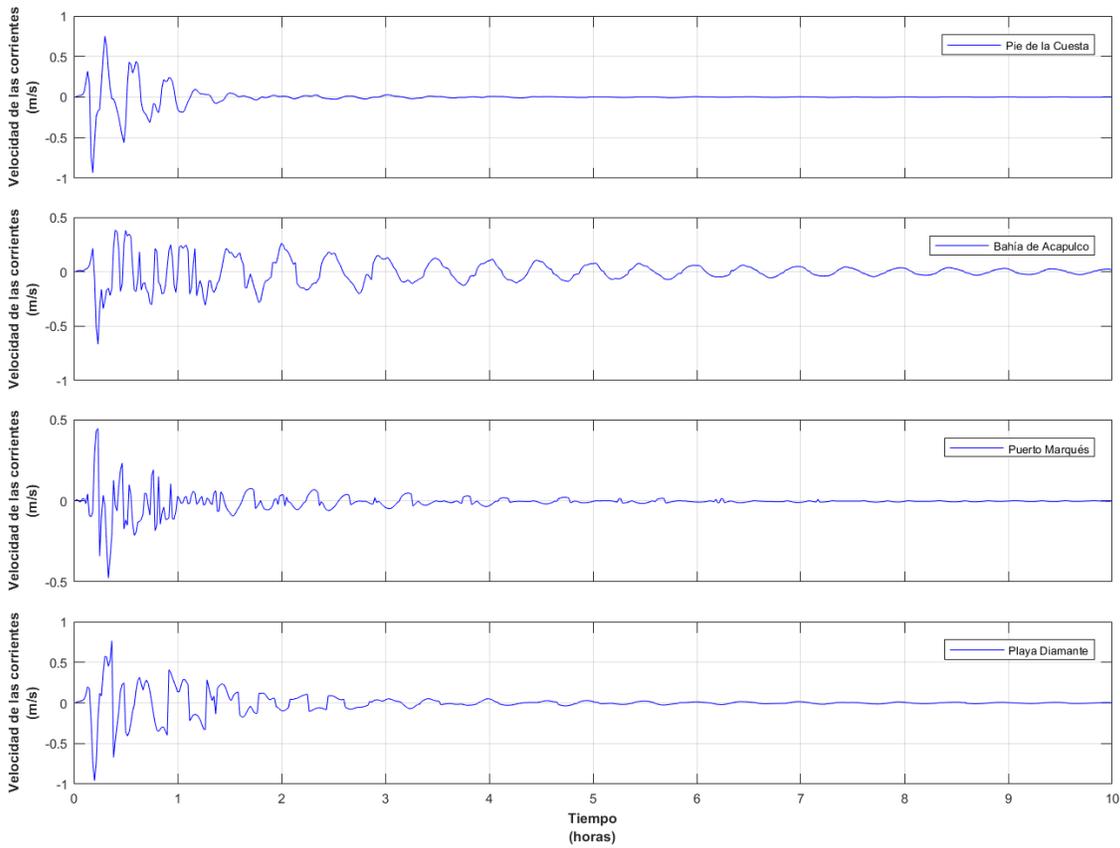


Figura 3. 190. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

- **Caso 32:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 17.4 m.

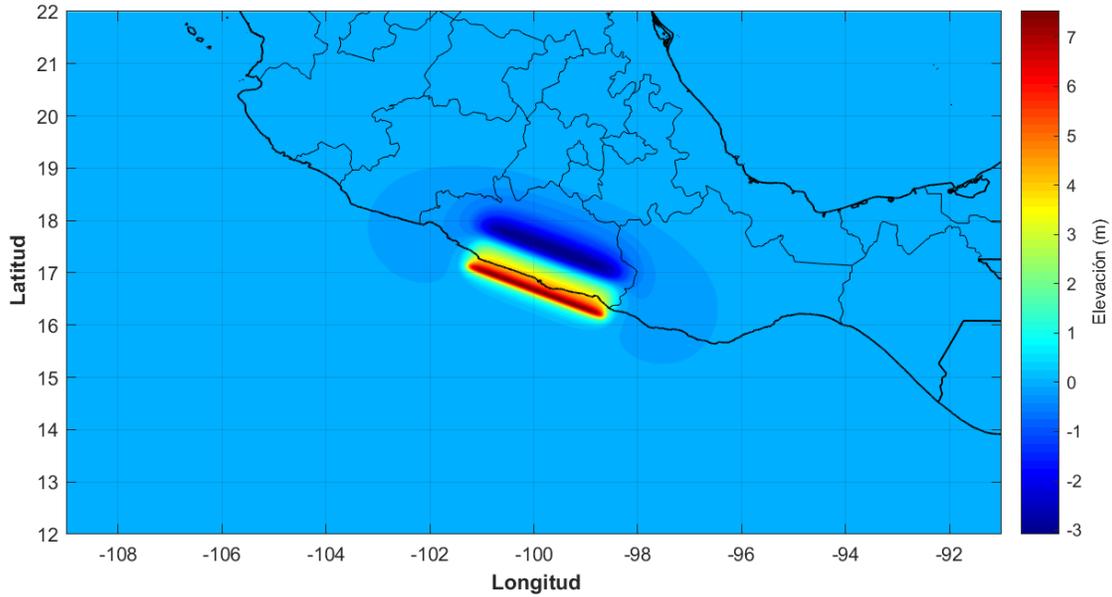


Figura 3. 191. Superficie libre inicial del tsunami, para un sismo de magnitud $M_w = 8.9$

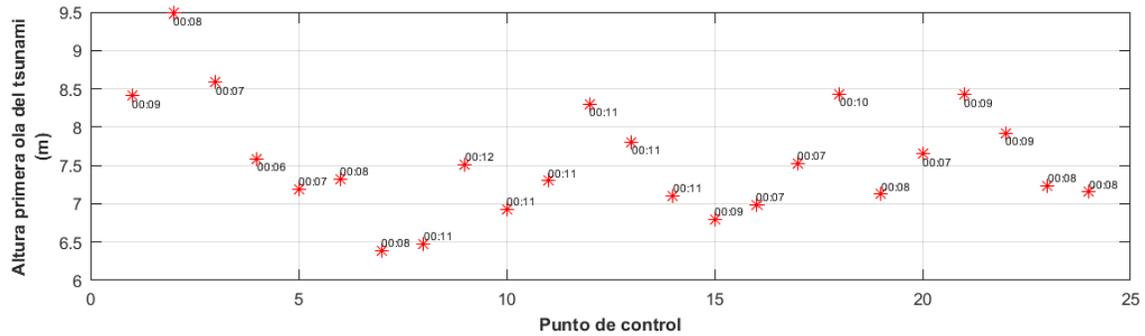


Figura 3. 192. Altura de la primera ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

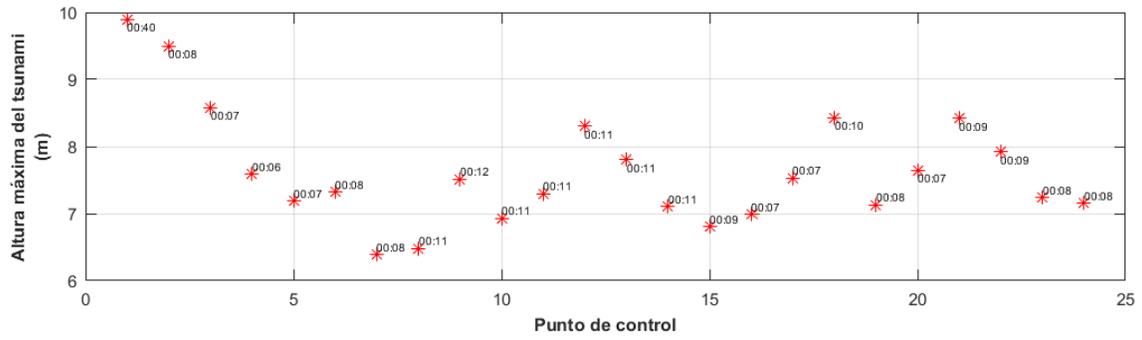


Figura 3. 193. Máxima altura de ola del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

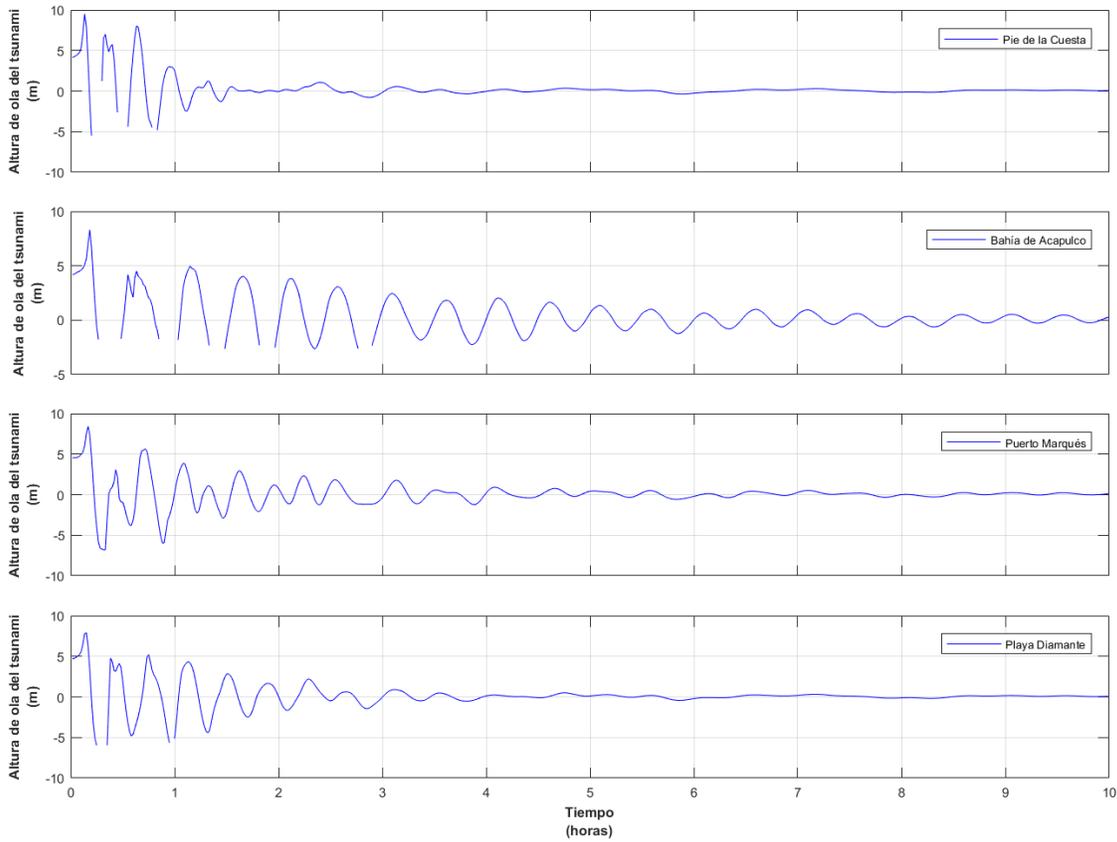


Figura 3. 194. Serie de tiempo de las alturas de ola del tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

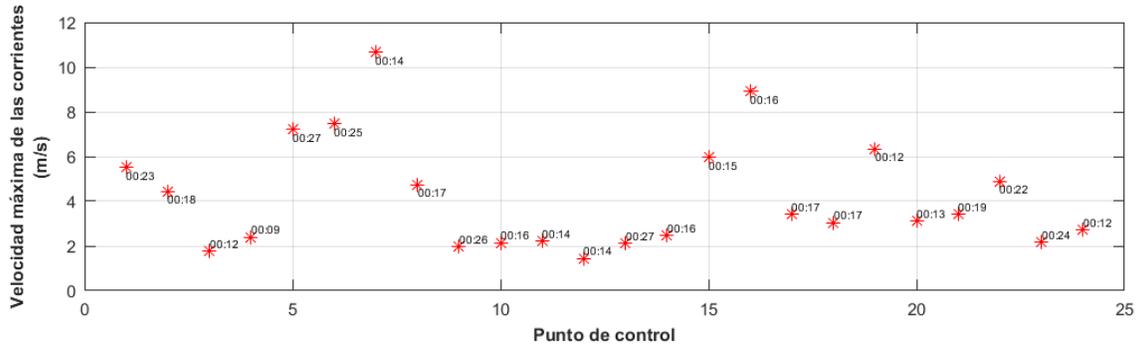


Figura 3. 195. Velocidad máxima de las corrientes del tsunami en los puntos de control y su respectivo tiempo de arribo

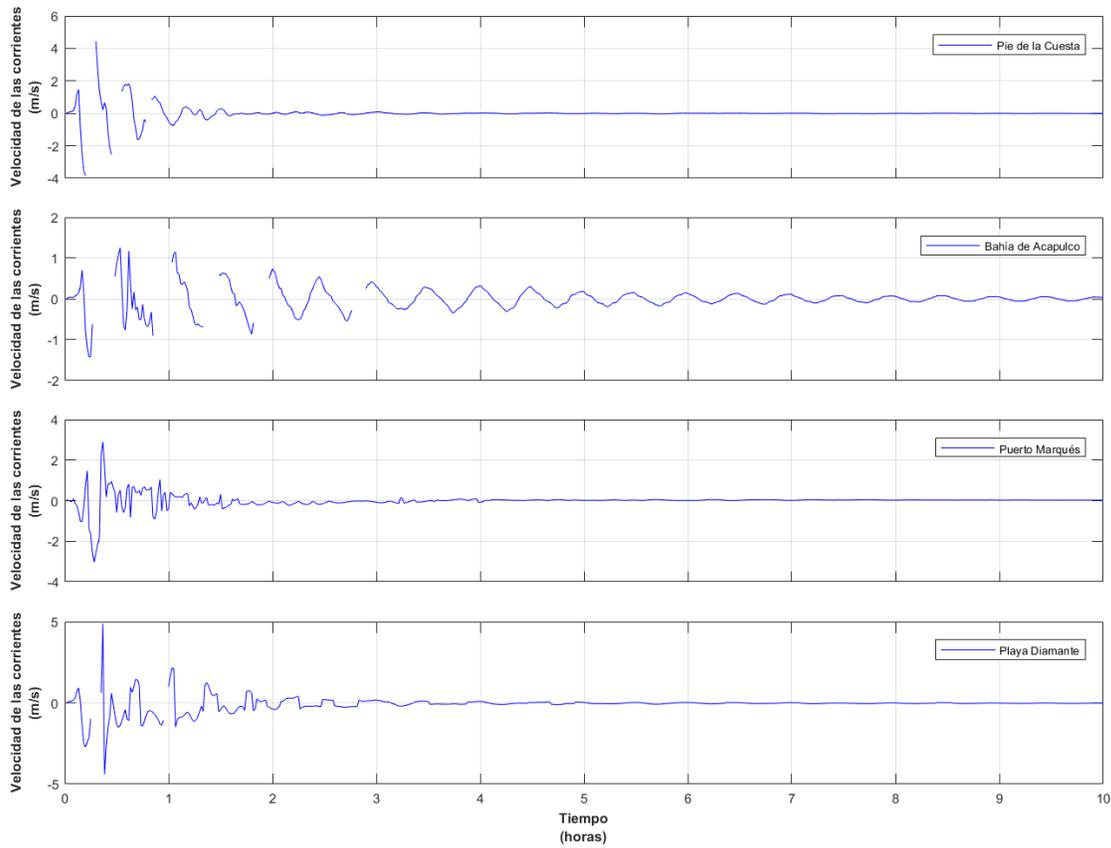


Figura 3. 196. Serie de tiempo de las velocidades de las corrientes generadas por el tsunami en 4 sitios representativos de Acapulco

4. Elaboración de mapas de riesgo

Con los resultados obtenidos de las modelaciones numéricas de la propagación de tsunamis, se delimitó la máxima zona de inundación, cabe señalar que, en el modelo numérico se estableció que el nivel cero del agua corresponde al N. B. M. I, por lo que, en caso de ocurrir el sismo durante la marea alta, los niveles de inundación se incrementarían hasta en 0.59 m conforme a la tabla de los niveles de referencia de la marea en el puerto de Acapulco, emitida por la Secretaría de Marina (ver Tabla 1.1).

Como se indicó en el capítulo 3, por simplicidad en la presentación de los resultados de este trabajo, de los 288 tsunamis modelados, se generaron los mapas de inundación y de corrientes (entrada y salida) de los 32 casos señalados en la tabla 4.1 (ver figuras 4.1 – 4.64), cabe aclarar que, en dichos mapas, la línea roja representa la línea de playa.

Tabla 4. 1. Resumen de las características de los casos que se presentan los mapas de inundación y de corrientes

Caso	Plano de falla (km)	Magnitud del sismo (Mw)	Caso	Plano de falla (km)	Magnitud del sismo (Mw)
1	90 x 90	7.5	17	210 x 90	7.5
2	90 x 90	8	18	210 x 90	8
3	90 x 90	8.4	19	210 x 90	8.4
4	90 x 90	8.9	20	210 x 90	8.9
5	120 x 90	7.5	21	240 x 90	7.5
6	120 x 90	8	22	240 x 90	8
7	120 x 90	8.4	23	240 x 90	8.4
8	120 x 90	8.9	24	240 x 90	8.9
9	150 x 90	7.5	25	270 x 90	7.5
10	150 x 90	8	26	270 x 90	8
11	150 x 90	8.4	27	270 x 90	8.4
12	150 x 90	8.9	28	270 x 90	8.9
13	180 x 90	7.5	29	300 x 90	7.5
14	180 x 90	8	30	300 x 90	8
15	180 x 90	8.4	31	300 x 90	8.4
16	180 x 90	8.9	32	300 x 90	8.9

- **Caso 1:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.5 m.

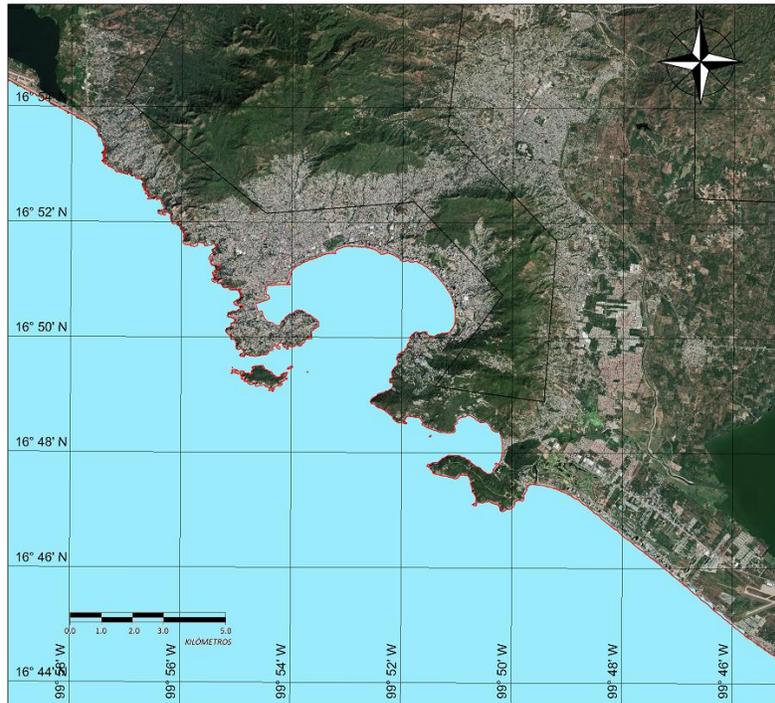


Figura 4. 1. Superficie máxima de inundación generada por el tsunami (Caso 1)

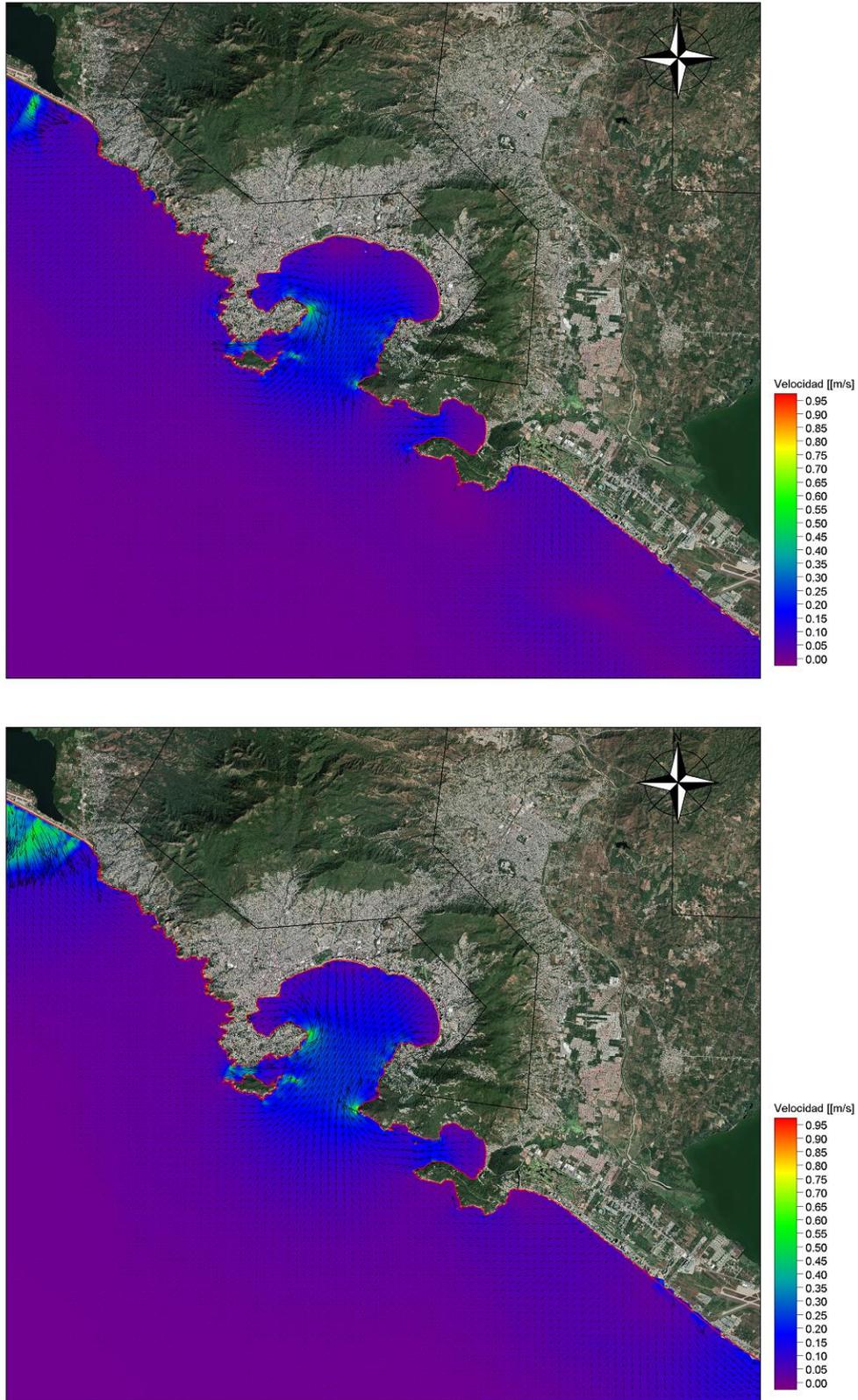


Figura 4. 2. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 1)

- **Caso 2:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 2.6 m.

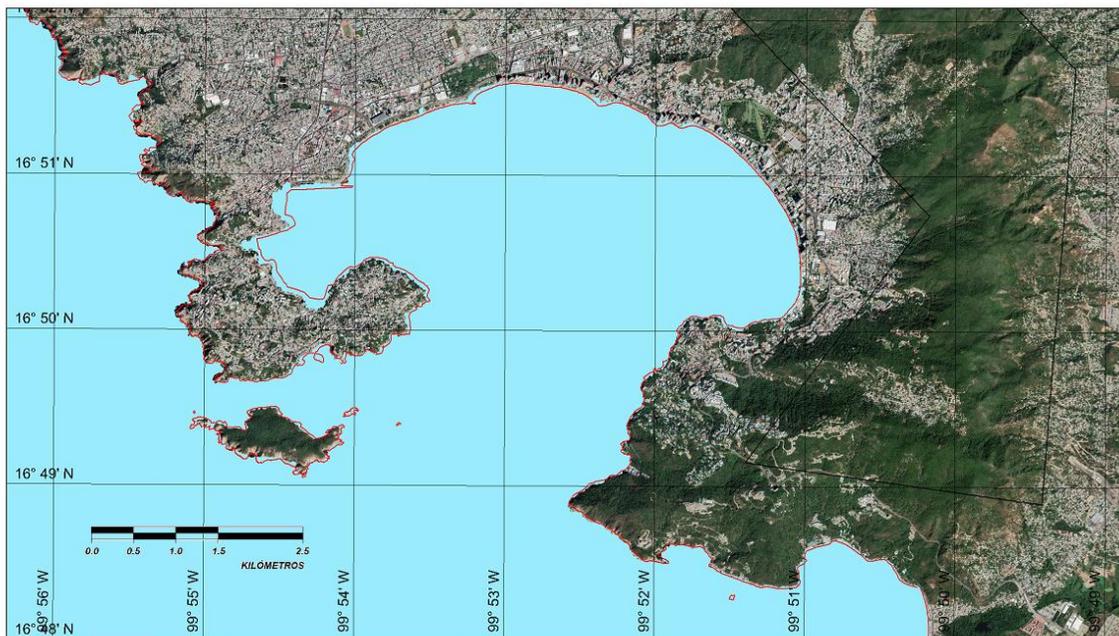
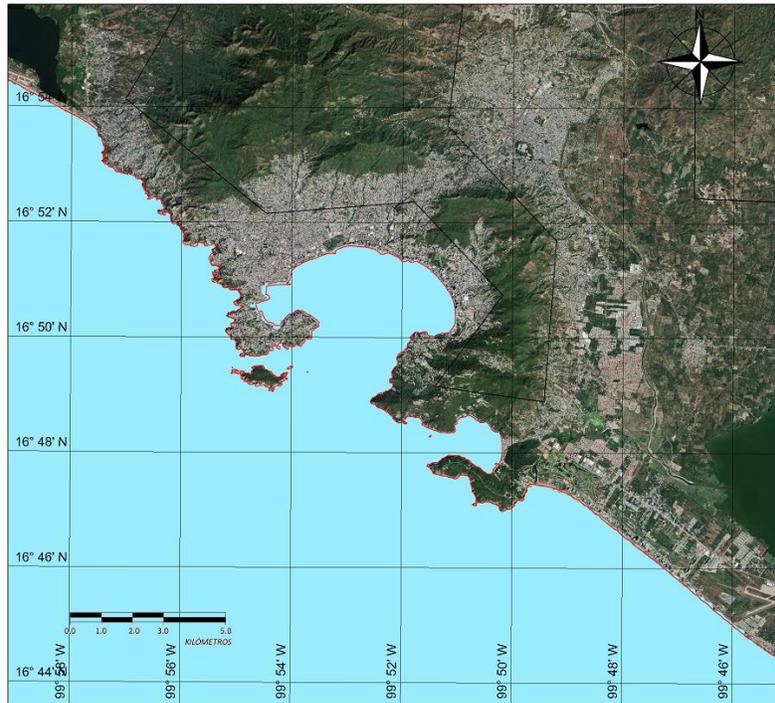


Figura 4. 3. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 2)

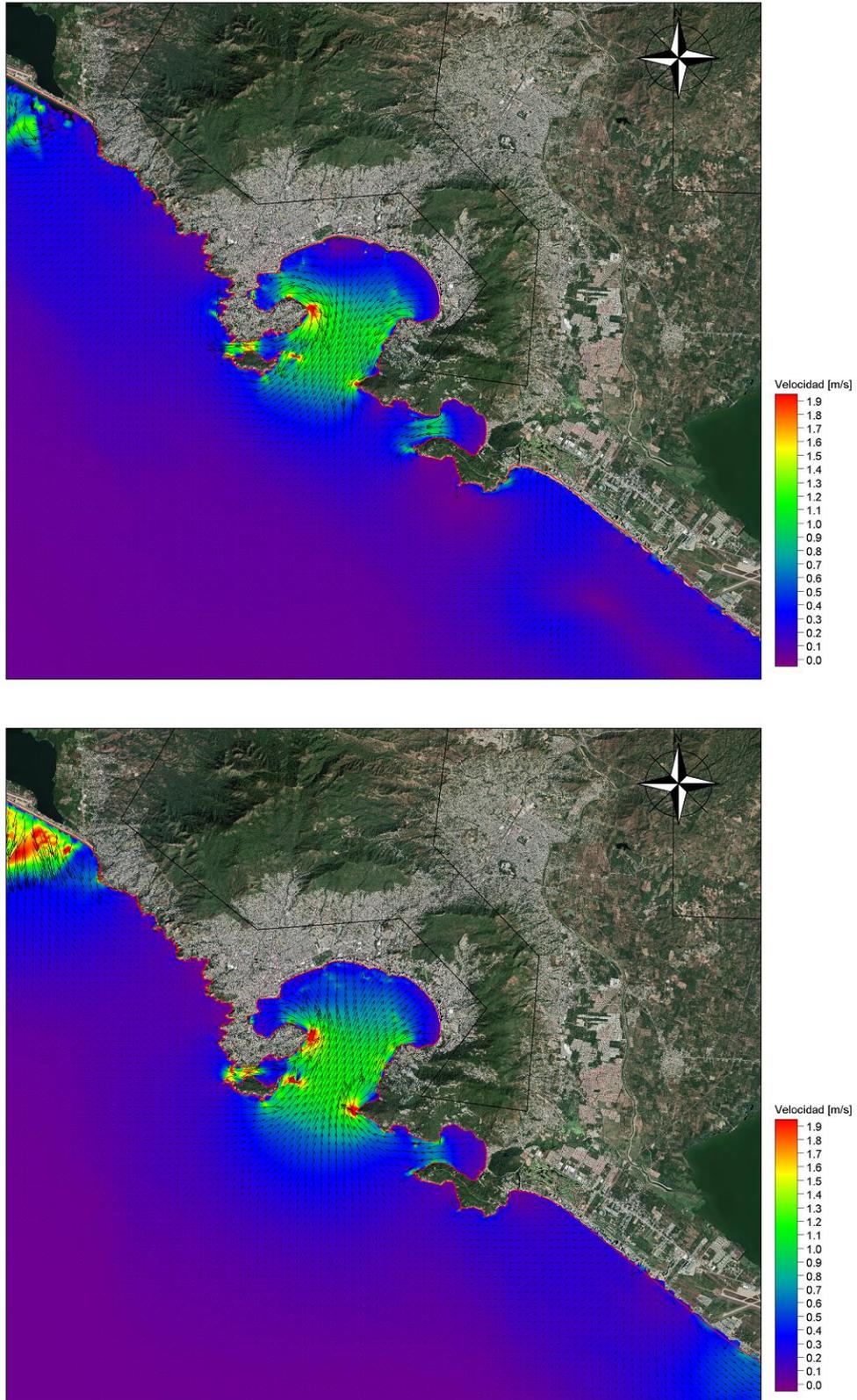


Figura 4. 4. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 2)

- **Caso 3:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 10.4 m.

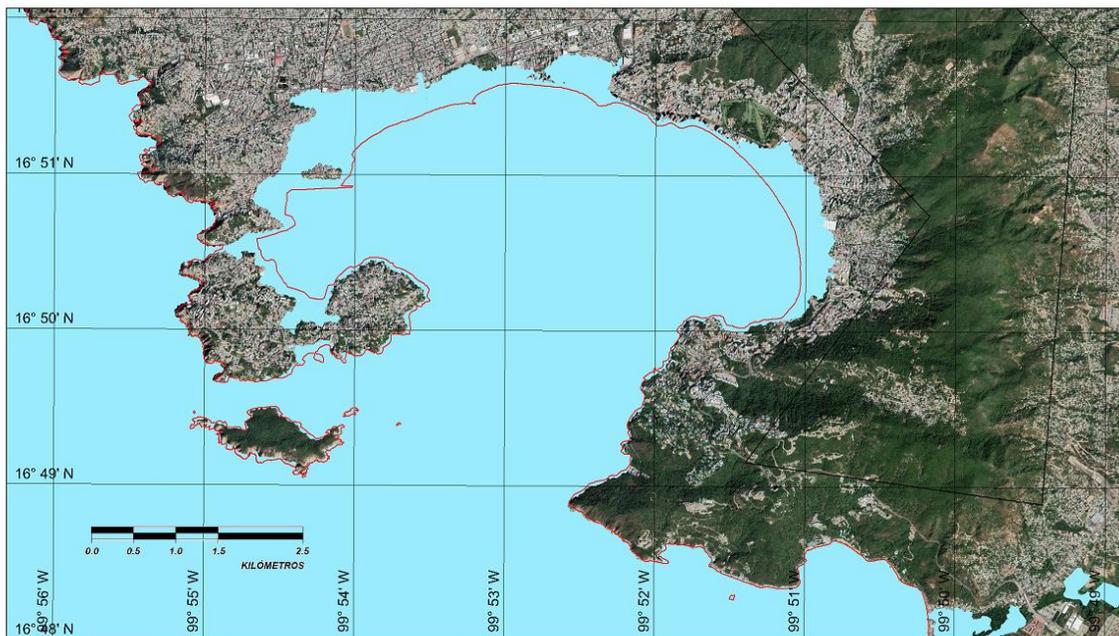
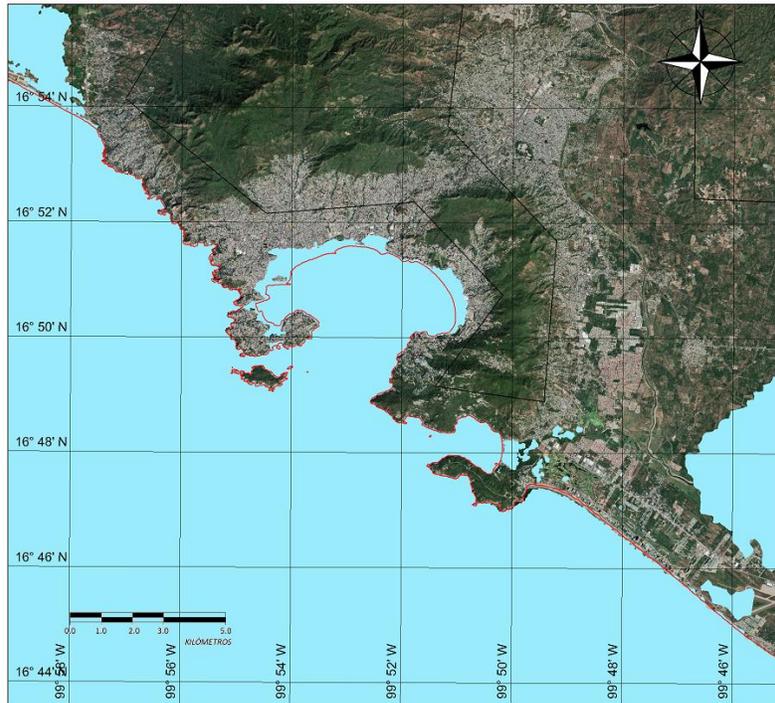


Figura 4. 5. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 3)

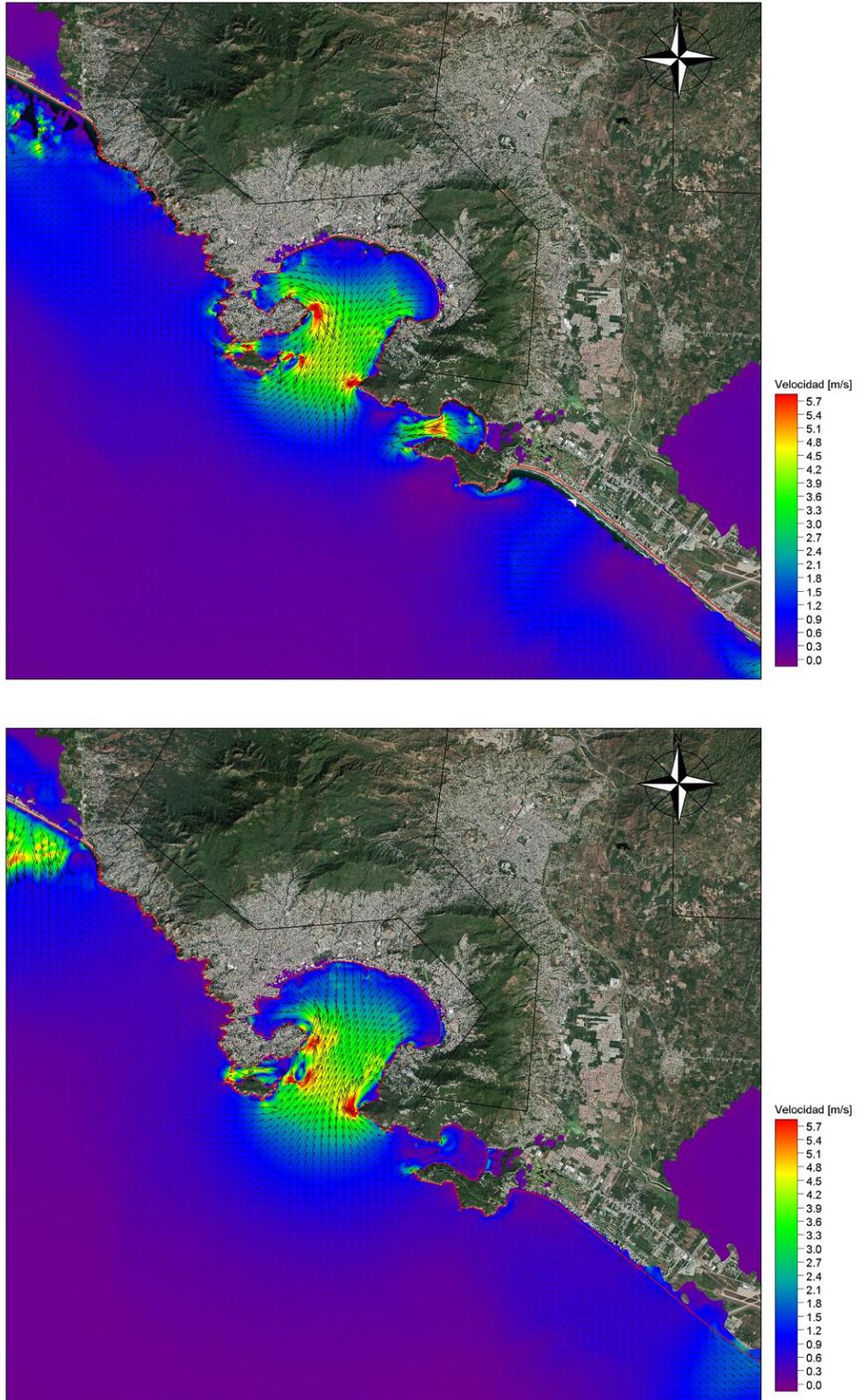


Figura 4. 6. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 3)

- **Caso 4:** Plano de falla 90 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 58 m.

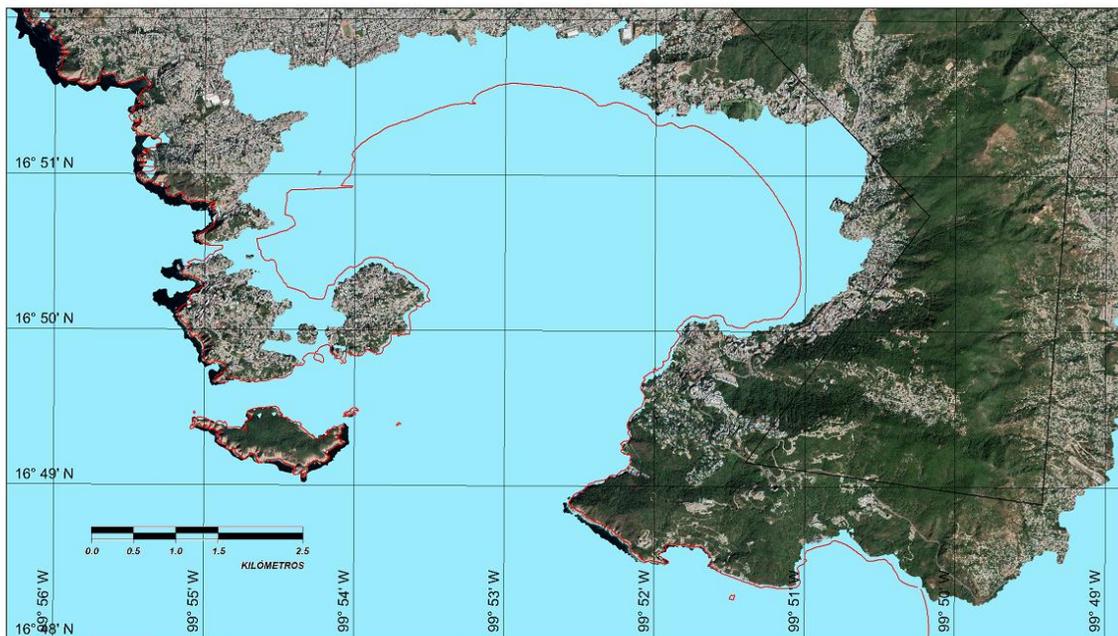
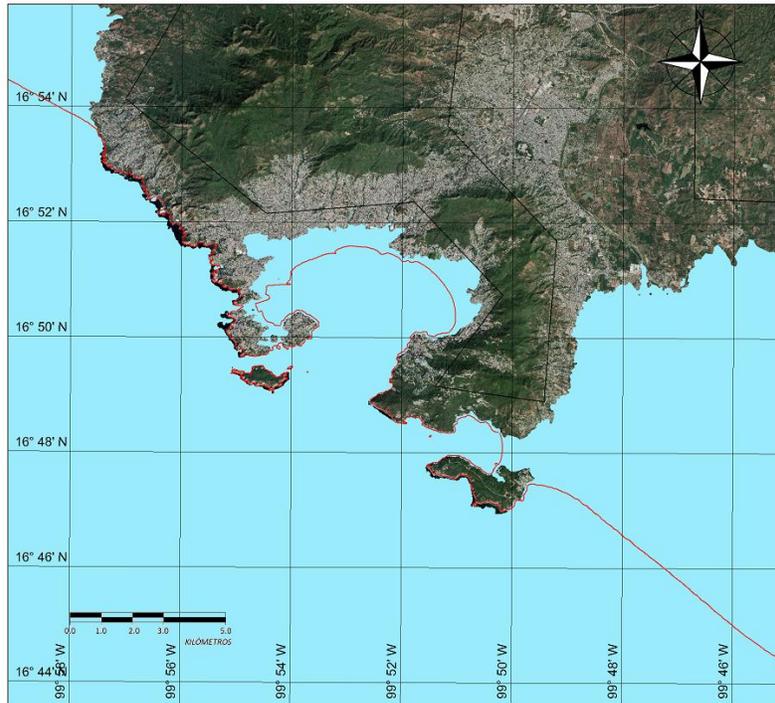


Figura 4. 7. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 4)

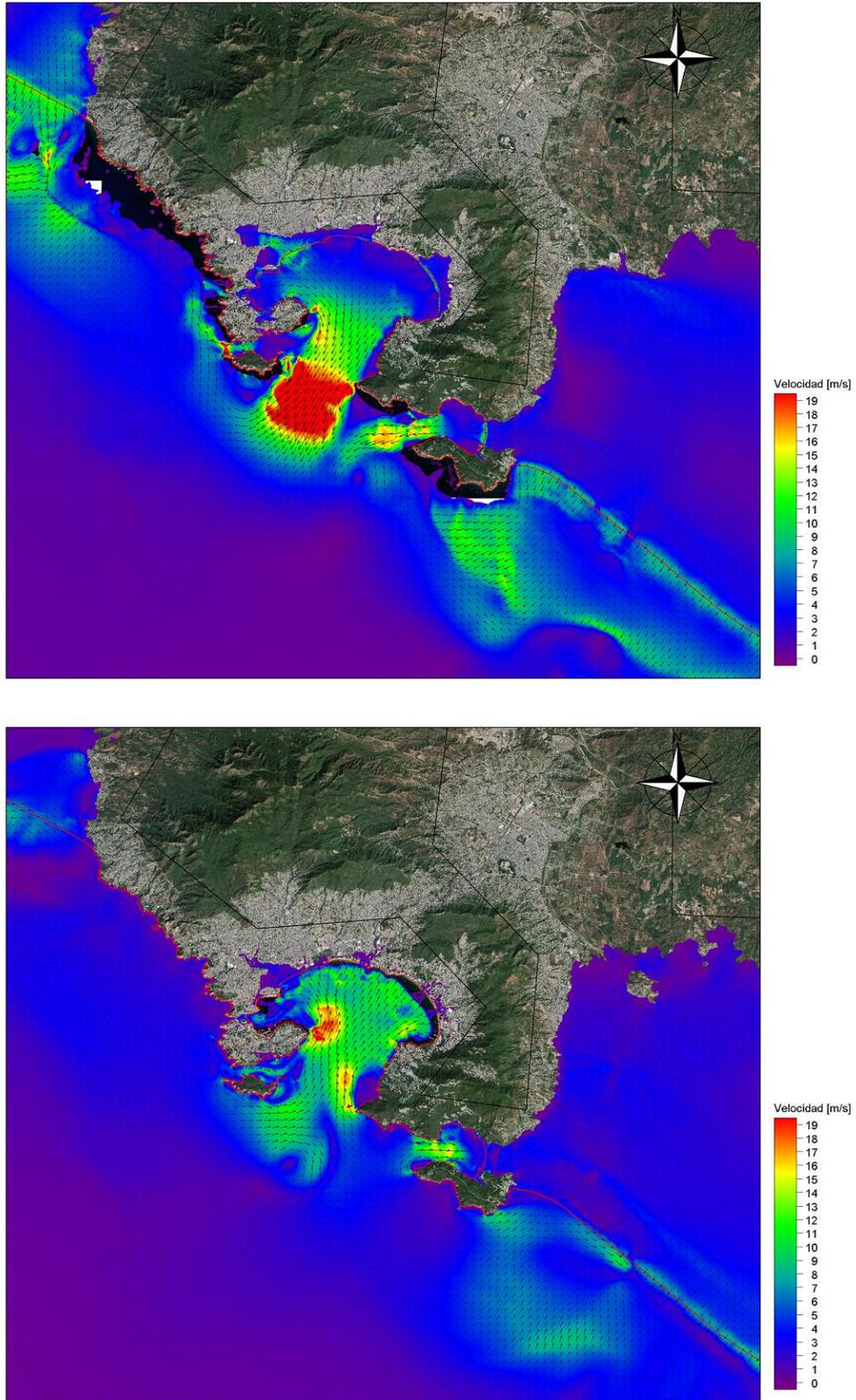


Figura 4. 8. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 4)

- **Caso 5:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.4 m.

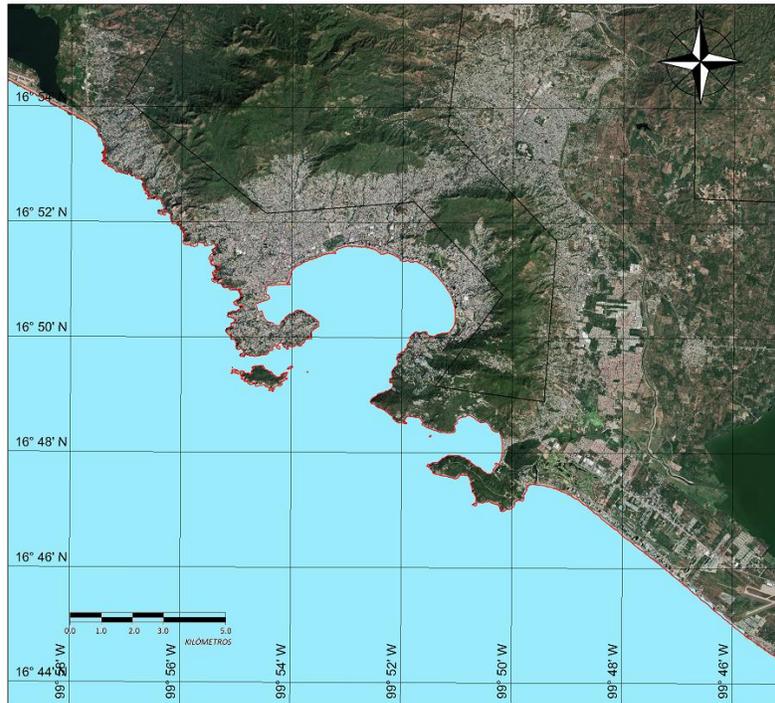


Figura 4. 9. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 5)

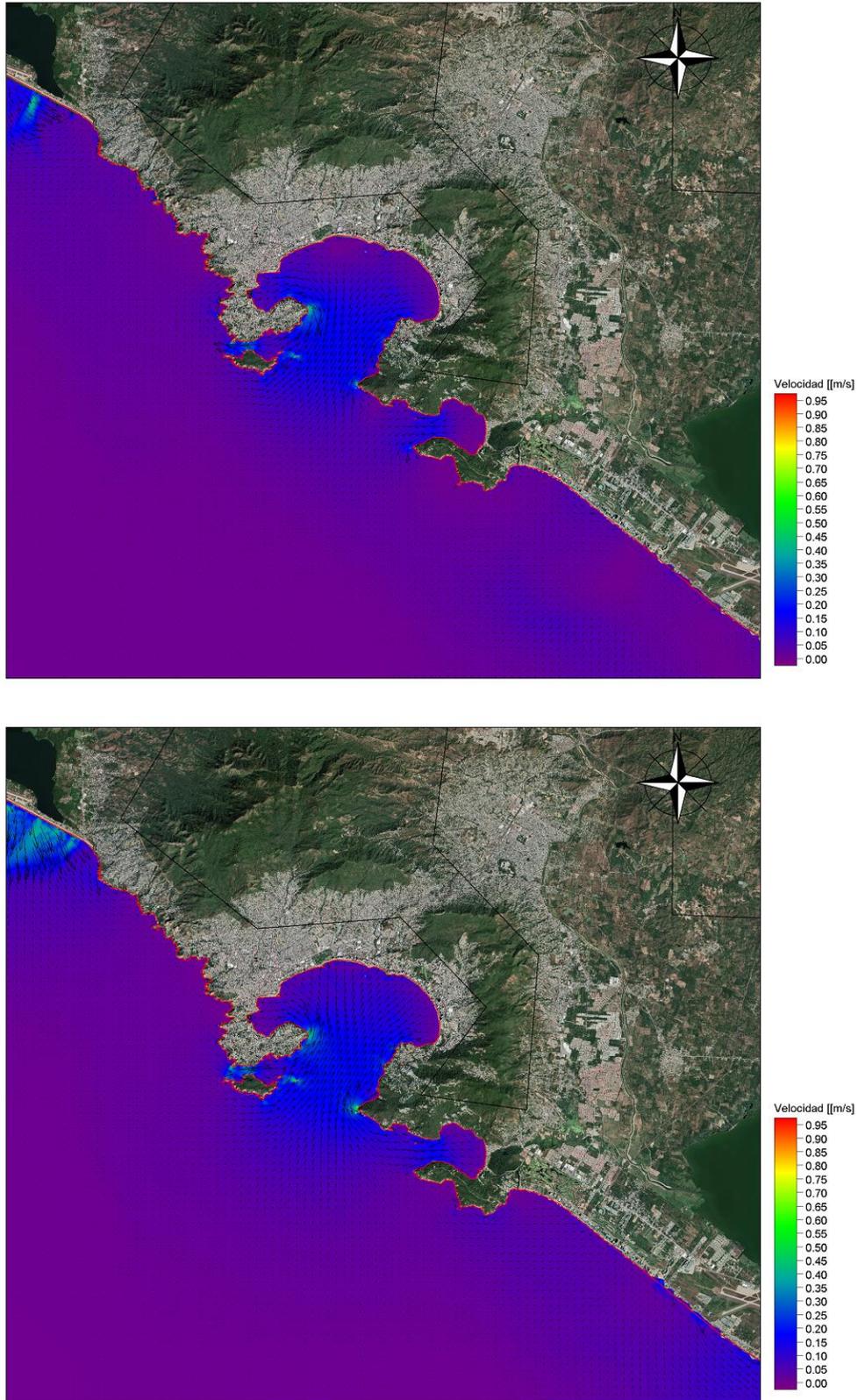


Figura 4. 10. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 5)

- **Caso 6:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 2.0 m.

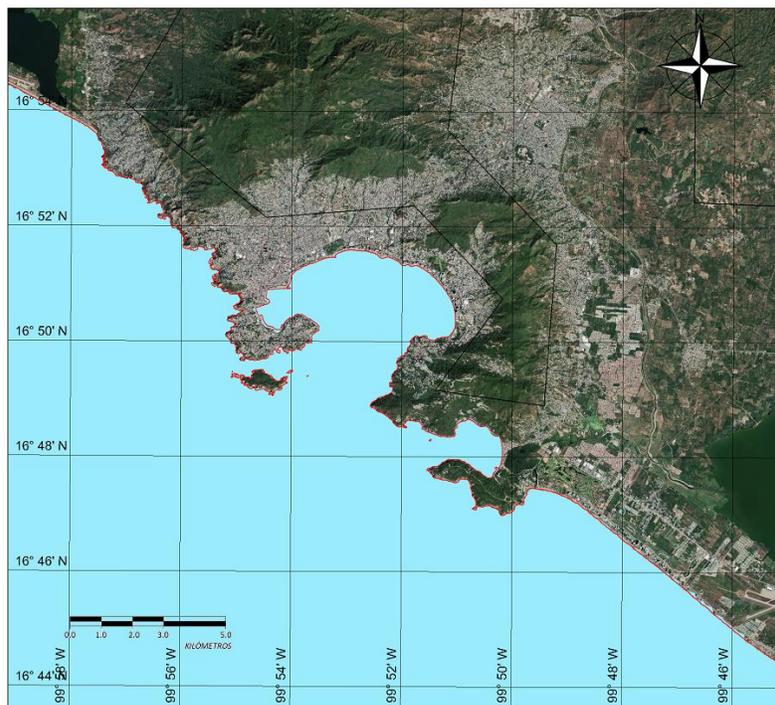


Figura 4. 11. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 6)

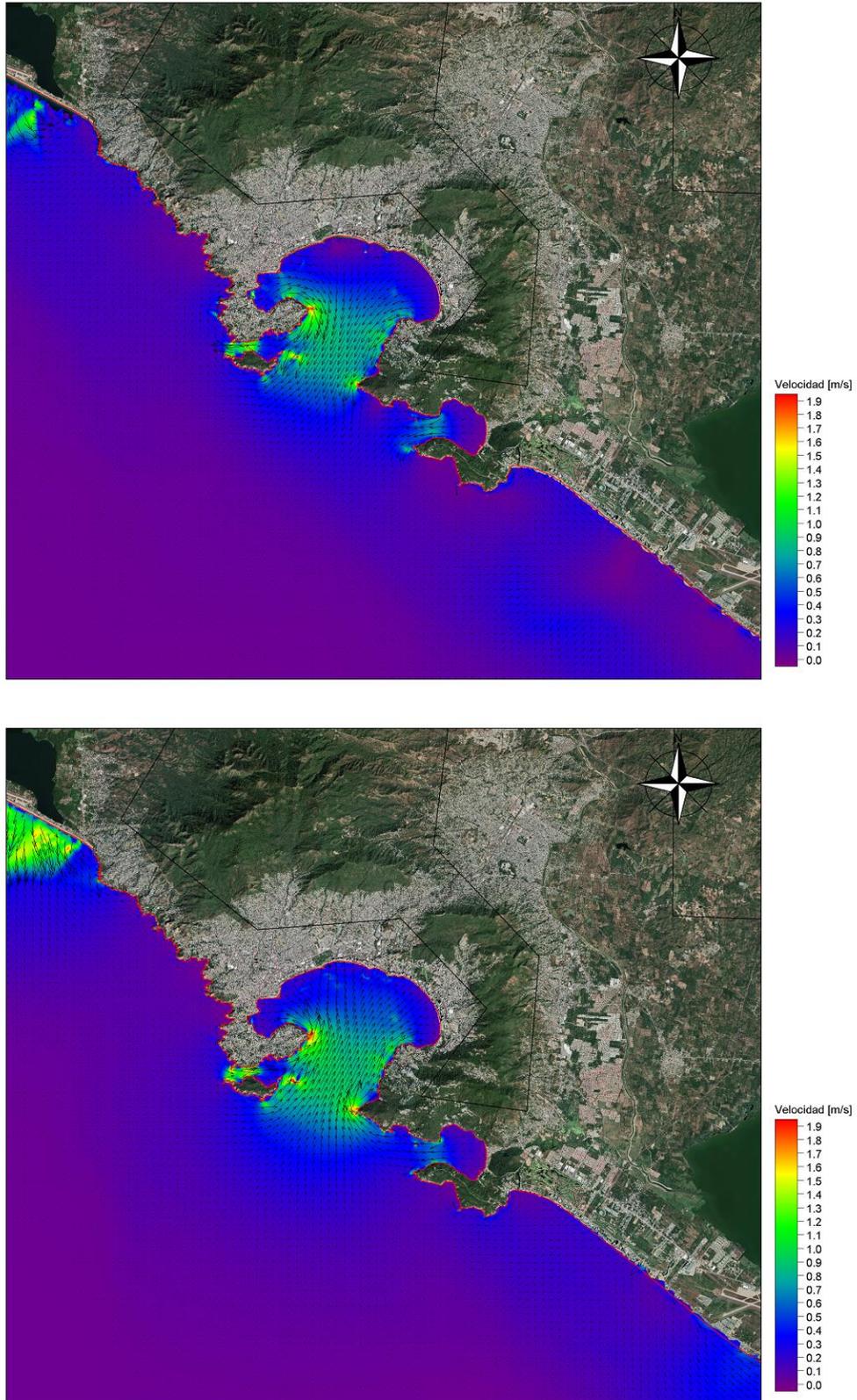


Figura 4. 12. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 6)

- **Caso 7:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 7.8 m.

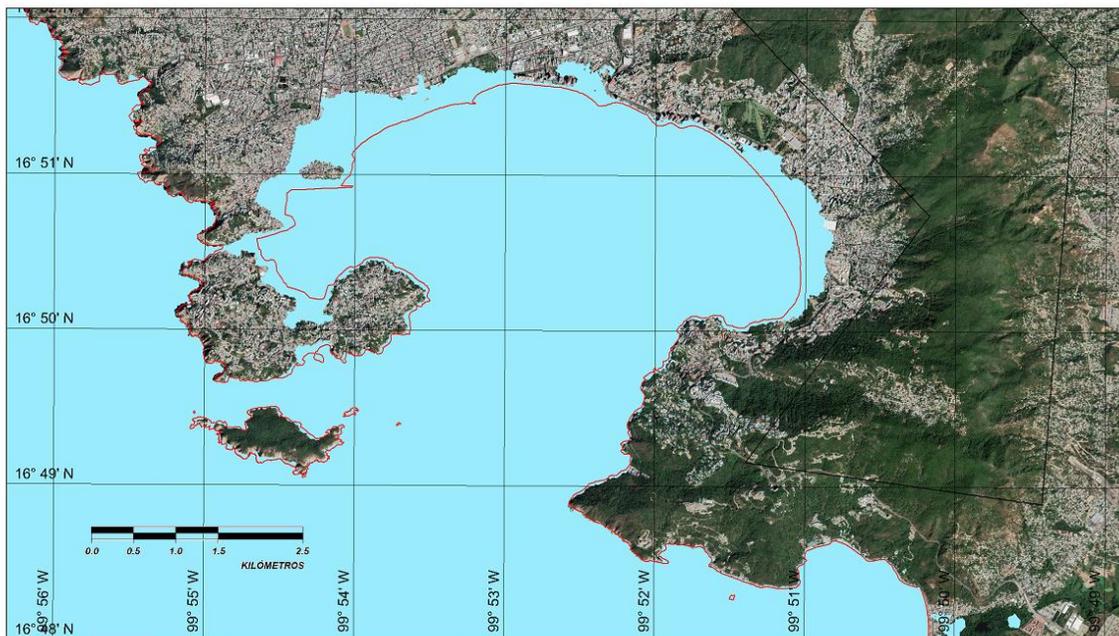
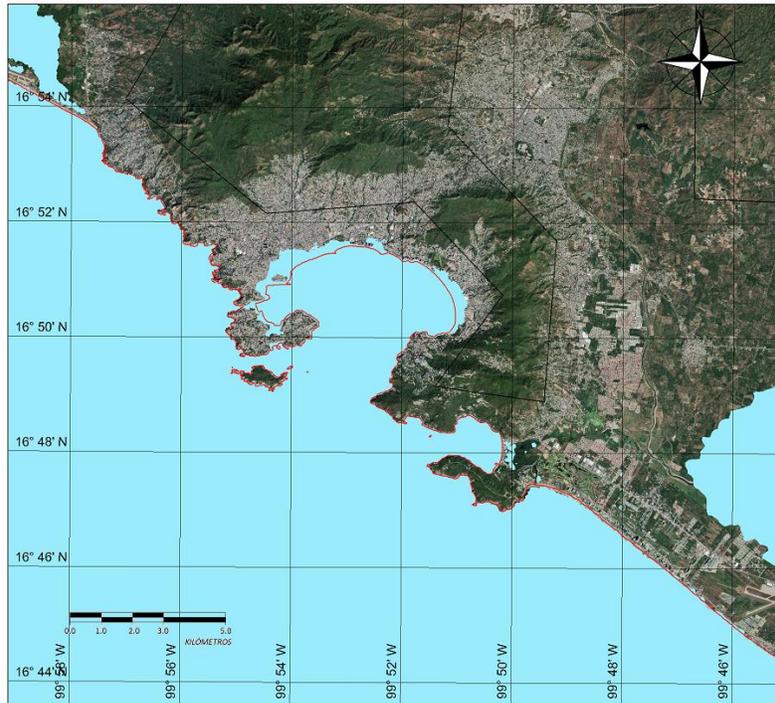


Figura 4. 13. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 7)

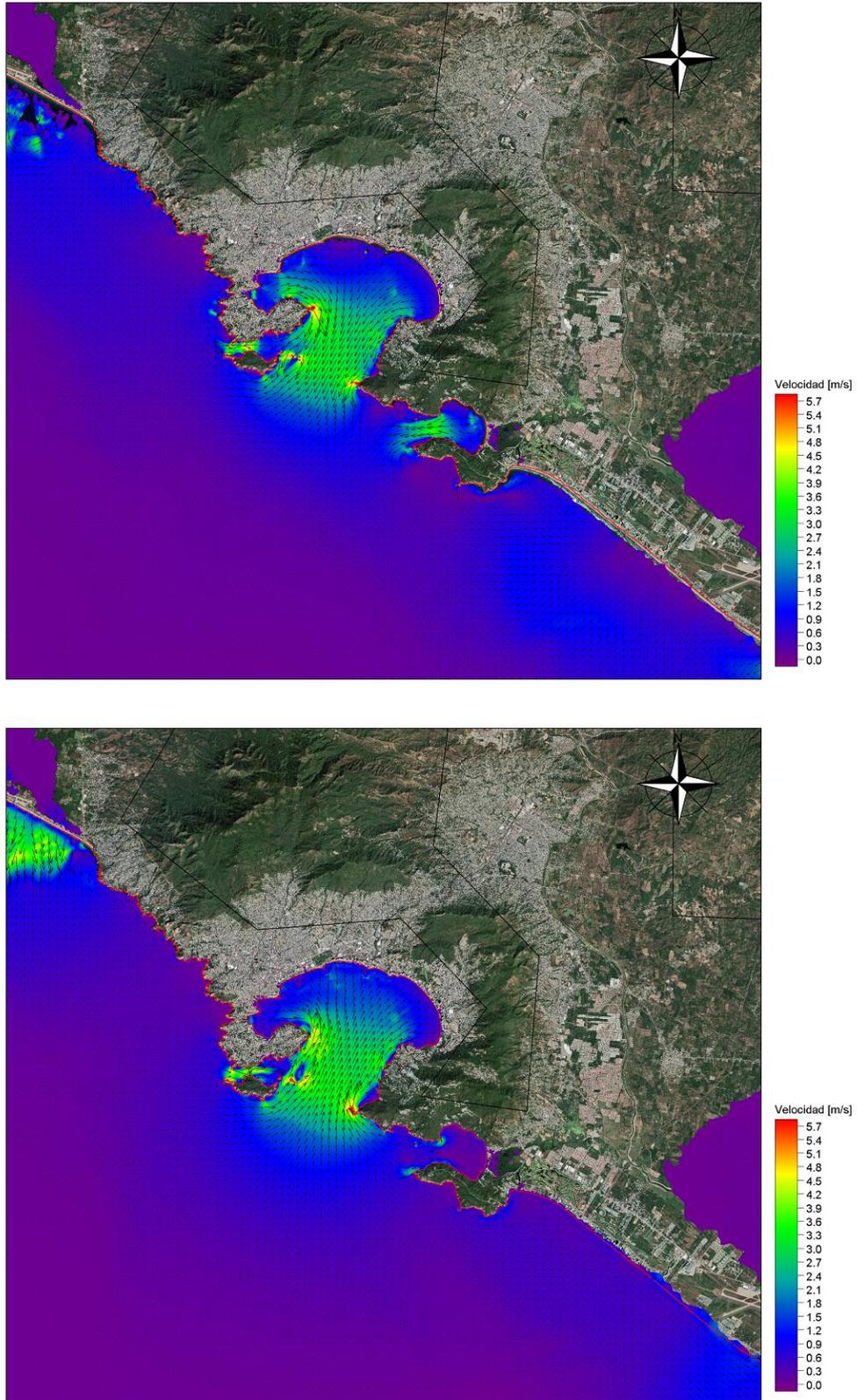


Figura 4. 14. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 7)

- **Caso 8:** Plano de falla 120 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 43.5 m.

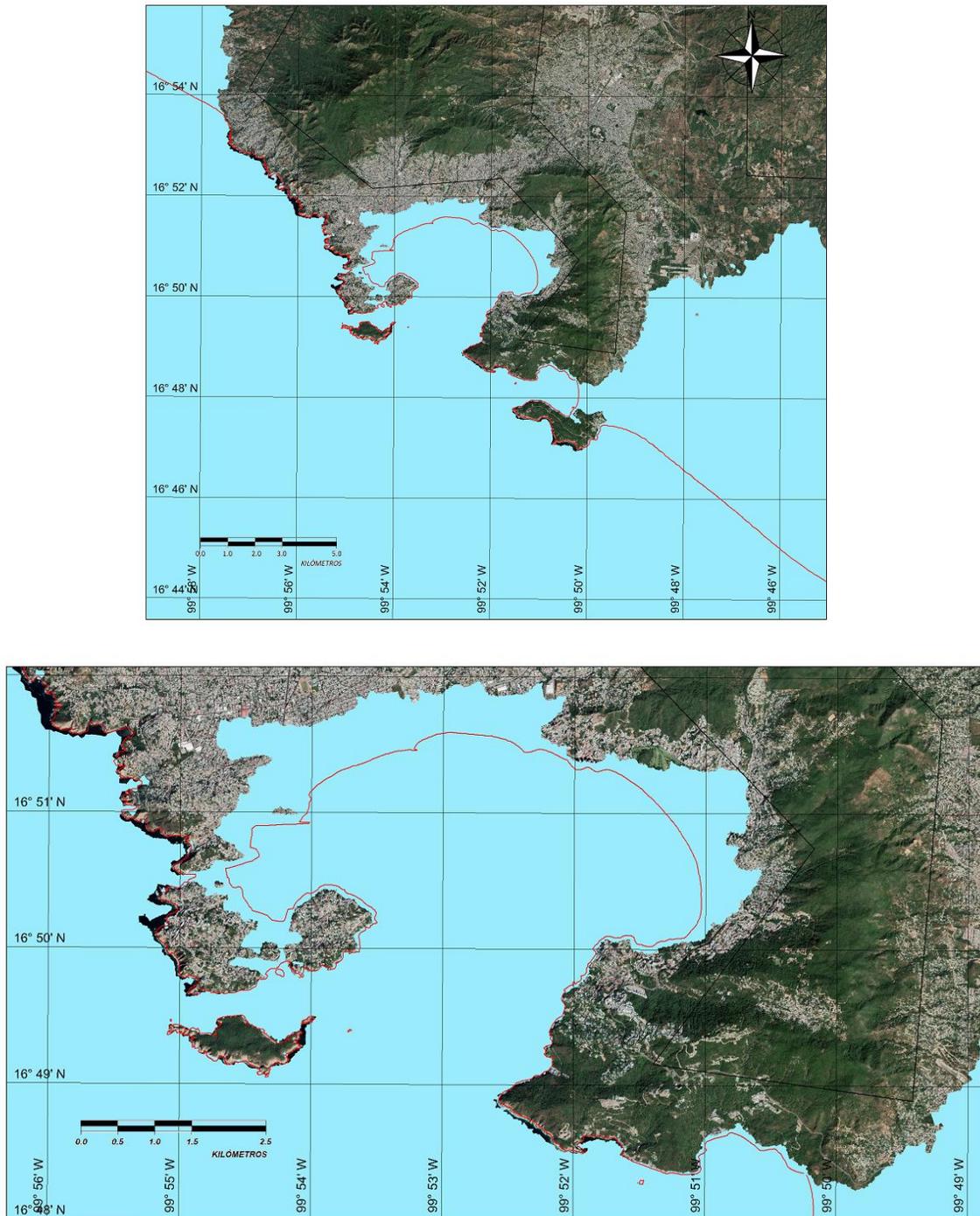


Figura 4. 15. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 8)

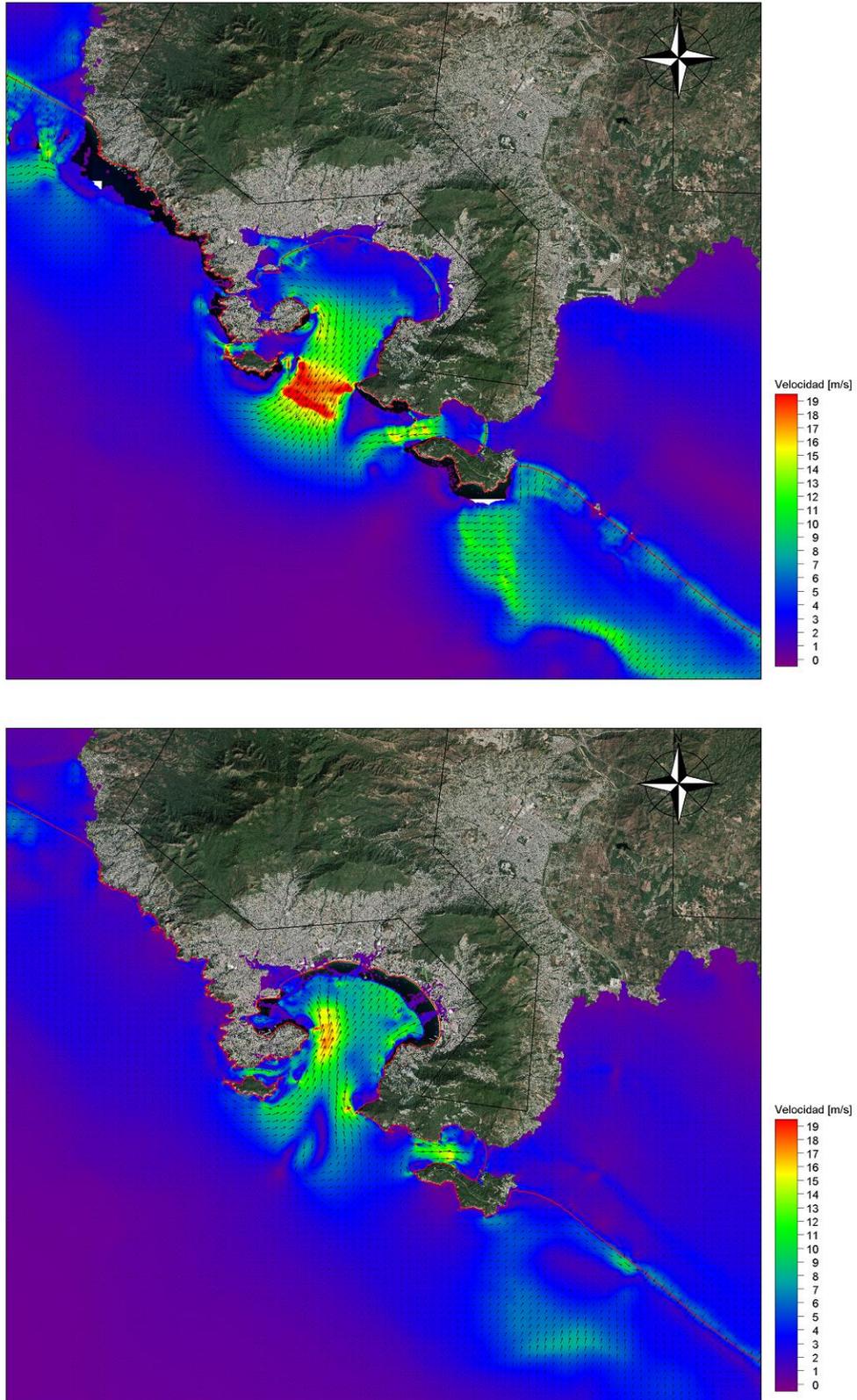


Figura 4. 16. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 8)

- **Caso 9:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.3 m.

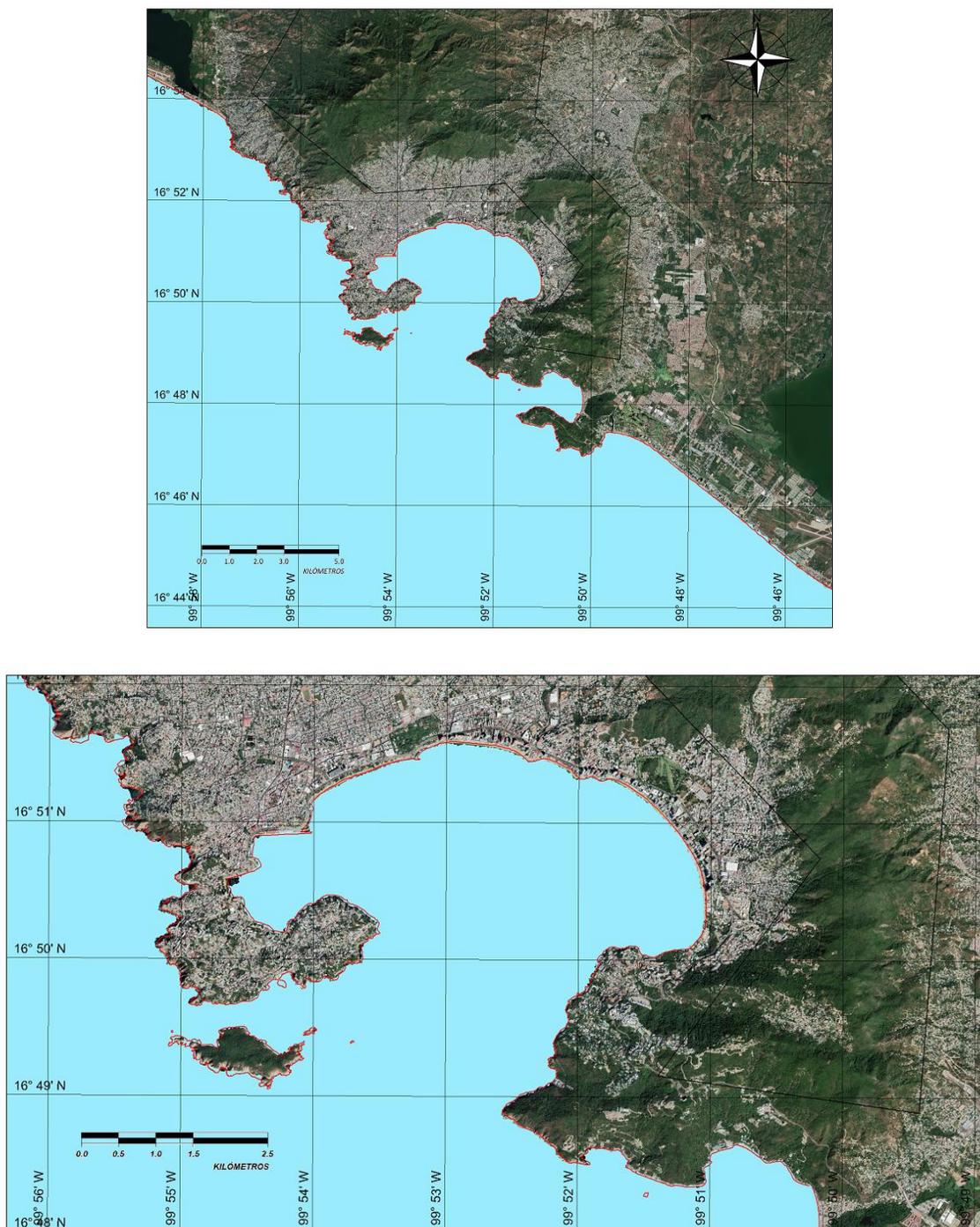


Figura 4. 17. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 9)

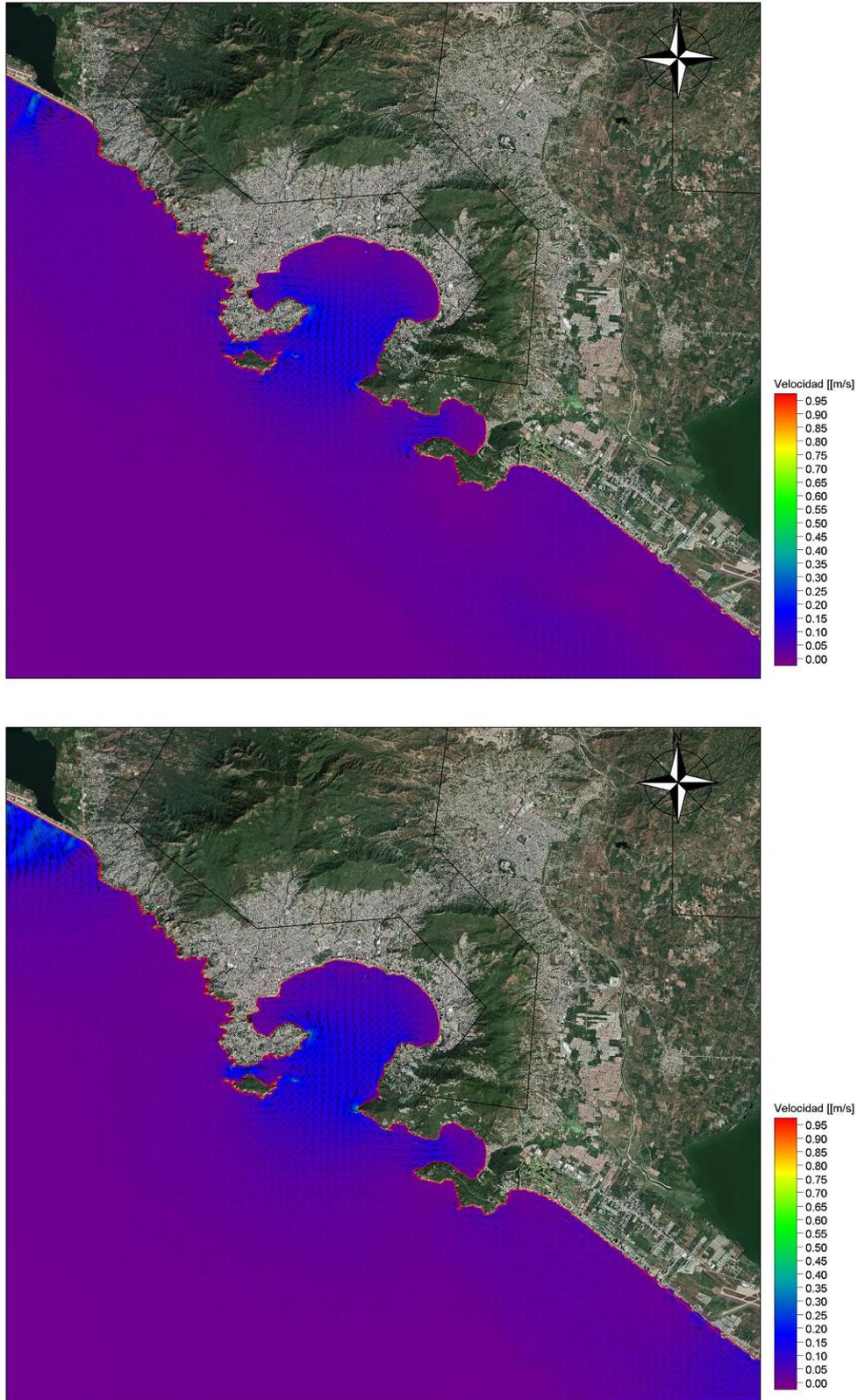


Figura 4. 18. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 9)

- **Caso 10:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.6 m.

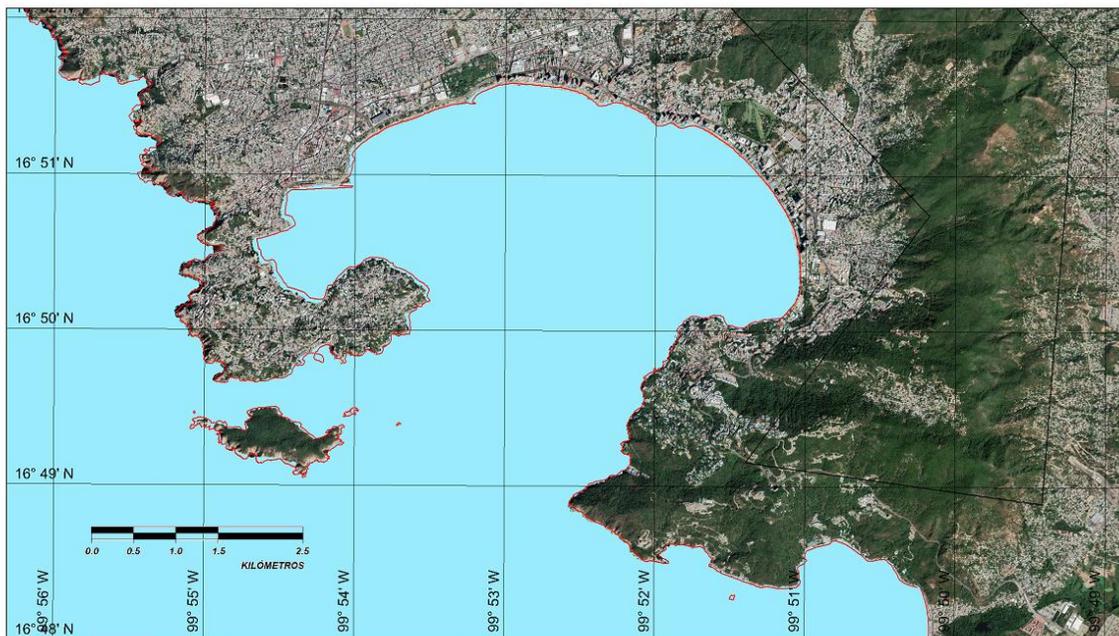
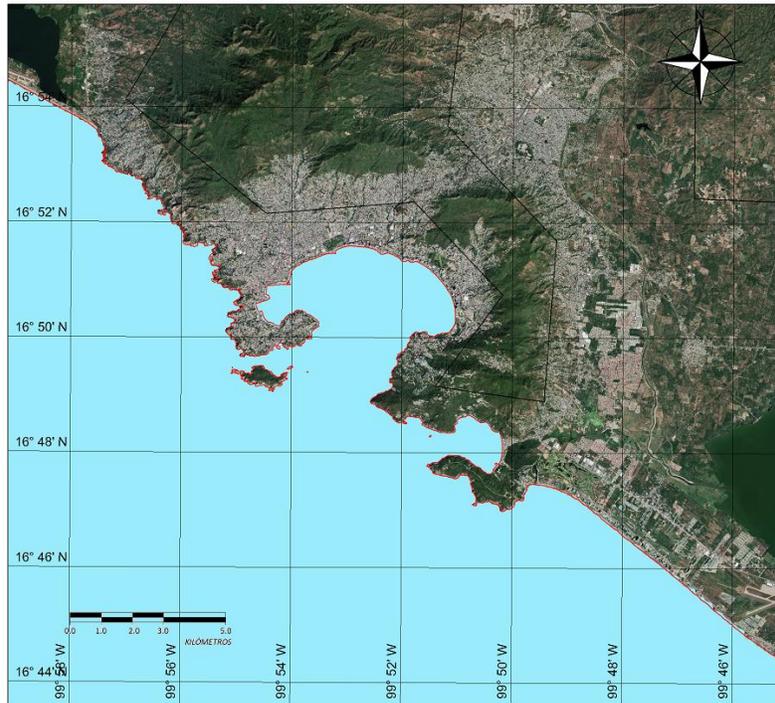


Figura 4. 19. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 10)

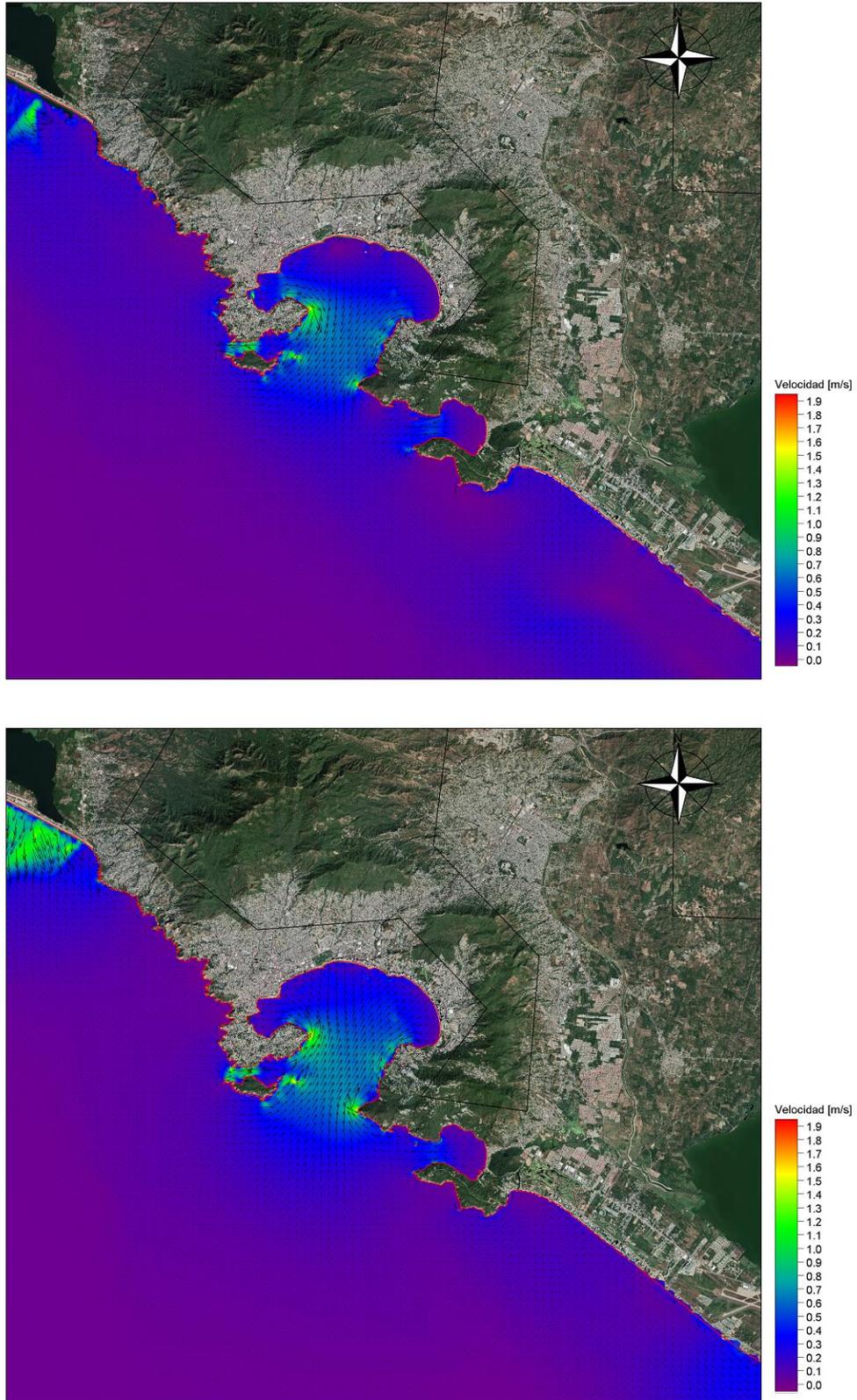


Figura 4. 20. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 10)

- **Caso 11:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 6.2 m.

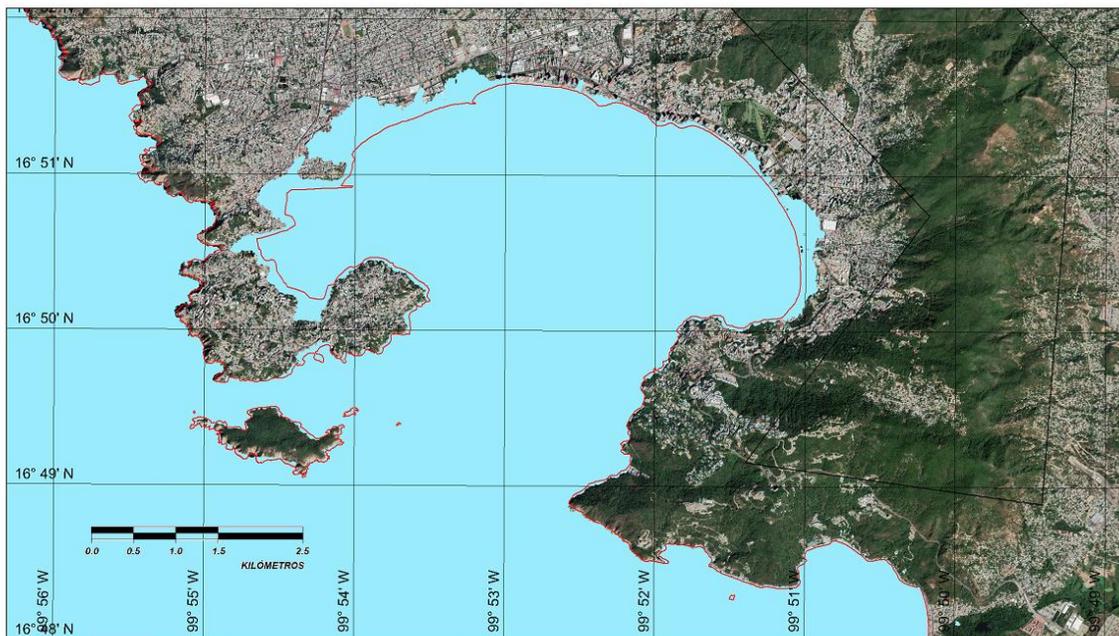
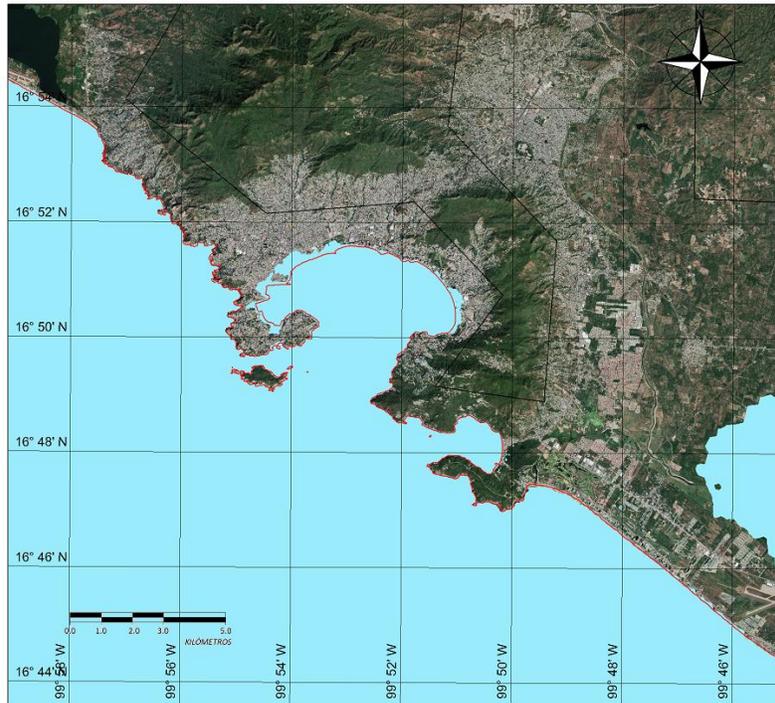


Figura 4. 21. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 11)

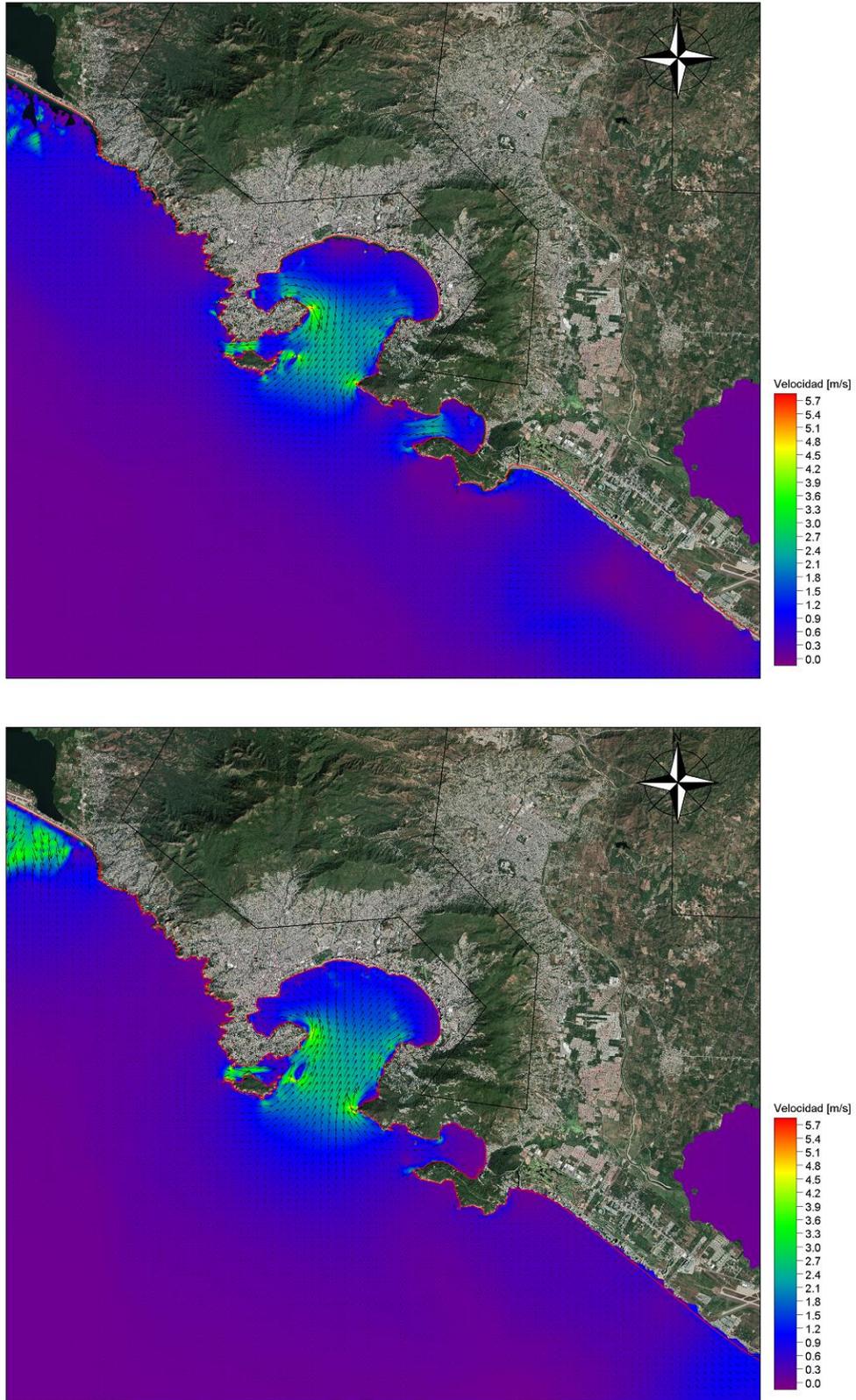


Figura 4. 22. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 11)

- **Caso 12:** Plano de falla 150 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 34.8 m.

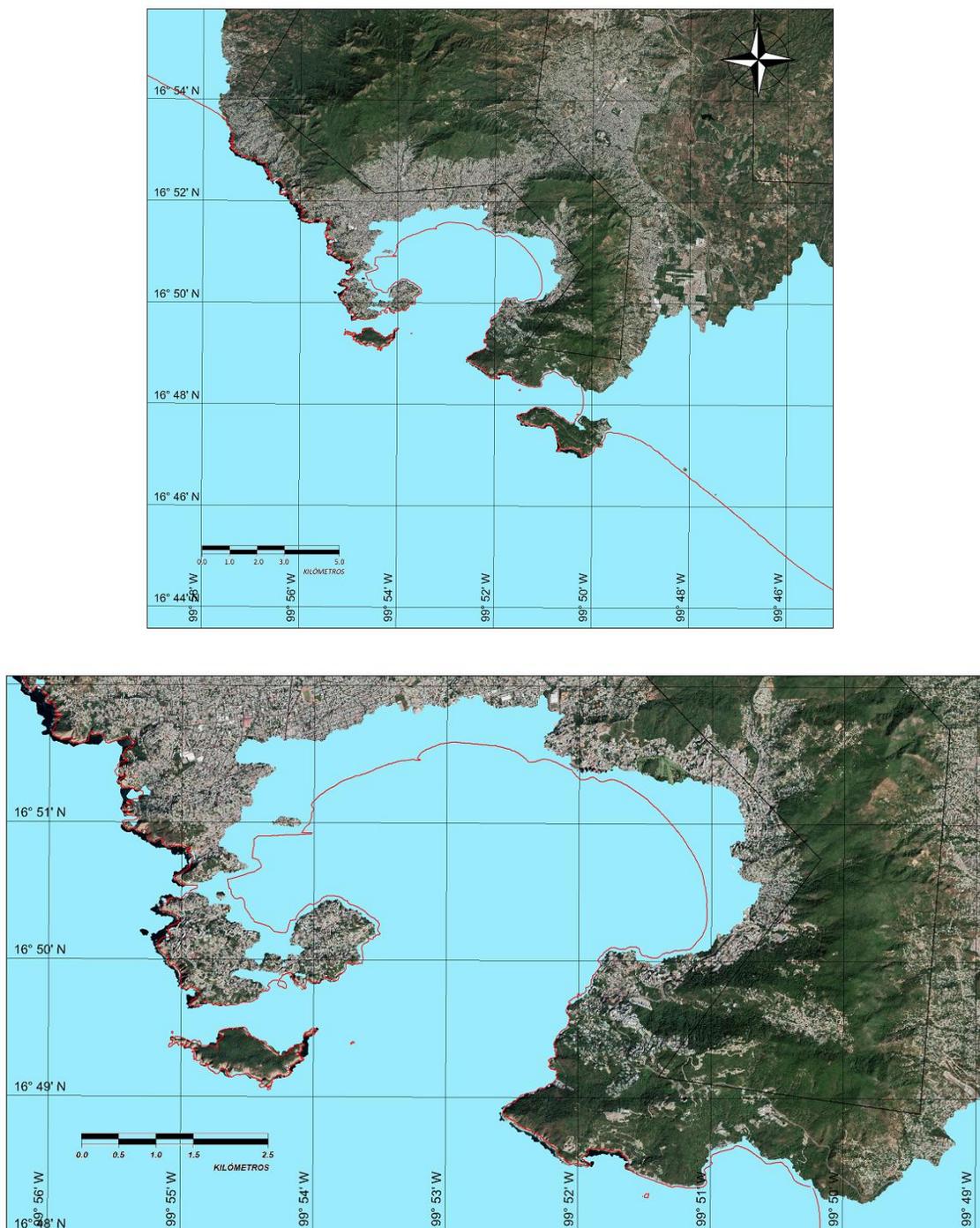


Figura 4. 23. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 12)

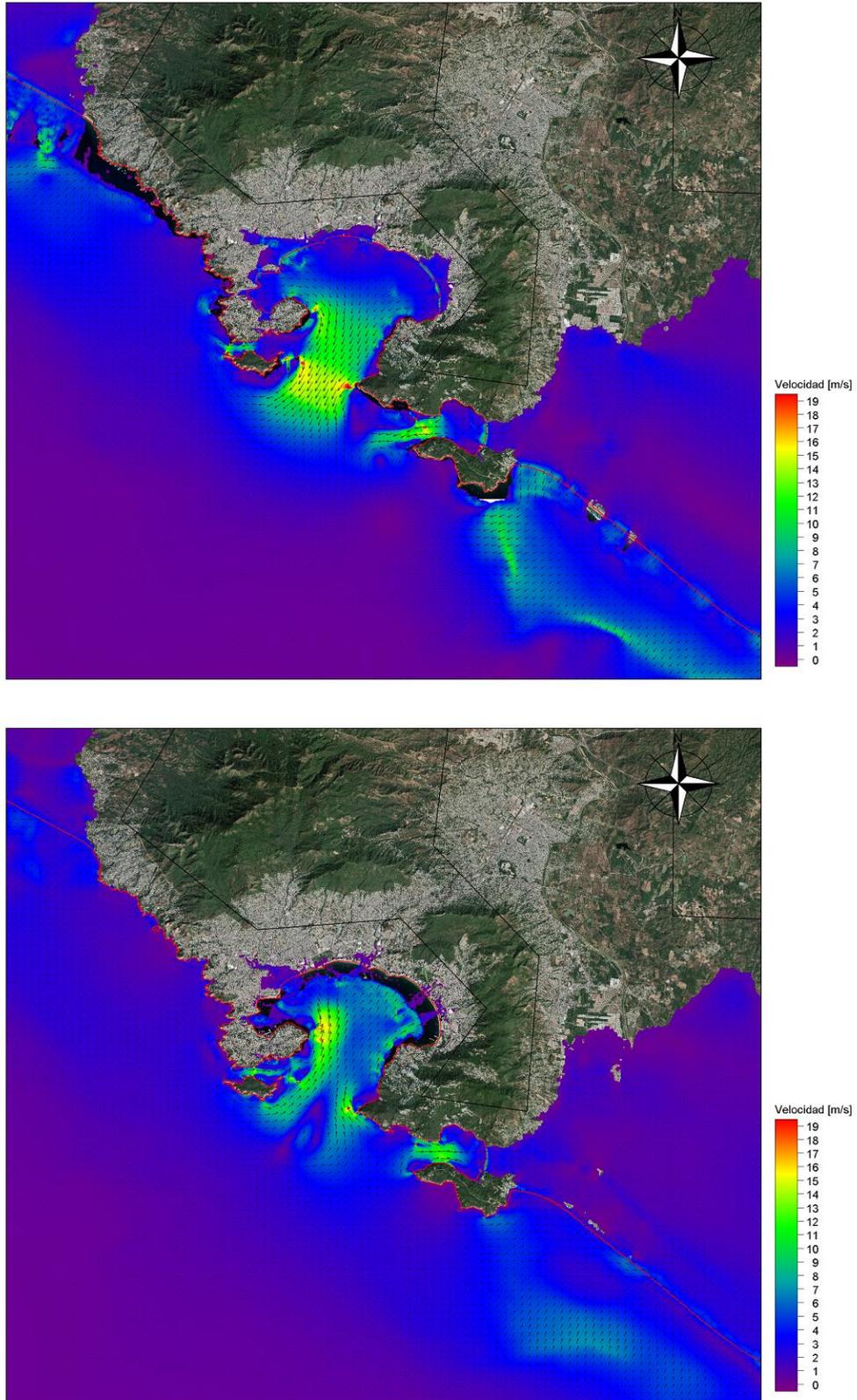


Figura 4. 24. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 12)

- **Caso 13:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.3 m.

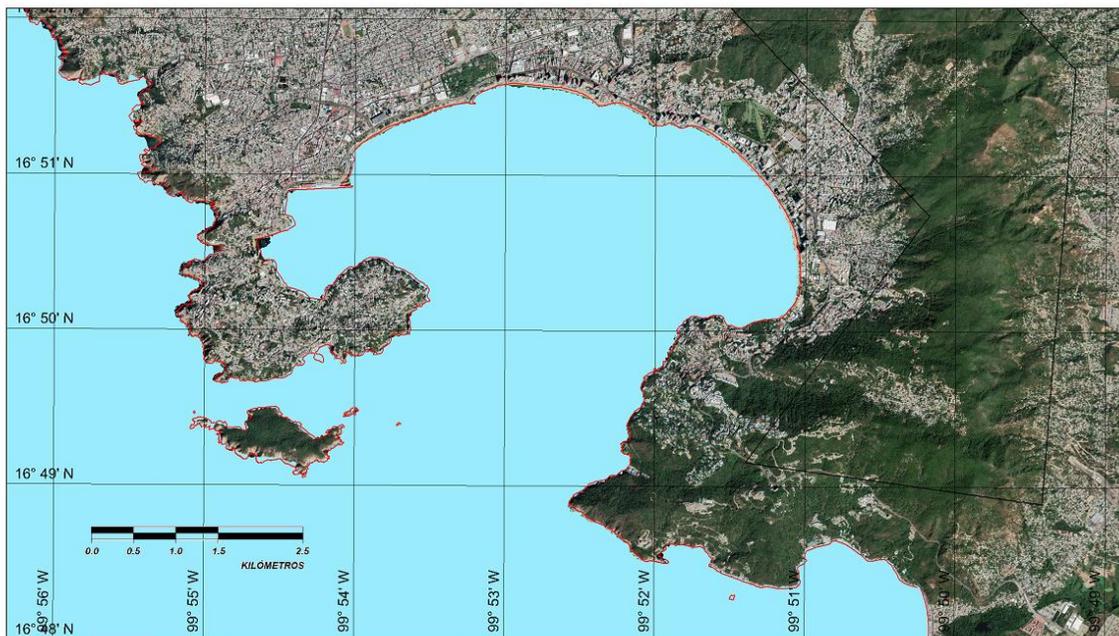
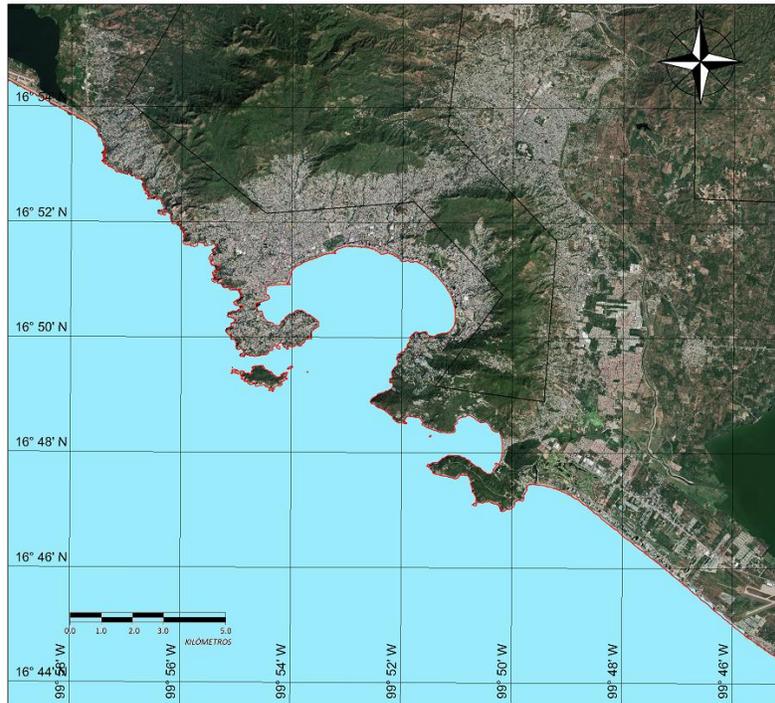


Figura 4. 25. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 13)

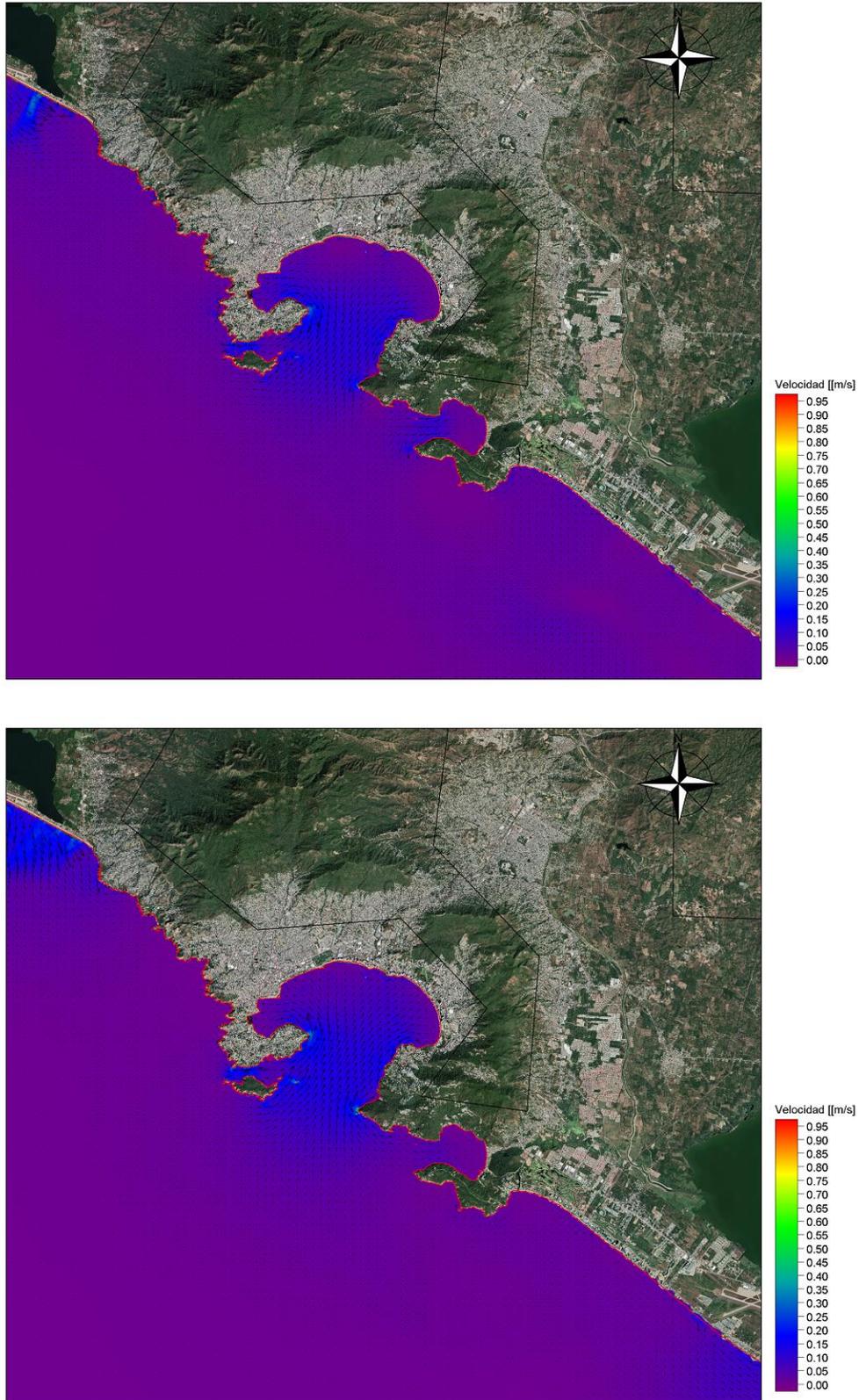


Figura 4. 26. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 13)

- **Caso 14:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.3 m.

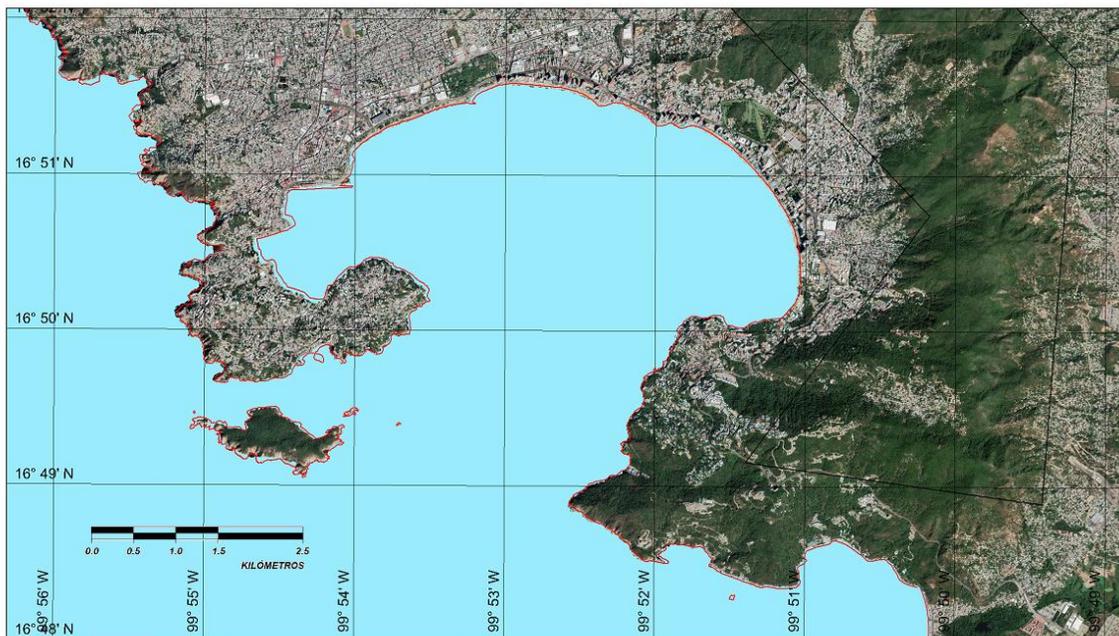
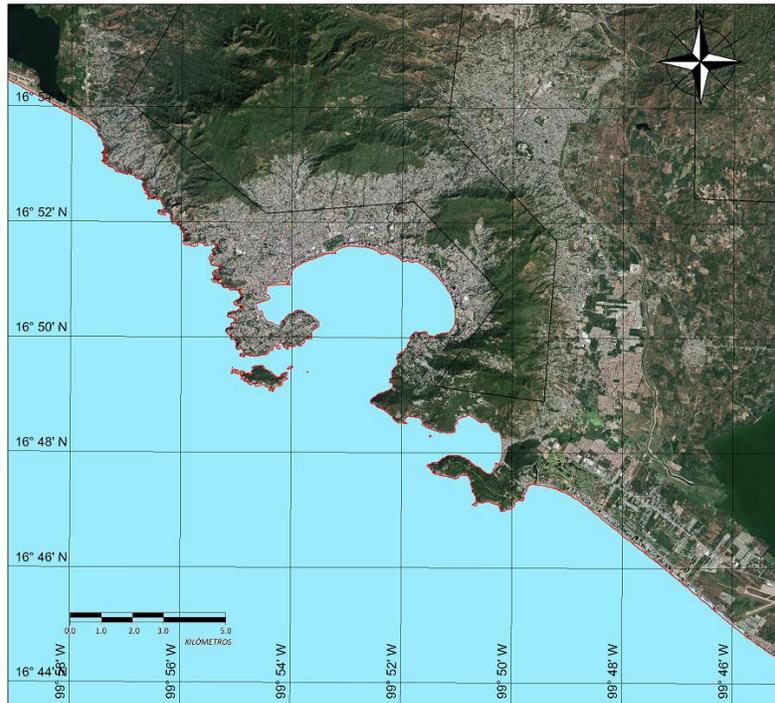


Figura 4. 27. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 14)

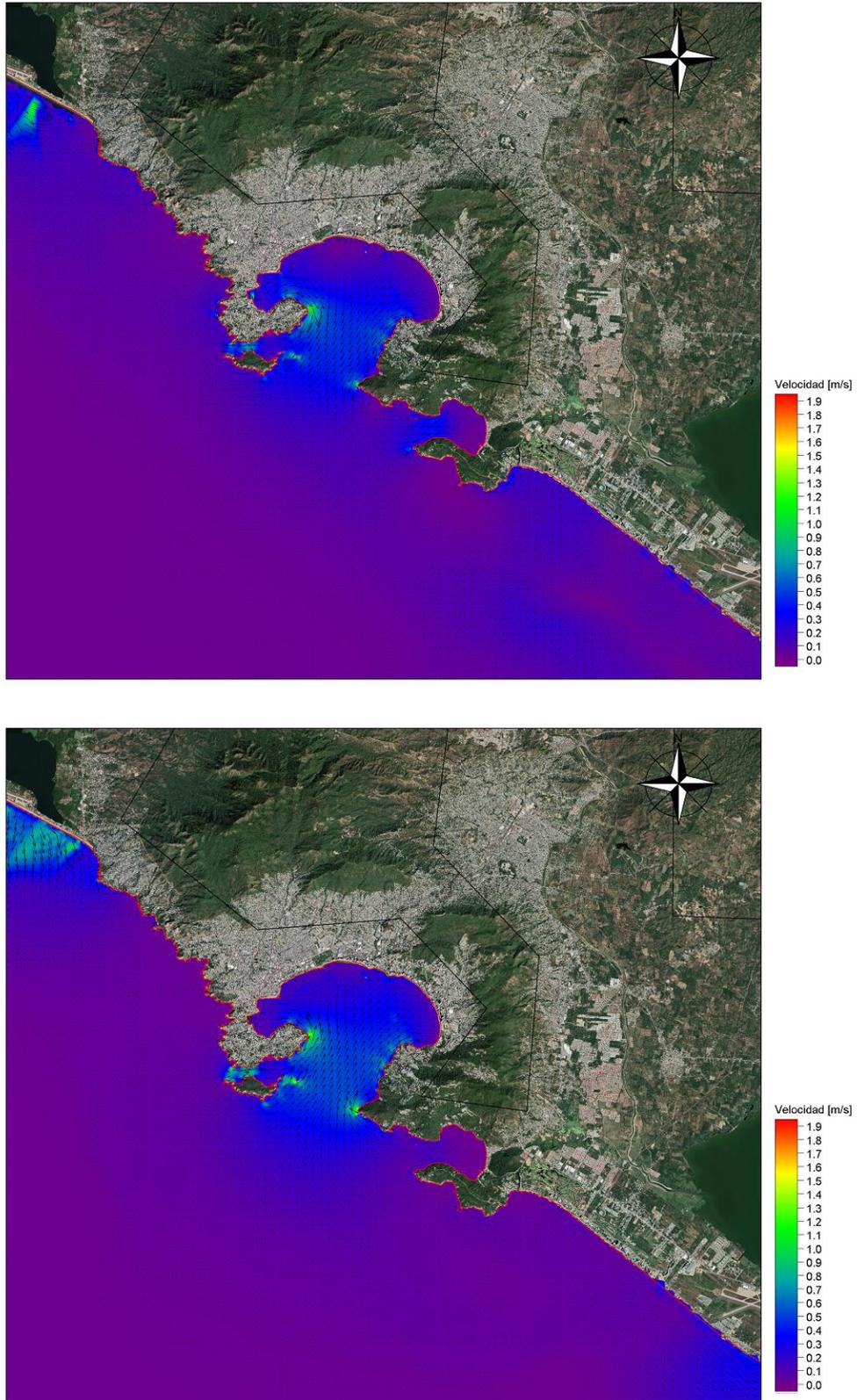


Figura 4. 28. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 14)

- **Caso 15:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 5.2 m.

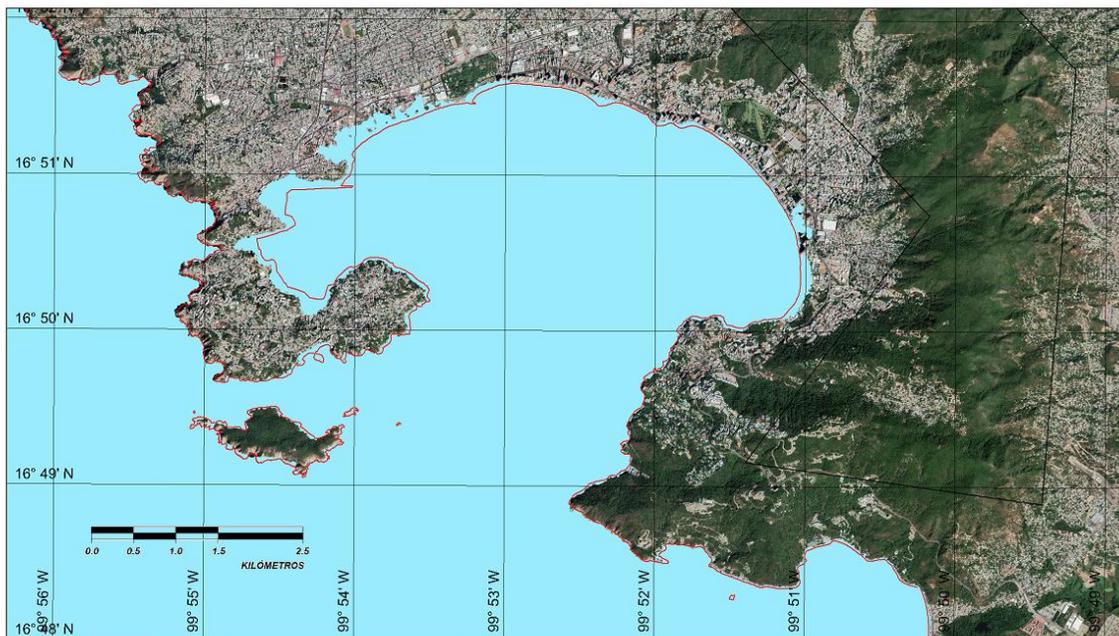
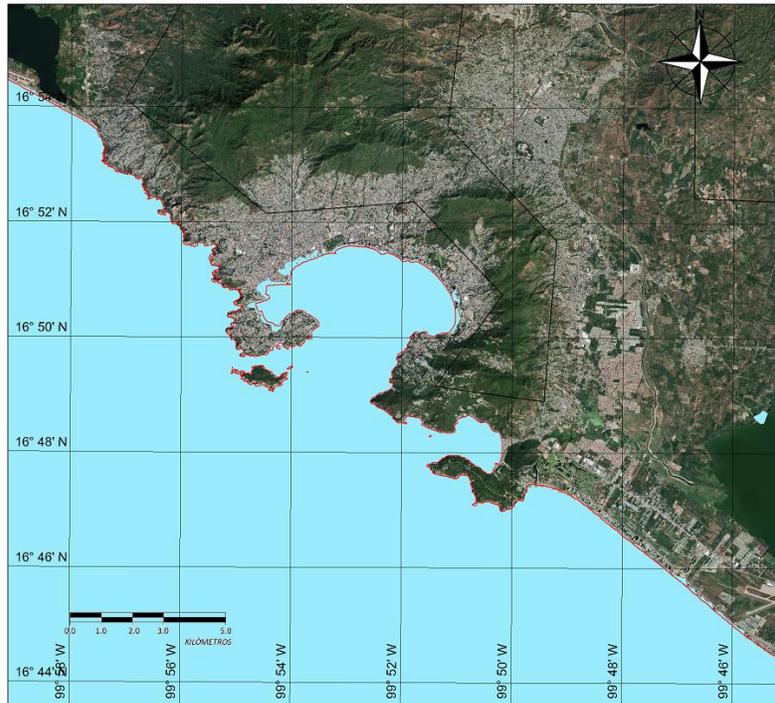


Figura 4. 29. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 15)

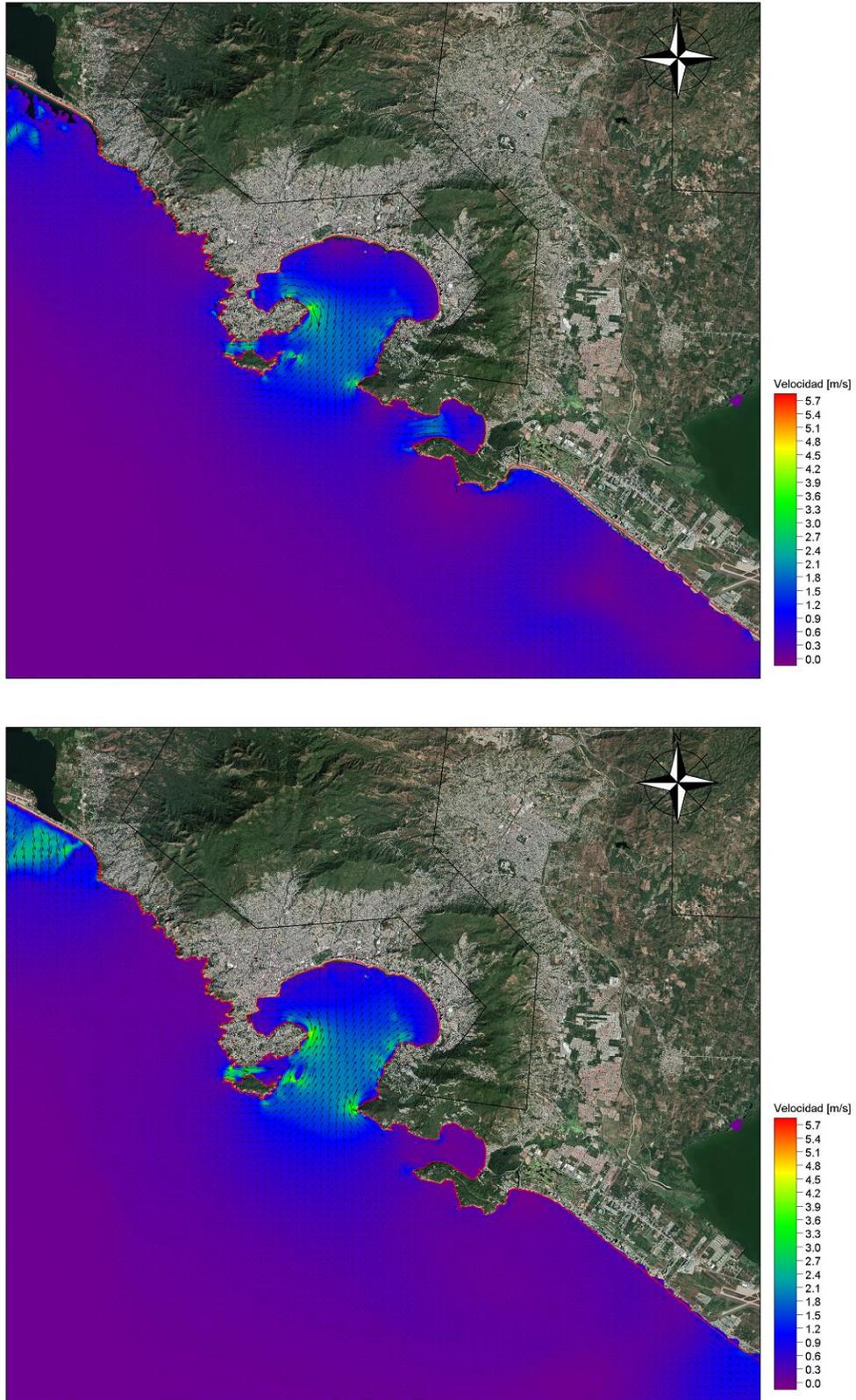


Figura 4. 30. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 15)

- **Caso 16:** Plano de falla 180 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 29 m.

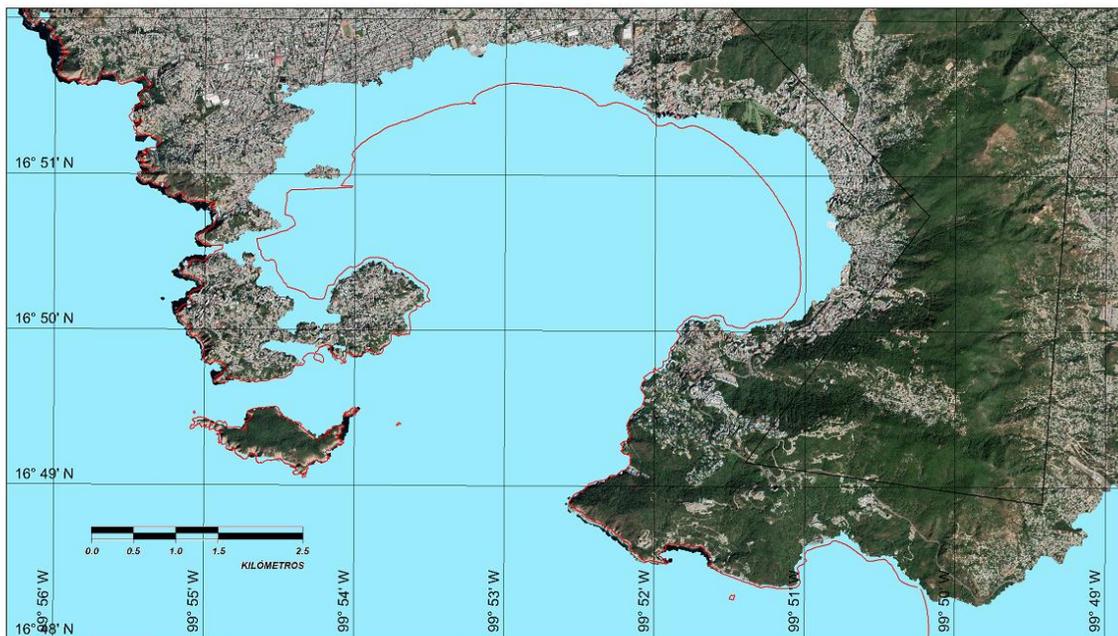
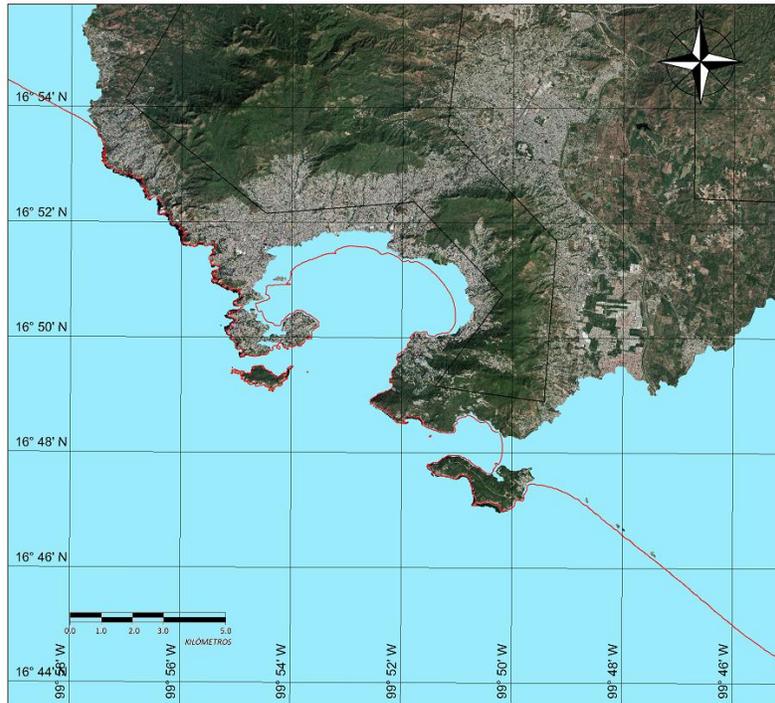


Figura 4. 31. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 16)

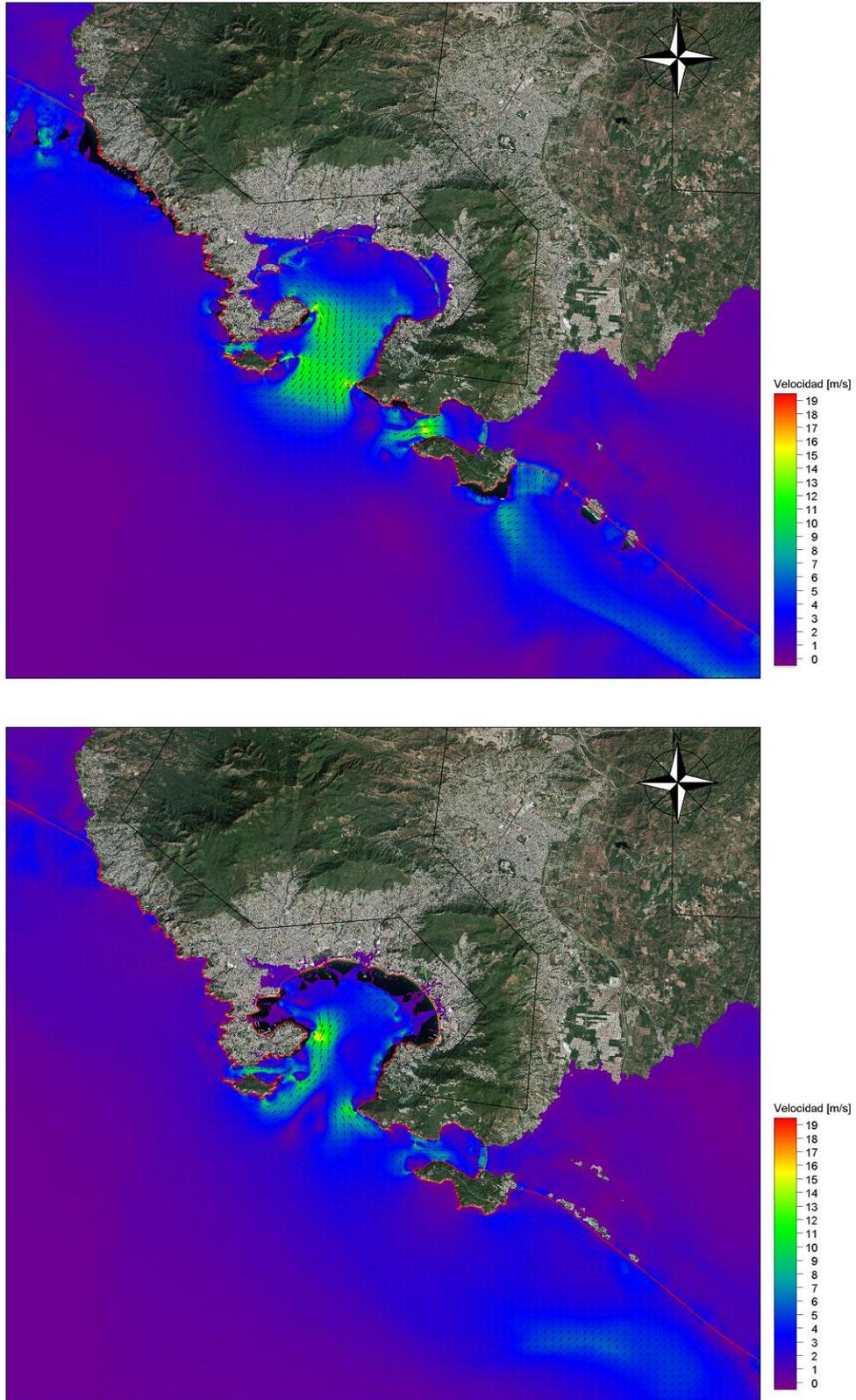


Figura 4. 32. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 16)

- **Caso 17:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

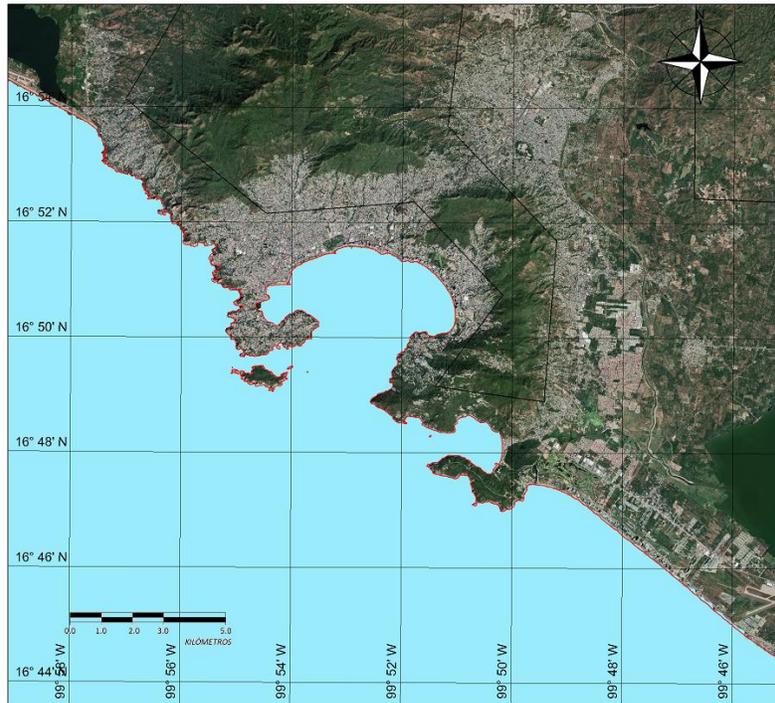


Figura 4. 33. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 17)

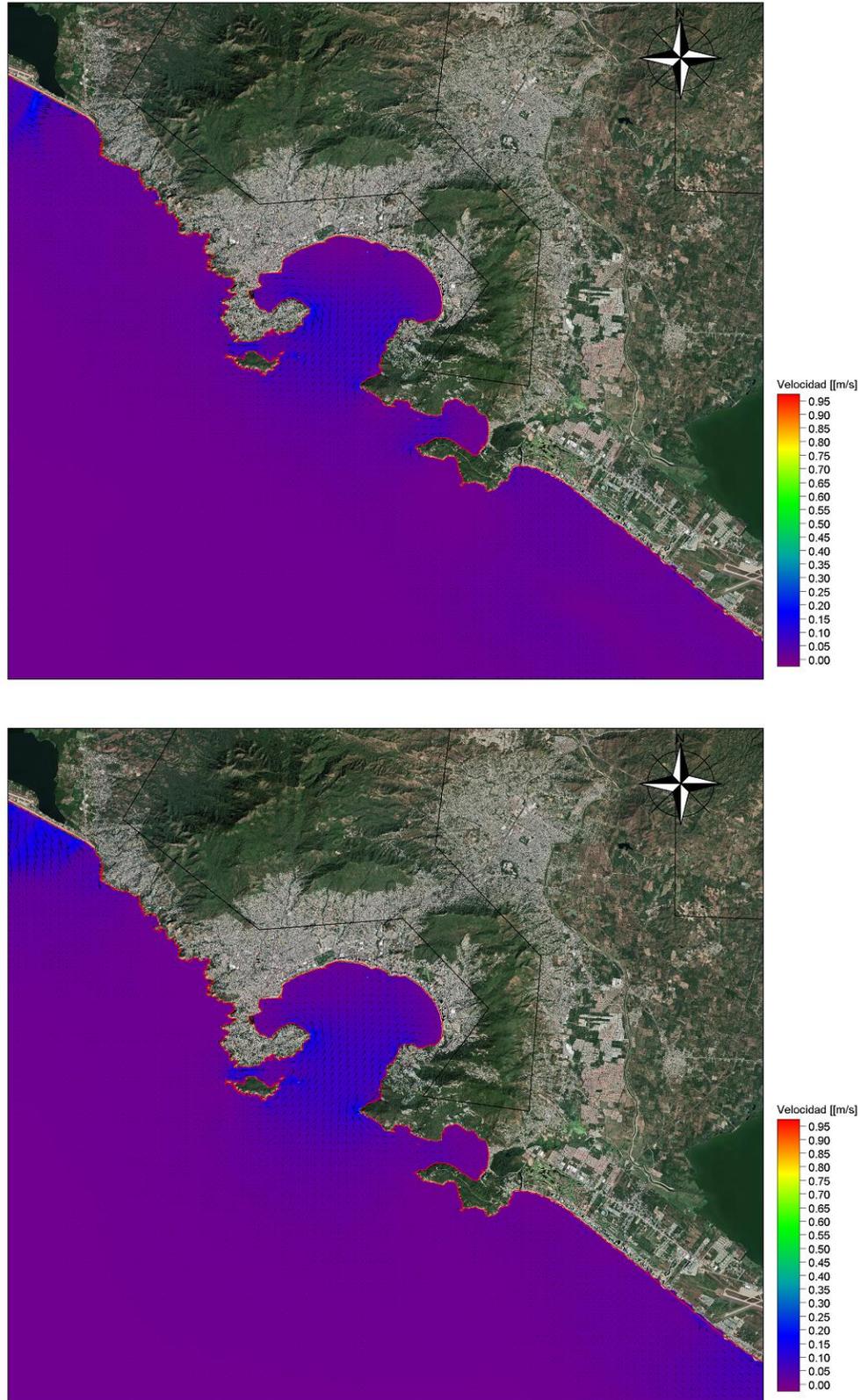


Figura 4. 34. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 17)

- **Caso 18:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.2 m.

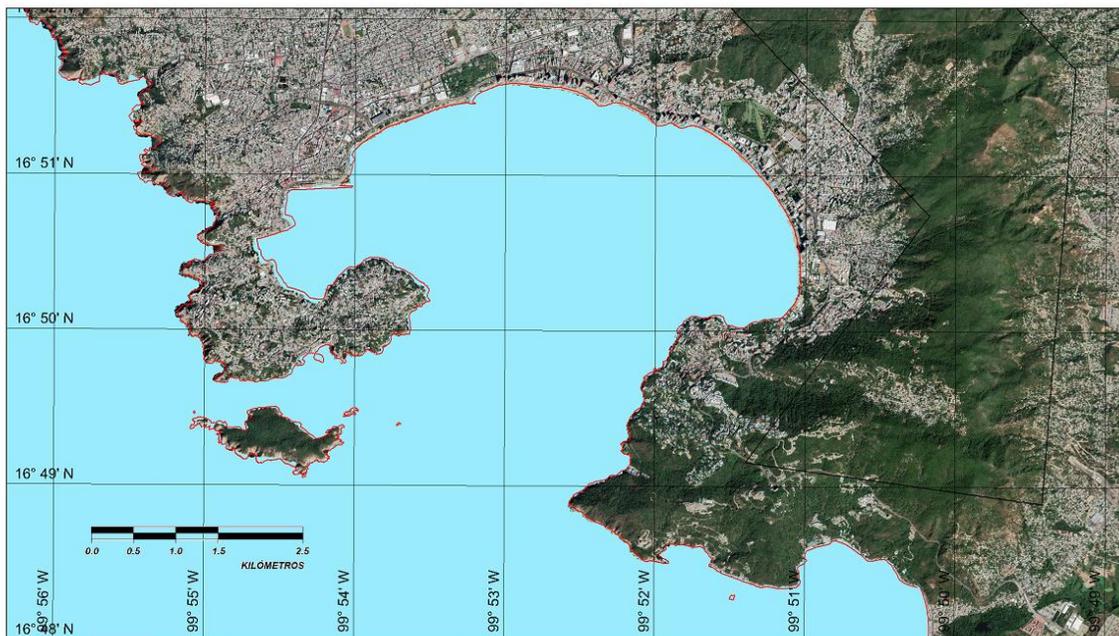
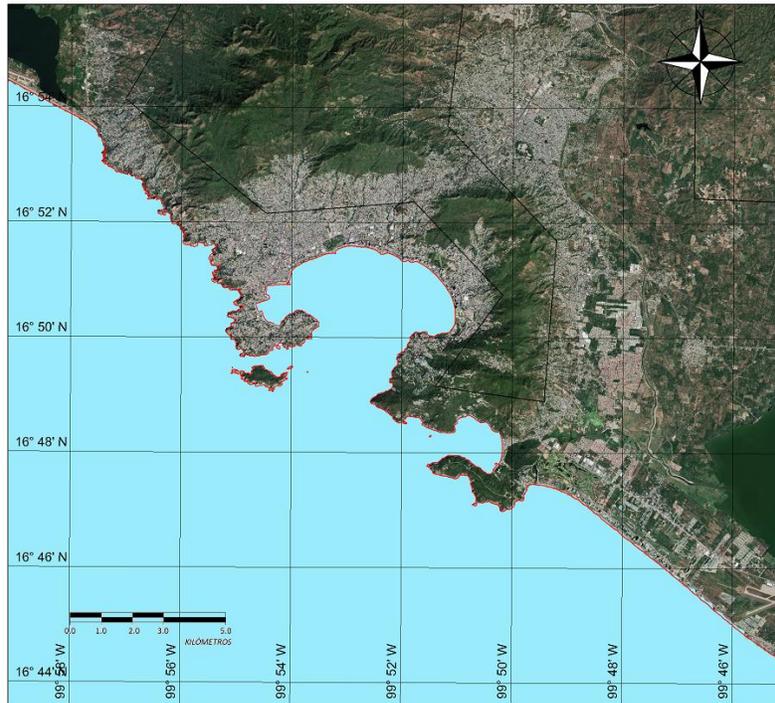


Figura 4. 35. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 18)

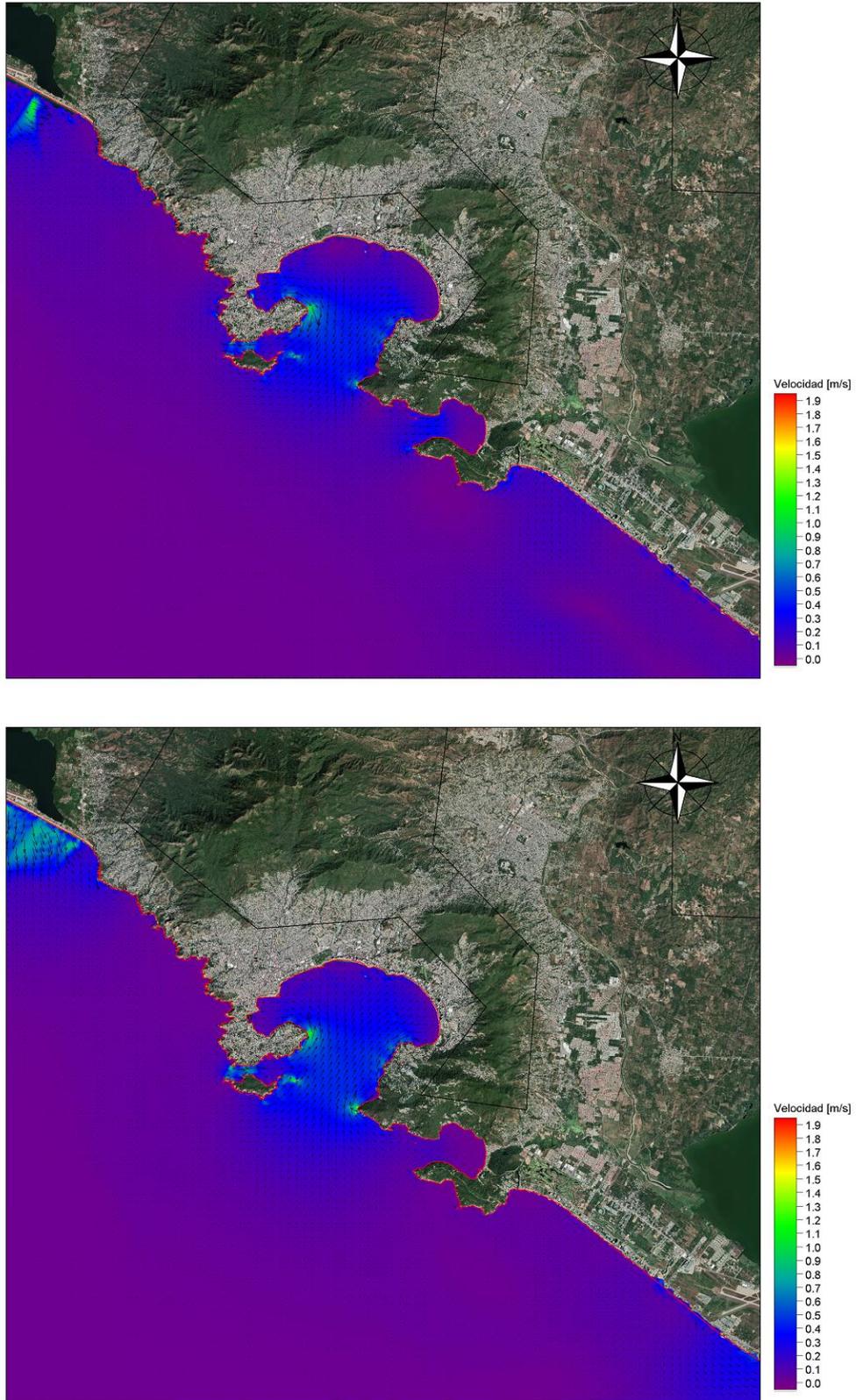


Figura 4. 36. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 18)

- **Caso 19:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 4.5 m.

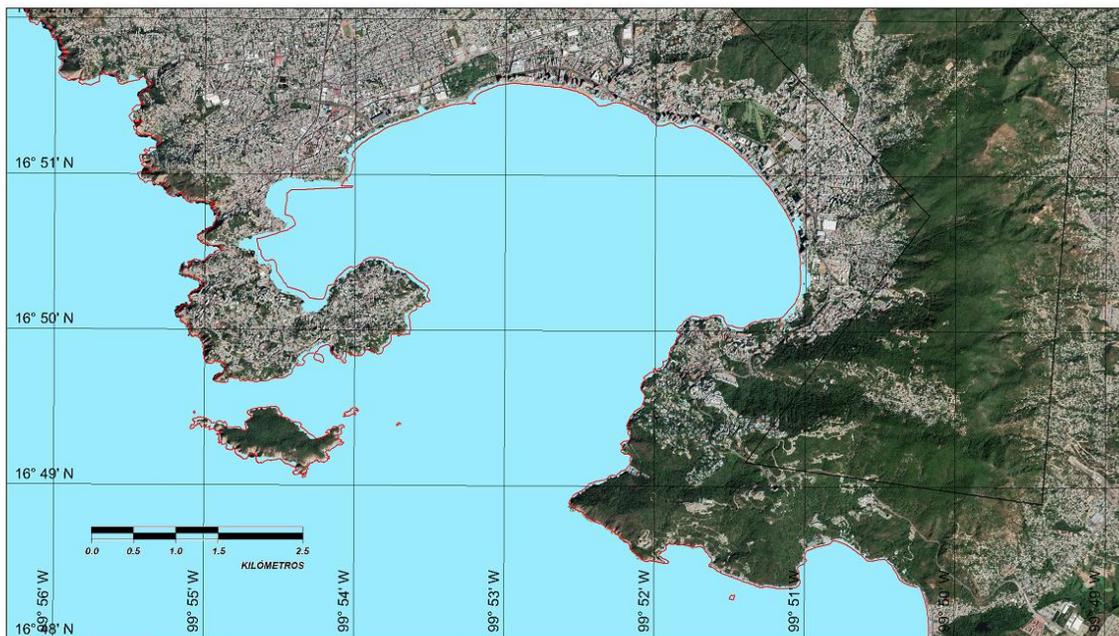
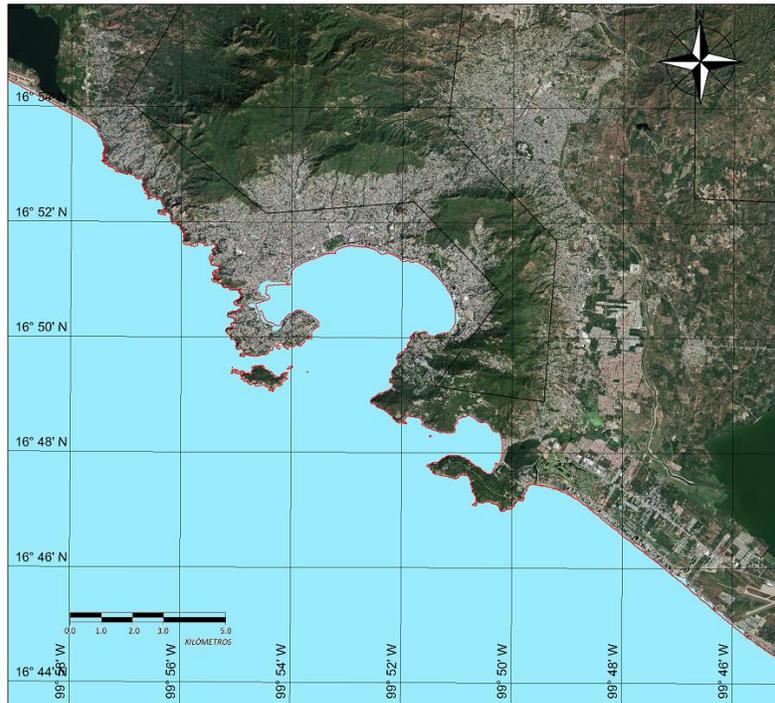


Figura 4. 37. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 19)

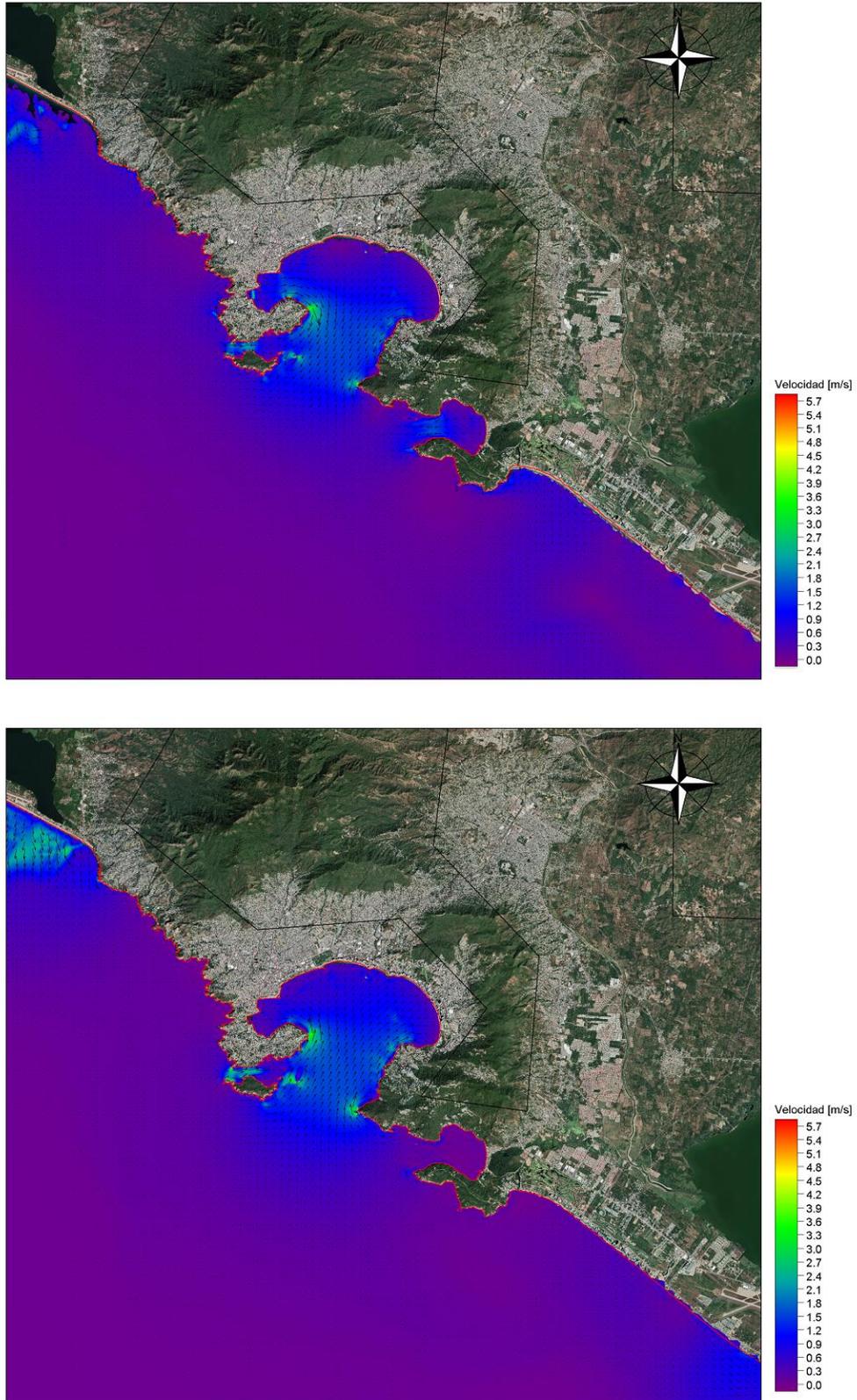


Figura 4. 38. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 19)

- **Caso 20:** Plano de falla 210 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 24.9 m.

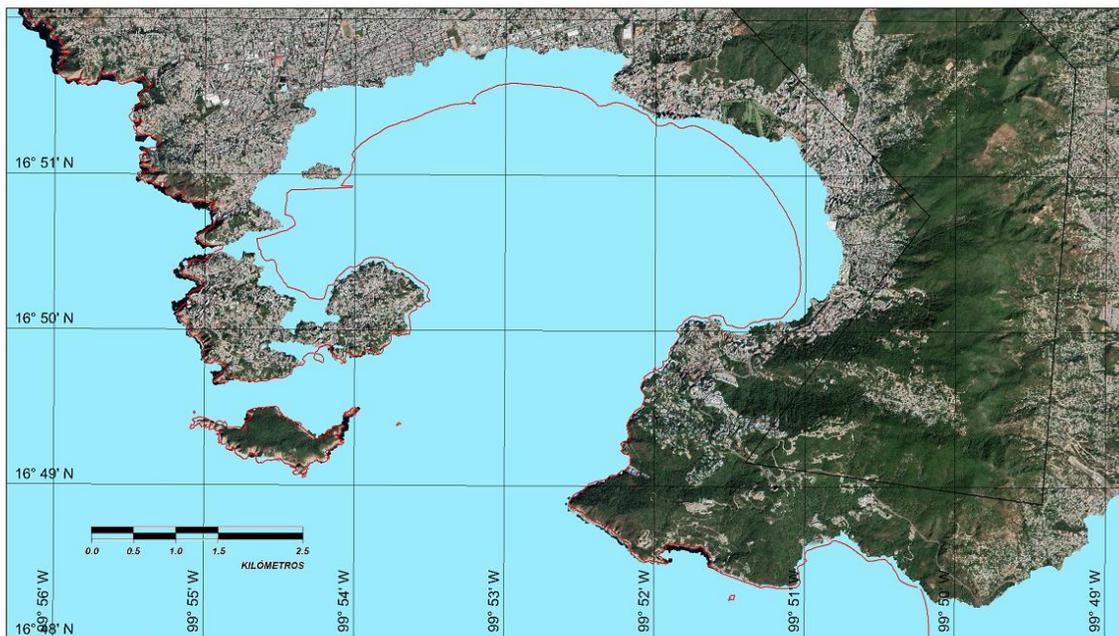
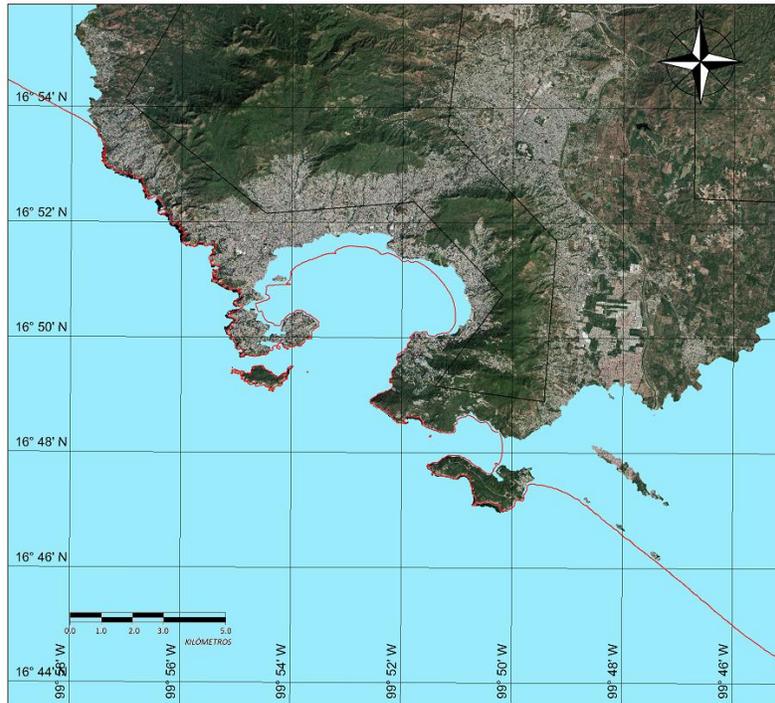


Figura 4. 39. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 20)

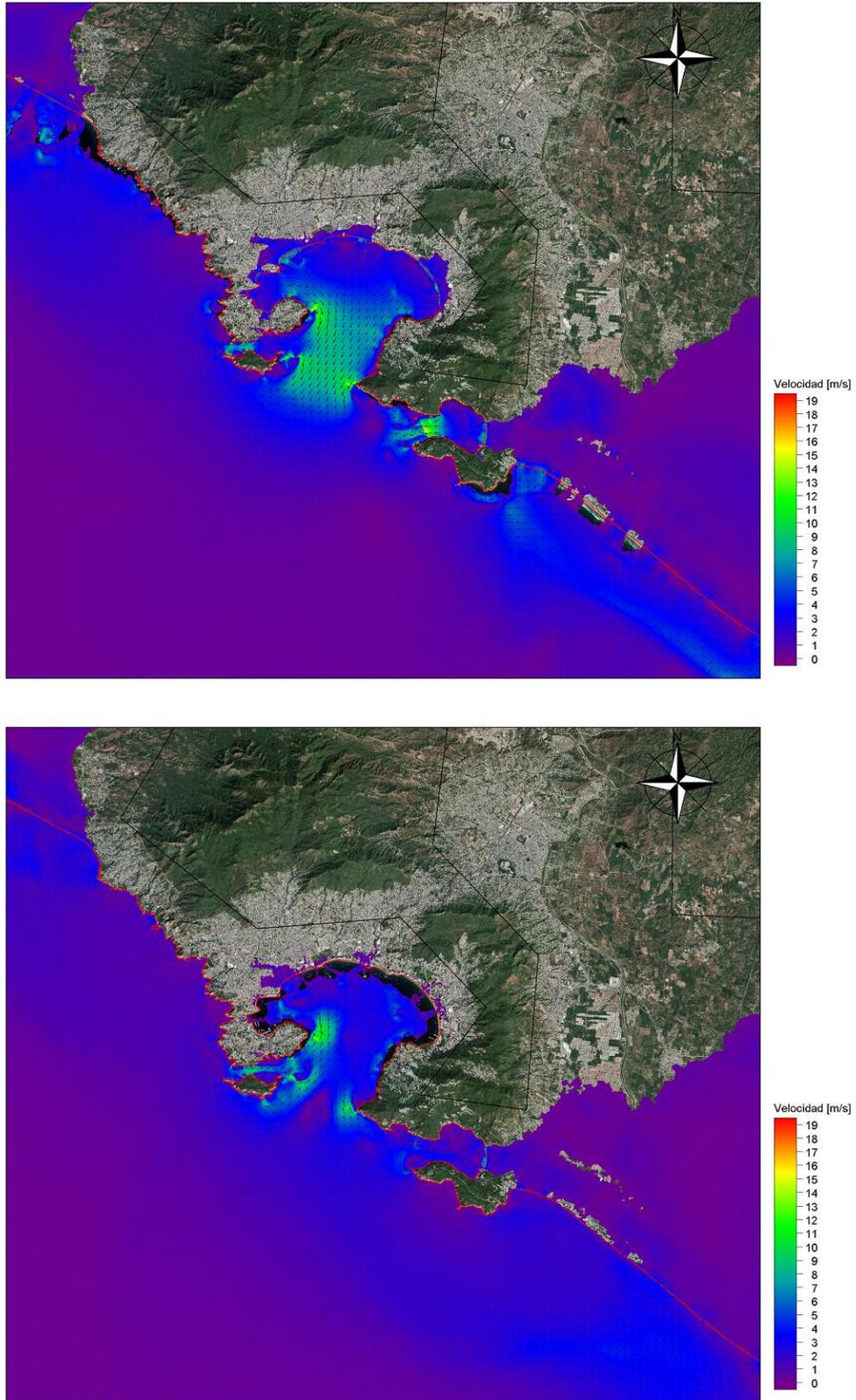


Figura 4. 40. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 20)

- **Caso 21:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

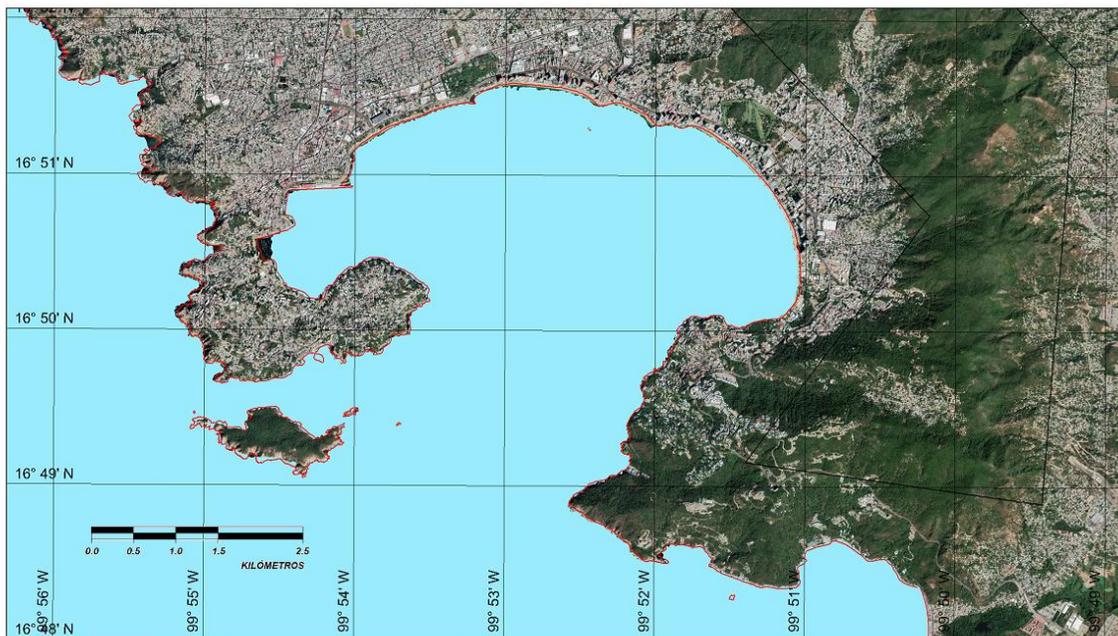
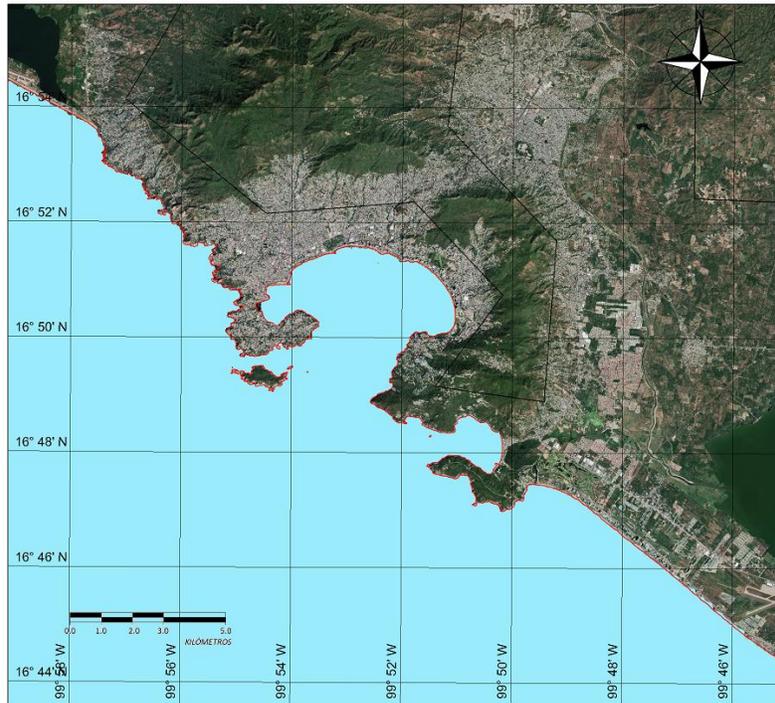


Figura 4. 41. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 21)

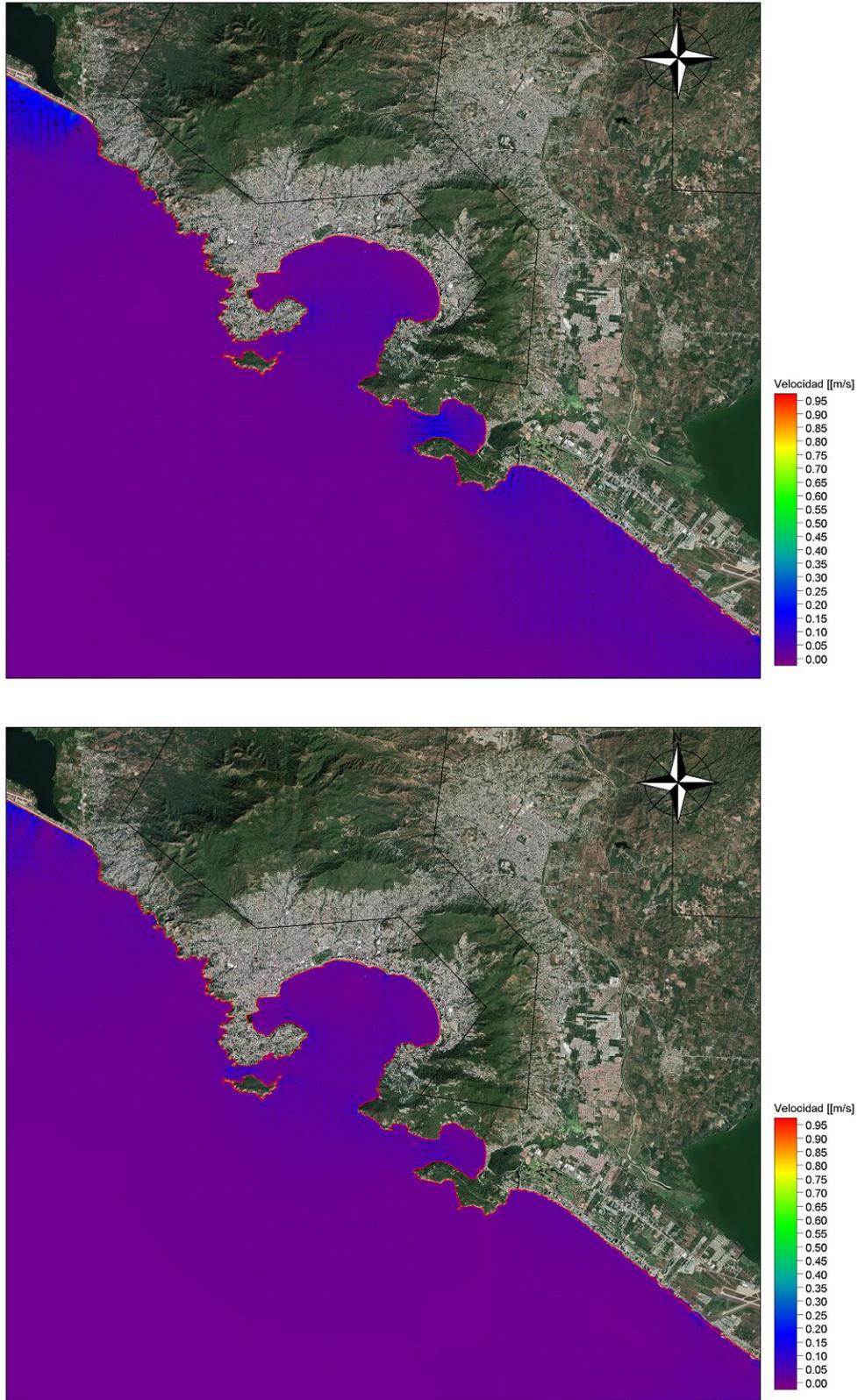


Figura 4. 42. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 21)

- **Caso 22:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 1.0 m.

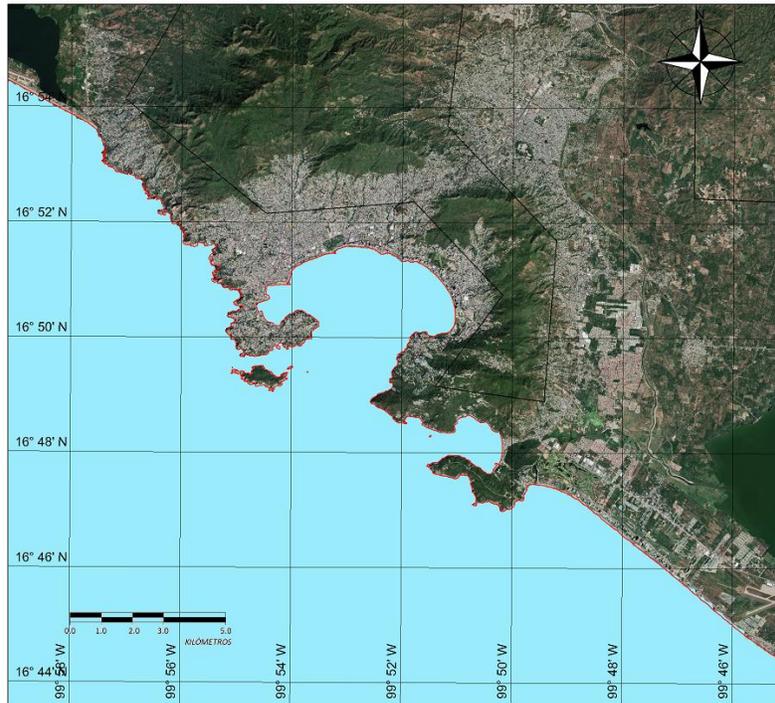


Figura 4. 43. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 22)

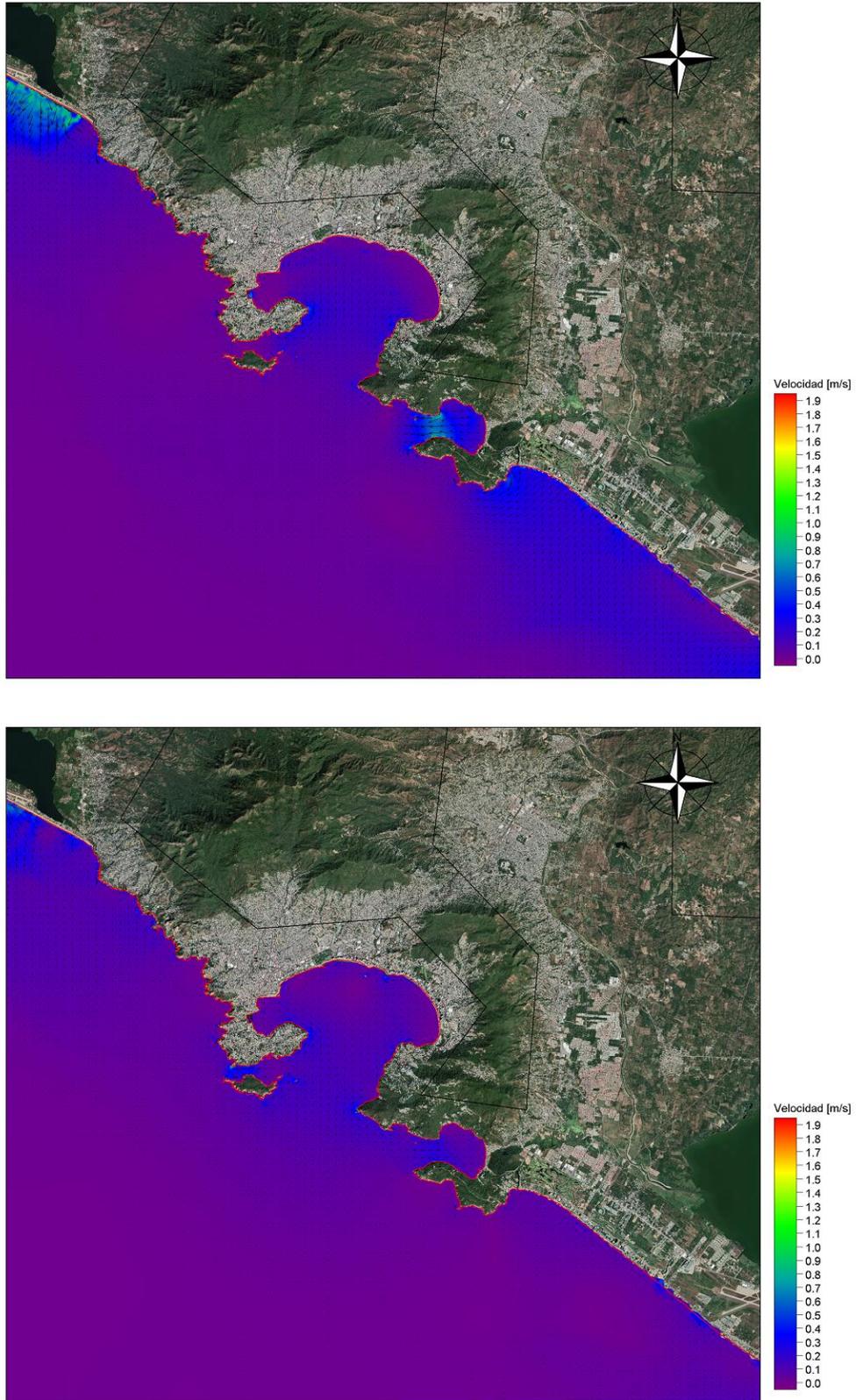


Figura 4. 44. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 22)

- **Caso 23:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.9 m.

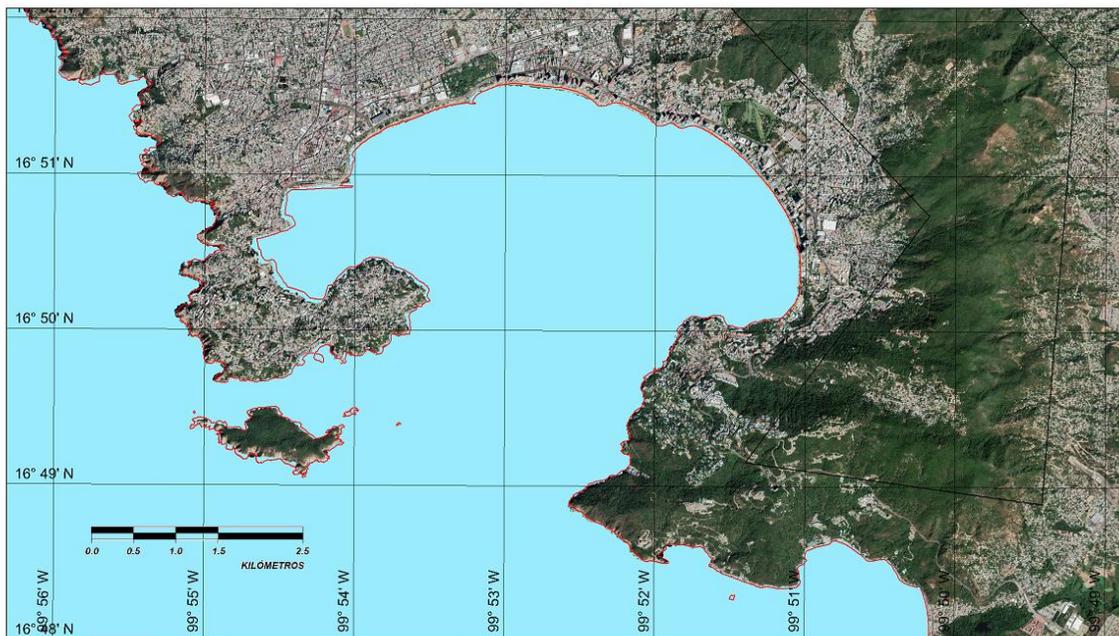
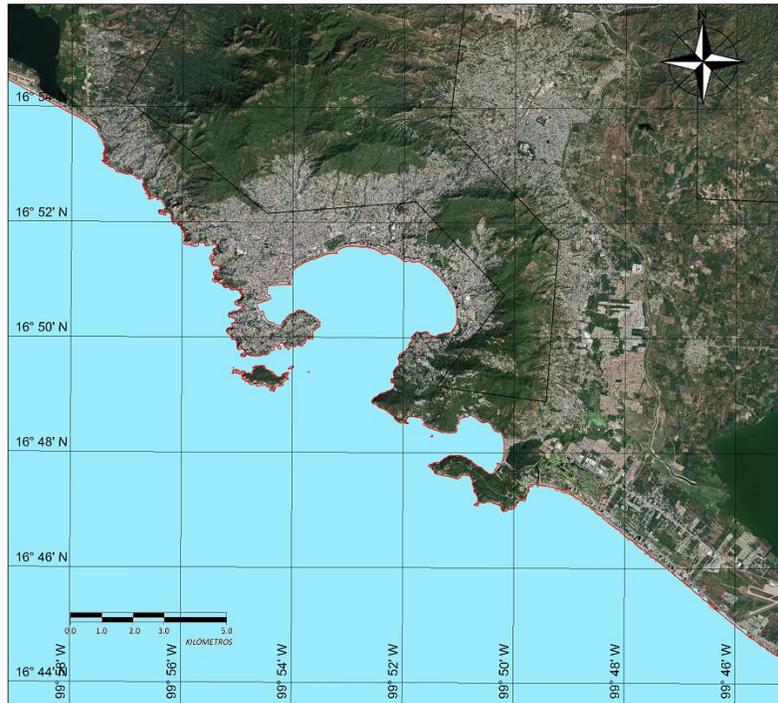


Figura 4. 45. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 23)

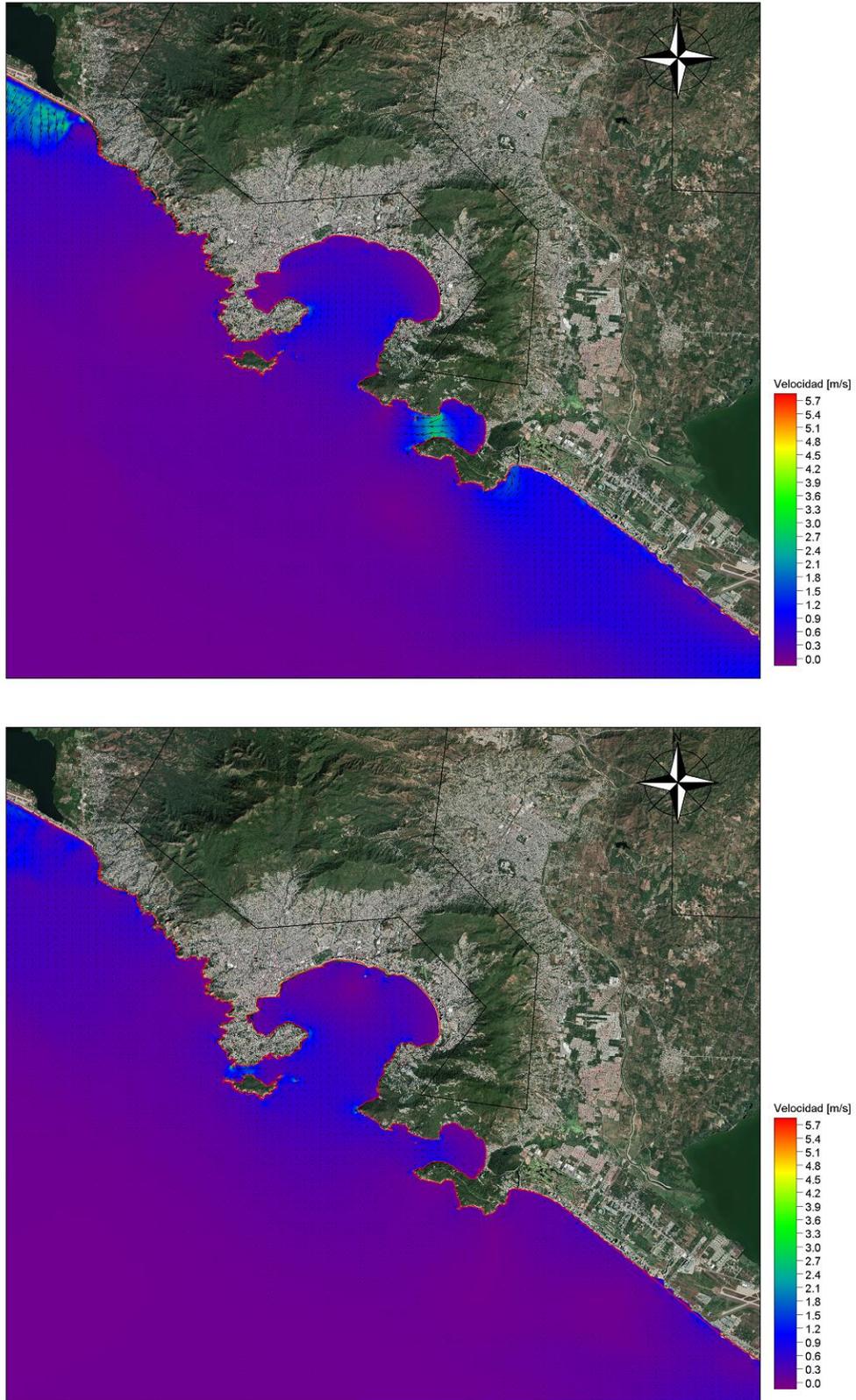


Figura 4. 46. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 23)

- **Caso 24:** Plano de falla 240 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 21.9 m.

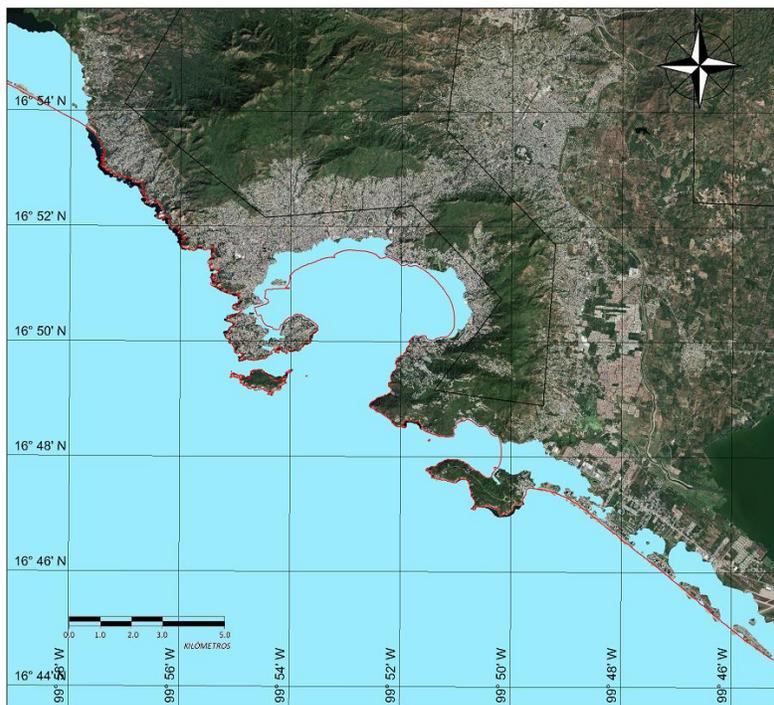


Figura 4. 47. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 24)

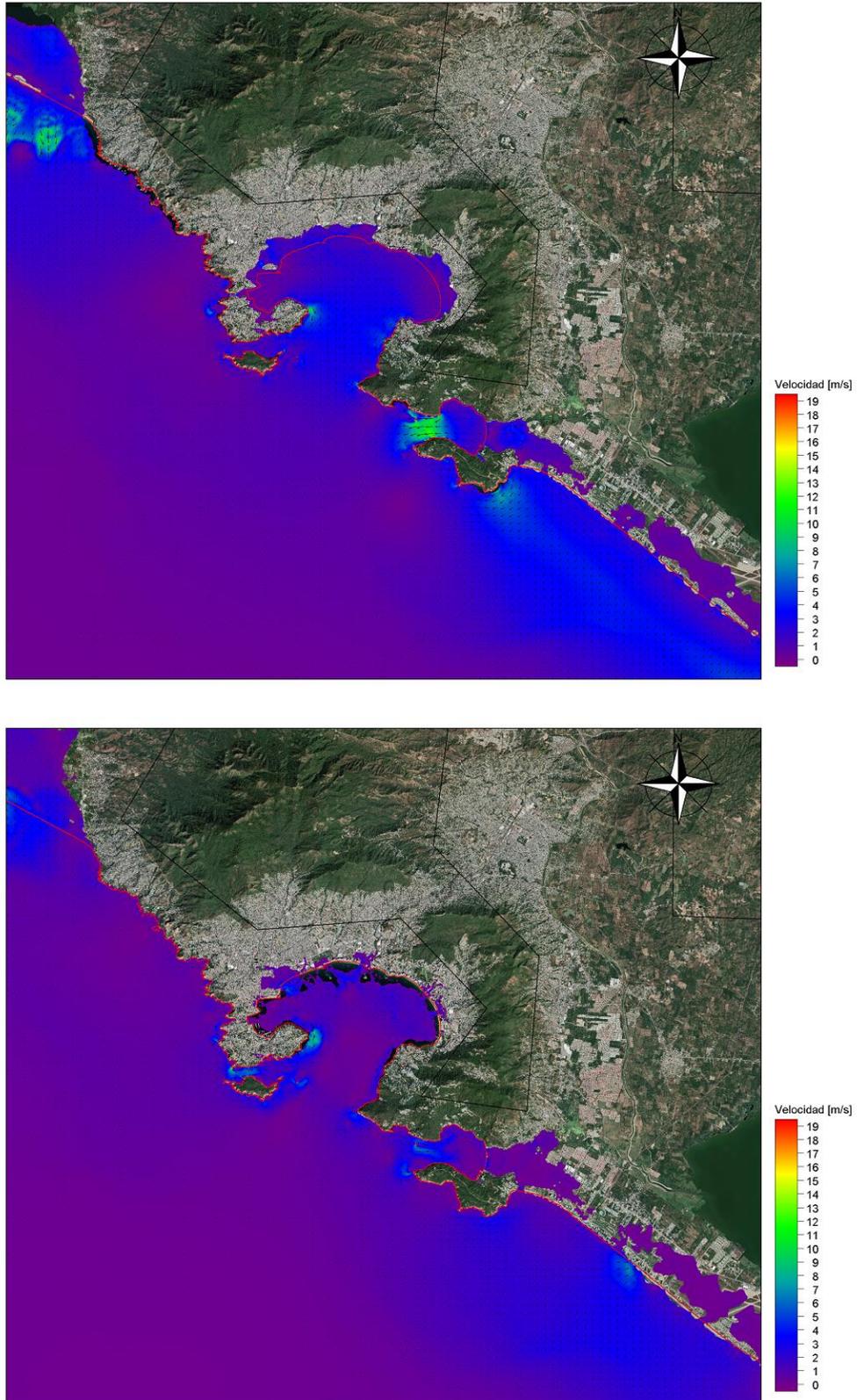


Figura 4. 48. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 24)

- **Caso 25:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.2 m.

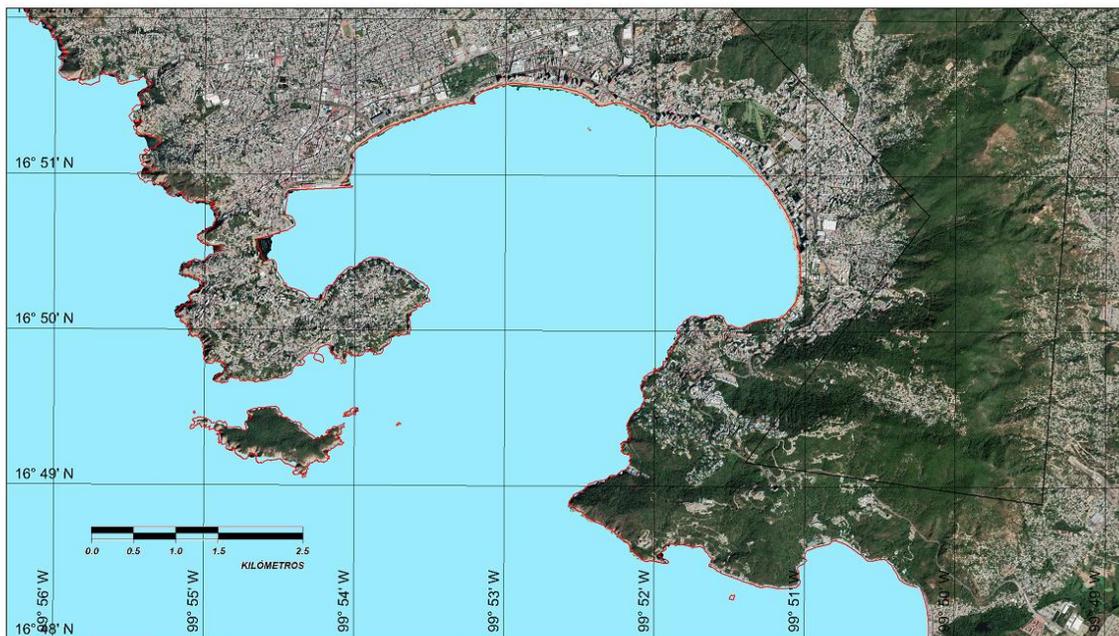
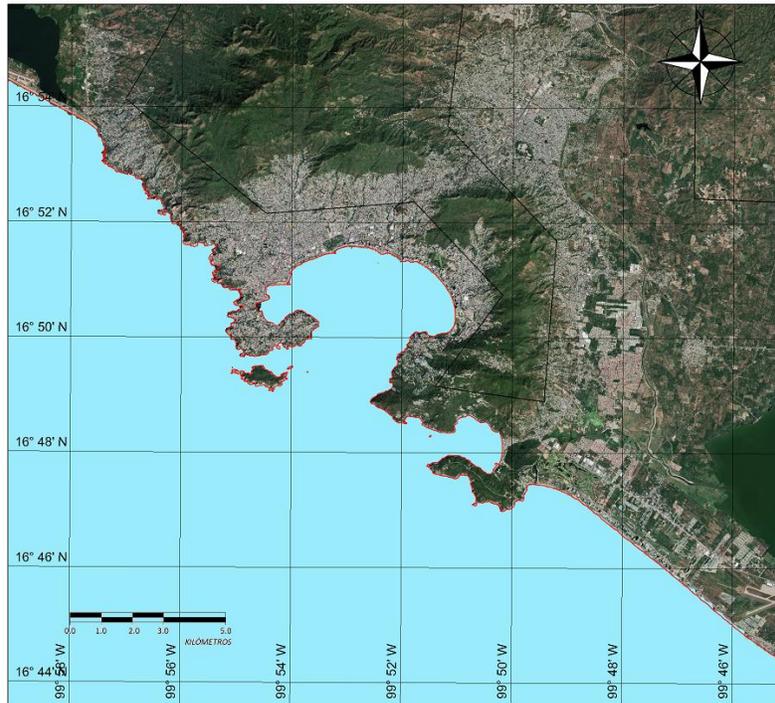


Figura 4. 49. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 25)

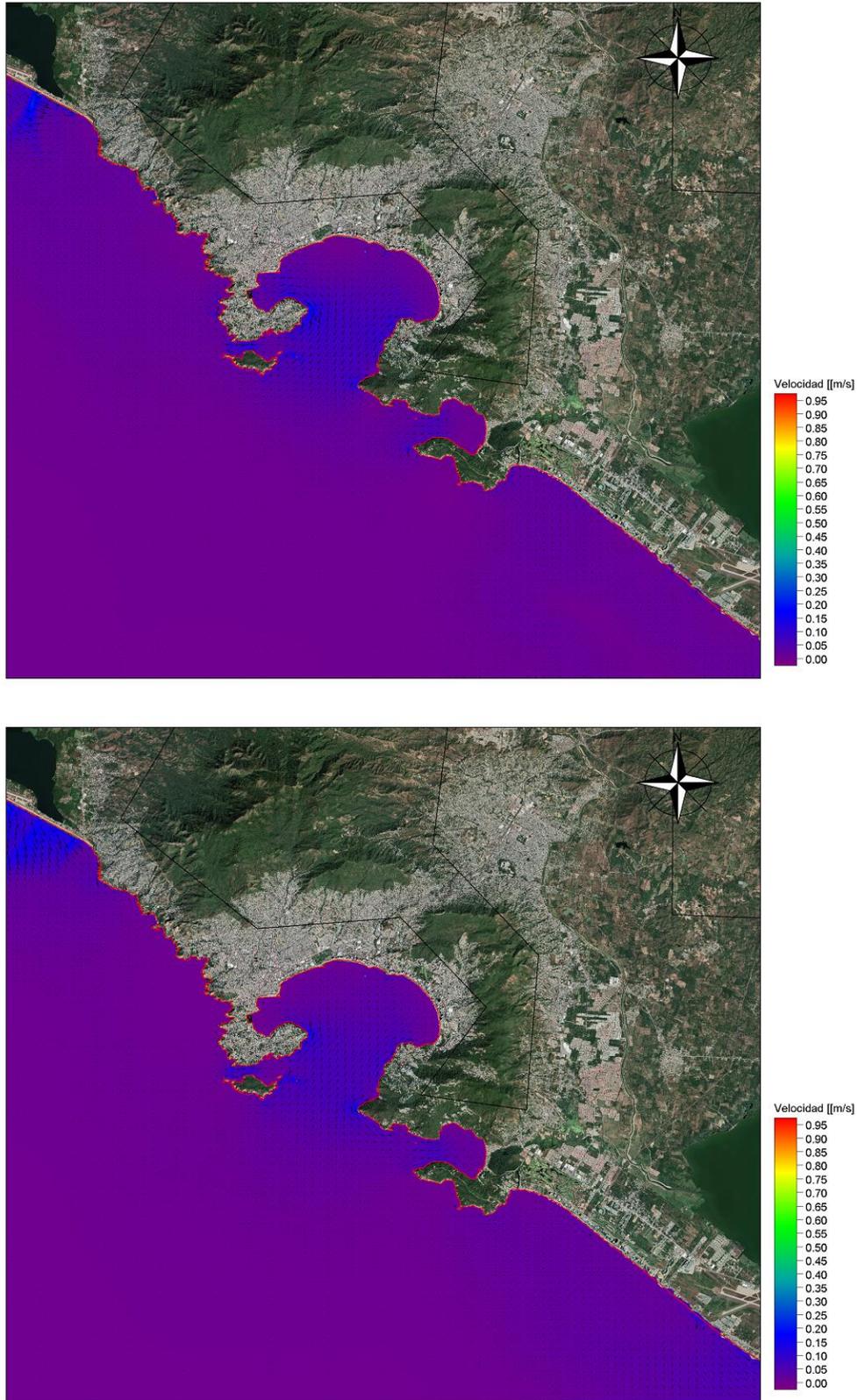


Figura 4. 50. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 25)

- **Caso 26:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 0.9 m.

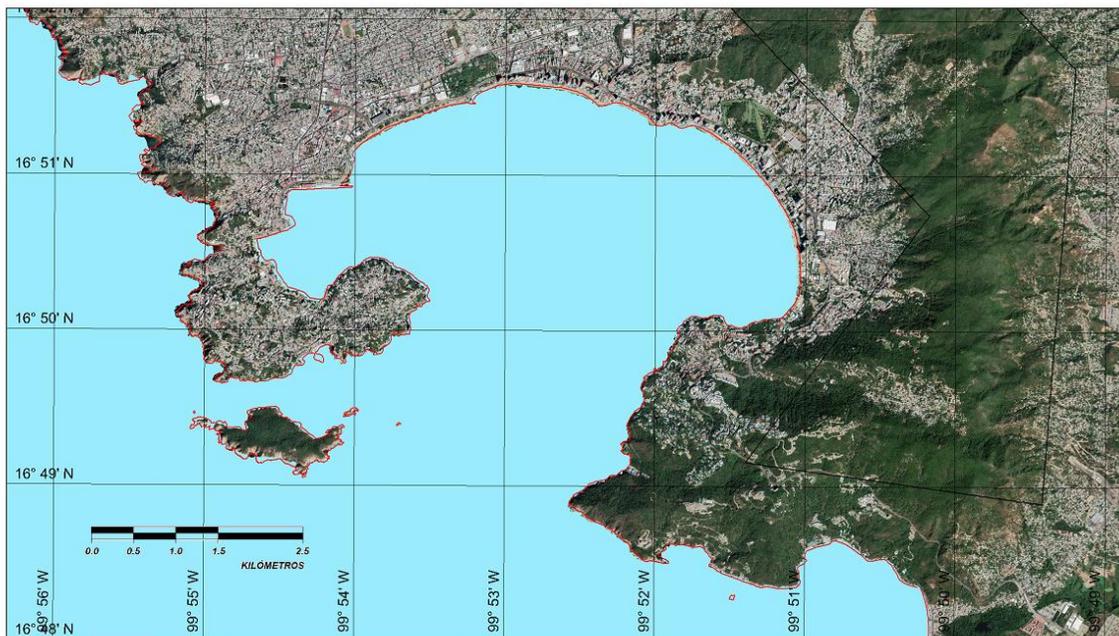
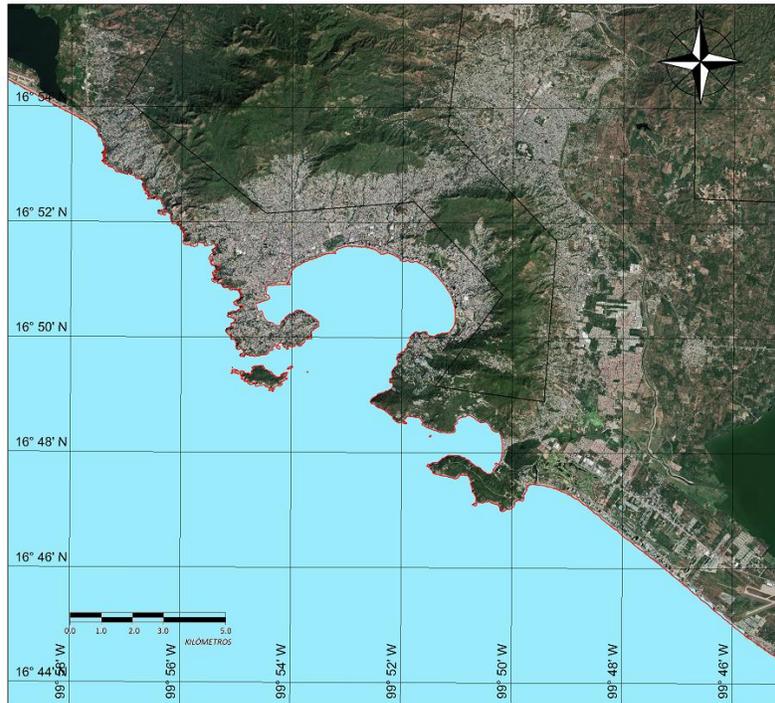


Figura 4. 51. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 26)

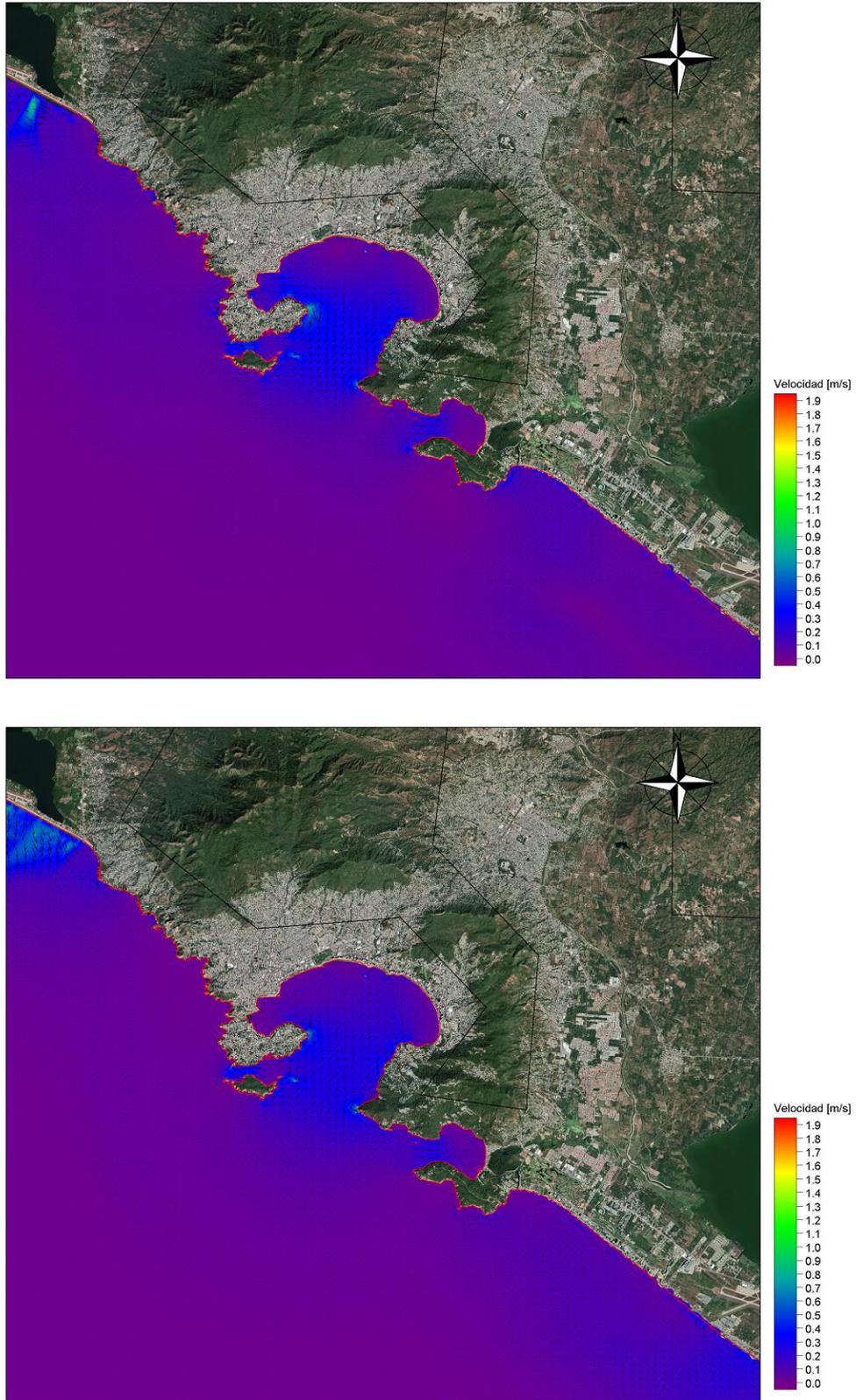


Figura 4. 52. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 26)

- **Caso 27:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.5 m.

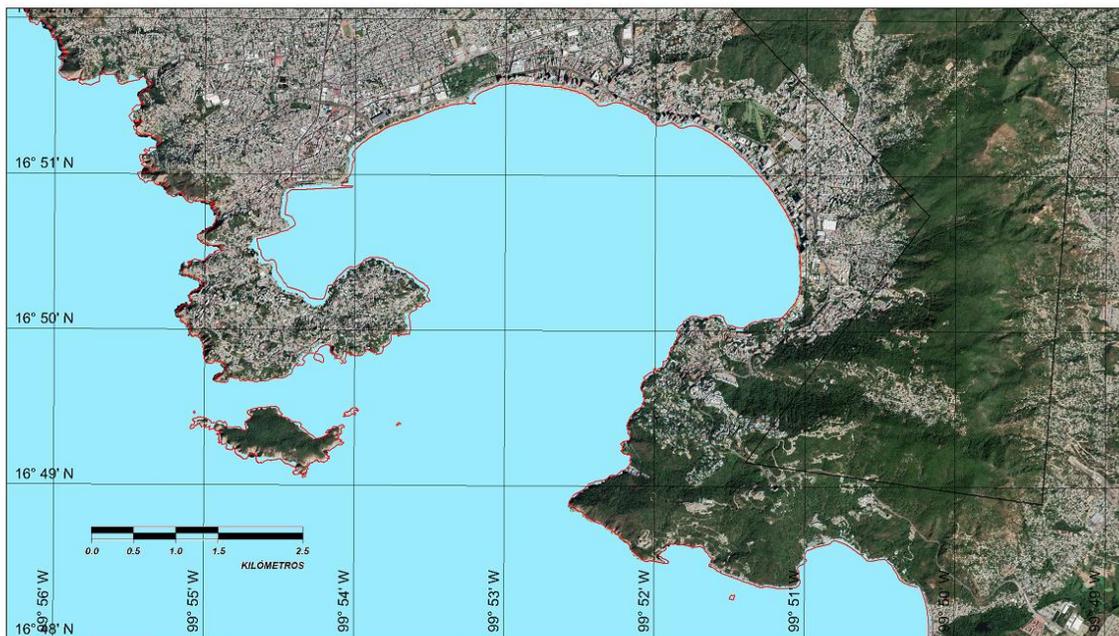
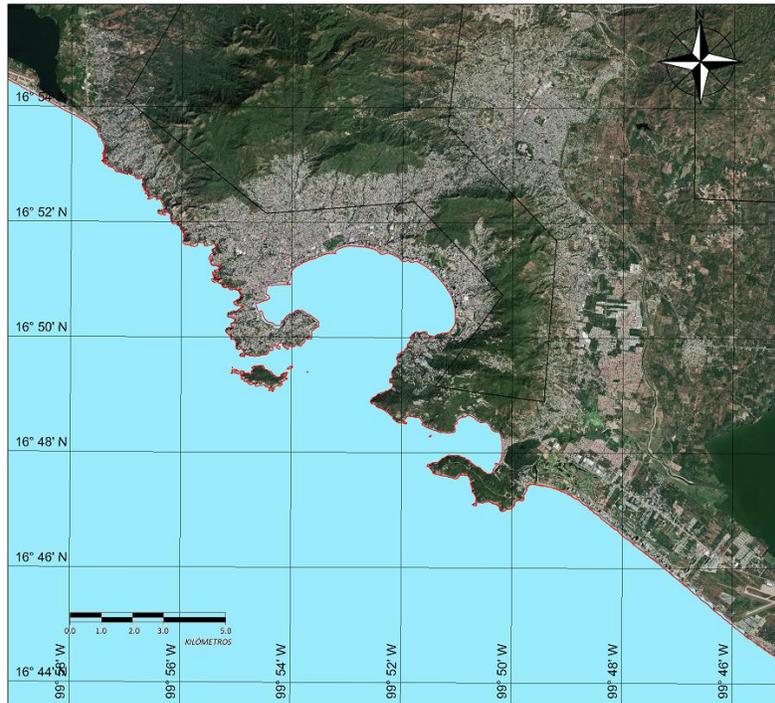


Figura 4. 53. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 27)

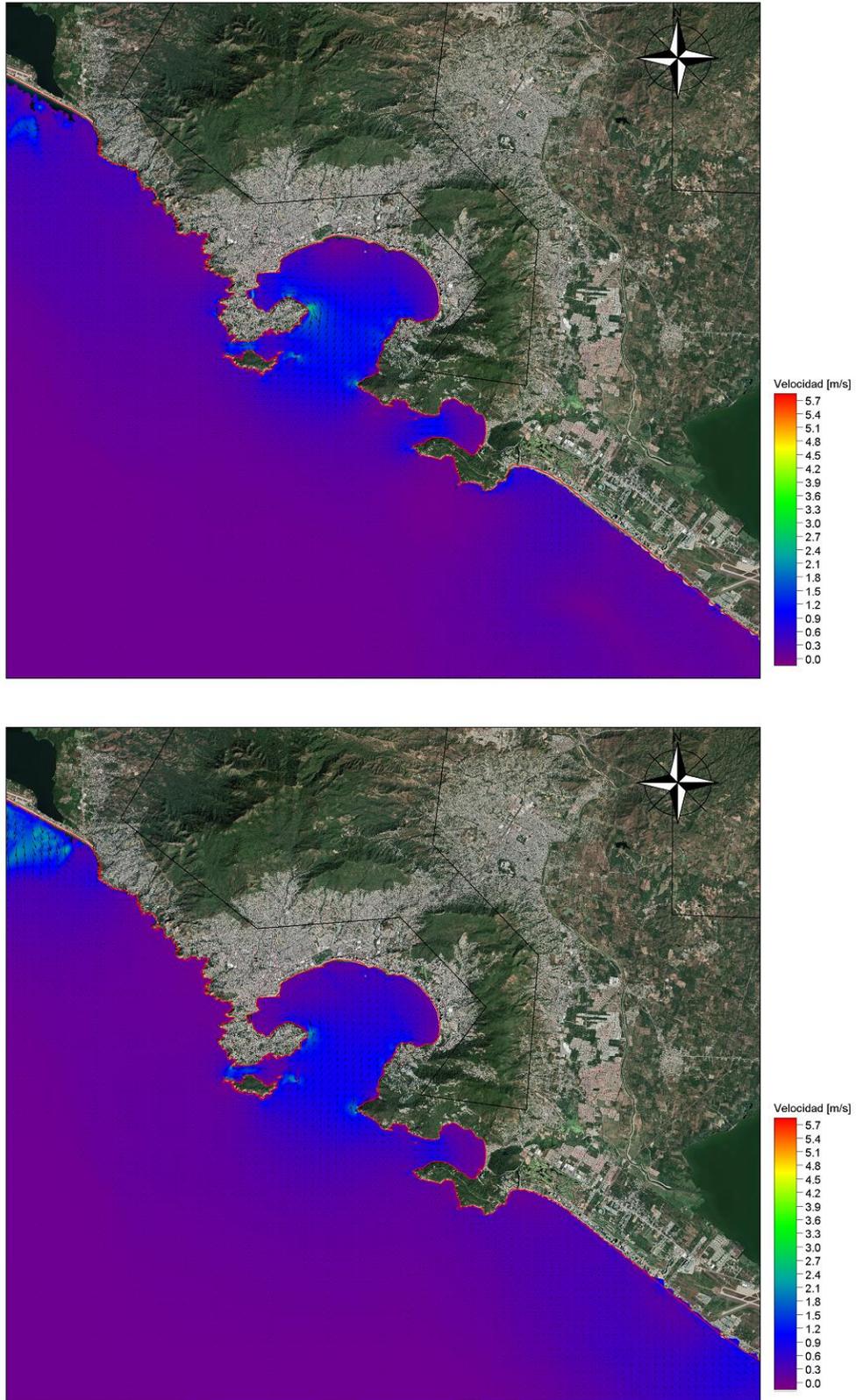


Figura 4. 54. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 27)

- **Caso 28:** Plano de falla 270 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 19.4 m.

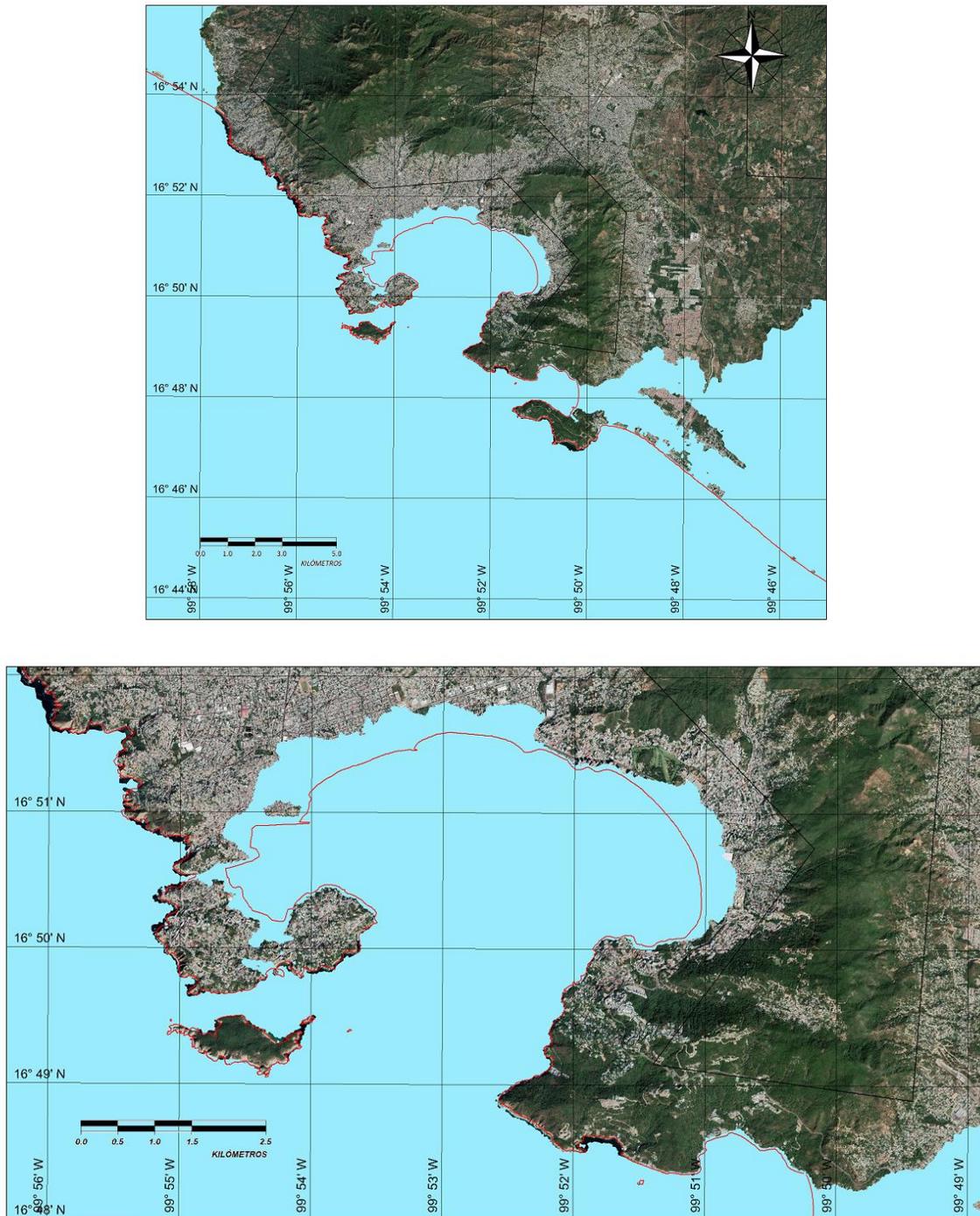


Figura 4. 55. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 28)

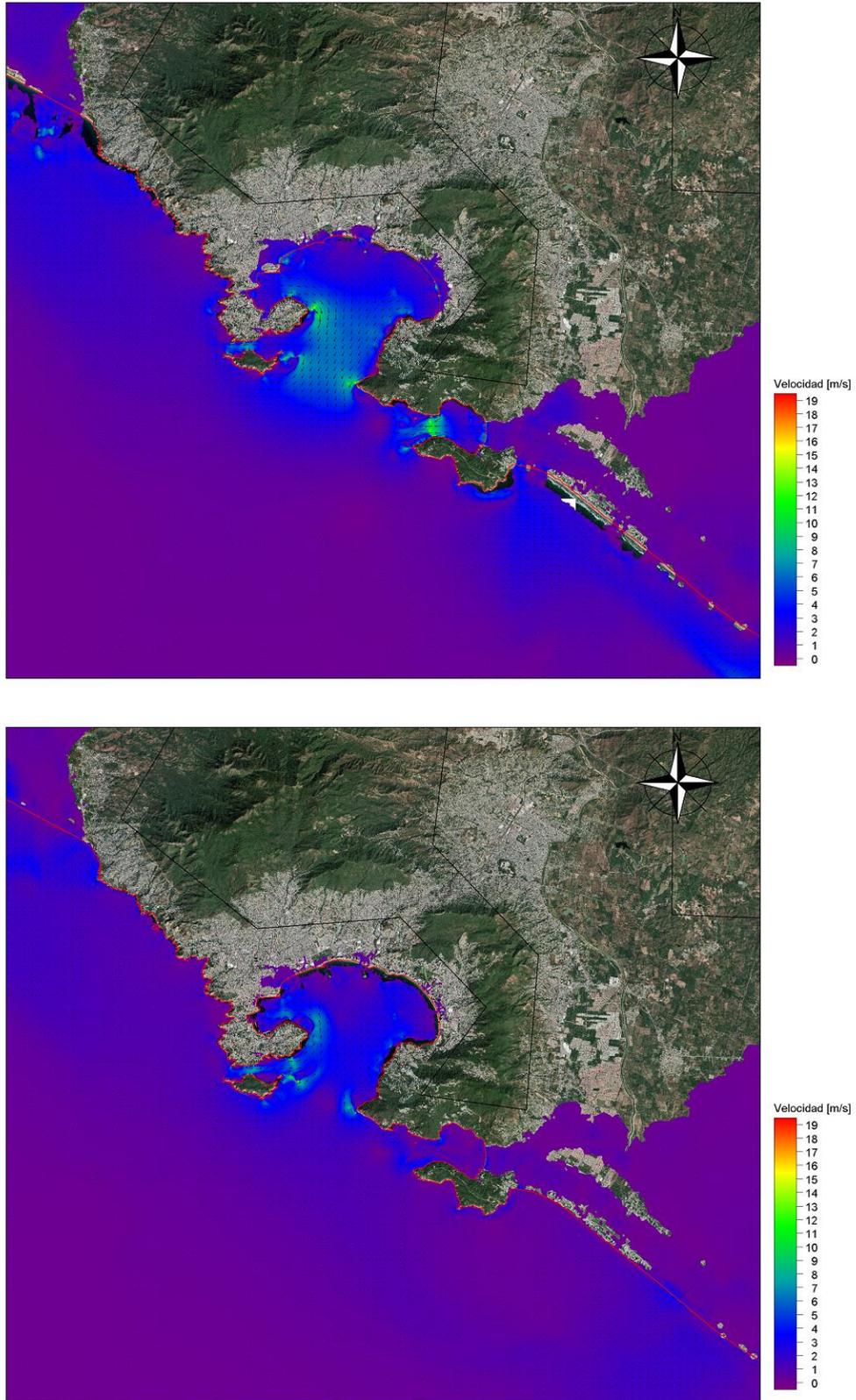


Figura 4. 56. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 28)

- **Caso 29:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 7.5$.

Dislocación cosísmica = 0.15 m.

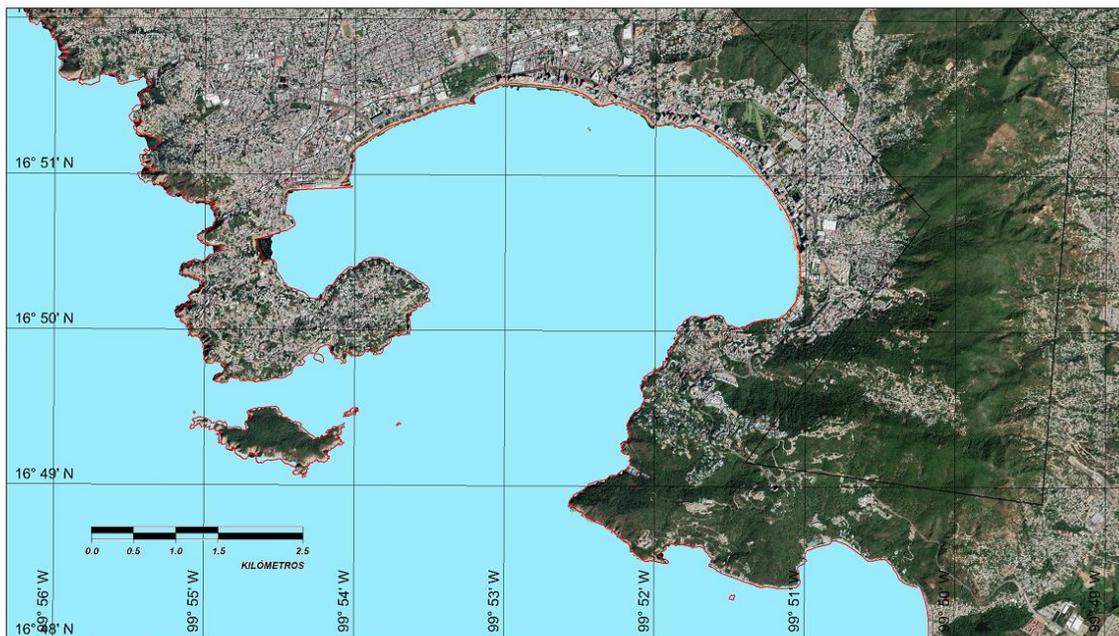
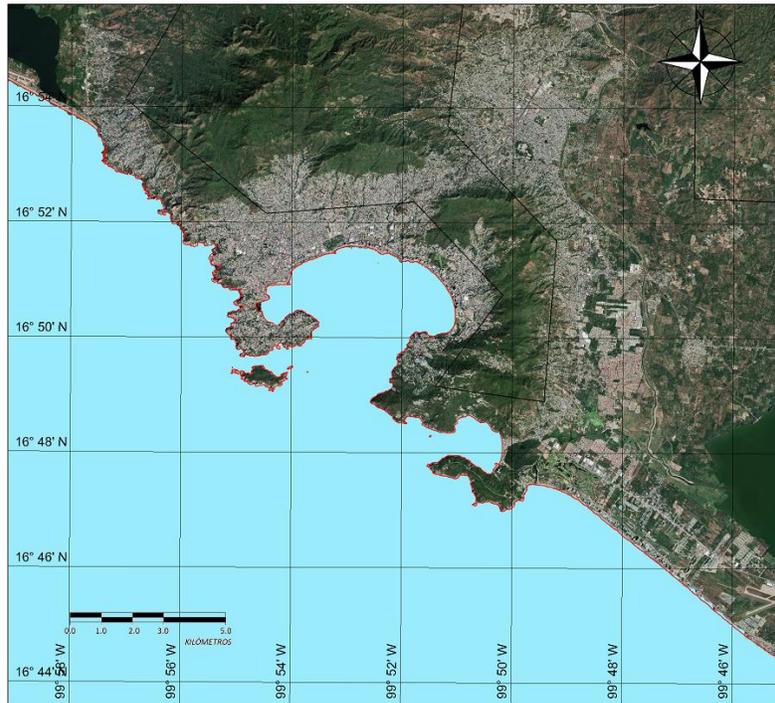


Figura 4. 57. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 29)

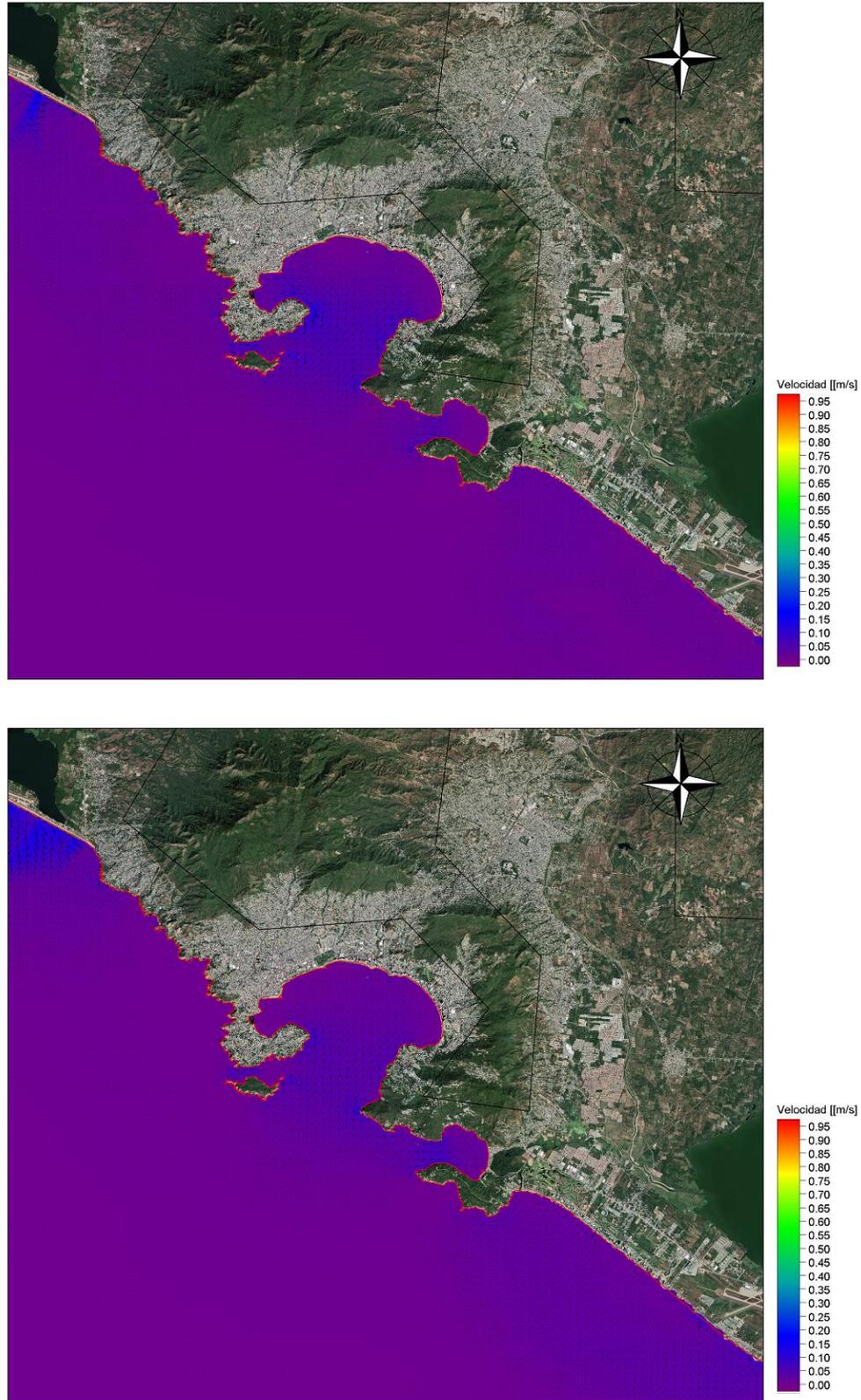


Figura 4. 58. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 29)

- **Caso 30:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.0$.

Dislocación cosísmica = 0.8 m.

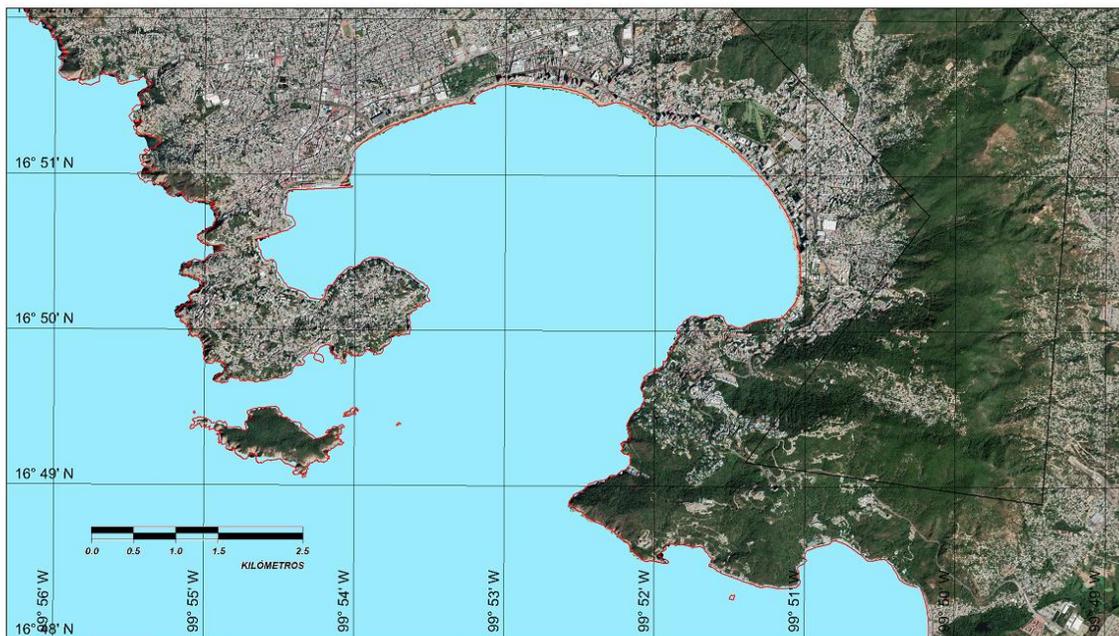
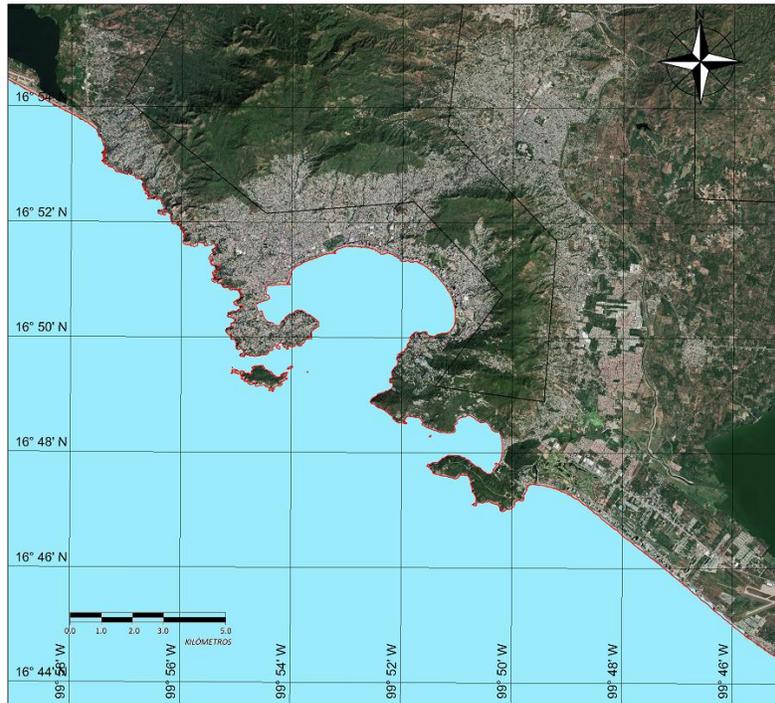


Figura 4. 59. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 30)

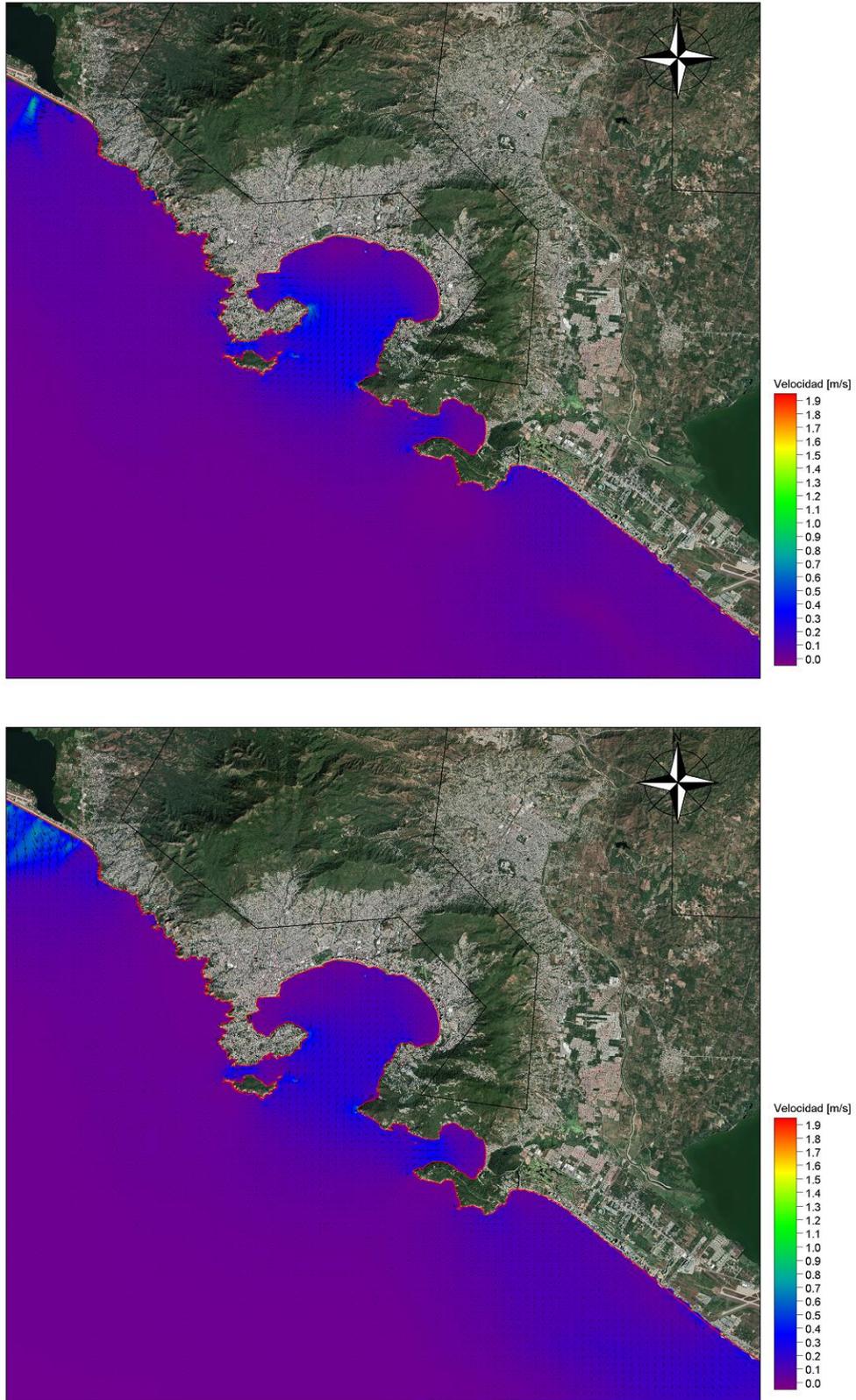


Figura 4. 60. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 30)

- **Caso 31:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.4$.

Dislocación cosísmica = 3.1 m.

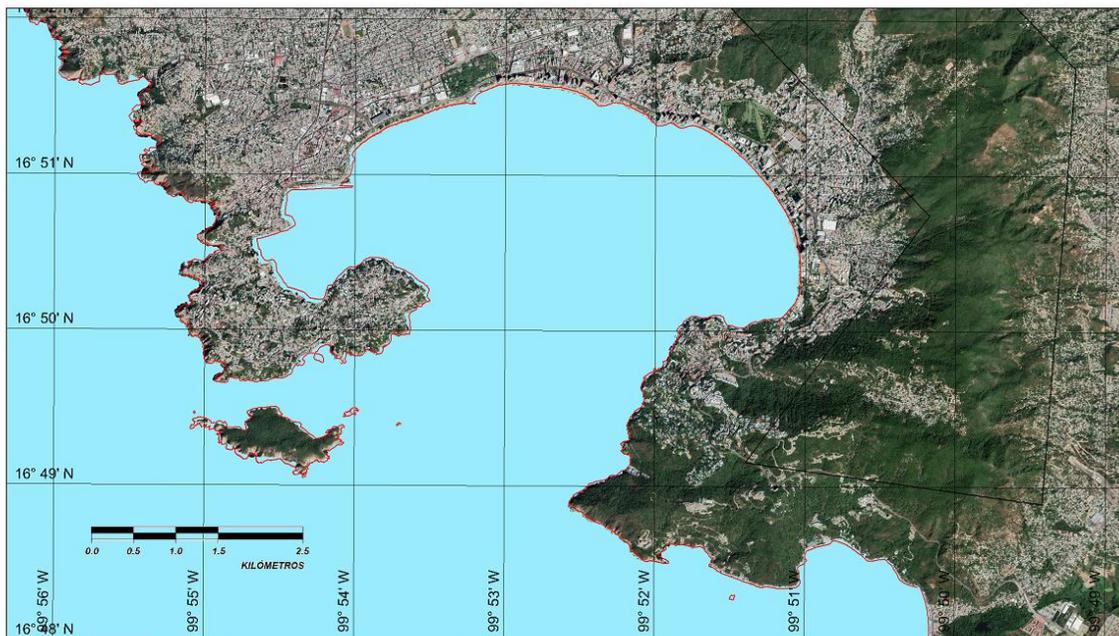
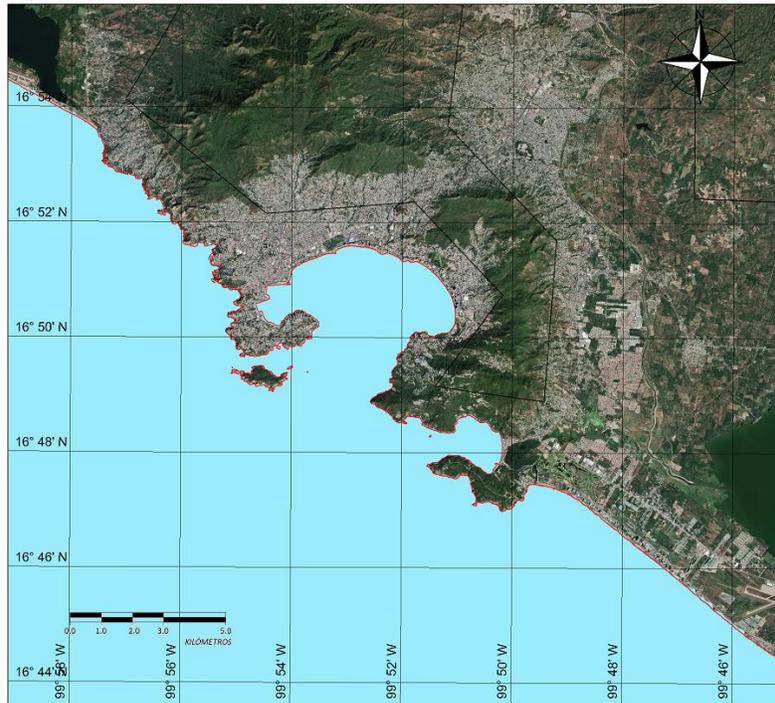


Figura 4. 61. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 31)

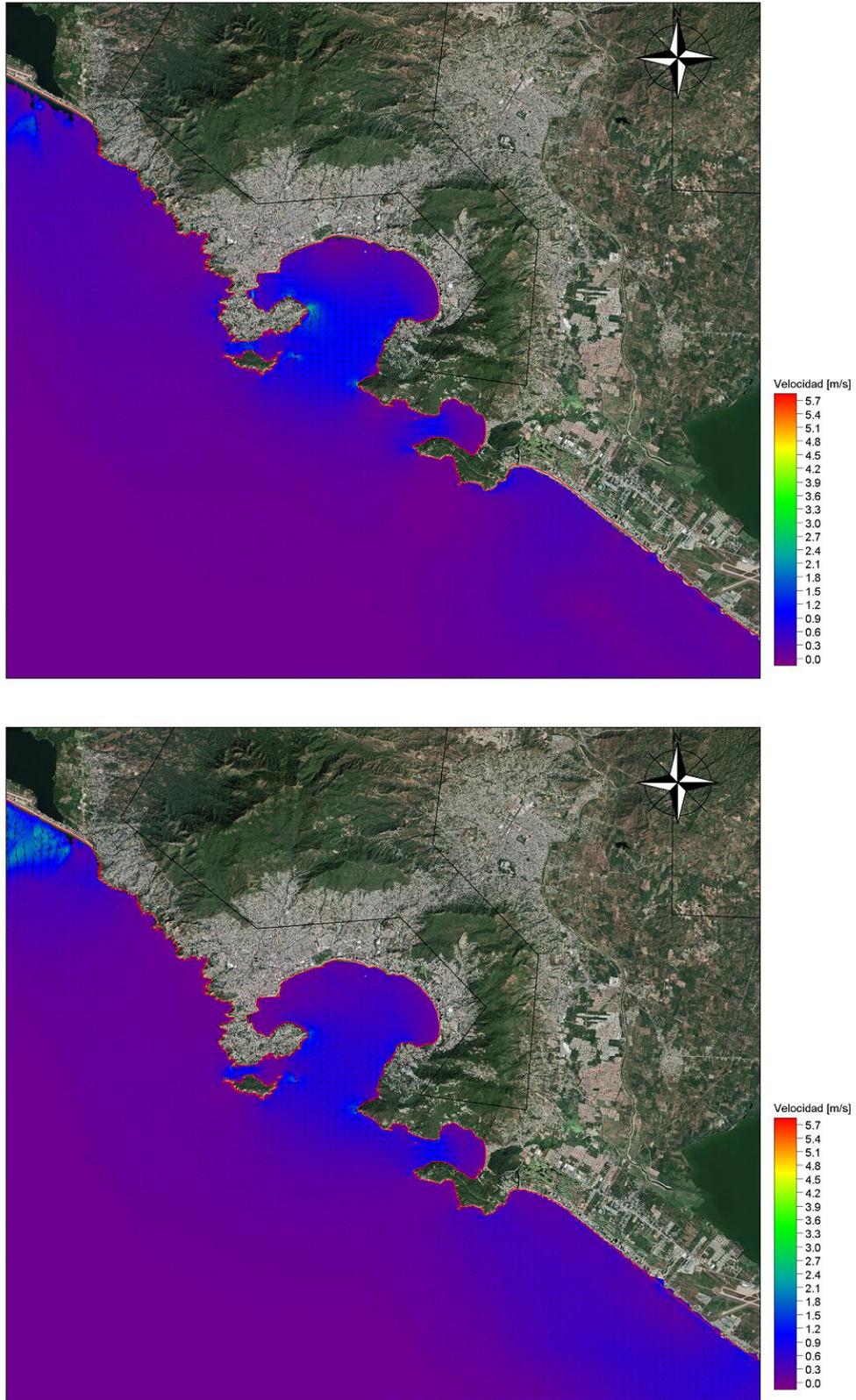


Figura 4. 62. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 31)

- **Caso 32:** Plano de falla 300 x 90 km.

Magnitud del sismo $M_w = 8.9$.

Dislocación cosísmica = 17.4 m.

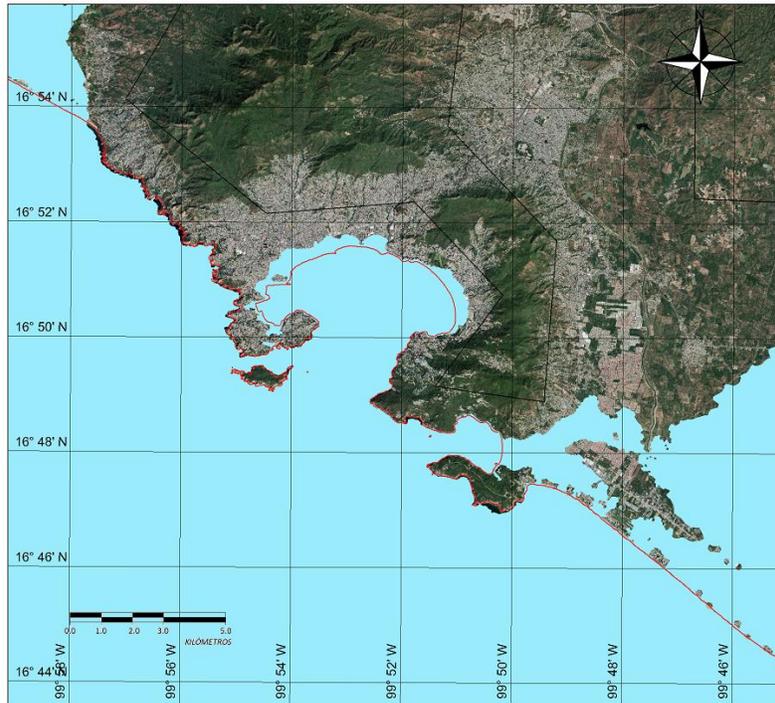


Figura 4. 63. Superficie de inundación generada por el tsunami (Caso 32)

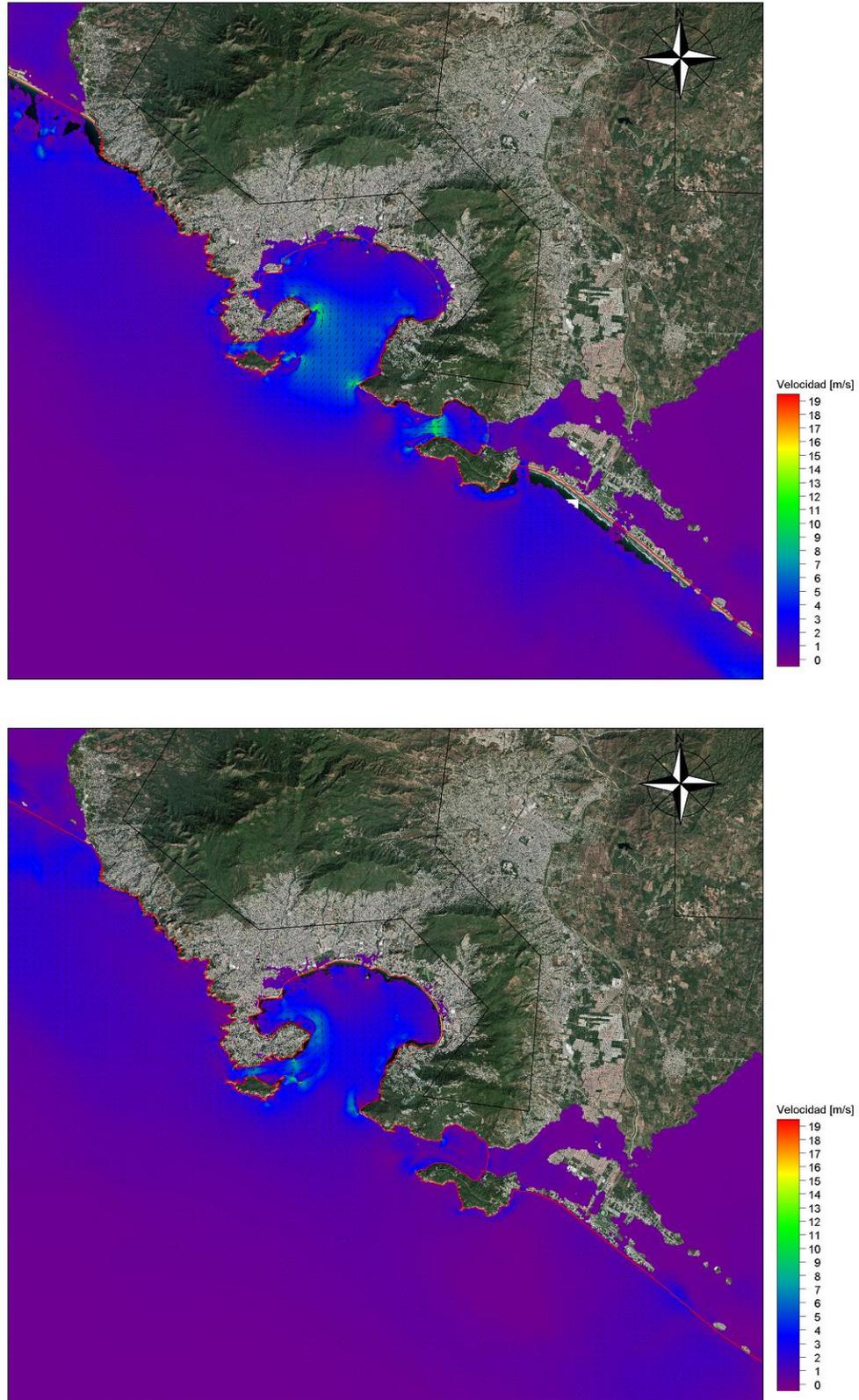


Figura 4. 64. Velocidades máximas de las corrientes generadas por el tsunami (Caso 32)

Conclusiones

- La ausencia por más de 110 años de grandes terremotos en la Brecha Sísmica de Guerrero, hace de este sitio, un lugar anómalo en la zona de subducción mexicana, por lo que es señalada como la región de la que vendrá el siguiente gran sismo en México.
- Para definir las zonas de riesgo de inundación y corrientes en la zona costera de Acapulco, se generaron 288 eventos tsunamigénicos, en los que se establecieron diferentes longitudes y ubicaciones del plano de falla, magnitudes del sismo y dislocación cosísmica.
- A partir de la superposición lineal de un grupo de funciones de Green o tsunami sintético se estimaron de forma preliminar, las alturas de ola de arribo del tsunami, los resultados muestran que, al alejar el plano de falla hacia el Noroeste de Acapulco, las alturas de ola de los tsunamis sintéticos van disminuyendo, de igual forma, para una misma magnitud de sismo, a mayor área del plano de falla es menor la altura de ola del tsunami.
- Para la interpretación de los resultados de las modelaciones numéricas de la propagación de los tsunamis, la zona costera de Acapulco, se dividió en 4 zonas, las cuales son: Playa Pie de la Cuesta, Bahía de Acapulco, Bahía de Puerto Marqués y Playa Diamante.
- El rango estimado de las máximas alturas de ola para las zonas mencionadas en el punto anterior, se indican en gráfica de la figura C.1, en la cual, las líneas punteadas corresponden al rango mayor de las máximas alturas de ola de los tsunamis y las líneas continuas corresponden al rango menor de las máximas alturas de ola de los tsunamis.

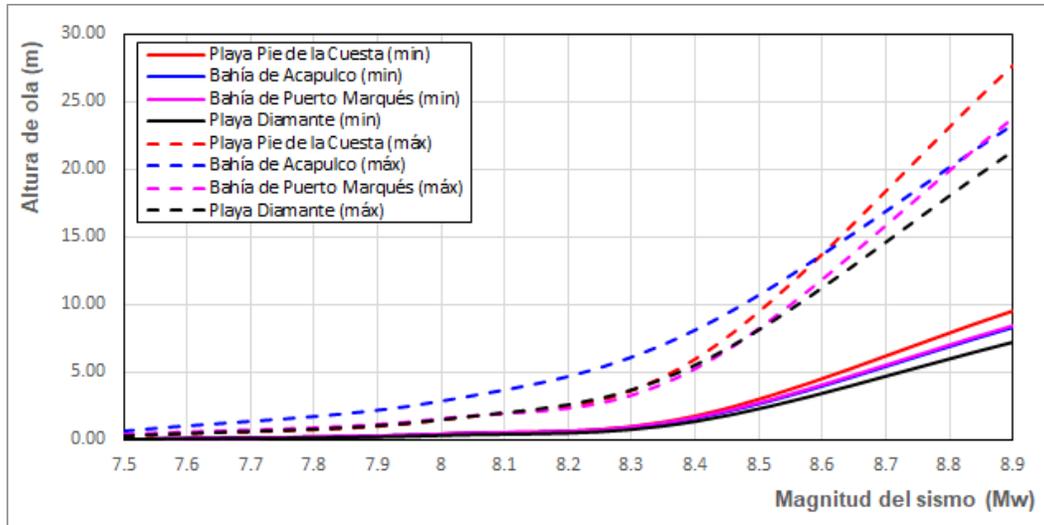


Figura C. 1. Rango de las máximas alturas de ola

- De la gráfica anterior, se estimó que las olas de los tsunamis locales generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían en playa Pie de la Cuesta con alturas máximas comprendidas entre los 0.09 y 0.29 m, mientras que, las olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona con alturas máximas de entre 9.49 y 27.69 m.

En la bahía de Acapulco, los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían con alturas de ola máximas comprendidas entre los 0.10 y 0.60 m, mientras que, las olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona con alturas máximas de entre 8.30 y 23.26 m.

En la bahía de Puerto Marqués, se estimó que los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían con alturas de ola máximas comprendidas entre los 0.10 y 0.36 m, mientras que, las máximas olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona con alturas de entre 8.43 y 23.74 m.

Por lo que respecta a la zona de playa Diamante, se estimó que las olas de los tsunamis locales generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían con alturas máximas comprendidas entre los 0.07 y 0.31 m, mientras que, las olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona con alturas máximas de entre 7.23 y 21.34 m

- En playa Pie de la Cuesta y en playa Diamante, la primera ola de los tsunamis, corresponde a la ola de mayor altura. En la bahía de Acapulco, la mayor altura de ola, corresponde a la segunda ola que arriba a la zona, y en la bahía de Puerto Marqués, la ola de mayor altura corresponde a la tercera ola. Cabe señalar que para tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9, la máxima altura de ola siempre corresponde a la primera ola que arriba.

- El rango del tiempo de arribo de las máximas alturas de los tsunamis para las 4 zonas antes mencionadas, se indican en la gráfica de la figura C.2, en la cual, las líneas punteadas corresponden al rango mayor del tiempo de arribo (en minutos) de las máximas alturas de ola de los tsunamis y las líneas continuas corresponden al rango menor del tiempo de arribo de máximas alturas del tsunami.

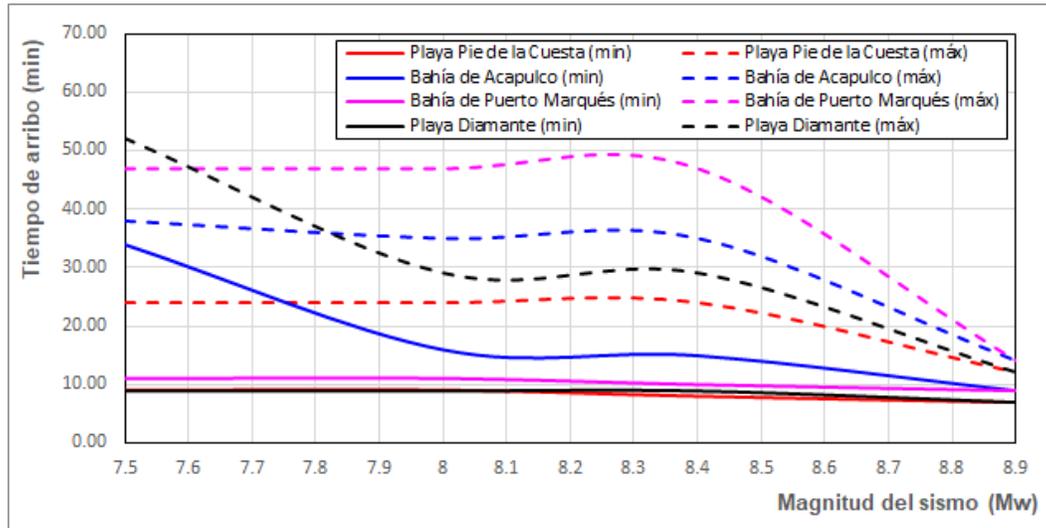


Figura C. 2. Rango de tiempo de arribo de las máximas alturas de ola

- De la gráfica anterior, se estimó que las máximas olas de los tsunamis locales generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían en playa Pie de la Cuesta entre los 9 y 24 minutos posteriores al sismo, mientras que, las máximas olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona entre los 7 y 12 minutos.

En la bahía de Acapulco, las máximas alturas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían entre los 34 y 38 minutos, mientras que, las máximas olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona entre los 9 y los 14 minutos posteriores al sismo.

En la bahía de Puerto Marqués, se estimó que las máximas alturas de ola de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían entre los 11 y los 47 minutos, mientras que, las máximas olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona entre los 9 y los 14 minutos.

Por lo que respecta a la zona de playa Diamante, se estimó que las máximas olas de los tsunamis locales generados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 arribarían entre los 9 y los 52 minutos, mientras que, las máximas olas de los tsunamis generados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 arribarían en dicha zona entre los 7 y los 12 minutos.

- El rango estimado de la distancia que cubriría la inundación para las 4 zonas antes mencionadas, se indican en la gráfica de la figura C.3, en la cual, las líneas punteadas corresponden al rango mayor de la inundación y las líneas continuas corresponden al rango menor de la distancia de inundación.

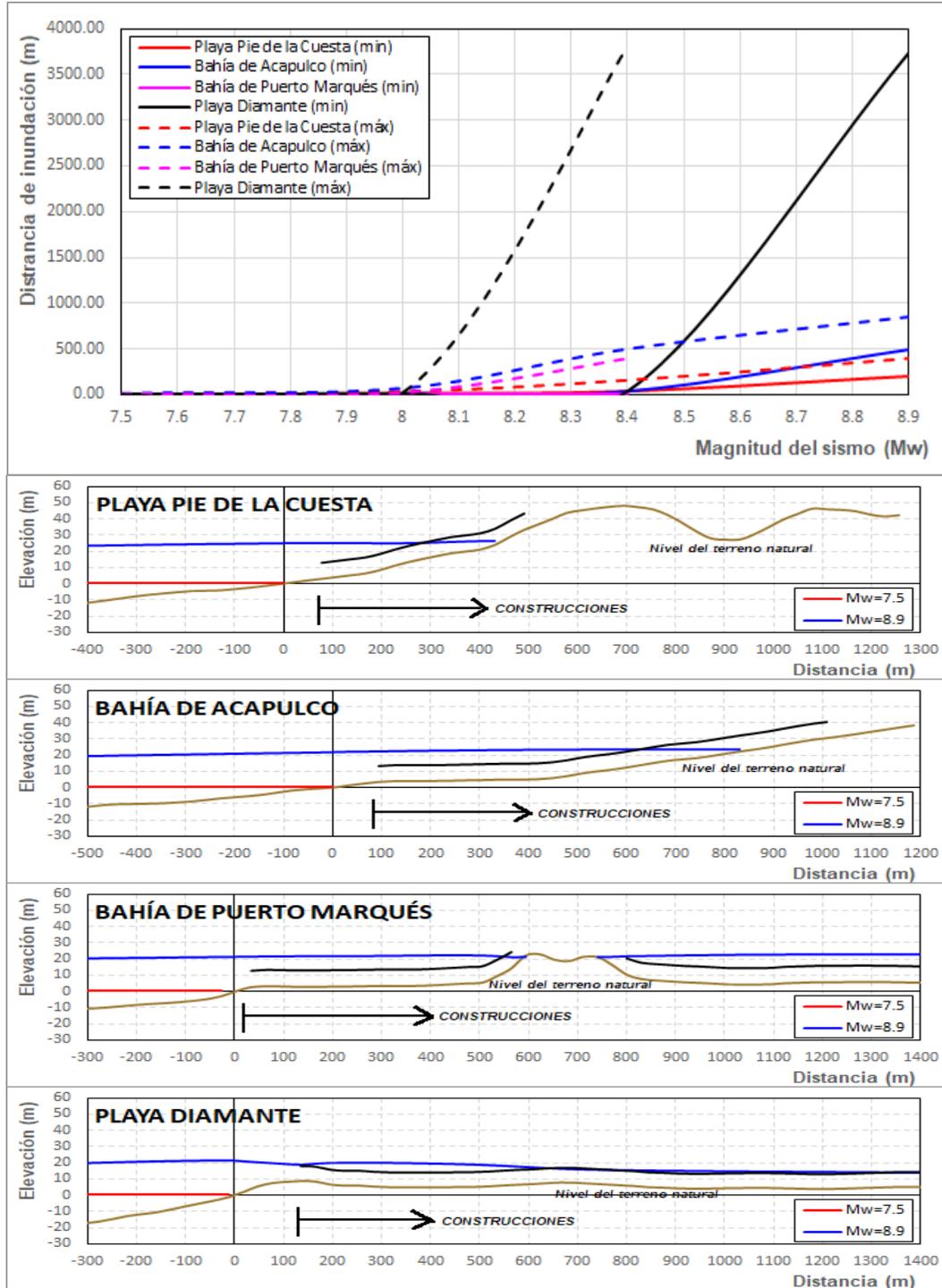


Figura C. 3. Rango de las distancias máximas de inundación.

- De la gráfica anterior, se estimó que para sismos de magnitud (M_w) de 7.5, la distancia máxima de inundación que cubriría el tsunami en la bahía de Acapulco es de 16.59 m, en las playas Pie de la Cuesta y Diamante sería de 7.71 y 5.01 m respectivamente y en la bahía de Puerto Marqués sería de 3.09 m, con afectación solamente en el área de playa.
- Con sismo de magnitud (M_w) de 8.9, la distancia máxima de inundación que alcanzaría a penetrar el tsunami se estimó en 398 m, con afectaciones en el cuerpo de agua de la laguna de Coyuca, en las instalaciones de la base aérea militar, colonias como la Unidad Habitacional Fuerza Aérea, Pie de la Cuesta y Brisas del Mar.

En la bahía de Acapulco, la distancia máxima de inundación que alcanzaría a penetrar el tsunami se estimó en 857 m, con afectaciones en colonias como Zona Urbana 49, el Parazal, Hornos, Farallón, Costa Azul, e Icacos, así como al Zócalo de Acapulco, el malecón, las instalaciones de la Marina Acapulco y las instalaciones de la Terminal Portuaria.

En la bahía de Puerto Marqués, la distancia que alcanzaría a penetrar el tsunami se estimó en más de 6000 m, lo que afectaría prácticamente todo el poblado de Puerto Marqués, pues la ola alcanzaría el cuerpo de la laguna de Tres Palos.

En la playa Diamante, la distancia que alcanzaría a penetrar el tsunami se estimó en más de 6000 m, con dicho tsunami se afectarían las instalaciones del Aeropuerto Internacional de Acapulco y prácticamente toda la franja costera de Acapulco Diamante, pues el tsunami alcanzaría el cuerpo de la laguna de Tres Palos.

- El rango estimado de las velocidades máximas de las corrientes para las zonas de playa Pie de la Cuesta, bahía de Acapulco, bahía de Puerto Marqués y playa Diamante, se indican en la gráfica de la figura C.4, en la cual, las líneas punteadas corresponden al rango mayor de las velocidades máximas de las corrientes generadas por los tsunamis y las líneas continuas corresponden al rango menor de las velocidades máximas de las corrientes.

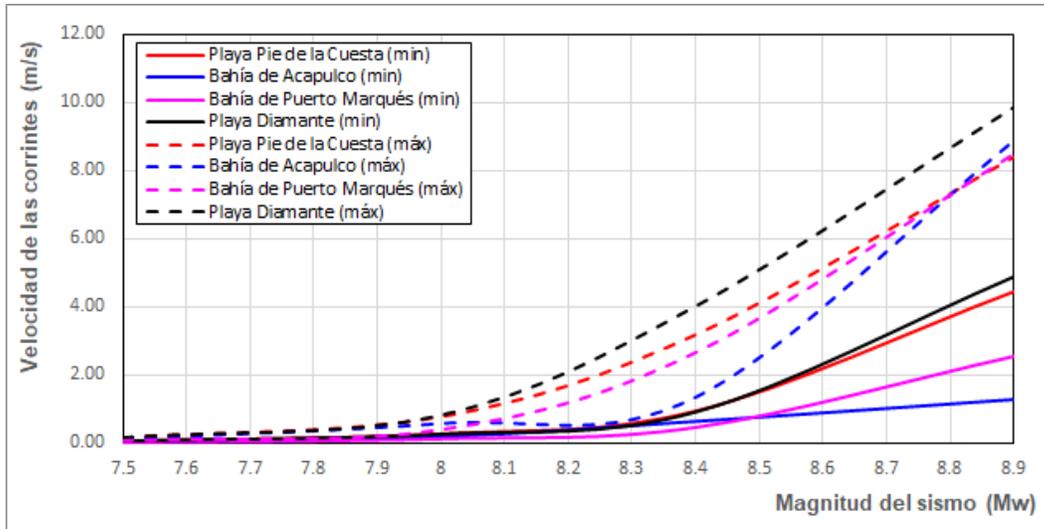


Figura C. 4. Rango de las velocidades máximas de las corrientes

- De la gráfica anterior, se estimó que las corrientes en el frente costero de la playa Pie de la Cuesta generados por tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 presentarían velocidades máximas de 0.16 m/s, mientras que, las corrientes generadas por los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 presentarían velocidades máximas de hasta 8.37 m/s.

En la bahía de Acapulco, los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 generarían corrientes con velocidades máximas de 0.13 m/s, mientras que los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 generarían corrientes con velocidades máximas de hasta 8.89 m/s.

En la bahía de Puerto Marqués, se estimó que las corrientes generadas por tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 presentarían velocidades máximas de 0.09 m/s, mientras que, las corrientes generadas por los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 presentarían velocidades máximas de hasta 8.49 m/s.

Por lo que respecta a la zona de playa Diamante, se estimó que los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 7.5 generarían corrientes con velocidades máximas de 0.19 m/s, mientras que los tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9 generarían corrientes con velocidades máximas de hasta 9.86 m/s.

- La zona menos segura por la presencia de las corrientes de mayor magnitud se presenta en el canal que se forma entre la isla de La Roqueta y la Península de Las Playas, así como en la entrada de la bahía de Acapulco en la zona comprendida entre la isla de La Roqueta y Punta Brujas, y en la entrada de la bahía de Puerto Marqués en la zona comprendida entre Punta Sirena y Cabo

Marqués, en donde las corrientes alcanzarían velocidades máximas de hasta 20 m/s para tsunamis originados por sismos de magnitud (Mw) de 8.9.

- Para establecer los índices de daño en la zona costera de Acapulco debido a las máximas velocidades de las corrientes, se utilizó el criterio establecido por Lynett, Borrero, Son, Wilson y Miller (2014), el cual se indica en la tabla C.1 que se muestra a continuación.

Tabla C. 1. Índice y tipo de daño causando en las zonas portuarias, por las corrientes generadas por tsunamis

índice de daño	Velocidad de las corrientes (nudos; m/s)	Tipo de daño
0	< 3	No daños/impactos
1	(< 1.54)	Pequeñas boyas movidas
2		1-2 Daños menores en muelles/embarcaciones y/o grandes boyas movidas
3	> 3 y < 6 (> 1.54 y < 3.09)	Daños moderados en muelles/embarcaciones (<25% de los muelles/barcos dañados) y/o las amarraderos de embarcaciones medianas
4	> 6 y < 9 (> 3.09 y < 4.63)	Daños mayores en muelles/embarcaciones (< 50% de muelles/embarcaciones dañadas) y/o amarraderos de grandes embarcaciones
5	> 9 (> 4.63)	Extremo/daño completo (> 50% de muelles/embarcaciones dañadas)

De acuerdo con las velocidades máximas y el criterio anterior, para los tsunamis originados por los sismos de magnitud (Mw) de 7.5 y 8.0, no se esperaría daño o posibles daños menores (índice de daño = 0 – 1). Para los tsunamis originados por los sismos de magnitud (Mw) de 8.4, se tendían daños moderados a posibles daños mayores (índice de daños = 3 – 4). Para los tsunamis originados por los sismos de magnitud (Mw) de 8.9, se tendían posibles daños extremos (índice de daños = 5).

Las zonas de riesgo, asociadas a las máximas velocidades de las corrientes (en nudos) y al tipo de daño esperado, se indican en las figuras C.5 – C.8, en las cuales, las corrientes con bajas velocidades (< 1 nudo) se presentan en las zonas de color amarillo, las corrientes con velocidades moderadas (< 1 y >5 nudos) se presentan en las zonas de color rojo, las corrientes con altas velocidades (< 5 y > 15 nudos) se presentan en las zonas de color azul y las corrientes con velocidades extremas (> 15) se presentan en las zonas de color morado.

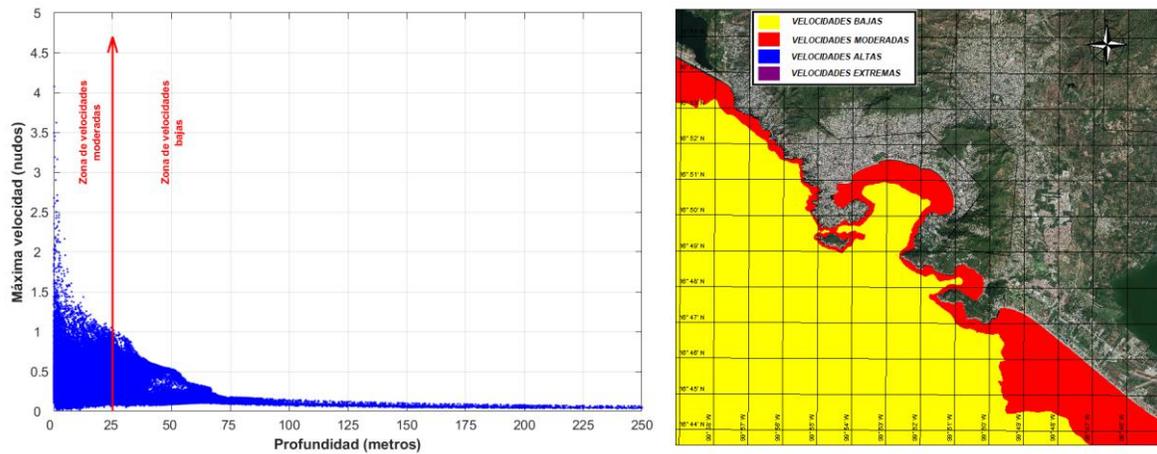


Figura C. 5. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 7.5

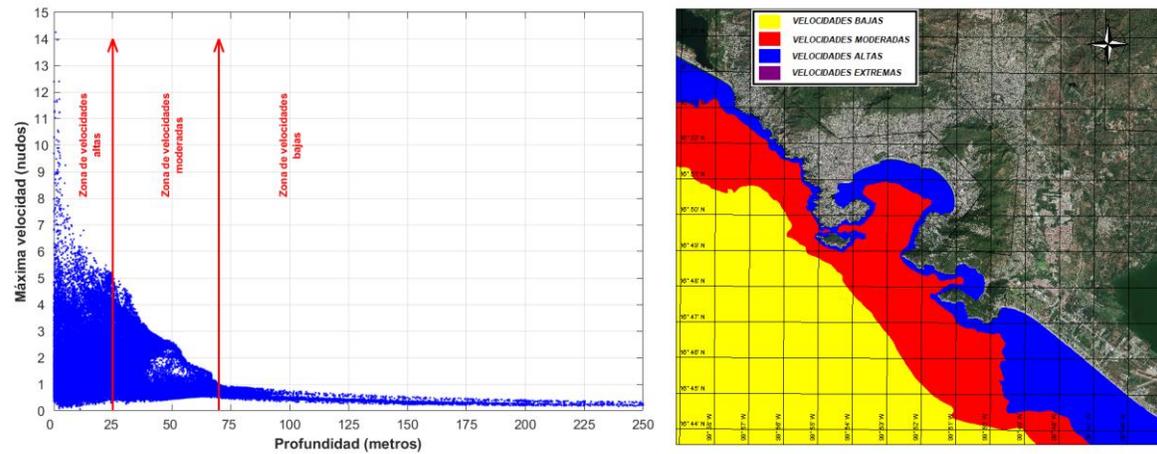


Figura C. 6. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.0

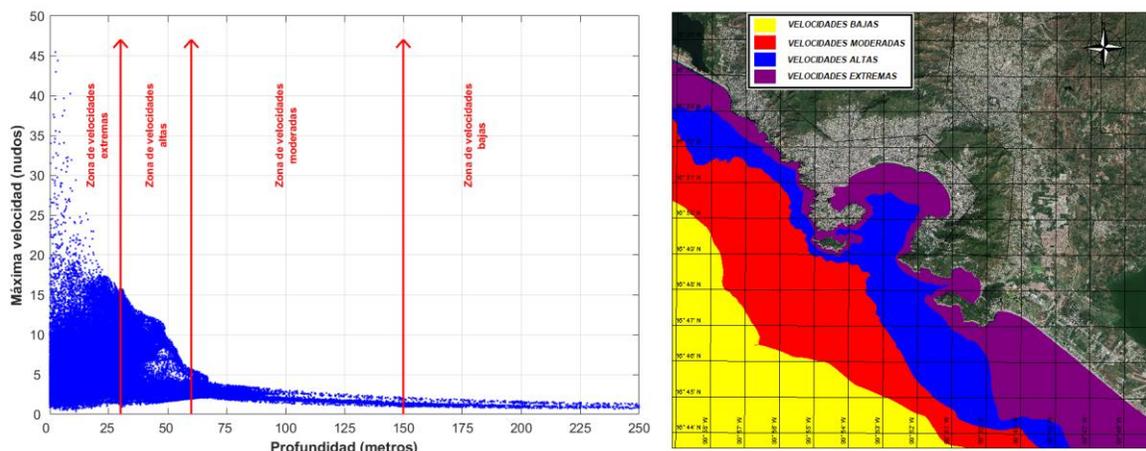


Figura C. 7. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.4

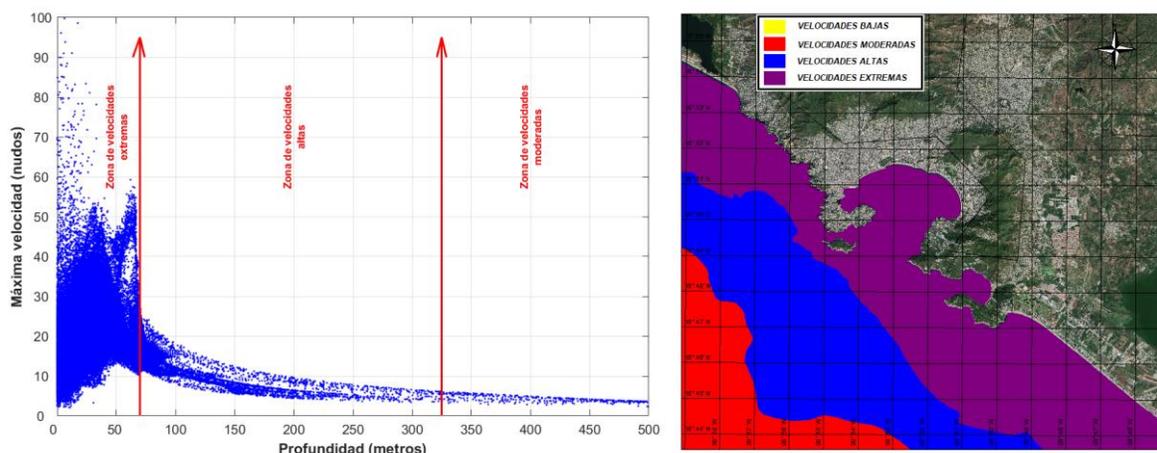


Figura C. 8. Zonas de riesgo por corrientes generadas por tsunamis originado por sismo de magnitud (Mw) de 8.9

- Las mediciones del nivel del mar en tiempo real son fundamentales para evaluar con mayor certidumbre el riesgo de inundación y de corrientes generadas por tsunamis a fin de evaluar una adecuada alerta temprana de tsunamis.
- Finalmente, los conocimientos científicos sobre sismología son insuficientes para realizar predicciones de cuando y donde se producirá un sismo y si este va a generar un tsunami, sin embargo, las recientes investigaciones y el desarrollo de metodologías para estimar las alturas y el tiempo de arribo de los tsunamis a las costas, permite contribuir a la mitigación de sus efectos en las zonas costeras, como medidas de prevención y autoprotección.

Bibliografía

Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros, A. C. (2019) *Crónica de seis siglos de sismos en México: lecciones aprendidas y perspectivas*. México.

Aste, A. (2003). *Optimización del sistema regional de alerta de tsunamis en Perú mediante la detección temprana y la simulación numérica*. [Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias]. México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Centro Nacional de Prevención de Desastres [CENAPRED]. (2005). *Tsunamis, Serie fascículos*. Recuperado de <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieFasciculos/fasciculotsunami.pdf>

Danish Hydraulics Institute [DHI]. (2007). *Mike 21 Flow Model. Tsunami Modelling. Step-by-step training example*.

Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología [DIGAOHM]. (s.f.). *Historia de los tsunamis locales ocurridos en México*. Recuperado de https://digaohm.semar.gob.mx/cat/Archivos/Historia_Tsunamis.pdf

Dziewonski A., Chou T., Woodhouse J. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *Journal Geophysical Research.*, 86 (1), 2825 – 2852.

González González, R. Ortiz, Modesto. Montoya, J. (2012), Tsunami: Un problema matemáticamente interesante. *Revista de Matemática Teoría y Aplicaciones*, 19(1), 107-119. ISSN: 1409-2433.

Imamura, F. and N. Shuto. (1990). Tsunami propagation by use of numerical dispersion, *Proceedings. of the International Symposium on Computational Fluid Dynamics, Nagoya*, 390-395.

Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). *Zona de subducción mexicana y su potencial para un sismo mayor*. Recuperado de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI]. (2020). *Modelo digital de elevación tipo terreno con 5m de resolución derivado de datos de sensores remotos satelitales y aerotransportados*.

Jiménez, C. (2019). *Generación y propagación de maremotos producido por una distribución de fuente sísmica*. [Tesis para optar el grado Académico de Doctor en Física]. Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Kostoglodov, V. Pacheco, F. (2000). *Cien años de sismicidad en México*. México: Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Lynett, P. Borrero, J. Son, S. Wilson, R. & Miller, K. (2014). Assessment of the Tsunami – induced Current Hazard. *Geophysical Research Letters*.

Liu, P. Woo, S. and Cho, Y. (1998) *Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation*. [National Science Foundation]. Cornell University.

Mansinha, L & Smylie, D. The Displacement Field of Inclined Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 61(1). 10.1785/BSSA0610051433

Núñez-Cornú, F., Ortiz, M., and Sánchez, J. (2008). The great 1787 Mexican tsunami. *Natural Hazards*. 47.569-576. 10.1007/s11069-008-9239-1.

Pedersen, N. Rash, P. and Tatsuaki, S. (2005). *Modelling of the Asian Tsunami off the Coast of Northern Sumatra*.

Ortiz, L. Ortiz, M. (2021). *Tsunamis en la Costa Occidental del México y en el Mar de Cortés*. México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. ISBN: 978-607-8811-21-2.

Singh, S., Astiz, L., and Havskov, J. (1981). Seismic Gaps and Recurrence Periods of Large Earthquakes along the Mexican subduction zone: a Reexamination, *Bulletin of Seismological Society of America*. 71(1), 827-843.

Trejo, E. (2015). *Evaluación de zonas vulnerables por tsunami local en Puerto Vallarta, Jalisco*. [Tesis para obtener el grado de Doctora en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas]. México: Universidad de Guadalajara.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>