



MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL

DIRECCIÓN GENERAL MARÍTIMA



**CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS
DEL PACÍFICO**



**EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR TSUNAMI DE ORIGEN CERCANO AL
QUE SE ENCUENTRAN EXPUESTOS LOS MUNICIPIOS DE TUMACO Y
BUENAVENTURA**

**CONVENIO ESPECIAL DE COOPERACIÓN PARA EL DESARROLLO DE
ACTIVIDADES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS A SUSCRIBIRSE ENTRE
EL MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL - DIRECCIÓN GENERAL
MARÍTIMA Y FONDO NACIONAL DE GESTION DEL RIESGO DE
DESASTRES - UNIDAD NACIONAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE
DESASTRES**

**III INFORME: FINAL DE ACTIVIDADES, GENERACIÓN DE PRODUCTOS,
CUMPLIMIENTO OBJETO DEL CONVENIO**

Área de Manejo Integrado de Zona Costera

San Andrés de Tumaco, Diciembre de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	FASE I: TRABAJO DE CAMPO	9
2.1	DETERMINACIÓN DEL ÁREA Y ESCALA A LEVANTAR.....	10
2.2	LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO ÁREAS FALTANTES.....	18
1.2.1	Preparación	19
1.2.2	Ejecución	20
1.3	PROCESAMIENTO Y EDICIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS Y ALTIMÉTRICOS PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVOS, EN FORMATO XYZ. 41	
1.4.	LEVANTAMIENTO GEODÉSICO Y ANÁLISIS MAREAL	55
1.4.1	Control Horizontal y Vertical	55
1.4.2	Levantamiento GNSS RTK estático.....	56
1.4.3	Determinación Punto de control en torre tráfico Marítimo de CP1	57
1.4.4	Comprobación Punto de control en muelle de SEMAP	58
1.4.5	Comprobación punto GPS2 mareógrafo Juanchaco	59
1.4.6	Determinación Punto de control en Muelle Guardacostas Tumaco ...	60
1.4.7	Levantamiento control vertical nivelación geométrica diferencial	61
1.4.8	Instalación red de Mareógrafos Portátiles	61
1.4.9	Estaciones Permanentes DIMAR	62

1.4.10	Determinación altura elipsoidal Cero Histórico	63
1.4.11	Análisis Mareal	66
3	FASE II: APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA	71
3.1	DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.....	71
3.2	DEFINICIÓN ESCENARIOS SÍSMICOS PRECURSORES DE TSUNAMI	75
2.2.1	Patrón Sismo-Tectónico	75
2.2.2	Región Sismo-Tectónica Homogénea	81
2.2.3	Mecanismos de falla Dominantes	87
2.2.4	Magnitudes sísmicas y probabilidades de Ocurrencia.....	91
2.2.5	Definición Sismos Precursores	97
3.3	ACONDICIONAMIENTO DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA Y ALTIMÉTRICA	101
2.3.1	Generación y Acondicionamiento de los Dominios de Cálculo	105
3.4	APLICACIÓN MODELOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE ONDAS DE TSUNAMI.....	109
2.4.1	Generación Ondas de Tsunami: Simulación numérica para evaluar el desplazamiento vertical cósmico del lecho marino.	114

2.4.2	Propagación e Inundación de Ondas de Tsunami: Simulación numérica para evaluar la altura, el tiempo de llegada y la inundación producida por el tren de ondas de tsunami, en las zonas de estudio.....	123
2.5	DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO DE AMENAZA MÁS DESFAVORABLE.....	156
2.5.1	Peor Condición de Amenaza	156
2.5.2	Análisis de Vulnerabilidad Física	159
2.5.3	Escenario de amenaza más desfavorable.....	168
4	FASE III: GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA.....	174
4.1	ÁREA DE ESTUDIO.....	175
1.3.1	Costa del Municipio de Buenaventura:	175
3.1.2	Costa del Municipio de San Andrés de Tumaco:.....	178
4.2	INTEGRACIÓN DE LA INUNDACIÓN A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	183
4.3	GENERACIÓN DE LAS CAPAS DE INFORMACIÓN	186
3.3.1	Digitalización.....	192
4.4	REVISIÓN CARTOGRAFÍA TEMÁTICA	196
4.5	VALIDACIÓN EN CAMPO	201
4.6	GENERACIÓN DE MAPAS.....	203
5	CONCLUSIONES	209
6	BIBLIOGRAFIA	211

7 ANEXOS 224

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Litoral Pacífico Colombiano.....	5
Figura 2.Comparación Tecnología Monohaz vs Tecnología Multihaz	11
Figura 3.Información Base de Datos DIMAR – Pacífico Sur	14
Figura 4.Información Base de Datos DIMAR – Pacífico Centro	15
Figura 5.Información Levantada en Fase de Campo – Pacífico Sur	17
Figura 6.Información Levantada en Fase de Campo – Pacífico Centro	17
Figura 7.Etapas Principales del Modelo Metodológico para Levantamientos Batimétricos.....	18
Figura 8.Planeamiento de Líneas de Levantamiento en software HYPACK MAX	20
Figura 9.Distribución Red Mareográfica Observación	22
Figura 10.Receptor GPS LEICA 1200.....	24
Figura 11.Transductor Ecosonda IMAGENEX DELTA T-837	25
Figura 12.Ecosonda ODOM HYDROTRAC MKII	27
Figura 13.Sensor de Movimiento TSS DMS-05.....	28
Figura 14.Sensor SBE19.....	29
Figura 15.Perfilador RESON SVP 20	30
Figura 16.Comportamiento Velocidad del Sonido Vs Profundidad de los Perfiles Realizados.....	31
Figura 17.Líneas Levantadas para Efectuar la Calibración del Sistema	33
Figura 18.Esquema Teoría de la Latencia	33
Figura 19. Módulo de Calibración Caris Hips and Sips Ver. 7.1	34
Figura 20. Esquema Teoría de Balanceo (roll).....	35

Figura 21. Esquema Teoría de Cabeceo (Pitch)	36
Figura 22. Esquema Teoría de Guiñada (yaw).....	38
Figura 23. Faena de Recolección de Datos Batimétricos.....	39
Figura 24. Intersección de Líneas para Control de Calidad	40
Figura 25. Diagrama Metodológico para el Procesamiento de la Información Batimétrica	42
Figura 26. Creación del Proyecto en CARIS HIPS	43
Figura 27. Editor de la Embarcación	44
Figura 28. Conversión de Datos Brutos	45
Figura 29. Editor de Navegación CARIS HIPS	45
Figura 30. Editor de Sensores Auxiliares CARIS HIPS	46
Figura 31. Editor de Datos Monohaz.....	47
Figura 32. Editor de Datos de Marea CARIS HIPS	48
Figura 33. Editor de Datos de Velocidad del Sonido	49
Figura 34. Proceso de Mezclado.....	49
Figura 35. Creación de Hojas de Campo	50
Figura 36. Superficie Batimétrica Sector Bahía Málaga	51
Figura 37. Modulo “EXPORT WIZARD”. Archivo XYZ.	52
Figura 38. Modelo Hoja Final	53
Figura 39. Información Topográfica-Batimétrica Bahía Tumaco-Islas.....	54
Figura 40. Información Topográfica-Batimétrica Bahía Buenaventura – Cascajal .	54
Figura 41. Posicionamiento de Estación Base en Puntos de Control.....	55
Figura 42. Levantamiento GNSS RTK.	56

Figura 43. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Buenaventura.	68
Figura 44. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Juanchaco....	68
Figura 45. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Tumaco	69
Figura 46. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Salahonda	69
Figura 47. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Curay	70
Figura 48. Arreglo de Mallas Computacionales Correspondientes a las Zonas de Salahonda, Tumaco y Curay.	74
Figura 49. Arreglo de Mallas Computacionales Correspondientes a las Zonas de Buenaventura y Juanchaco.	74
Figura 50. Definición de los Tres Segmentos Propuestos para la Fosa Colombia, Y Localización de las Secciones Verticales Perpendiculares a los Mismos. Se Indica la Localización de los Sismos más Importantes Registrados en esta Área [26].	76
Figura 51. Sección Norte Perpendicular al Segmento Chocó, Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad Vs la Profundidad. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de la Sección [26].	77
Figura 52. Sección Central Perpendicular al Segmento Caldas Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad Vs la Profundidad Bajo el Centro-Oeste de Colombia. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de la Sección. En el Inferior, el Triángulo Verde Indica la Localización del Vulcanismo [26].	78
Figura 53. Sección del Segmento Sur Perpendicular a la Fosa, Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad en Profundidad Bajo el Suroeste de Colombia. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de La Sección. En El	

Gráfico Inferior el Triángulo Verde Indica la Localización del Vulcanismo Activo [26].	79
Figura 54.Corte del Segmento Sur Ubicado Entre 0° y 2.5°. [31].	80
Figura 55.Yaquina Graben, Colombian Trench, Carnegie Ridge, la Zona de Fractura Grijalva, El Bloque Norte de los Andes [32].	83
Figura 56.Eventos Sísmicos Tipo Normal o Inverso con Mw> 5.0 Y H= 0-70 Km Registrados en el Pacífico Colombo-Ecuatoriano Durante el Periodo 1976-2010. El Área del Círculo es Proporcional a la Magnitud del Sismo; Círculos Grandes Mw= 8.1; Círculos Pequeños 5<Mw<8.1 (Fuente: Harvard CMT Catalog; NEIC-USGS). Las Líneas Rojas Indican Los Patrones Sísmicos Señalados Por [33] [34].	84
Figura 57.Rupturas de los Terremotos de 1942, 1958 y 1979 [32].	85
Figura 58.Sismos Superficiales, de Magnitud Mw> 5. Bloque Norte Pacífico Colombiano [15].	87
Figura 59.Imagen de Radar de Bahía Solano y Bahía Utría, Mostrando el Fuerte Control Estructural en la Morfología de la Costa y el Trazo de la Falla Inversa de Bahía Solano que Atraviesa la Bahía. Fuente: Reproducido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)e INTERA Información Technologies (STAR-1 Radar).	89
Figura 60. Mecanismos Focales de Terremotos Asociados al Proceso de Subducción Bajo El Occidente Colombiano Reportados en el Catalogo CMT de Harvard para el Periodo 1976-2008. Los Colores del Cuadrante en Extension del Mecanismo Focal Representan el Tipo de Movimiento: en Rojo los Inversos, en Verde los de Rumbo-Deslizantes y en Azul los Normales [26].	90

Figura 61. Variación de Sismo Máximo Anual para el Pacífico Colombiano Data (1520-15 Abril 2013, CERESIS, USGS) Latitud 0 ° a 4 °.....	93
Figura 62. Variación de Sismo Máximo Anual para el Pacífico Colombiano Data (1520-15 Abril 2013, CERESIS, USGS) Latitud 0 ° a 7.5 °.....	93
Figura 63. Magnitud (Mw) Contra Periodo de Retorno Latitud 0 ° a 4 °.....	96
Figura 64. Magnitud (Mw) Contra Periodo de Retorno Latitud 0 ° a 7 °.....	96
Figura 65. Información Batimétrica Correspondiente a las Zonas de Juanchaco y Buenaventura.....	103
Figura 66. Información Batimétrica Correspondiente a las Zonas de Salahonda, Curay y Tumaco.....	103
Figura 67. Información Topográfica Correspondiente a las Zonas de Salahonda, Curay y Tumaco.....	104
Figura 68. Información Topográfica Correspondiente a las Zonas de Juanchaco y Buenaventura.....	104
Figura 69. Diagrama de Generación de Dominios de Cálculo.....	106
Figura 70. Malla de Detalle para la Zona de Tumaco.....	107
Figura 71. Malla de Detalle para la Zona de Buenaventura.....	107
Figura 72. Malla de Detalle para la Zona de Juanchaco.....	108
Figura 73. Malla de Detalle para la Zona de Curay.....	108
Figura 74. Malla de Detalle para la Zona de Salahonda.....	109
Figura 75. Diagrama de Flujo Funcionamiento COMCOT.....	114
Figura 76. Representación de una Falla Sísmica Sobre la Zona de Subducción.....	115

Figura 77. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E1.....	116
Figura 78. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E2-SGC.....	117
Figura 79. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E3 (CCA).....	118
Figura 80. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E4 (ACM).....	119
Figura 81. Superposición Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E1 con el Estudio De Pararas 2012.....	120
Figura 82. Superposición Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E2, con el Estudio de Pararas 2012.	121
Figura 83. Superposición Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E3, con la Sismicidad de la Tierra de USGS 2010.	122
Figura 84. Superposición Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E4, con la Sismicidad de la Tierra de USGS 2010.	123
Figura 85. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Buenaventura.	124
Figura 86. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Buenaventura.	125
Figura 87. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Buenaventura.	125

Figura 88.Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Buenaventura.	126
Figura 89. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Juanchaco.	127
Figura 90. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Juanchaco.	128
Figura 91. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Juanchaco.	128
Figura 92. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Juanchaco.	129
Figura 93. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Salahonda.	130
Figura 94.Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Salahonda.	130
Figura 95. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Salahonda.	131
Figura 96. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Salahonda.	131
Figura 97.Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Curay.	132
Figura 98. Propagación e Inundación Generada por el escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Curay.	133

Figura 99. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Curay.....	133
Figura 100. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Curay.....	134
Figura 101. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Tumaco.....	135
Figura 102. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Tumaco.....	135
Figura 103. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Tumaco.....	136
Figura 104. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Tumaco.....	136
Figura 105. Ubicación de Mareogramas Sintéticos en el Casco Urbano de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco.	138
Figura 106. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E1.	139
Figura 107. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E2.	139
Figura 108. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E3.	140
Figura 109. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E4.	140
Figura 110. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E1.	141

Figura 111. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E2.	142
Figura 112. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E3.	142
Figura 113. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E4.	143
Figura 114. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E1.	144
Figura 115. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E2.	144
Figura 116. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E3.	145
Figura 117. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E4.	145
Figura 118. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E1.....	146
Figura 119. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E2.....	147
Figura 120. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E3.....	147
Figura 121. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E4.....	148
Figura 122. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E1. ...	149
Figura 123. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E2. ...	149
Figura 124. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E3. ...	150
Figura 125. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E4. ...	150
Figura 126. Ubicación Espacial de Los Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.	152
Figura 127. Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.....	153
Figura 128. Ubicación Espacial de los Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de La Superficie Libre en La Bahía de Buenaventura.....	154

Figura 129.Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Tumaco. .	155
Figura 130.Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Buenaventura.	163
Figura 131. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Juanchaco.	164
Figura 132. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Salahonda.	165
Figura 133.Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Curay.	166
Figura 134. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Tumaco.....	168
Figura 135. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Buenaventura.....	169
Figura 136. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Juanchaco.....	170
Figura 137. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Salahonda.....	171
Figura 138. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Curay.	172
Figura 139. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Tumaco.	173
Figura 140.Mapa de la Bahía de Buenaventura.	178
Figura 141.Mapa de la Bahía de Tumaco.	182
Figura 142.Datos del Modelo de Propagación e Inundación por Tsunami de Origen Cercano, con Geometría Tipo Puntual, Desplegados en el Sistema de Información Geográfica.....	183

Figura 143. Parámetros para la Construcción de la Superficie <i>Raster</i> , A Partir de los Puntos Generados por los Modelos de Propagación e Inundación de Tsunami de Origen Cercano.	184
Figura 144. Modelos de Inundación XYZ Transformado a Formato <i>Raster</i>	185
Figura 145. Mapa de la Bahía de Buenaventura.	188
Figura 146. Mapa de la Bahía de Tumaco.	188
Figura 147. Modelo Digital en 3D, Perfil de Suelo y Datos LiDAR de los Bosques de Manglar de la Isla Del Gallo en La Bahía de Tumaco, Nariño.	190
Figura 148. Modelo Conceptual del Proceso de los Datos LiDAR y la Creación de los Modelos de Terreno y de Vegetación.	191
Figura 149. Digitalización a Escala 1:250 de la Costa en Arcgis®. Isla Gallo, Tumaco, Nariño.	192
Figura 150. Creación de la Capa de Inundación por Tsunami con Geometría Poligonal, para el Área de Tumaco.	193
Figura 151. Aplicativo Web Color Brewer2.0 para la Creación de Paletas de Color en Combinaciones RGB (Colorbrewer2.Org).	194
Figura 152. Construcciones, Vías y Puentes del Centro de Tumaco. Escala 1:2000.	196
Figura 153. Construcciones, Vías y Puentes del Casco Urbano de Tumaco. Escala 1:50000	197
Figura 154. Drenajes de La Bahía de Buenaventura. Escala 1:50000.	198
Figura 155. Curvas de Nivel de La Islalba, Bahía de Buenaventura. Escala 1:25000.	199

Figura 156.Revisión Visual de la Correspondencia Entre el Modelo de Inundación y la Digitalización Manual de la Inundación Cuando el Tsunami Toca la Costa...	200
Figura 157.Reglas Topológicas Usadas en las Capas de Inundación. Reglas: Los Polígonos No Deben Solaparse y los Polígonos No Deben Tener Vacíos.....	201
Figura 158. Examen Visual de las Orto Fotografías en el Software Arcgis® 10.1.	202
Figura 159.Revisión y Corroboración en Terreno de la Cartografía Básica y los Modelos Digitales	203
Figura 160.Estructura de la Base de Datos para las Diferentes Escalas de la Cartografía.	204
Figura 161.Modelo de Ficha de Metadatos de las Capas de Información de las Diferentes Bases de Datos Geográficas para el Escenario de Inundación por Tsunami.....	205
Figura 162.Plantilla de Presentación para los Mapas por Inundación por Tsunami de Origen Cercano para el Pacífico Colombiano.	206
Figura 163.Mapa de Juanchaco a Escala 1:2000, Representando el Relieve con un Hill Shade.....	207
Figura 164.Mapa de Juanchaco a Escala 1:2000, Representando la Superficie con la Ortofotografía.	208

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Levantamientos Base de Datos DIMAR	14
Tabla II. Levantamientos Realizados en la Fase de Campo	16
Tabla III. Parámetros de Configuración GPS Leica 1200	23
Tabla IV. Resultado Cálculo de Latencia	34
Tabla V .Resultado Cálculo de Balanceo (roll)	36
Tabla VI. Resultado Cálculo de Cabeceo (pitch)	37
Tabla VII. Resultado Cálculo de Guiñada (yaw)	38
Tabla VIII. Resultado Control de Calidad Datos Batimétricos	41
Tabla IX. Especificaciones Vértice Geodésico Origen IGAC Torre Tráfico Marítimo CP1	57
Tabla X. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Torre Tráfico Marítimo CP1	57
Tabla XI. Especificaciones Vértice Geodésico Origen CP1-001 Muelle SEMAP ..	58
Tabla XII. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Comprobado Muelle SEMAP	58
Tabla XIII. Especificaciones Vértice Geodésico Origen GPS1 Muelle Juanchaco.	59
Tabla XIV. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Baliza GPS2 Juanchaco.	59
Tabla XV. Especificaciones Vértice Geodésico Origen IGAC Muelle Guardacostas Tumaco.	60
Tabla XVI. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Muelle Guardacostas Tumaco.	60

Tabla XVII. Descripción General Estaciones Mareográficas	62
Tabla XVIII. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) para las Estaciones en Metros	64
Tabla XIX. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) para la Estación en Metros	64
Tabla XX. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) Basado en Modelo GEOCOL 2004 en Metros	66
Tabla XXI. Niveles de Marea para las Poblaciones de Interés en Metros	70
Tabla XXII. Consolidado Actividades Fase I: Trabajo de Campo	71
Tabla XXIII. Características del Arreglo de Mallas Computacionales para las Zonas Bajo Estudio.	73
Tabla XXIV. Probabilidades de Sismos para Diferentes Magnitudes (Mw) y Diferentes Periodos en Latitud 0 ° a 4 °	95
Tabla XXV. Escenarios Sísmicos Precursores de Tsunami en la Zona De Subducción.....	100
Tabla XXVI. Escenario Sísmico Extremo Creíble para el Segmento Cabo Corrientes-Arusi.	100
Tabla XXVII. Escenario Sísmico Extremo Creíble para el Segmento Arusi– Cabo Marzo.	101
Tabla XXVIII. Ubicación Geográfica de los Puntos de Interés en el Casco Urbano de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco.	138
Tabla XXIX. Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.	152

Tabla XXX.Puntos De Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Tumaco.....	154
Tabla XXXI. Consolidado Ejecución Fase II.....	173
Tabla XXXII. Combinaciones RGB para la Separación de las Alturas de la Ola de Inundación por Tsunami, Generadas A Partir De Color Brewer2 (Colorbrewer2.Org).	195

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Estándar para Levantamientos Hidrográficos, 2008.	224
Anexo 2. Escenario Sísmico propuesto por UNGRD - SGC como precursor de tsunami: Zona Centro.	224
Anexo 3. Mapas de Inundación por Tsunami. Impresos	224
Anexo 4. Mapas de Inundación por Tsunami Geo Referenciados en Formato PDF, Respectiva Base De Datos Digital.....	224

RESUMEN

Con el fin de dar cumplimiento al convenio especial de cooperación para el desarrollo de actividades científicas y tecnológicas a suscribirse entre el Ministerio de Defensa Nacional - Dirección General Marítima y Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, se realizó el estudio de investigación para evaluar la amenaza por tsunami de origen cercano en los municipios de Tumaco en el departamento de Nariño y Buenaventura en el departamento del Valle del Cauca, como también en los cascos urbanos de las poblaciones de Curay y Salahonda en Nariño; y Juanchaco en el Valle del Cauca. La metodología para el desarrollo del proyecto, se basó en la aplicación de las aproximaciones deterministas y probabilistas para evaluar la peligrosidad por tsunami en las zonas costeras, como resultado se obtuvieron los tiempos de llegada de las olas de tsunami y las áreas de inundación en las zonas bajo estudio, con lo cual se generó cartografía temática de inundación por tsunami de acuerdo al anexo técnico documento integral del convenio. La amenaza o peligrosidad debido a tsunamis de origen cercano para las zonas de interés es alta, presentando en algunos casos inundación del 100% en los cascos urbanos, con niveles que superan los 3m de lámina de agua inundante en poblaciones como Tumaco, Curay, Salahonda y Juanchaco.

1 INTRODUCCIÓN

Pronosticar cuándo, dónde y con qué intensidad ocurrirá el próximo tsunami es una tarea imposible hoy en día. Sin embargo, el término de “predecir” sí que puede ser aplicado para dar respuesta a lo que podría ocurrir ante el impacto de un tsunami, que se origina y genera, con unas características determinadas. Es por ello que se han desarrollado métodos de aproximación determinista y probabilística que intentan responder en términos de cuál es el peor escenario creíble de inundación por tsunami que se podría presentar o, con que probabilidad de ocurrencia se presentaría una inundación determinada en una zona específica. La primera aproximación se basa específicamente en el peor escenario creíble de tsunami, que es usualmente seleccionado de los registros históricos de tsunamis en la región, aunque en este trabajo también se recurrió a estudios científicos reportados. La segunda aproximación trata el problema a partir de métodos empíricos o mediante generación sintética de futuros peores escenarios creíbles de tsunami. Ambas, aproximaciones son complementarias y proporcionan información valiosa para evaluar la peligrosidad por tsunami en las costas. La valoración de la peligrosidad por tsunami, por lo tanto, se debe realizar de forma integrada a través de la definición de escenarios creíbles que, de forma complementaria, con la aplicación de técnicas de simulación numérica, permitan su correcta representación [1].

La simulación numérica de tsunami incluye, al menos, tres diferentes zonas: (1) desde la zona de generación hasta la zona de rotura; (2) desde la zona de

rotura hasta la línea de costa, en donde el tsunami se desarrolla como un bore turbulento; y (3) la zona de propagación del bore, desde la línea de costa hasta el límite del máximo **runup** inundación. De acuerdo con lo anterior y dependiendo de la zona en donde se esté propagando, los tsunamis exhiben diversas características en el flujo, por lo que la selección de un método numérico para resolver el sistema de ecuaciones de gobierno debe realizarse teniendo en cuenta que éste pueda representar esas características. En su etapa inicial un tsunami comienza como una pequeña perturbación del estado estacionario (considerando el estado estacionario como un cuerpo de agua sin movimiento sobre una batimetría variable), dado que la amplitud de un tsunami en aguas profundas es del orden de centímetros y la profundidad media del océano es del orden de miles de metros. Por lo tanto, el modelado exacto de la propagación de un tsunami en aguas profundas demanda resolver muy bien esta pequeña desviación desde el estado estacionario inicial. Cuando un tsunami se aproxima hacia la costa su longitud de onda se reduce y su amplitud se incrementa, así como su energía. En esta región, la reducción de la longitud de onda produce un levantamiento de las ondas y, eventualmente, su rotura y posterior propagación como un bore. Para modelar exactamente este régimen se requiere de un método numérico capaz de tratar de forma robusta los fuertes gradientes y las discontinuidades que las ondas presentan en esta zona. Finalmente, la inundación y secado es una etapa compleja, dado que es donde el tsunami descarga su capacidad destructiva. Para modelar exactamente la inundación se requiere de un método para calcular la

posición de la línea de costa y que a la vez sea robusto para el tratamiento de las regiones inundables, *a priori* secas.

Para simular la generación del tsunami, entendida como la condición inicial, se determina a partir de las teorías de deformación sísmica, como las de [2] y [3]. Estas teorías suponen una deformación instantánea de la superficie del océano idéntica a la deformación vertical del fondo marino. De esta manera se calcula el campo de deformación del lecho marino simulando la generación del tsunami, aunque en la realidad el fondo marino no es perfectamente elástico y hay un pequeño periodo de transición que no supera los 2 s, la simplificación representa aproximadamente la realidad [4]. Para reproducir la propagación de las ondas de tsunami en el océano y el impacto en el borde de costa, se estudia en un enfoque hidrodinámico, utilizando la teoría de ondas largas en aguas someras en sus formas Lineal y No Lineal[5]; y la condición de frontera móvil[6]. La teoría de ondas de aguas someras integra verticalmente las ecuaciones de continuidad y de conservación de momentum a lo largo de la columna de agua.

En general el marco metodológico para la aplicación de las aproximaciones se basó en la generación de eventos de tsunami de origen cercano tomando como mecanismo precursor eventos sísmicos, que incluye: (1) definición de escenarios sismotectónicos de generación de tsunamis, (2) implementación de modelos numéricos de deformación sísmica para definir las condiciones iniciales de generación de tsunamis, (3) aplicación de modelos numéricos de propagación de ondas largas en aguas someras, para simular el tránsito de las ondas de tsunami, y (4) evaluación del impacto de las ondas de tsunami en las zonas costeras (*i.e.*

áreas inundadas, tiempos de arribo del tren de olas), utilizando información topobatemétrica a diferentes escalas, con base en lo anterior se generó cartografía matemática de inundación por tsunami que permite en las área de estudio identificar las zonas no inundables e inundables con su respectivo nivel de inundación aproximado para el evento.

La causa más frecuente de generación de tsunami son los sismos con origen en el océano, con mayor frecuencia en las zonas de subducción. La zona de subducción del Pacífico Sudeste, creada por el límite activo entre las placas tectónicas de Nazca y Suramericana, presenta alta actividad sísmica [7]; en esta zona se generaron sismos precursores de tsunami, registrados en 1906, 1942, 1958 y 1979, los cuales afectaron la costa Pacífica colombiana [8]. Por su ubicación geográfica, próxima a la zona de subducción, los asentamientos poblados en la costa pacífica colombiana, (Figura 1) presenta un alto grado de amenaza a fenómenos naturales como tsunami. Sumado a una alta vulnerabilidad, debido a las condiciones de densidad poblacional y socio-económicas. Recientes eventos de tsunami en la región del Pacífico Sudeste (Perú, 2007 y Chile, 2010), ponen de manifiesto la inminente amenaza a la cual se encuentra expuesta las población del Pacífico, en especial las que se consideran en el presente estudio, razón por la cual se hace necesario actualizar los estudios de amenaza por tsunami, teniendo en cuenta las actuales condiciones de riesgo. De esta manera en virtud del presente Convenio de Cooperación entre el Ministerio de Defensa Nacional-Dirección General Marítima (MDN - DIMAR) y el Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo

de Desastres (FNGRD - UNGRD), se comprometieron a aunar esfuerzos para el desarrollo de actividades científicas y tecnológicas dirigidas a la realización de estudios de evaluación de la amenaza por tsunami de origen cercano al que se encuentran expuestos los municipios de Tumaco y Buenaventura, a partir de la creación de mapas de inundación por tsunami, y determinación del tiempo de llegada del tren de olas a las zonas de interés, tal como se describe en el anexo técnico que hacen parte integral del presente Convenio.

Figura 1. Litoral Pacífico Colombiano



En el ámbito mundial, uno de los esfuerzos más importantes con objetivos concretos y ambiciosos adelantados para efectuar una valoración completa de la amenaza por tsunami es el Programa Nacional de Mitigación de la Amenaza por Tsunami en los Estados Unidos (NTHMP, por sus siglas en inglés). El proyecto tiene como uno de sus objetivos principales el desarrollo de mapas de inundación, los cuales están basados en el “peor caso creíble” y las simulaciones numéricas de tsunami han sido llevadas a cabo mediante el uso de diferentes modelos numéricos, como el modelo COMCOT (*CornellMulti-gridCoupled Tsunami Model*) [9], utilizado en el presente estudio.

Otro de los programas de mitigación del riesgo por tsunami que, se ha desarrollado con éxito ha sido el proyecto “Cartas de Inundación por Tsunamis para la Costa de Chile” (CITSU). En este programa se ha utilizado el peor escenario creíble para la elaboración de los mapas de inundación para cada una de las zonas de la costa chilena. La selección del peor escenario creíble se realiza mediante el análisis histórico de tsunami. A la fecha, como resultado de este proyecto se han publicado 28 cartas de inundación en igual número de comunidades. En Perú también se ha adelantado un programa con gran cobertura para elaborar mapas de inundación por tsunami. Como resultado se han elaborado 52 mapas de inundación, basados en el peor escenario creíble para las costas peruanas. En los países afectados por el tsunami del 26 de diciembre de 2004 en Asia, los mapas de inundación se están elaborando, tal es el caso de los realizados para algunas poblaciones de la costa de Sri Lanka, utilizando este

mismo evento de tsunami como el peor escenario creíble bajo el modelo numérico COMCOT [1].

Diferentes autores han evaluado la amenaza por tsunami de origen cercano en zonas del Pacífico, a partir de técnicas de modelación numérica de eventos de tsunami reales y probabilísticos, generando como resultado mapas de inundación por tsunami que sirvieron como herramienta fundamental en la creación de planes de mitigación y atención de desastres en los municipios. De la misma manera, los estudios realizados recomiendan aumentar el nivel de detalle de la información base (batimetría, altimetría) con la cual se realizan las simulaciones de eventos de tsunami, con el fin de establecer con mayor precisión las zonas de inundación en los mapas y de esta manera, evaluar con mayor rigor la amenaza. Por otro lado, la fuerte dinámica sedimentaria en Bahías como las de Tumaco y Buenaventura; y sus marcados cambios en la morfología litoral, pueden ser factores importantes en la determinación del nivel de inundación y la extensión o *run-up* de un tsunami, es decir la medida de inundación máxima al interior de la costa, [10].

Los mapas de inundación por tsunami corresponden al evento extremo conocido y mejor documentado a la fecha, así como también al evento extremo probable con base en antecedentes científicos disponibles [11]. Para el caso de Colombia tenemos un evento extremo conocido (Histórico) muy bien documentado 1979, y un evento histórico con algunos parámetros en discusión 1906 [12] [13] [14] [15]. Por otro lado se pueden definir eventos extremos probables con base en estudios científicos, teniendo en cuenta la sismicidad histórica, sismo-tectónica y geodinámica de la zona de estudio, algunos de estos estudios sugieren la

existencia de rugosidades, asperezas, lagunas sísmicas o zonas de acoplamiento máximo, generadas por la ocurrencia de grandes sismos 1906, 1942, 1958, 1979, que a la fecha, después de haber transcurrido varias décadas o siglos, aún no se repiten, situación temporal que incrementa su probabilidad de ocurrencia [16]. Esto se confirma en primera instancia en lo reportado en [17] en donde se concluye que en un espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw es del 98% con periodo de retorno de 24.54 años en las latitudes de 0 ° N- 4° N longitudes 84°W - 77°W. Sin embargo teniendo en cuenta la dinámica de la subducción de las placas Nazca inmersa sobre la Suramérica, reportada en 6.6 cm/año [18] los mismo estudios informan que existe la probabilidad que se repita un evento extremo con característica similares al de 1906.

Con base en lo anterior en un contexto de gestión del riesgo, la propuesta y recomendación universal, es realizar mapas que permita estimar la máxima afectación en las zonas de estudio [19].

El presente estudio se ejecutó en tres fases: la primera hace referencia al Trabajo de Campo, la segunda corresponde a la Aplicación del Modelo Numérico y Evaluación de la Amenaza, y la tercera a la Generación de Cartografía Temática de inundación por tsunami en las poblaciones de interés. Cada fase desarrollada se presenta en tres secciones del presente informe.

Es importante conocer la instrumentación de cada una de las técnicas llevadas a cabo, debido a que esto garantiza una mayor eficacia en los resultados y una menor incertidumbre. Por tanto, en algunos segmentos del documento se dará a

conocer en detalle procesos como captura, filtración, edición y procesamiento de datos; técnicas que permiten conjugarse para finalmente obtener información confiable que servirá de insumos para la aplicación de los modelos de generación y propagación de ondas de Tsunami de origen cercano, que finalmente resultarán en los diferentes mapas de inundación.

Finalmente, se darán a conocer el consolidado final de ejecución, de acuerdo al cronograma establecido en el Anexo Técnico, acordado previamente en el convenio.

2 FASE I: TRABAJO DE CAMPO

Para el desarrollo de actividades de investigación que involucran una interpretación de datos espaciales de tipo terrestre e hidrográfico, es indispensable contar con información estandarizada y de muy buena calidad. La información colectada en campo es fundamental para el desarrollo de los objetivos del proyecto, de esta manera se considera herramienta indispensable para el desarrollo seguro de las actividades bajo parámetros estandarizados y alineados con la reglamentación nacional e internacional vigente.

Para el caso específico de los levantamientos hidrográficos usados como fuente para la implementación de modelos numéricos que permiten generar simulaciones de eventos tsunamigénicos, y con ello evaluar el grado de afectación en las zonas costeras del Pacífico, se siguieron los estándares normativos de la Oficina Hidrográfica Internacional (OHI), que dentro de sus publicaciones y normatividad

considera el “Estándar para Levantamientos Hidrográficos, 2008” o S-44 [20]. Anexo I.

Los levantamientos batimétricos, se constituyen en insumo fundamental para la implementación de modelos numéricos ya que permiten determinar los cambios que sufre la onda debido a las características del relieve marino, a medida que se propaga en la costa del pacifico Colombiano.

Esta sección contiene el desarrollo de las actividades de la fase I, consistentes en: Determinación del Área y Escala a Levantar de la Información Base, Levantamiento Batimétrico de Áreas Faltantes, Procesamiento y Edición de Datos del Levantamiento; y Levantamiento Geodésico y Análisis Mareal.

Es importante resaltar el proceso de obtención del “Cero” o valor de referencia para los datos batimétricos y topográficos, toda vez que estos deben estar en la misma referencia para poder obtener buenos resultados en la aplicación de los modelos numéricos.

Finalmente, se presenta un consolidado de ejecución de las actividades de la Fase I.

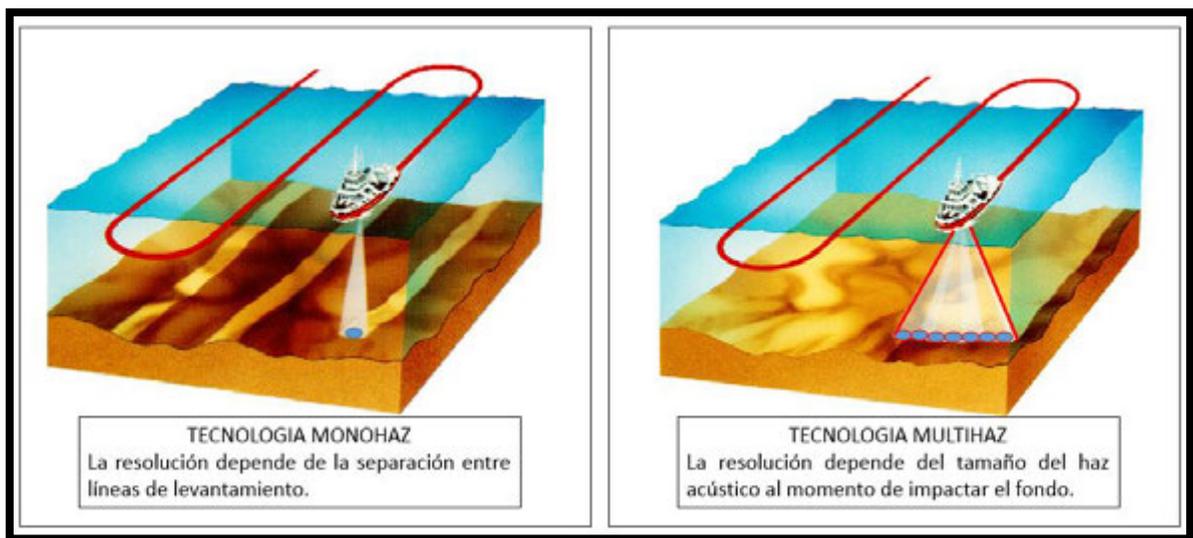
2.1 DETERMINACIÓN DEL ÁREA Y ESCALA A LEVANTAR

La revisión y análisis de las zonas de estudio permitió determinar cuál era la información base con la que contaba DIMAR-CCCP y cual tendría que ser colectada, de esta manera se determinaron las zonas a ser levantadas, con los criterios de falta de información, información escasa o de baja resolución, y

análisis de resolución espacial versus cobertura, para representar en detalle el relieve del fondo marino de las áreas bajo estudio.

En cuanto a la escala específica en cada área a levantar, esta obedece a un término netamente cartográfico cuando esta información se utiliza para alimentar la Cartografía Náutica Oficial de la zona de estudio; sin embargo cada levantamiento tiene una resolución espacial definitiva propia, dependiente del tipo de tecnología acústica utilizada al momento de recolectar la información. Si la información es colectada con tecnología multihaz, la cual permite efectuar barridos completos del fondo marino, emitiendo múltiples haces acústicos en forma de abanico transversal a la línea de levantamiento, se podrán obtener resoluciones espaciales dependientes del tamaño de la huella que la onda acústica deje en el fondo marino al momento de hacer contacto con éste. Para el caso de levantamientos de tipo Monohaz, la resolución dependerá de la separación en metros con la cual se ejecuten las líneas de levantamiento(figura 2).

Figura 2. Comparación Tecnología Monohaz vs Tecnología Multihaz



De esta forma la resolución del levantamiento será el criterio de referencia para determinar y valorar la información batimétrica con la que se cuenta y la que se debe levantar con el fin de cumplir las necesidades de precisión (representación del fondo marino) que se desea para evaluar la propagación e inundación de la onda de tsunami.

Adicionalmente los levantamientos hidrográficos, dependiendo de las características del lugar a levantar, la precisión de las mediciones en el componente vertical y horizontal, la separación entre líneas principales de levantamiento y el tipo de tecnología que se utilice para hacer la detección del fondo marino, se clasifican acuerdo unos ordenes establecidos por la Organización Hidrográfica Internacional OHI, en la publicación especial No 44 “Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrográficos - Paginas 17-18” los cuales se clasifican en: Especial, 1a, 1b y 2.

En este orden de ideas, teniendo en cuenta que la información requerida tiene por objetivo la implementación de modelos numéricos que permitan generar simulaciones de eventos Tsunamigénicos, así como su representación cartográfica y no el desarrollo de cartografía náutica, se realizó un planeamiento previo, con el fin de conocer de primera mano las distancias proyectadas entre los nodos de las mallas de trabajo, hacer utilizadas en los diferentes modelos a ejecutar, esto con el objeto de realizar el análisis de las distancias a recorrer entre las líneas proyectadas sobre el área de estudio, lo cual nos permite determinar la escala y el tiempo de ejecución del levantamiento, teniendo en cuenta que las unidades hidrográficas, establecen un total de 40 millas náuticas lineales diarias,

valor resultante de multiplicar 5 nudos (Knts) que es la velocidad promedio de levantamiento hidrográfico por 8 horas que es el tiempo estimado de trabajo diario. Por otra parte, con el fin de obtener una mejor calidad de los datos, se hace necesario establecer un límite entre los diferentes veriles o niveles de profundidad, teniendo en cuenta que en aguas someras cercanas a la costa, se produce una amplitud de onda mayor, por lo que en estas áreas las distancias entre cada dato batimétrico obtenido debe ser menor, ajustándose a la realidad del subsuelo submarino presente en el área de estudio.

Con base en lo anteriormente expuesto, es claro que la definición del área y resolución de los levantamientos, se encuentra sujeta a los requerimientos técnicos del modelado numérico, sin embargo, la metodología para su ejecución, está basada en las Normas de la Organización Hidrográfica Internacional para los Levantamientos Hidrográficos (S-44) 5ta Edición, Febrero de 2008 [20].

La tabla I – Figura 3-4 y Tabla II – Figura 5-6, resume las características principales, clasificación y área geográfica, de los levantamientos previos con los que contaba DIMAR en su base de Datos, y los ejecutados en la fase de campo, respectivamente.

Tabla I. Levantamientos Base de Datos DIMAR

ID	Área levantada	Escala Cartográfica	Tecnología acústica utilizada	Resolución requerida modelación (m)	Resolución final del levantamiento (m)	Orden OHI
1	Zona de Aproximación a bahía de Tumaco	1:30.000	Monohaz	270	150	1b
2	Zona de Aproximación entre Bahía de Tumaco Y desembocadura Río Mataje.	1:10.000	Multihaz	90	5	1a
3	Desembocadura Río Mataje.	1:25.000	Monohaz	270	125	1b
4	Aguas Profundas Entre Bahía de Tumaco Y Límite fronterizo con Ecuador	1:50.000	Multihaz	270	50	1b
5	Bahía Ancón de Sardinas	1:5.000	Monohaz	30	25	1b
6	Aguas Profundas Rio San Juan a Boca Yurumanguí	1:25.000	Monohaz	270	125	1b
7	Aguas Profundas Merayana	1:50.000	Multihaz	270	50	1b

Figura 3. Información Base de Datos DIMAR – Pacífico Sur

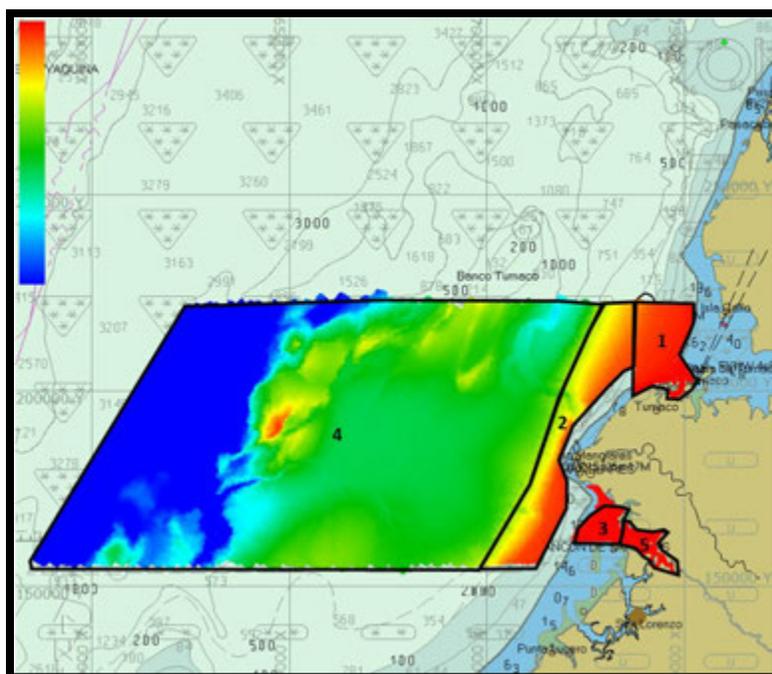


Figura 4. Información Base de Datos DIMAR – Pacífico Centro

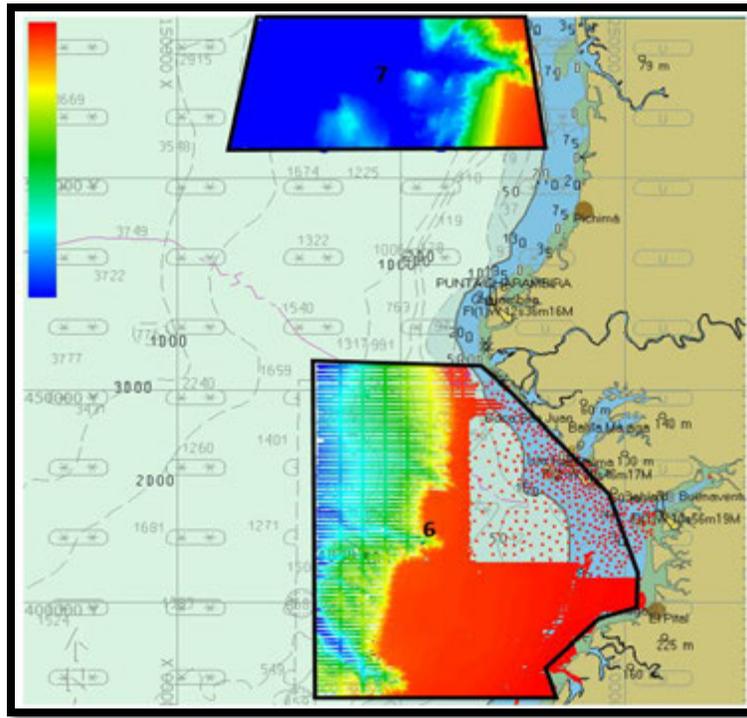


Tabla II. Levantamientos Realizados en la Fase de Campo

ID	Área levantada	Escala Cartográfica	Tecnología acústica utilizada	Resolución requerida modelación (m)	Resolución final del levantamiento (m)	Orden OHI
1	Rio Mataje a Bahía de Tumaco	1:12.500	Multihaz	90	5	1a
2	Bahía Interna de Tumaco	1:10.000	Monohaz	90	50	1b
3	Aguas someras- Islas Tumaco	1:5.000	Monohaz	30	25	1b
4	Canal de Acceso a Tumaco	1:2.000	Monohaz	30	10	1b
5	Aproximación a Curay	1:5.000	Monohaz	30	50	1b
6	Salahonda- Pasacaballos	1:25.000	Monohaz	270	250	1b
7	Estero Curay	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
8	Bocana Salahondita	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
9	Bocana San Ignacio	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
10	Entrada Salahonda	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
11	Estero Salahonda	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
12	Estero Critico Mariano	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
13	Estero Punto Frio	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
14	Estero Correntoso	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
15	Salahonda	1:1.000	Monohaz	30	10	1b
16	Bahía de Buenaventura- Canal	1:5.000	Multihaz	30	1	Especial
17	Bahía de Buenaventura- Fuera Canal	1:15.000	Monohaz	90	50	1b
18	Bahía Málaga- Juanchaco	1:5.000	Multihaz	30	1	Especial

Figura 5. Información Levantada en Fase de Campo – Pacífico Sur

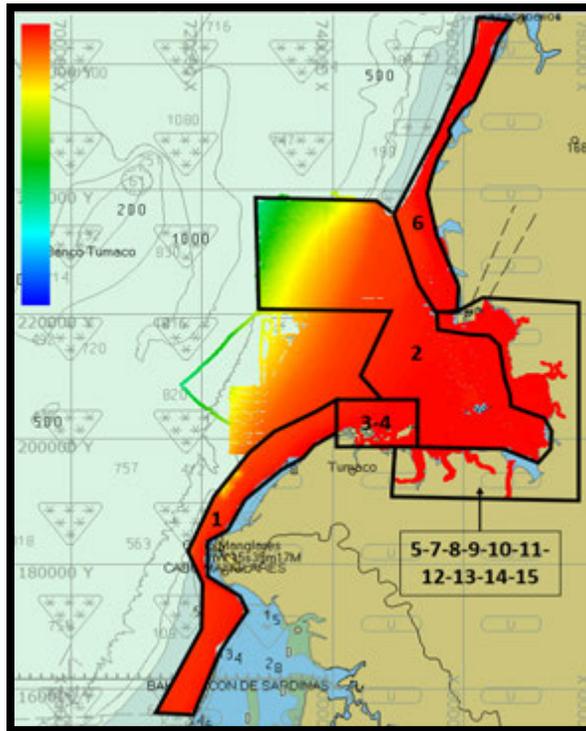
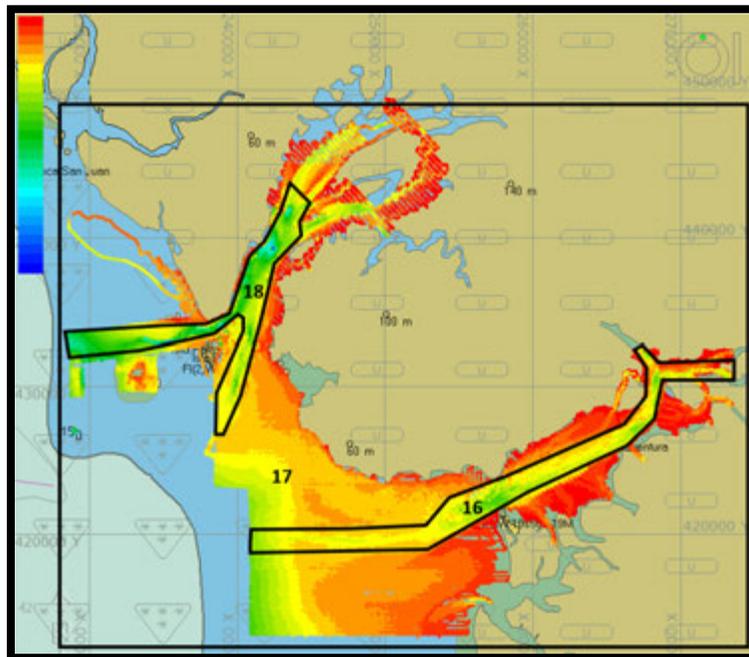


Figura 6. Información Levantada en Fase de Campo – Pacífico Centro

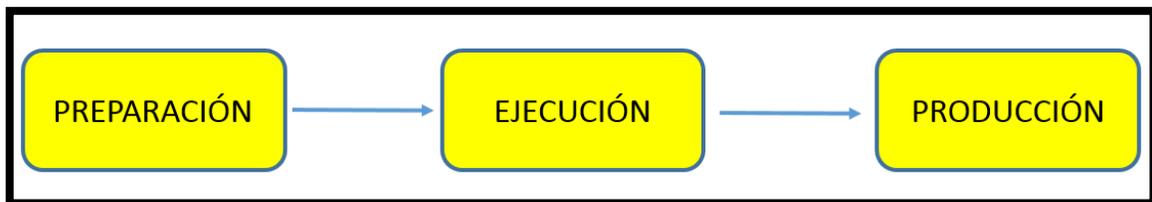


Al revisar la información altimétrica con que cuenta DIMAR para el desarrollo del presente estudio se determinó que no se tienen áreas faltantes de información altimétrica para la implementación de los modelos numéricos, en consecuencia no es necesario realizar levantamiento pues ya se cuenta con la información necesarias con resolución espacial de +/- 30 m en la horizontal y vertical para las zonas de estudio, obtenida a través de tecnología LiDAR, y complementada con información de base de datos globales General Bathymetric Chart of theOceans(GEBCO), adamas de Modelos Digitales de Terreno Satelitales y curvas de nivel del Instituto de Geografía Agustín Codazzi (IGAC) disponibles.

2.2 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO ÁREAS FALTANTES

Para la realización de los levantamientos batimétricos, la Dirección General Marítima soporta su ejecución, en las directrices emanadas de la Organización Hidrográfica Internacional con referencia a los estándares S-44 OHI 5ta. Ed. 2008 y el manual de Hidrografía OHI C-13 1ra. Ed. 2005. Teniendo como referencia estas publicaciones y basados en las capacidades de tecnología y talento humano, el modelo metodológico con el que se desarrollan estas actividades tiene 03 etapas principales (Figura 7):

Figura 7. Etapas Principales del Modelo Metodológico para Levantamientos Batimétricos



1.2.1 Preparación

En esta etapa desarrollada en oficina, se procede a realizar la compilación de información multidisciplinaria previa que se tenga del área a levantar, con el fin de definir el plan de operación con el cual se ejecutara la campaña de recolección de datos. Dentro de esta compilación de información se satisfacen los siguientes interrogantes principalmente:

Propósito del Levantamiento: Necesidad que buscamos satisfacer con la captura de la información (Cartografía náutica, Modelación numérica, Análisis geomorfológico del fondo, Control de dragados, Búsqueda y salvamento, Prospección de hidrocarburos, Gestión del litoral etc.).

Tecnología Requerida: Uso de sistema Monohaz o Multihaz en la detección acústica, basado en el propósito y especificaciones del requerimiento.

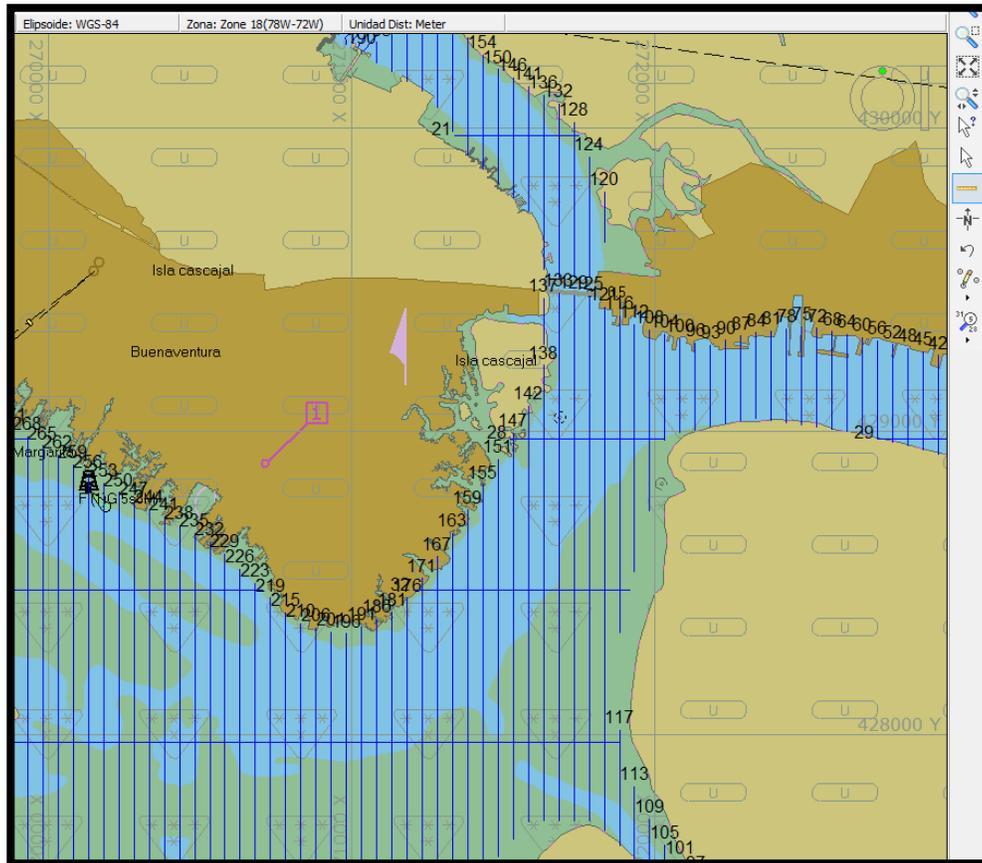
Plataformas de Levantamiento: Se escoge la embarcación adecuada para la campaña hidrográfica, dependiendo de la zona a levantar y la tecnología a utilizar.

Talento Humano: Dependiendo el tipo de levantamiento y la embarcación en la cual se desarrollaran los trabajos, se procede a conformar el equipo de trabajo conformado por Tecnólogos navales en Hidrografía, donde se nombrara a un jefe de campo, el cual responderá por la ejecución de la campaña hidrográfica conforme las especificaciones técnicas requeridas.

Planeamiento de líneas a ejecutar: Esta tarea es efectuada mediante la herramienta de software HYPACK MAX, permitiéndonos en un entorno de información geográfica, cuantificar millas lineales a levantar, tiempos de ejecución,

asimismo ajustar los parámetros Geodésicos y de configuración de hardware que se utilizaran en la fase de ejecución de campo.

Figura 8.Planeamiento de Líneas de Levantamiento en software HYPACK MAX



1.2.2 Ejecución

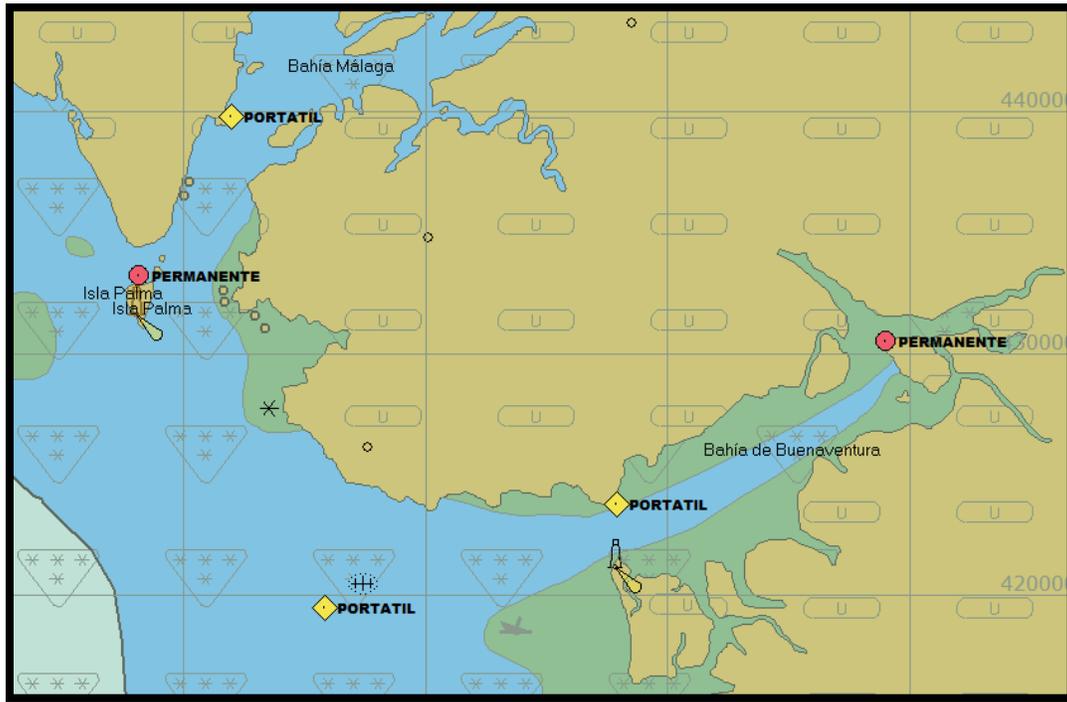
Esta etapa del trabajo comprende todas las actividades que se realizan en el área de estudio, con el fin de obtener la información batimétrica que se tiene como objetivo. La ejecución de campo se resume en 03 actividades principales que sufren algunas variaciones en ciertos aspectos técnicos, dependiendo del tipo de tecnología utilizada para la detección acústica (Monohaz y Multihaz); A

continuación se describe como se desarrollaron esas actividades en Buenaventura y Málaga, teniendo en cuenta, que en esa región se combinaron las 02 tecnologías mencionadas.

Actividad 1. Instalación mareográfica, Integración de Equipos a utilizar y Calibración del sistema:

a. Instalación mareográfica. Teniendo en cuenta que una de las principales variables a corregir dentro de un levantamiento hidrográfico es el ascenso y descenso constante del nivel de agua por efecto principalmente de la marea, buscando llevar todas las mediciones a un plano de referencia vertical común, sin importar el espacio temporal, en el cual se efectuó el levantamiento. Se procedió a conformar una red de observación mareográfica dentro del área de estudio, con el fin de garantizar la menor incertidumbre posible del componente vertical en la solución final de datos batimétricos durante el procesamiento. Para esta red se utilizaron las estaciones mareográficas permanentes de DIMAR en Juanchaco y Buenaventura, y se complementaron con la instalación de 03 sensores portátiles de nivel de agua RBR- TWR 2050, en el muelle de la Bocana, Boya 6 del canal de Navegación de Buenaventura y Muelle de la Armada Nacional en la Bahía de Málaga, con el fin de cubrir la extensión geográfica del levantamiento.

Figura 9.Distribución Red Mareográfica Observación



Los equipos portátiles se programaron para tomar registros de nivel de agua cada minuto, con el fin de tener la misma resolución temporal que las estaciones permanentes de DIMAR. Todos los registros de la red de observación, fueron descargados al término del levantamiento batimétrico y se usaron en el procesamiento final de la información.

b. Integración de Equipos. Para el desarrollo de un levantamiento hidrográfico, es necesario contar con un sistema compuesto por una embarcación adecuada, en la cual se realiza el montaje e integración de una serie de equipos, que mediante una herramienta de software para la recolección, control, sincronización y despliegue, estarán en la capacidad de capturar distintas variables, tales como: Posición, profundidad, movimiento, y velocidad del sonido, las cuales generaran al

final del procesamiento, datos batimétricos referenciados horizontalmente al sistema geodésico mundial (WGS-84), y verticalmente al Datum oficial de la Cartografía Náutica Colombiana “MLWS” (Mean LowWater Springs) Promedio de bajamares de Sicigia. A continuación se describen cada una de las variables a resolver, las características del equipo que las satisface y su modo de integración al sistema en general.

Posicionamiento: Para el posicionamiento durante el levantamiento hidrográfico se utilizaron los receptores GPS Leica 1200 de doble frecuencia; los cuales se configuraron para el trabajo en modo diferencial RTK con el fin de buscar niveles de precisión dentro del rango de ± 15 mm para el componente horizontal y ± 20 mm para el vertical.

Los parámetros mínimos para la operación y la conexión física y virtual del sistema DGPS durante la recolección de la información fueron los siguientes:

Tabla III. Parámetros de Configuración GPS Leica 1200

Características	DGPS LEICA 1200
Posición en Datum:	WGS-84, Lat. Long.
Modo:	Diferencial
Número de satélites:	Mínimo *8
PDOP:	Inferior a cuatro (4)
Librería en Hypack MAX:	kinematic.dll
Puerto Serial:	RS232
BaudRate	9600
Paridad	N
Data Bits	8
Stop Bits	1
Control de Flujo	(NO)

Figura 10.Receptor GPS LEICA 1200



Profundidad: La determinación de la profundidad fue efectuada por los siguientes equipos acústicos:

MULTHAZ: Ecosonda IMAGENEX DELTA T 837

Este fue el equipo acústico utilizado para la recolección de la información de profundidad, donde se requería efectuar un cubrimiento al 100% del fondo marino como fueron los canales navegables, dársenas de maniobra y sectores de atraque en las diferentes instalaciones portuarias que se encontraron en el área de estudio.

Frecuencia del Equipo: **260 KHz**

Máximo ancho de barrido: **120°**

Máximo número de haces: **240**

Ancho de haz: **1.5°**

Mínima profundidad detectable: **0.5m**

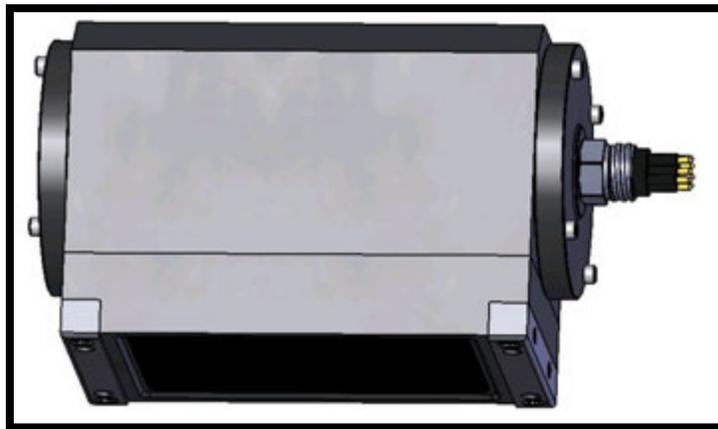
Máxima Profundidad detectable: **100m**

Precisión: **0.2% de la profundidad**

Software de operación: **DeltaT.exe**

Conexión física mediante cable de red: **IP 192.168.0.2**

Figura 11. Transductor Ecosonda IMAGENEX DELTA T-837



MONOHAZ: Ecosonda OdomHydrotrac MKII

Este fue el equipo acústico utilizado para la recolección de la información de profundidad donde no se requería efectuar cubrimiento al 100% del fondo marino. se utilizó para recolectar información en áreas adyacentes a los canales principales de navegación y zonas externas en general, trabajándose a espaciamientos definidos con el fin de satisfacer la resolución de las grillas de modelación requeridas. Igualmente se efectuaron mediciones en zonas que se

trabajaron con multihaz con el fin de usarlas como comparación, durante el control de calidad.

Frecuencia del Equipo: **200 KHz**

Mínima profundidad detectable: **0.3m**

Máxima Profundidad detectable: **100m**

Precisión: **0.01m +/- 0.1% de la profundidad**

Conexión física mediante puerto serial RS232

A continuación se describen los parámetros de conexión del equipo con el

Computador de recolección:

Librería: Echotrac.dll

Puerto Serial: RS232

Baud Rate: 9600

Paridad: N

Data Bits: 8

Stop Bits: 1

Control de Flujo: (NO)

Figura 12.Ecosonda ODOM HYDROTRAC MKII



Movimiento: La captura de los datos relativos al movimiento de la embarcación, como son cabeceo (pitch), balanceo (roll) y desplazamiento vertical u oleaje (Heave), fue realizada por el sensor de movimiento TSS DMS-05. Estos datos permitirán corregir en el procesamiento, la afectación que hayan tenido los haces acústicos del sistema multihaz, debido a estas perturbaciones en la estabilidad de la embarcación, y que son críticas en la calidad de los datos. El sistema monohaz, solamente tendrá corrección por el movimiento de desplazamiento vertical u oleaje (Heave).

Precisión Medición de oleaje: **5cm**

Precisión Medición Cabeceo y balanceo: **0.05°**

Resolución Oleaje: **1cm**

Resolución Cabeceo y balanceo: **0.01°**

A continuación se describen los parámetros de conexión del equipo con el Computador de recolección:

Serial Port	RS232
Baud Rate	38400
Paridad	N
Data Bits	8
Stop Bits	1
Device 1	TSS 1

Figura 13.Sensor de Movimiento TSS DMS-05



Velocidad del Sonido: Teniendo en cuenta que la determinación de la profundidad depende en su forma básica, del tiempo que tarda la onda acústica emitida por la ecosonda, en hacer el recorrido Transductor - Fondo marino – Transductor, basado en la velocidad del sonido; Se hace necesario conocer esta

importantísima variable, la cual no es constante y tiene una variabilidad, dependiente de otros parámetros físicos tales como profundidad, temperatura, densidad y salinidad. A partir de lo anterior, el sensor utilizado para la medición de este parámetro a la altura del transductor tanto multihaz como monohaz fue el sensor SBE19. En el caso del multihaz el valor medido por el sensor SBE19 era aplicado en tiempo real a los datos recolectados por el equipo, mientras que para monohaz era necesario introducir el valor numérico de forma manual antes de iniciar la recolección de información.

Figura 14.Sensor SBE19



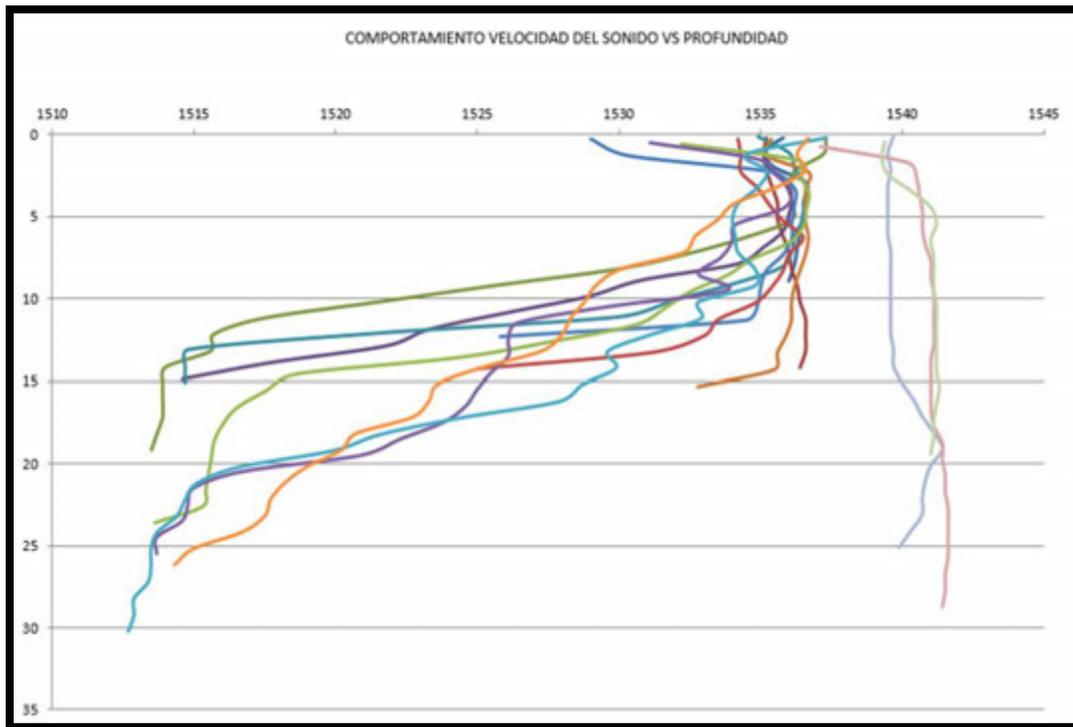
Adicional al valor de velocidad del sonido que se toma en tiempo real para aplicar en las ecosondas, es necesario hacer observaciones de esta variable ejecutando perfiles de medición en toda la columna de agua, con el fin de corregir en el procesamiento, los errores producto de la refracción que sufren los haces acústicos durante su viaje por el cuerpo de agua. El equipo que se utilizó para la medición de la velocidad del sonido en la columna de agua, mediante

lanzamientos de este, sujeto a una línea en la embarcación de levantamiento, fue el perfilador de velocidad del sonido RESON SVP-20, el cual mide directamente este parámetro. Durante el desarrollo de la campaña, se tomaron perfiles todos los días en horas aleatorias, con el fin de generar un banco de datos, que permita durante el procesamiento, dar la mejor solución posible, teniendo en cuenta proximidad temporal y espacial al lugar donde se toma la muestra, con referencia a los datos batimétricos recolectados.

Figura 15. Perfilador RESON SVP 20



Figura 16. Comportamiento Velocidad del Sonido Vs Profundidad de los Perfiles Realizados



Software: Durante la Campaña hidrográfica se utilizaron las siguientes herramientas de software:

Hypack Max Versión 2014. Fue el utilizado para la planeación de líneas, configuración de equipos, recolección de los datos monohaz y para el seguimiento de las líneas a desarrollar con el sistema multihaz.

Delta T Version 1.0. Es el software utilizado para la integración, control y toma de datos con el sistema multihaz de la ecosonda IMAGENEX DELTA T 837.

Caris Hips and Sips. Software utilizado para el preprocesamiento de campo, calibración del sistema y control de calidad.

c. Calibración del sistema. Una vez se encuentran los equipos instalados a bordo de la embarcación y debidamente interconectados, se procede a efectuar la calibración del sistema en general, con el fin de encontrar y cuantificar errores en el montaje del componente acústico y posibles latencias en la sincronización de la navegación, este procedimiento es crítico para garantizar la menor incertidumbre en la solución final de los datos batimétricos.

Latencia: Este proceso nos permitió determinar el error de retardo en tiempo que existe entre la navegación y la medición que realiza el equipo acústico, con el fin de minimizar la incertidumbre en la calidad de los datos georreferenciados y dar cumplimiento al estándar S-44 5ta. Edición, aplica para Multihaz y para Monohaz. Para calcular el error en tiempo (latencia) de un sistema de levantamiento se hizo necesario efectuar las siguientes acciones:

- Efectuar dos líneas de levantamiento coincidentes a diferentes velocidades (entre mayor sea la diferencia de velocidades, sin que la mayor exceda la máxima velocidad permitida para efectuar el levantamiento, se obtendrán mejores resultados) sobre un elemento notable en el fondo o en un sector inclinado. Estas líneas fueron planeadas en la Bahía de Buenaventura sobre el rasgo frente a la Isla Cascajal.

Figura 17. Líneas Levantadas para Efectuar la Calibración del Sistema

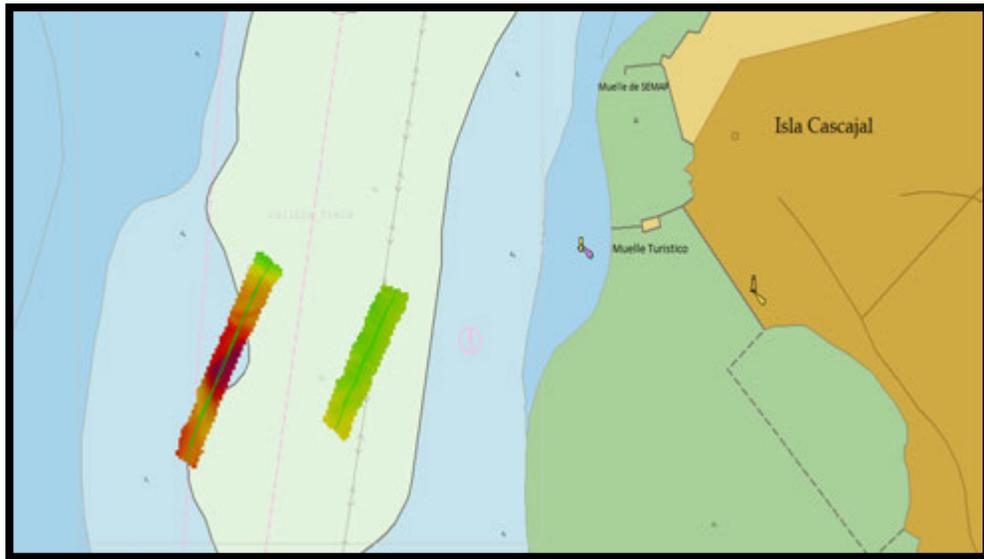
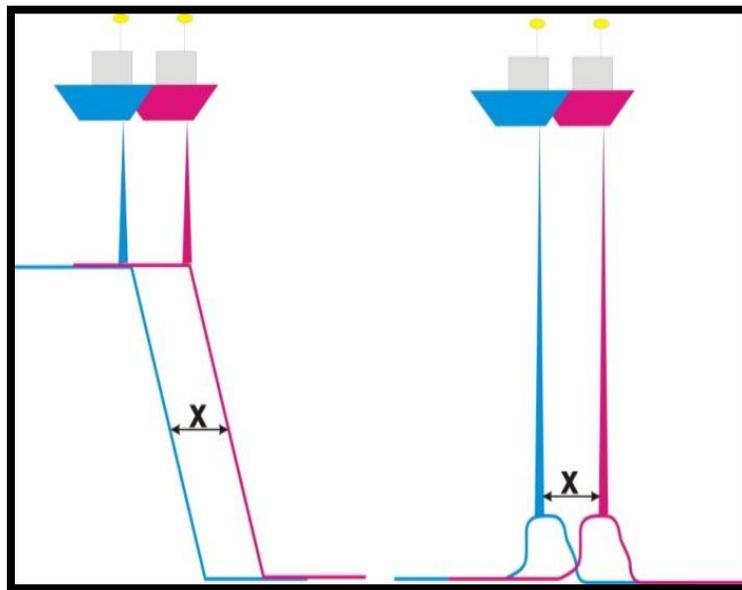


Figura 18. Esquema Teoría de la Latencia



El color rojo representa la línea efectuada a la mayor velocidad y el color azul a la mínima.

“x” representa la diferencia a lo largo de la línea entre las dos pasadas.

El error de latencia puede expresarse como $=x/\text{rojo-azul}$

Con el software Caris Hips and SIPS ver. 7.1 en el módulo de calibración se procedió a llamar las líneas efectuadas para el cálculo de latencia y determinar el error con el fin de incluirlo en el diseño final de la embarcación que afectara el proyecto.

Figura 19. Módulo de Calibración Caris Hips and Sips Ver. 7.1

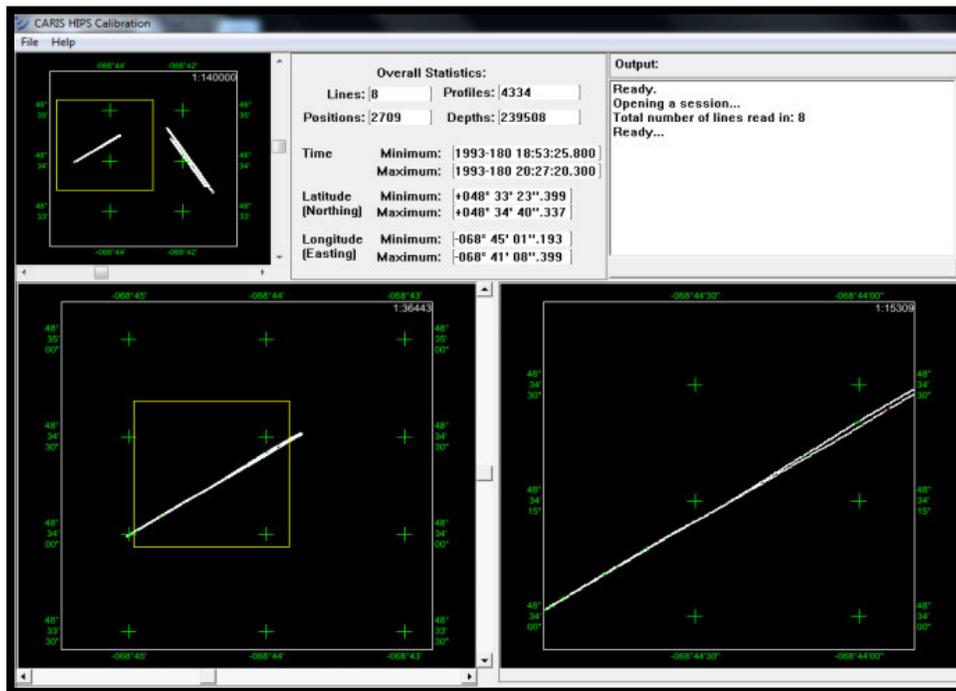


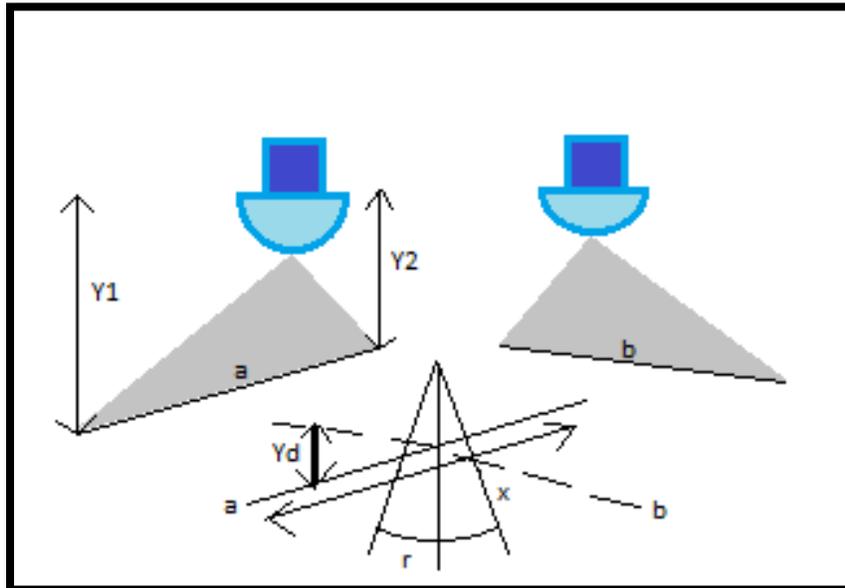
Tabla IV. Resultado Cálculo de Latencia

LATENCIA (NAVEGACIÓN)					
Línea	Archivo Línea	Vel. Emb.	Azimut	PROMEDIO	Resultado (seg)
1	Línea 200637.83p	5 Kts	006		
2	Línea 201417.83p	3 Kts	006		0,01

Balanceo (roll). Este proceso nos permite conocer el error de montaje angular en sentido transversal del transductor del sistema multihaz, respecto a la línea de flotación de la embarcación. No aplica para monohaz.

- Para ejecutar la calibración del balanceo de un transductor individual, se ejecutaron dos líneas coincidentes en direcciones opuestas sobre un área plana del lecho marino.

Figura 20. Esquema Teoría de Balanceo (roll)



Donde “a” es el perfil en la sección transversal del transductor en una dirección, “b” es el perfil en la sección transversal del transductor pero en la dirección opuesta. “Yd” es la diferencia de profundidad a través del perfil, esta relación puede expresarse como $Y1 - Y2 = Yd$. “X” es el ancho en la dirección transversal de los perfiles.

El error de balanceo puede expresarse como $= \tan^{-1} (Yd / X) / 2$

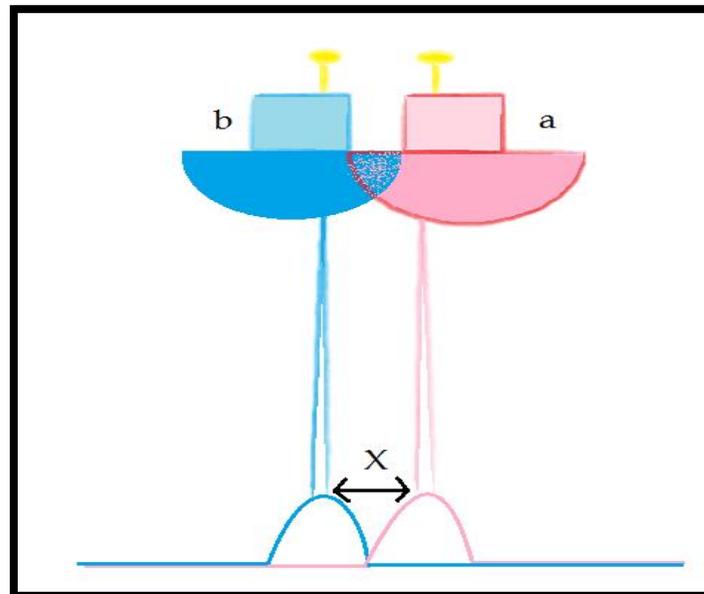
Tabla V.Resultado Cálculo de Balanceo (roll)

BALANCEO					
Línea	Archivo Línea	Vel. Emb.	Azimut	PROMEDIO	Resultado
1	Línea 202356.83p	5 Kts	028		
2	Línea 202655.83p	5 Kts	208		-1.4°

Cabeceo (Pitch): Este proceso nos permitió conocer el error de montaje angular del transductor del sistema multihaz, en sentido longitudinal a la línea de flotación de la embarcación. No aplica para monohaz.

- Para resolver este valor de calibración, se ejecutaron dos líneas coincidentes, en direcciones opuestas, a la misma velocidad sobre una pendiente del terreno o un elemento notable del mismo.

Figura 21. Esquema Teoría de Cabeceo (Pitch)



Donde “a” es el pase de la embarcación de derecha a izquierda, “b” es el pase de la embarcación de izquierda a derecha, “X” es la diferencia horizontal (distancia) en el sentido longitudinal entre los dos pases.

El error del cabeceo puede expresarse como $= \tan^{-1} (X / 2)$

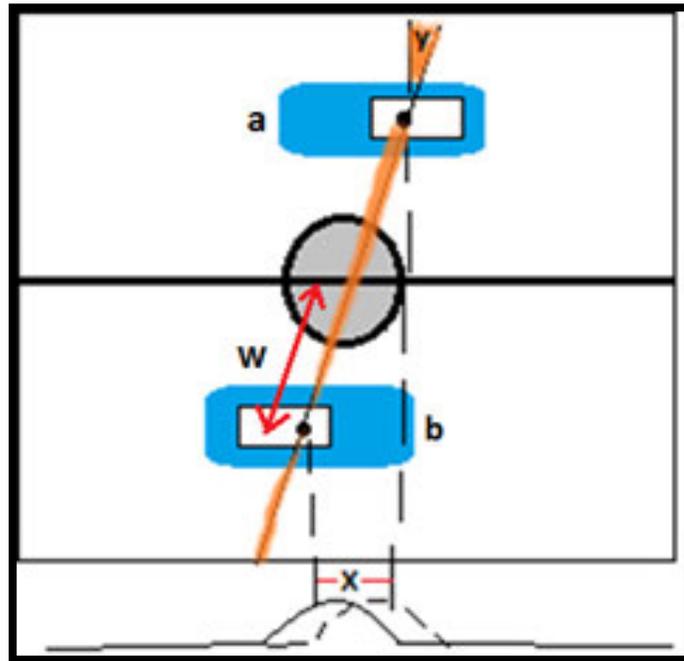
Tabla VI.Resultado Cálculo de Cabeceo (pitch)

CABECEO					
Línea	Archivo Línea	Vel. Emb.	Azimut	PROMEDIO	Resultado
11	Línea 200637.83p	5 Kts	207		1.5°
2	Línea 201029.83p	5 Kts	027		

Guiñada (Yaw): Este proceso nos permitió conocer el error de montaje angular teniendo en cuenta la orientación del transductor respecto a la línea de crujía de la embarcación.

- Para resolver esta calibración, se ejecutaron dos líneas en direcciones opuestas asegurando que los mismos haces externos pasen sobre un elemento notable.

Figura 22. Esquema Teoría de Guiñada (yaw)



Donde “a” es el pase por el norte del bajo, “b” es el pase por el sur del bajo, “X” es la diferencia en la dirección longitudinal en la posición del bajo con relación a los dos pases. “W” es la distancia desde el transductor hasta el bajo, “Y” es el error de la guiñada

El error de la guiñada puede expresarse como $= \sin^{-1} (X / 2) / W$

Tabla VII. Resultado Cálculo de Guiñada (yaw)

GUIÑADA					
Línea	Archivo Línea	Vel. Emb.	Azimut	PROMEDIO	Resultado
1	Línea 203657.83p	5 Kts	076		
2	Línea 203909.83p	5 Kts	256		0°

Los valores anteriormente calculados para cada una de las variables, se introducirán en el archivo general de embarcación creado en el software Caris Hips and Sips, con el fin de efectuar el procesamiento de toda la información recolectada durante la campaña.

Actividad 2. Recolección de la Información Hidrográfica:

Esta es la actividad específica en la cual se hace la recolección de datos batimétricos a bordo de la embarcación, haciendo seguimiento a las líneas que se planearon previamente en oficina, con ayuda del software de visualización, control y registro. Diariamente se georreferencian las ayudas y peligros a la navegación que se encuentran en el área de trabajo, así como los muestreos de los perfiles de velocidad del sonido.

Figura 23. Faena de Recolección de Datos Batimétricos



Actividad 3. Control de Calidad en Campo:

Con el fin conocer la calidad de los datos obtenidos y su clasificación preliminar acorde a los órdenes de levantamiento establecidos por la OHI en el estándar S-44 feb. 2008, se procede a efectuar un test de control de calidad mediante el módulo QC del software Caris Hips and Sips 7.1., utilizando para ello una intersección aleatoria de múltiples líneas de levantamiento multihaz efectuadas en diferentes días, a las cuales se les realiza la corrección por marea, velocidad del sonido y desplazamientos de la embarcación. Una vez efectuadas estas acciones, la herramienta QC procede a computar todas las variables que intervienen en el levantamiento con sus incertidumbres asociadas y despliega el nivel de confianza.

Figura 24. Intersección de Líneas para Control de Calidad

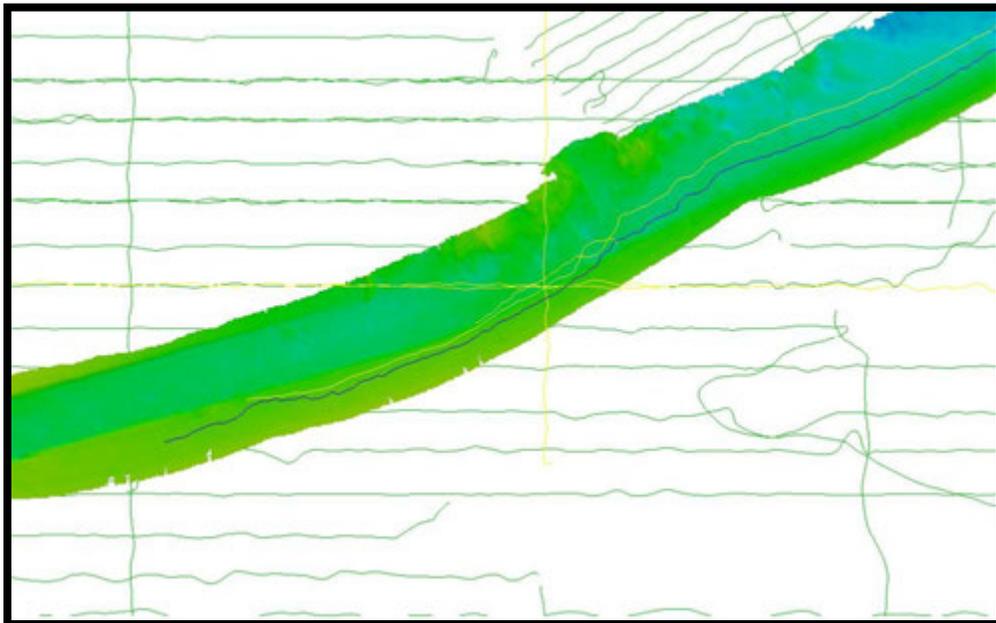


Tabla VIII.Resultado Control de Calidad Datos Batimétricos

Angulo	Muestras	Maximo (+)	Mínimo(-)	Promedio	Desviación Estándar	Orden Especial (%)	Orden 1a (%)
60.0 - 40.0 b	1,487,049	1.533	1.208	-0.003	0.122	95.993	99.409
40.0 - 20.0 b	2,530,330	1.177	1.303	0	0.087	98.404	99.722
20.0 - 0.0 b	2,641,747	1.371	1.314	0	0.083	99.02	99.884
0.0 - 20.0 e	2,631,821	1.621	1.093	0.003	0.084	98.908	99.912
20.0 - 40.0 e	2,535,073	0.981	1.113	0.002	0.084	98.824	99.918
40.0 - 60.0 e	1,639,128	1.655	1.373	-0.008	0.129	95.655	99.317

La tabla anterior nos permite identificar que el levantamiento siempre se mantuvo por encima del 95% de nivel de confianza respecto al orden especial, **por lo tanto el levantamiento se ratifica en este orden acuerdo clasificación OHI.**

La etapa de producción se desarrolla en el literal 1.3 a continuación.

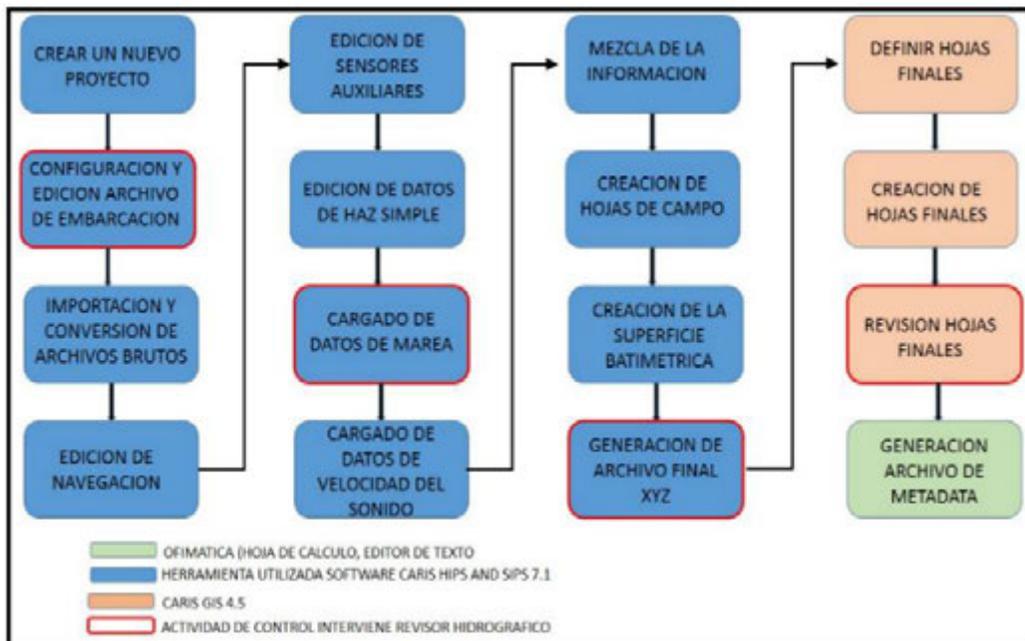
1.3 PROCESAMIENTO Y EDICIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS Y ALTIMÉTRICOS PARA LA GENERACIÓN DE ARCHIVOS, EN FORMATO XYZ.

Esta es la etapa final del proyecto, la cual se desarrolla en oficina, con el fin de realizar el procesamiento definitivo de la información recolectada en la fase de campo y generar los archivos digitales que servirán como fuente en la modelación numérica.

El siguiente diagrama (figura 25), ilustra la ruta metodológica paso a paso empleada para el procesamiento y edición de productos finales del proyecto en un levantamiento batimétrico, desarrollado desde la etapa del procesamiento de la información hidrográfica recolectada, utilizando con la herramienta CARIS HIPS

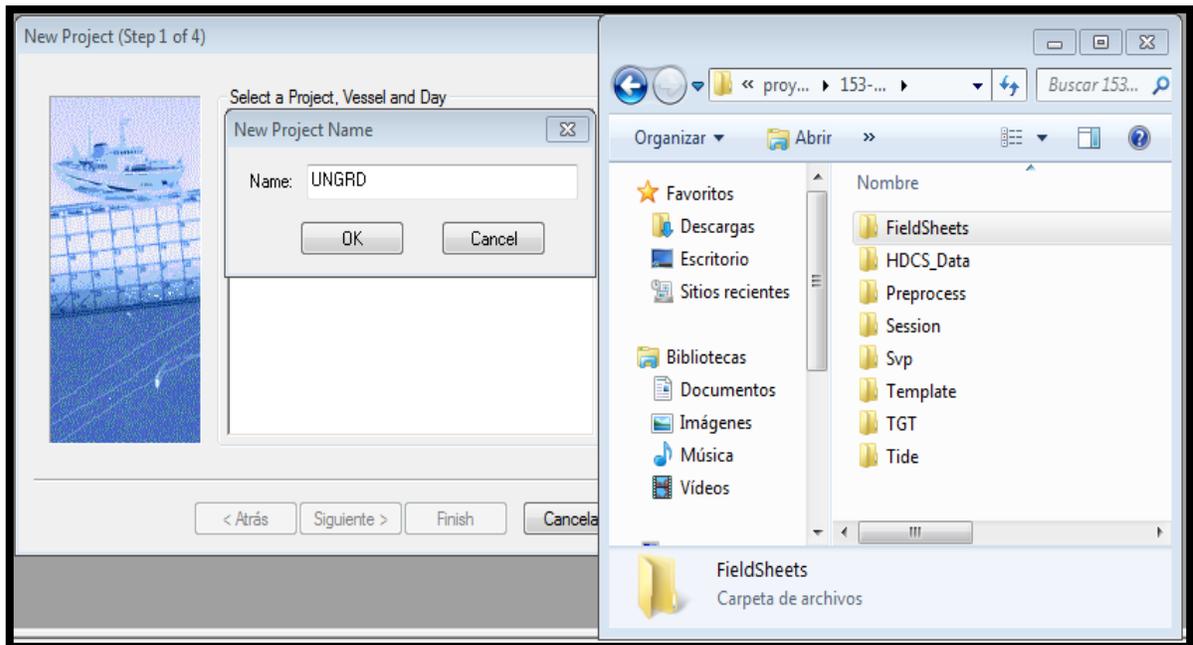
AND SIPS 7.1, hasta la generación de los archivos xyz, los cuales son datos filtrados, corregidos y reducidos, utilizados posteriormente para el desarrollo de los planos batimétricos realizados con el software CARIS GIS 4.5.

Figura 25. Diagrama Metodológico para el Procesamiento de la Información Batimétrica



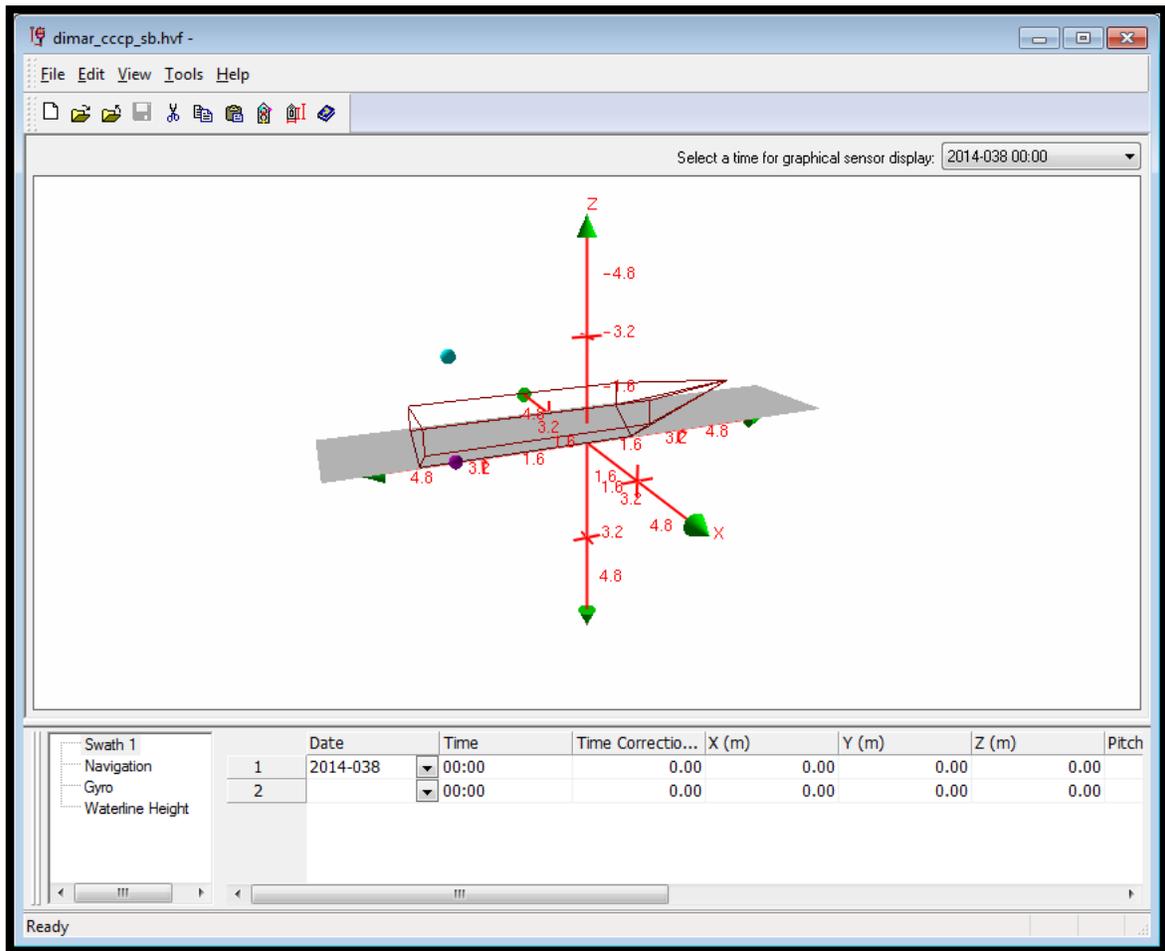
Creación del Proyecto: Esta etapa permite organizar toda la información asociada al proyecto, creando la estructura acorde para el manejo dentro de la herramienta de software. Básicamente se definen los directorios principales a ser utilizados durante el procesamiento.

Figura 26. Creación del Proyecto en CARIS HIPS



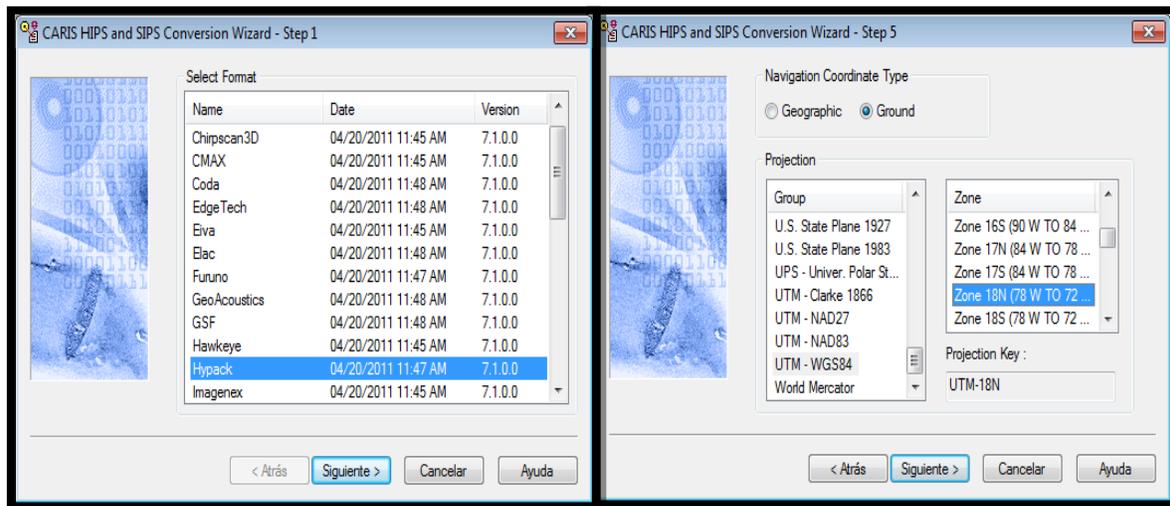
Edición del Archivo de la Embarcación: Mediante el modulo “Vessel Editor”, se procede a configurar todas las variables que inciden en la solución final de datos, tomando como referencia aspectos propios de la embarcación y la disposición de los equipos utilizados. Se incluyen desplazamientos entre sensores, dimensiones y calado de la embarcación.

Figura 27. Editor de la Embarcación



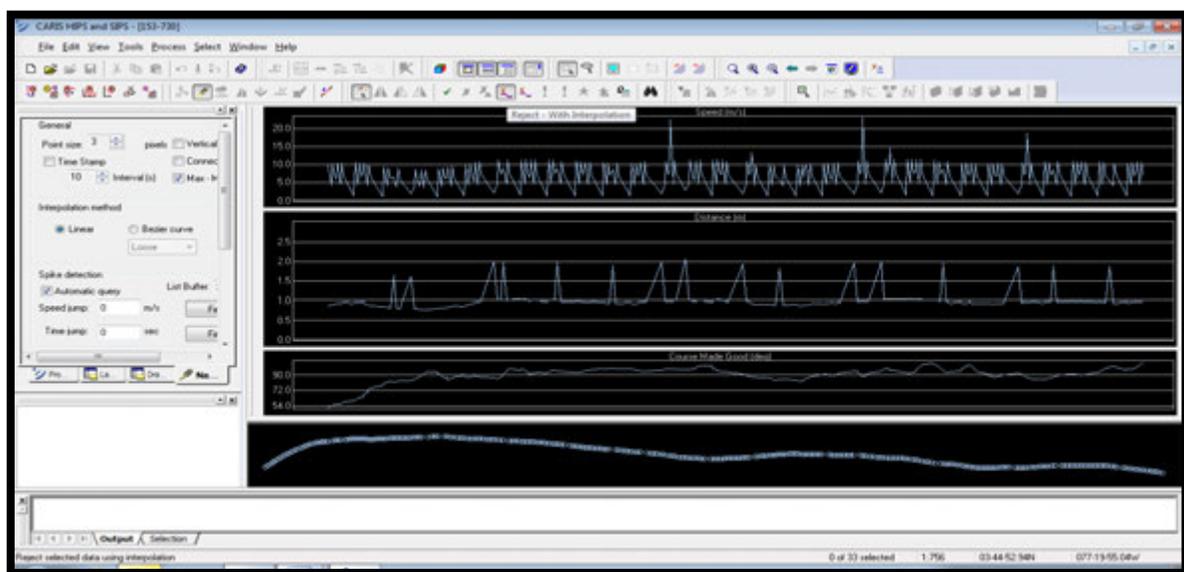
Conversión de Archivos Brutos: En esta etapa, se realiza el cambio de formato de los datos brutos recolectados en campo mediante el software Hypack Max, hacia el formato y estructura propia de CARIS HIPS, así mismo se asignan los parámetros geodésicos bajo los cuales se desplegará la información. Los archivos provenientes de Hypack están bajo la extensión “RAW” para datos monohaz y “HSX” para datos Multihaz.

Figura 28. Conversión de Datos Brutos



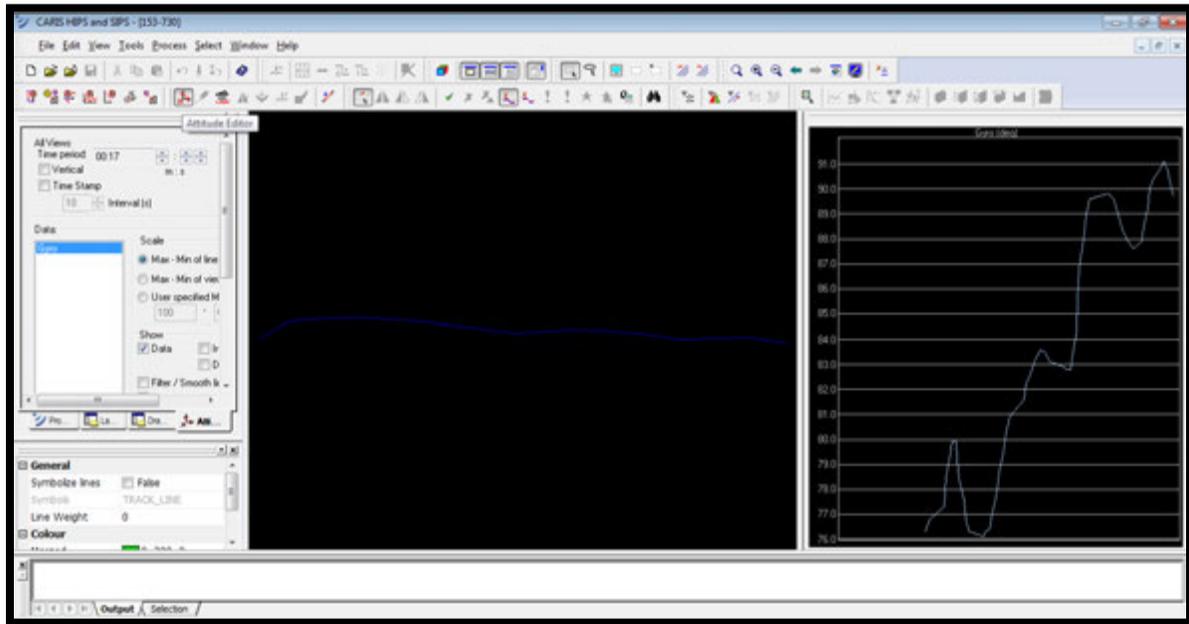
Edición de Navegación: Mediante esta edición se procede a corregir posibles saltos o fallos que se hubieran presentado con el sistema de posicionamiento durante la recolección de información, con herramientas de interpolación y rechazo.

Figura 29. Editor de Navegación CARIS HIPS



Edición de Sensores Auxiliares: Mediante la herramienta “Attitude Editor”, se verifica y corrigen los fallos que se pudiesen haber presentado durante la recolección de campo, para los sensores auxiliares, principalmente en datos multihaz, donde interviene el sensor de movimiento y rumbo, por lo tanto se hace necesario examinar el cabeceo, balanceo, oleaje y rumbo. Las ediciones del caso se realizan mediante herramientas de rechazo e interpolación.

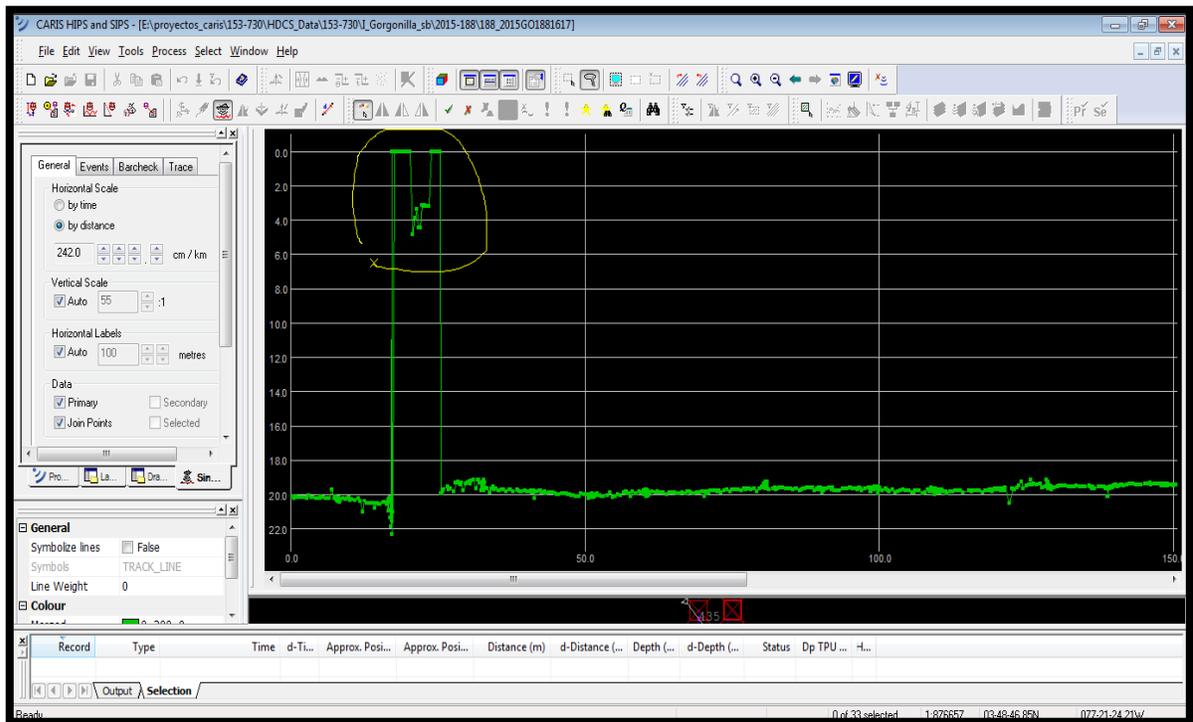
Figura 30. Editor de Sensores Auxiliares CARIS HIPS



Edición de Datos Monohaz/Multihaz: En este módulo, se procede a verificar los datos de profundidad mediante el despliegue de los perfiles o líneas batimétricas que se realizaron en campo. Se busca eliminar falsos ecos acústicos y mitigar efectos anómalos propios de la reflexión y refracción de las ondas sonoras. En el caso de datos monohaz, la edición se hace en vista longitudinal, mientras que

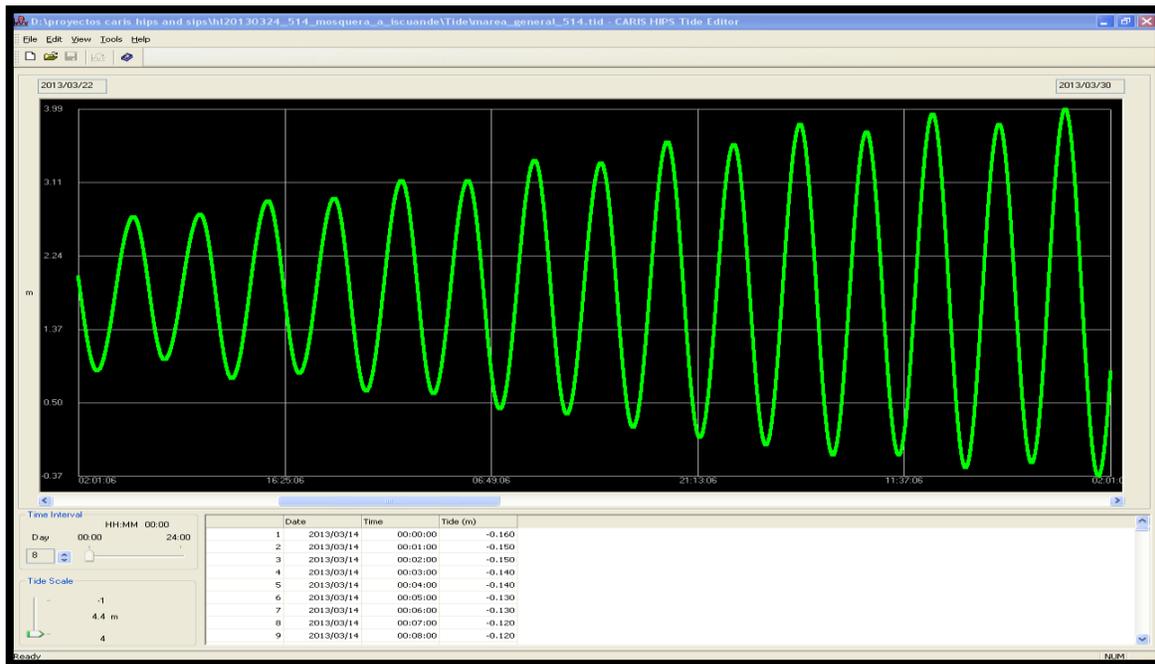
para datos multihaz, es posible hacer edición por bandas de sondajes, por bloques de datos y línea por línea.

Figura 31. Editor de Datos Monohaz



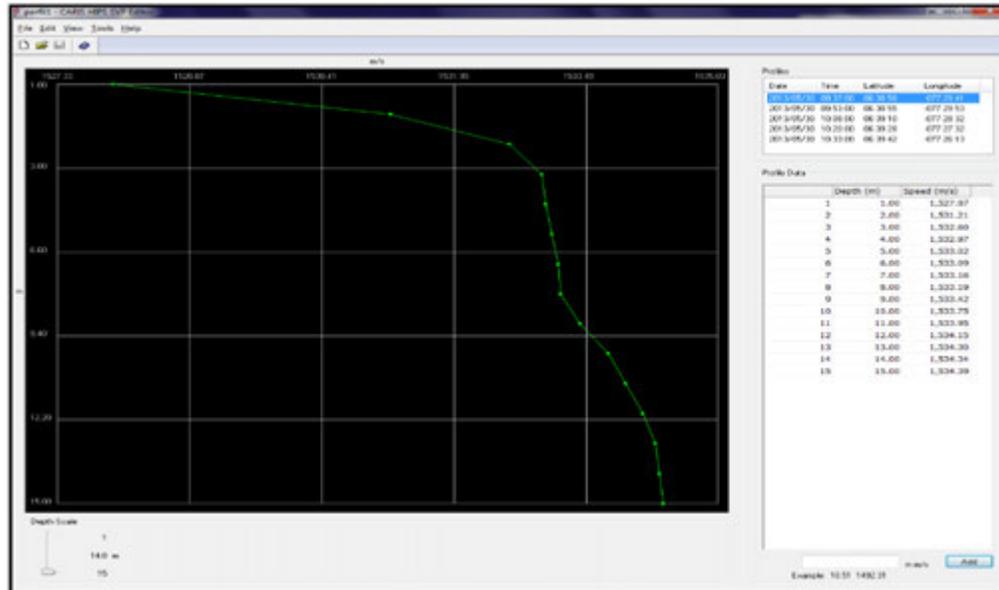
Corrección por Marea: se realiza la construcción del archivo de marea, a partir de los datos descargados de las estaciones mareográficas principales y las instaladas durante la fase de levantamiento. Este archivo mareal está referido al Datum de carta oficial con el que se referirán los sondajes, para el caso de Colombia es el MLWS (Promedio de las bajamares de Sicigia).

Figura 32. Editor de Datos de Marea CARIS HIPS



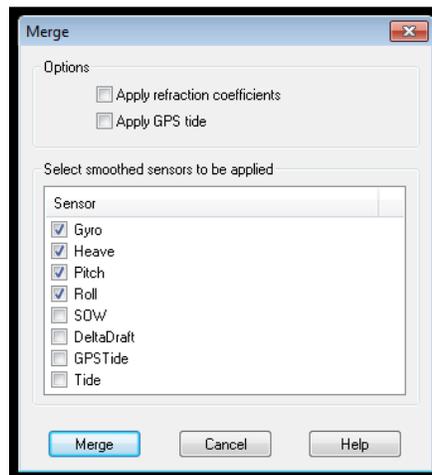
Corrección por Velocidad del Sonido: Durante esta etapa del procesamiento, se procede a construir el archivo general mediante el editor “SVP” de CARIS HIPS, en el cual se integran todos los perfiles realizados durante el levantamiento, con el fin de efectuar la corrección a los datos batimétricos que se vieron afectados por la refracción producida debido a los cambios en la velocidad del sonido a lo largo de la columna de agua.

Figura 33. Editor de Datos de Velocidad del Sonido



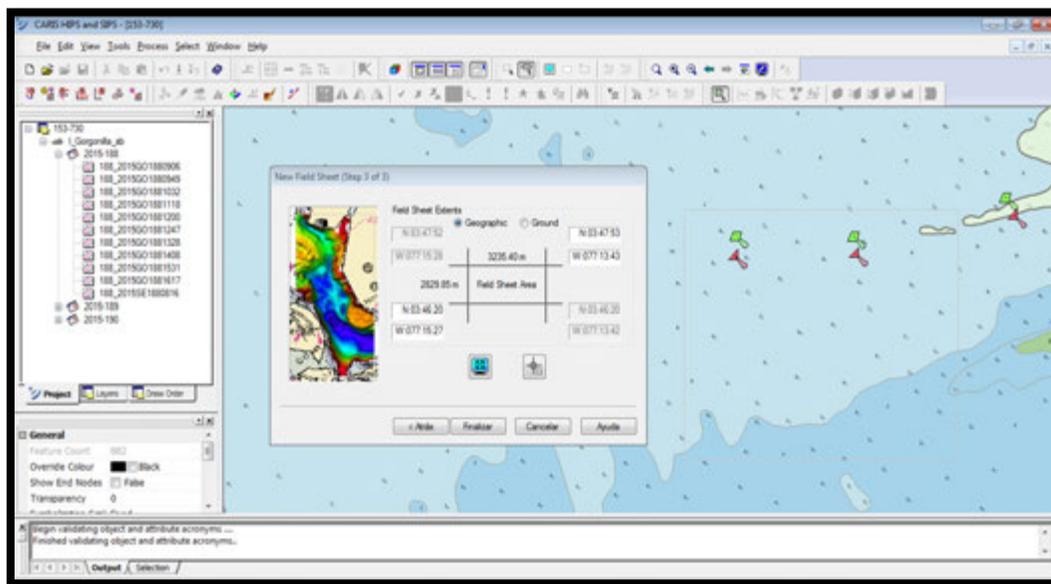
Mezcla de la información: Proceso en CARIS HIPS mediante el cual los datos batimétricos, se integran a las variables introducidas en el archivo de la embarcación y los datos del sensor de movimiento, generando así los datos batimétricos finales, debidamente corregidos y georreferenciados.

Figura 34. Proceso de Mezclado



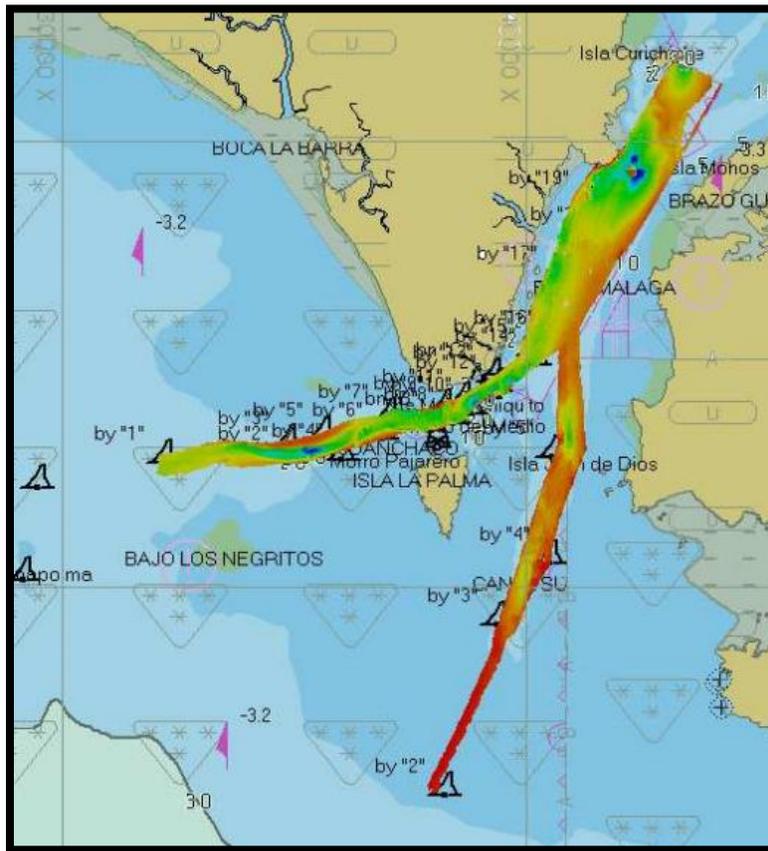
Creación de Hojas de Campo: Mediante el editor “FieldSheet”, se procede a delimitar un espacio geográfico, sobre el cual se derivaran productos finales basados en los datos batimétricos corregidos y finalizados.

Figura 35. Creación de Hojas de Campo



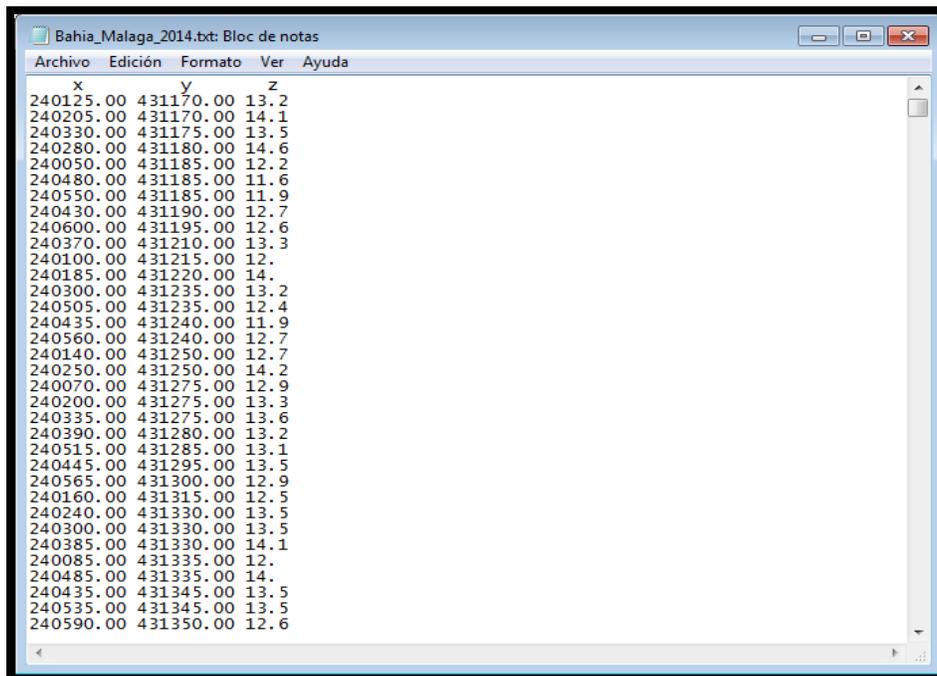
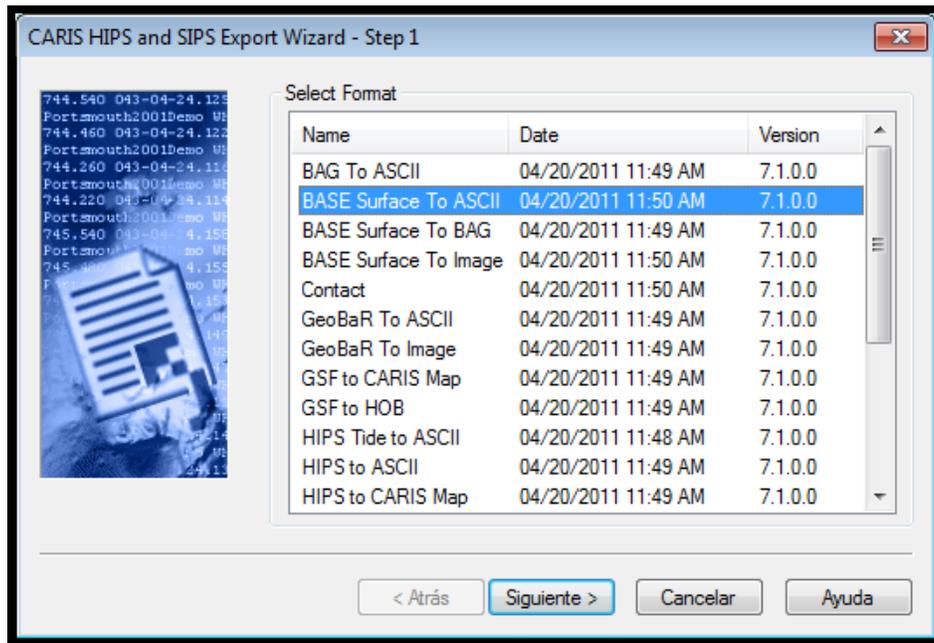
Generación Superficie Batimétrica: Es una capa de información geográfica bajo el formato *.CSAR, propio de CARIS HIPS para este tipo de archivos, en la cual se genera una solución final de datos, representado la morfología del fondo marino. A partir de esta superficie, se pueden obtener subproductos como: nubes de puntos, curvas de nivel y resultados estadísticos.

Figura 36. Superficie Batimétrica Sector Bahía Málaga



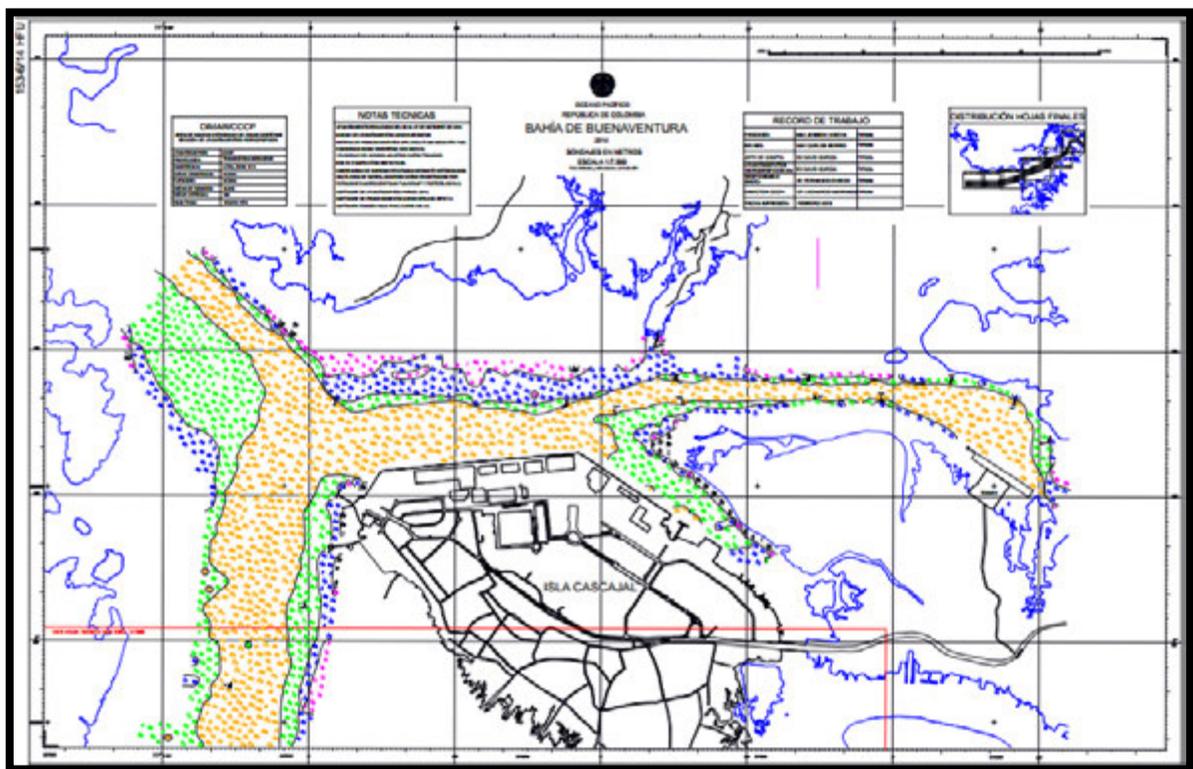
Generación Nube de puntos final: A partir de la superficie batimétrica generada, se procede a crear el archivo nube de puntos en formato *.XYZ, mediante el modulo "ExportWizard" de CARIS HIPS. Este archivo universal, es el empleado para alimentar los modelos numéricos y demás aplicaciones que lo requieran.

Figura 37. Modulo "EXPORT WIZARD". Archivo XYZ.



Edición de Hojas Finales: Estas se elaboran mediante la herramienta de dibujo cartográfico CARIS GIS. Su objetivo es la representación final impresa de los sondeos, con el fin de generar el insumo básico para la elaboración de la cartografía náutica de oficial de papel, basándose en los parámetros técnicos del Servicio Hidrográfico Nacional.

Figura 38.Modelo Hoja Final



Finalizada la etapa de procesamiento de los datos batimétricos, se procede a efectuar la fusión con los datos topográficos. La figuras 38 y 39 presentan la información topo-batimétrica, integrada, procesada y editada.

Figura 39. Información Topográfica-Batimétrica Bahía Tumaco-Islas.

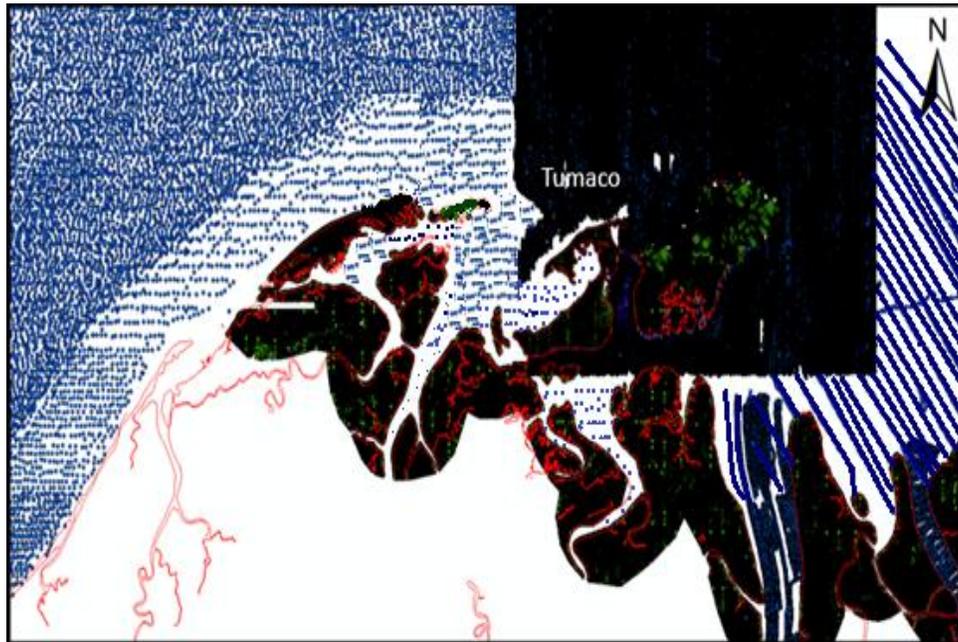
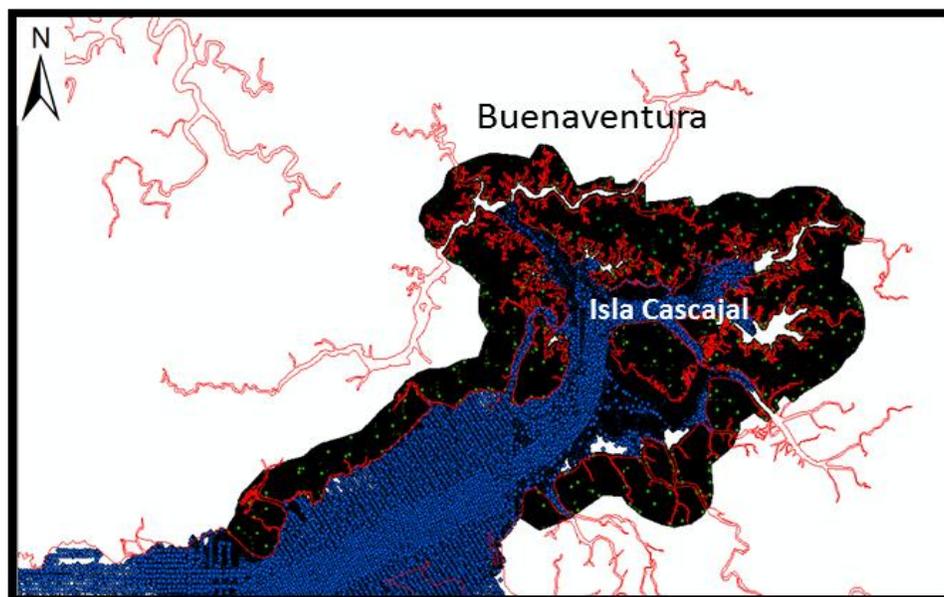


Figura 40. Información Topográfica-Batimétrica Bahía Buenaventura – Cascajal



1.4. LEVANTAMIENTO GEODÉSICO Y ANÁLISIS MAREAL

Los procedimientos para determinar el cero histórico, se hicieron teniendo en cuenta los estándares técnicos para la realización de levantamientos geodésicos y topográficos vigentes, así mismo para la descripción de los mismos se identificaron las siguientes 3 actividades principales:

1.4.1 Control Horizontal y Vertical

Este procedimiento fue efectuado para determinar coordenadas y alturas elipsoidales en puntos de control nuevos y algunos ya existentes(Figura 41), teniendo en cuenta la necesidad de asociar el Datum de referencia vertical hidrográfico de Buenaventura (cero Histórico) utilizado en los levantamientos batimétricos, con la información de alturas en tierra obtenidas de información LIDAR referidas al elipsoide WGS-84.

Figura 41. Posicionamiento de Estación Base en Puntos de Control.



1.4.2 Levantamiento GNSS RTK estático

Mediante el uso de los receptores GPS Leica 1200, se configuró un levantamiento de datos GPS en modo RTK estático [Manual GPS Leica GX 1230](figura 42), con el fin de garantizar en postproceso, resultados dentro de un rango de precisión de +/-10mm para el horizontal y +/-15mm para el vertical.

Figura 42.Levantamiento GNSS RTK.



1.4.3 Determinación Punto de control en torre tráfico Marítimo de CP1

Tabla IX. Especificaciones Vértice Geodésico Origen IGAC Torre Tráfico Marítimo CP1

VÉRTICE GEODÉSICO DE ORIGEN IGAC		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	76109001	
Elipsoidales	longitud	3° 53' 18.1435" N
	latitud	77° 4' 44.96347" W
Altura elipsoidal [m]	20.638	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1422924.978
	Y [m]	-6202447.228
	Z [m]	429632.105
Velocidades	Vx [m/año]	0.005
	Vy [m/año]	0.002
	Vz [m/año]	0.013

Tabla X. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Torre Tráfico Marítimo CP1

RESULTADO VÉRTICE GEODÉSICO CALCULADO TORRE CP1		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	CP1-001	
Elipsoidales	longitud	3° 53' 26.93437" N
	latitud	77° 4' 49.75705" W
Altura elipsoidal [m]	45.31	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1422782.241
	Y [m]	-6202486.434
	Z [m]	429903.1803
Tiempo de ocupación en puntos [hr]	3	

1.4.4 Comprobación Punto de control en muelle de SEMAP

Tabla XI. Especificaciones Vértice Geodésico Origen CP1-001 Muelle SEMAP

VÉRTICE GEODÉSICO DE ORIGEN CP1-001 TORRE CP1		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	CP1-001	
Elipsoidales	longitud	3° 53' 26.93437" N
	latitud	77° 4' 49.75705" W
Altura elipsoidal [m]	45.31	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1422782.241
	Y [m]	-6202486.434
	Z [m]	429903.1803
Tiempo de ocupación en puntos [hr]	2	

Tabla XII. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Comprobado Muelle SEMAP

RESULTADO VÉRTICE GEODÉSICO COMPROBADO MUELLE SEMAP		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	SEMAP	
Elipsoidales	longitud	3° 53' 29.84483" N
	latitud	77° 4' 54.18186" W
Altura elipsoidal [m]	20.373	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1422642.266
	Y [m]	-6202486.791
	Z [m]	429990.6816

1.4.5 Comprobación punto GPS2 mareógrafo Juanchaco

Tabla XIII. Especificaciones Vértice Geodésico Origen GPS1 Muelle Juanchaco.

VÉRTICE GEODÉSICO DE ORIGEN GPS1 MAREÓGRAFO JUANCHACO		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	GPS1	
Elipsoidales	longitud	3° 55' 42.82254" N
	latitud	77° 21' 05.00761" W
Altura elipsoidal [m]	16.895	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1393426.571
	Y [m]	-6209083.598
	Z [m]	434070.3075
Tiempo de ocupación en puntos [hr]	3	

Tabla XIV. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Baliza GPS2 Juanchaco.

RESULTADO VÉRTICE GEODÉSICO CALCULADO BALIZA GPS2 JUANCHACO		
Departamento	Valle del Cauca	
Municipio	Buenaventura	
Nombre	GPS2	
Elipsoidales	longitud	3° 54' 54.43937" N
	latitud	77° 21' 32.44143" W
Altura elipsoidal [m]	18.725	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1392568.484
	Y [m]	-6209125.081
	Z [m]	432582.9984

1.4.6 Determinación Punto de control en Muelle Guardacostas Tumaco

Tabla XV. Especificaciones Vértice Geodésico Origen IGAC Muelle Guardacostas Tumaco.

VÉRTICE GEODÉSICO DE ORIGEN IGAC		
Departamento	Nariño	
Municipio	Tumaco	
Nombre	SAZ-GPS-3011-S	
Elipsoidales	longitud	1° 48' 55.15283" N
	latitud	77° 44' 51.69581" W
Altura elipsoidal	18.491	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1243944.213
	Y [m]	-6252414.295
	Z [m]	200694.812
Velocidades	Vx [m/año]	0.009
	Vy [m/año]	0.002
	Vz [m/año]	0.011

Tabla XVI. Especificaciones Resultado Vértice Geodésico Calculado Muelle Guardacostas Tumaco.

RESULTADO VÉRTICE GEODÉSICO CALCULADO MUELLE GUARDACOSTAS TUMACO		
Departamento	Nariño	
Municipio	Tumaco	
Nombre	CP2-002	
Elipsoidales	longitud	1° 49' 12.04584" N
	latitud	78° 43' 43.40228" W
Altura elipsoidal [m]	18.093	
Geocéntricas Cartesianas	X [m]	1246014.613
	Y [m]	-6252003.682
	Z [m]	201214.002
Tiempo de ocupación en puntos [hr]	3	

1.4.7 Levantamiento control vertical nivelación geométrica diferencial

Este procedimiento se realiza con el fin de amarrar el nivel de referencia de las estaciones mareográficas tanto portátiles como fijas, a la red horizontal establecida mediante el levantamiento GNSS. El resultado de esta actividad permite asignar cotas elipsoidales a los datum hidrográficos que se calculen para cada una de las estaciones dentro de la zona de estudio.

Las nivelaciones geométricas fueron realizadas con el Nivel laser automático LeicaSprinter 50, efectuando recorrido de ida y regreso en cada una de las estaciones permitiendo lograr precisiones milimétricas.

1.4.8 Instalación red de Mareógrafos Portátiles

La ejecución de esta actividad permitió complementar una red de observación a lo largo de las bahía de Buenaventura y Málaga apoyando las estaciones mareográficas en continuo funcionamiento de DIMAR instaladas en el muelle de SEMAP, en Juanchaco y el muelle de Guardacostas en Tumaco.

Estos sensores arrojan lecturas cada 01 minutos en las variables de presión, temperatura y profundidad, siendo esta última la de interés para el presente análisis, teniendo en cuenta que está asociada directamente a los ascensos y descensos del nivel de agua. A continuación (tabla XVII), se muestran la ubicación y las características de cada mareógrafo.

Tabla XVII. Descripción General Estaciones Mareográficas

ESTACION	TIPO	LATITUD	LONGITUD	SENSOR	PERIODO
SEMAP	Permanente	3° 53' 29.84483" N	77° 04' 54.1818" W	Radar	1 minuto
Juanchaco	Permanente	3° 54' 54.43937"N	77° 21' 32.4414"W	Radar	1 minuto
Tumaco	Permanente	1° 49' 12.04584" N	78° 43' 43.4022" W	Radar- Presión	1 minuto

1.4.9 Estaciones Permanentes DIMAR

Muelle de SEMAP

Cota cero de referencia equipo: la lectura “cero” del sensor RLS se encuentra a -6.61 metros, respecto punto geodésico del muelle. Cota obtenida mediante lectura del equipo el día 08/08/2014 a las 14:35 horas la cual fue de 4.65 metros, sumado a la diferencia de altura de 1.96 metros obtenida por nivelación geométrica entre la línea de espejo de agua para ese instante de tiempo y el vértice geodésico del muelle.

Juanchaco

Cota cero de referencia equipo: la lectura “cero” del sensor RLS se encuentra a -4.688 metros, respecto punto geodésico GPS2 materializado en baliza del canal de Juanchaco frente a Isla Palma, acuerdo cartera histórica de nivelación para la estación. Esta cota fue verificada mediante control vertical utilizando nivelación geométrica.

Muelle guardacostas Tumaco

Cota cero de referencia equipo: la lectura “cero” del sensor RLS para la bahía de Tumaco, se encuentra a -6.58metros, respecto punto geodésico del muelle Guardacostas Tumaco. Cota obtenida mediante nivelación geométrica.

1.4.10 Determinación altura elipsoidal Cero Histórico

La determinación de esta variable se efectuó por 02 métodos distintos teniendo en cuenta las necesidades actuales de implementar estos valores en proyectos como es el caso de los levantamientos hidrográficos y en trabajos que requieran interoperabilidad con datos terrestres.

Método para necesidades hidrográficas

Para obtener esta cota se procedió a determinar la equivalencia en cada uno de los datos brutos de las estaciones, ubicando la fecha y hora exacta en la cual el nivel de agua llegó al cero histórico del puerto; partiendo que la lectura de 0.78 metros del sensor RLS de la estación SEMAP coincide con el cero histórico de Buenaventura (MLWS) sobre el cual se han desarrollado todos los trabajos de hidrografía en el puerto, se encontró que el día 12 de agosto de 2014 a las 22:42 horas el sensor registraba este nivel.

SEMAP: Agosto 12 de 2014 22:42 lectura RLS 0.78metros

JUANCHACO: Agosto 12 de 2014 22:35 lectura RLS -2.21metros

Basados en lo anterior y conociendo las diferencias de altura desde los puntos geodésicos conocidos con alturas elipsoidales hacia el cero de referencia de cada

una de las estaciones observadas se procedió a calcular la cota respectiva (tabla XVIII).

Tabla XVIII. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) para las Estaciones en Metros

ESTACION	ALTURA ELIPSOIDAL PUNTO	NIVELACION HACIA CERO DE LA ESTACION	CERO ELIPSOIDAL ESTACION	CERO HISTORICO EN SENSOR	CERO HISTORICO ELIPSOIDAL
SEMAP	20.373	-6.61	13.763	0.78	14.543
JUANCHACO	18.725	-4.688	14.037	-2.21	11.827

Para el caso de Tumaco se calcula la cota de altura elipsoidal para la lectura “cero” del sensor RLS de la estación. Posteriormente, se suma el valor correspondiente al MLWS (cero histórico de Tumaco en las batimetrías), el cual es 2.255 metros como se muestra en (tabla XIX).

Tabla XIX. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) para la Estación en Metros

ESTACION	ALTURA ELIPSOIDAL PUNTO GEODESICO	NIVELACION HACIA CERO DE LA ESTACION	CERO ELIPSOIDAL ESTACION	CERO HISTORICO EN SENSOR	CERO HISTORICO ELIPSOIDAL
TUMACO	18.093	-6.58	11.513	2.255	13.768

Con estos valores se podrán crear zonas de marea con el datum de la cartografía náutica oficial ajustado a su situación geográfica, para ejecutar levantamientos hidrográficos en modo RTK minimizando la incertidumbre.

Método para aplicación en modelación con datos terrestres

Partiendo de la necesidad actual de implementar una cota elipsoidal para el cero histórico, que sea compatible en trabajos donde intervienen datos espaciales provenientes de alturas elipsoidales en tierra, se genera una grilla de altura elipsoidal en el área general de estudio (Bahías de Buenaventura y Málaga), construida en base al modelo GEOCOL 2004, el cual es utilizado como referencia de nivel medio del mar para Colombia en asignación de cotas ortométricas al asociarlo con alturas elipsoidales. Para calcular las cotas de línea de más baja marea se le resta a la grilla GEOCOL 2004 el valor de amplitud presentado durante el evento de sicigia extrema del día 12 de Agosto de 2014 para cada una de las estaciones de observación (Buenaventura y Juanchaco), el resultado se interpola por método lineal y de proximidad a cada una de las estaciones de observación generando la base de datos asociada.

En la bahía de Tumaco se realizó el mismo procedimiento teniendo en cuenta que la amplitud registrada durante el evento de sicigia fue de 2.025 metros, el cual corresponde a la lectura RLS de 1.97 metros. Posterior a esto se suma la corrección para llevarlo a 2.255 metros, correspondiente al nivel MLWS del área de estudio (Tabla XX).

Tabla XX. Altura Elipsoidal de Cero Histórico (MLWS) Basado en Modelo GEOCOL 2004 en Metros

ESTACION	ONDULACION MODELO GEOCOL 2004	AMPLITUD DE LA MAREA	CERO HISTORICO ALTURA ELIPSOIDAL
SEMAP	17.48	-2.54	14.94
JUANCHACO	14.39	-2.145	12.245
TUMACO	14.42	-2.025	12.68

1.4.11 Análisis Mareal

El nivel del mar en cualquier instante se ve afectado principalmente por dos procesos naturales: la marea astronómica, que es el proceso que más afección tiene en el ascenso y descenso periódico del nivel del mar, y es debida a la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la luna y el sol sobre la masa de agua terrestre; y la marea meteorológica, que es generada por la presión atmosférica y por el viento [21]. Así como también, por factores no astronómicos como línea costera, distribución geográfica, topografía local, profundidad de las cuencas oceánicas, influencias hidrográficas, entre otras, que cumplen un rol importante en su comportamiento [22].

Teniendo en cuenta que ésta marcada diferencia entre pleamar y bajamar en el Pacífico, es un factor decisivo y repercute directamente en la inundación que se pueda generar en una población costera ante un posible evento tsunamigénico, es de gran importancia determinar el nivel del mar en un instante dado en cada una de las poblaciones bajo estudio.

Debido a la gran extensión del Pacífico Colombiano, a las condiciones geomorfológicas de las zonas bajo estudio y la poca información instrumental en bases de datos, no se contaba antes de este estudio con información de nivel de mar medida *insitu* en todas las zonas, es por ello que se realizó paralelo a los levantamientos registros mareográficos, sin embargo para obtener la distribución promedio de nivel del mar se necesitan series extensas (más de 15 años) y continuas es por ello que se adopta la metodología desarrollada en el CCCP [23], la cual es validada con los registros instrumentales adquiridos. La metodología del CCCP determina las cotas máximas de inundación cuando no se cuenta con registros instrumentales, con el fin de obtener de forma probabilística un estimado del comportamiento del nivel del mar de estas áreas. Tiene como base el análisis por separado de la marea astronómica utilizando un análisis armónico, modelos numéricos de propagación y generación de marea; y la marea meteorológica empleando métodos indirectos basados en técnicas de Montecarlo debido al carácter aleatorio de la misma.

A continuación se muestran los regímenes medios de nivel del mar (figuras 43 a 47) para cada una de las poblaciones, a partir de los cuales se obtiene los niveles de marea alta, media y baja (tabla XXI), los cuales son sumados a las mallas de detalle (1arcs) y con ello evaluar el grado de inundación en estas localidades.

Figura 43. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Buenaventura.

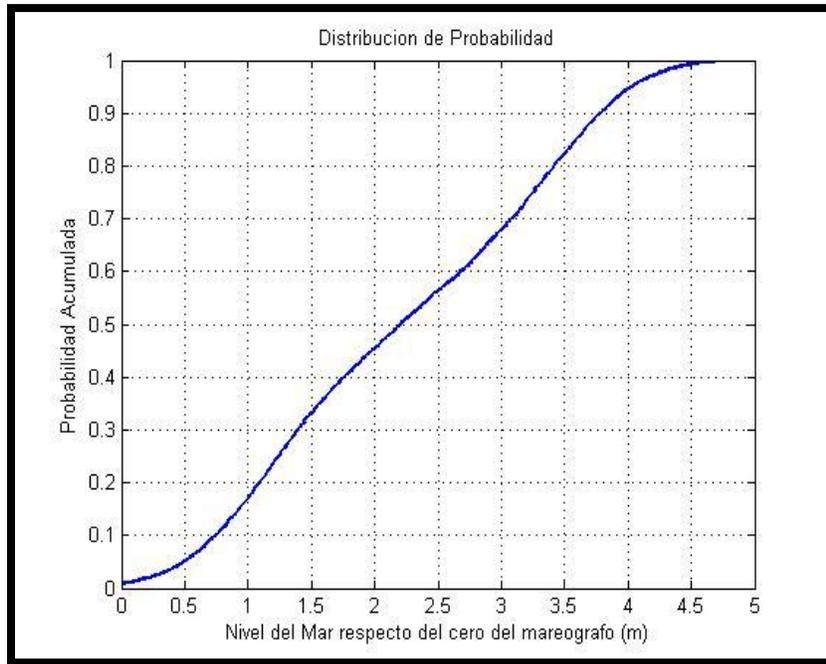


Figura 44. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Juanchaco.

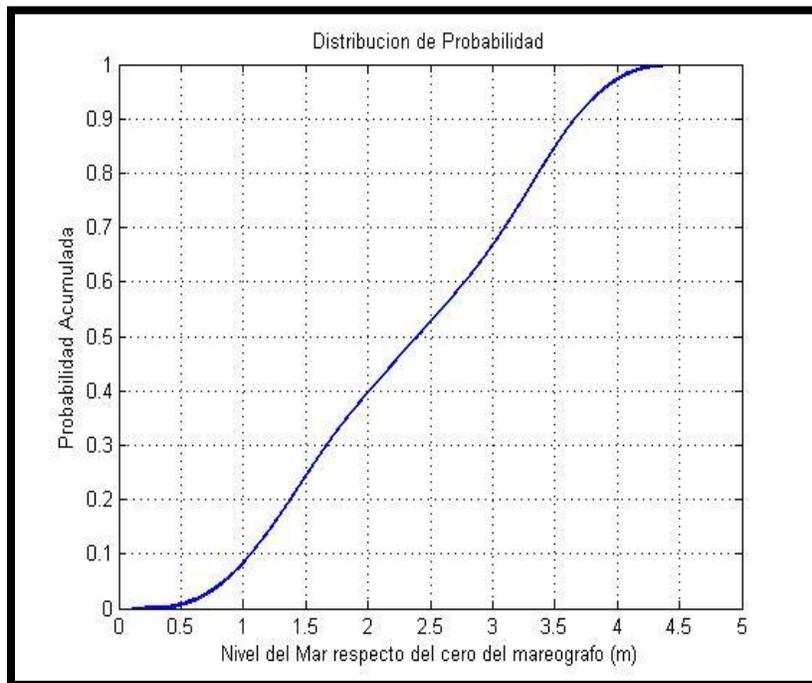


Figura 45. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Tumaco

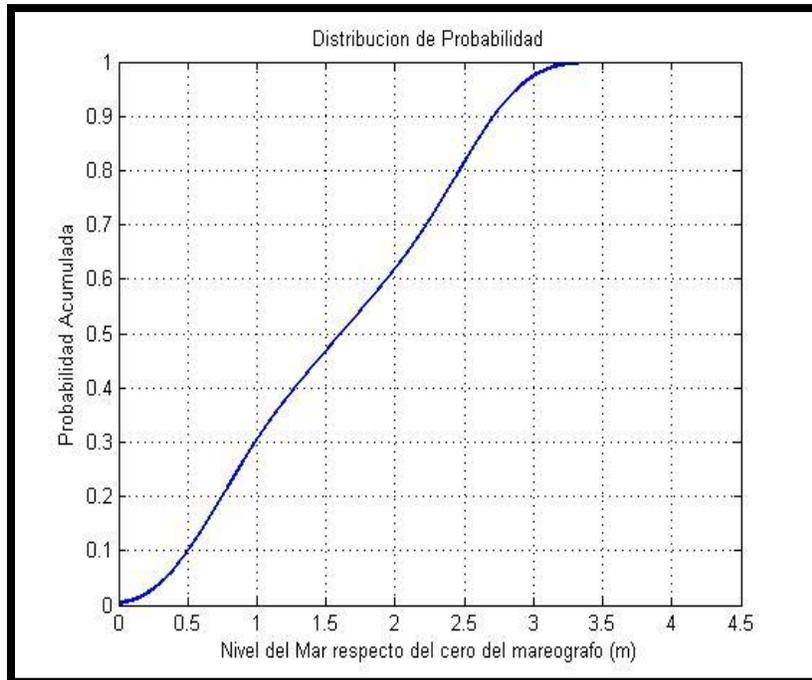


Figura 46. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Salahonda

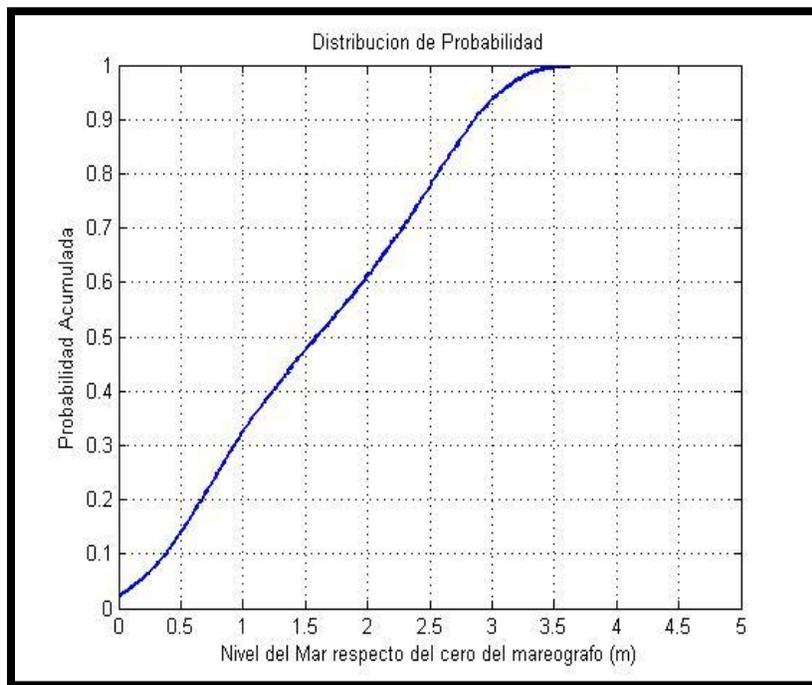


Figura 47. Régimen Medio Determinado para el Casco Urbano de Curay

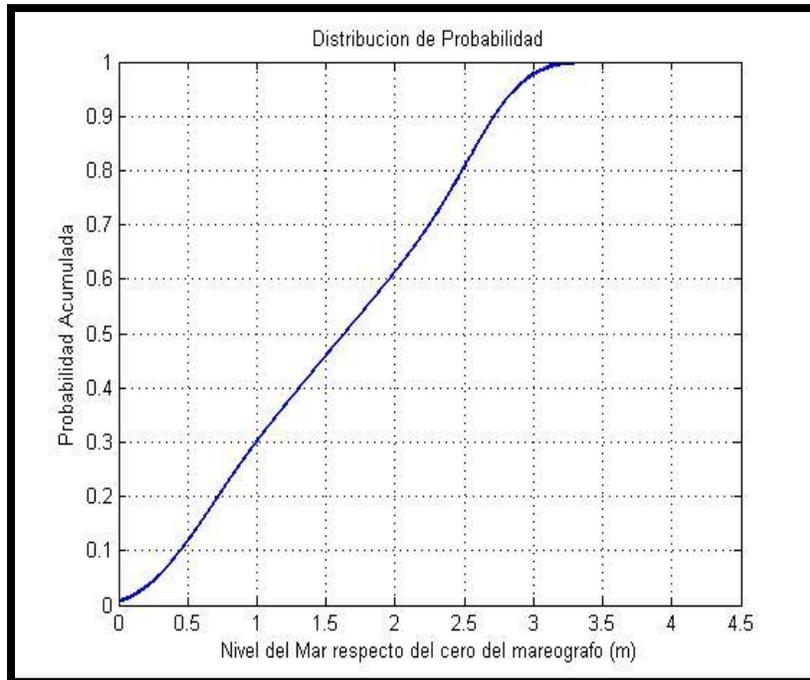


Tabla XXI. Niveles de Marea para las Poblaciones de Interés en Metros

Zona de interés	Nivel Marea Alta	Nivel Marea Media	Nivel Marea Baja
Tumaco	3.60	2.50	0.80
Curay	2.72	1.64	0.72
Salahonda	2.71	1.61	0.75
Buenaventura	4.8	3.26	1.0
Juanchaco	4.54	3.21	0.08

Tabla XXII. Consolidado Actividades Fase I: Trabajo de Campo

CONSOLIDADO ACTIVIDADES FASE I: TRABAJO DE CAMPO	
ACTIVIDAD	PORCENTAJE DE EJECUCIÓN
Determinación del Área y Escala a Levantar.	100 %
Levantamiento Batimétrico Áreas Faltantes	100%
Procesamiento y Edición de Datos del Levantamiento	100%
Levantamiento Geodésico y Análisis Mareal	100%

3 FASE II: APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO Y EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

En esta sección se describen las actividades que permite aplicar los modelos de generación, propagación e inundación por tsunamis. Los resultados de la simulación numérica de las etapas del evento de tsunami, permite conocer la afectación por inundación, además de los tiempos de llegada y comportamiento del tren de ondas de tsunami en la costa, información que permite crear los mapas de inundación, y de esta manera evaluar la amenaza o peligrosidad en las poblaciones de interés.

3.1 DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO.

Para realizar simulaciones de tsunamis, es necesario contar con información base que será representada en forma de mallas de trabajo, donde sea posible representar las alturas del terreno, así como la profundidad de lecho marino. Estos

dominios computacionales son introducidos en el modelo numérico, los cuales deben tener unas características específicas[24]. Este modelo, adopta un sistema de rejillas anidadas, acoplado de forma dinámica hasta cuatro regiones (que se conocen como capas) con diferente resolución de la cuadrícula. En cada una de estas regiones se puede elegir el sistema de ecuaciones que la regirá, ya sea de tipo lineal o no lineal, poniendo en consideración que para un terremoto dado, el desplazamiento del fondo marino se determina a partir de una teoría lineal de dislocación elástica [25].

El sistema de anidamiento recomendado para el uso del modelo numérico seleccionado para evaluar amenazas por tsunamis, viene dado por el juego de capas 1arcs, 3arcs, 9arcs, 27arcs de espaciamiento, donde su equivalencia aproximada en metros es 30, 90, 270, y 833 metros, respectivamente. Cabe resaltar que la malla con un mayor espaciamiento (27 arcs), debe ser lo suficientemente amplia como para contener toda la zona afectada por la ruptura de la falla. En conjunto las mallas son utilizadas por el modelo para generar una deformación del lecho marino que es tomada como condición inicial para propagar la onda hasta la zona costera en donde se encuentra la zona de interés en la cual se evalúa la inundación generada por un evento determinado.

A continuación se presentan las características establecidas para las mallas computacionales a usar en cada zona de trabajo (tabla XXIII), y se presenta el arreglo espacial de las mismas (figuras 48-49).

Tabla XXIII.Características del Arreglo de Mallas Computacionales para las Zonas Bajo Estudio.

MALLA	ÁREA COMPRENDIDA	LÍMITE INF. IZQ.	LÍMITE SUP. DER.	TAMAÑO CELDA
A	Pacífico	-83.01004444 ; - 1.49244444	-76.80004444; 6.74255556	27 arc-second (~833 m)
B	Municipio de Tumaco	-79.32754444; 1.33505556	-78.24754444 ; 2.46005556	9 arc-second (~277 m)
	Municipio de Buenaventura	-78.0023444 ; 3.2237222	-76.94401111 ; 3.93705556	9 arc-second(~277 m)
C	Bahía de Tumaco	-79.1109121 ; 1.33785556	-78.2409111 ; 2.45535556	3 arc-second(~92 m)
	Bahía de Buenaventura	-77.2390111 ; 3.77455556	-76.94401111 ; 3.93705556	3 arc-second(~92 m)
	Bahía de Málaga	-77.41801111 ; 3.89025556	-77.27301111 ; 3.98025556	3 arc-second(~92 m)
D	Casco urbano Buenaventura	-77.0904000 ; 3.844000	-76.9504000 ; 3.91316667	1 arc-second(~30 m)
	Casco urbano Juanchaco	-77.3819 ; 3.9222	-77.3344; 3.94803333	1 arc-second(~30 m)
	Casco urbano Tumaco	-78.8323000; 1.77980000	-78.7106333; 1.85396667	1 arc-second (~30 m)
	Casco urbano Salahonda	-78.6908 ; 2.0358	-78.6358; 2.06413333	1 arc-second (~30 m)
	Casco urbano Curay	-78.5681 ; 1.8895	-78.53893333 ; 1.907	1 arc-second(~30 m)

Figura 48.Arreglo de Mallas Computacionales Correspondientes a las Zonas de Salahonda, Tumaco yCuray.

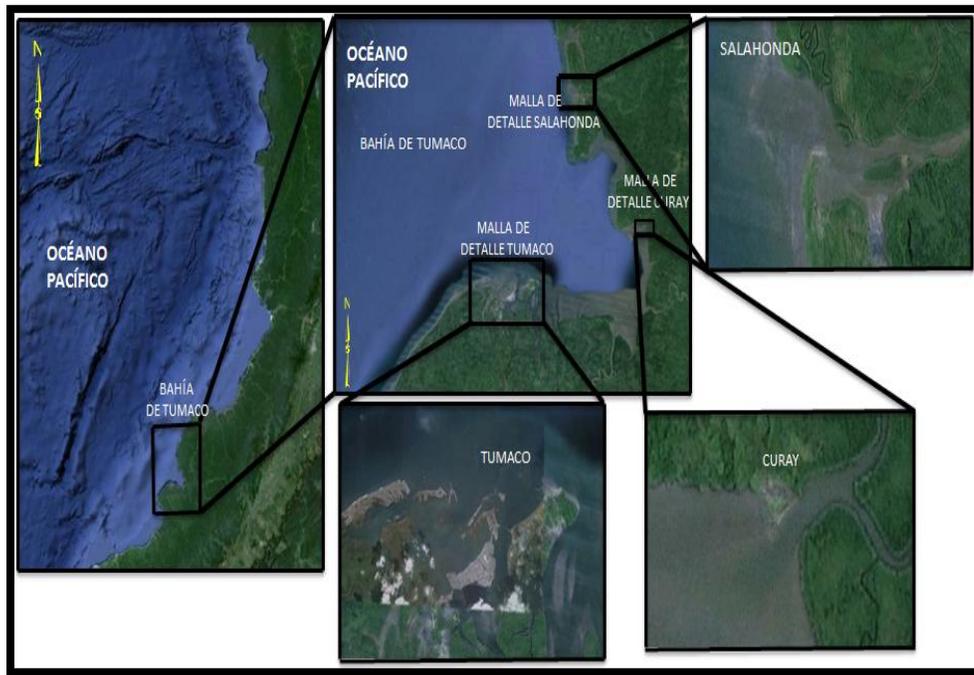
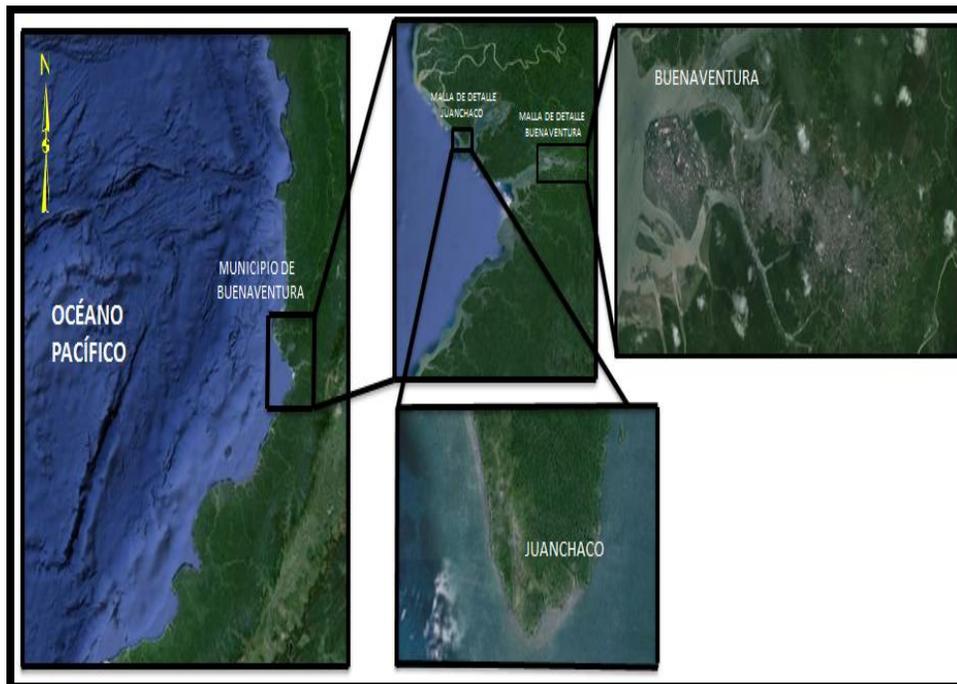


Figura 49.Arreglo de Mallas Computacionales Correspondientes alas Zonas de Buenaventura yJuanchaco.



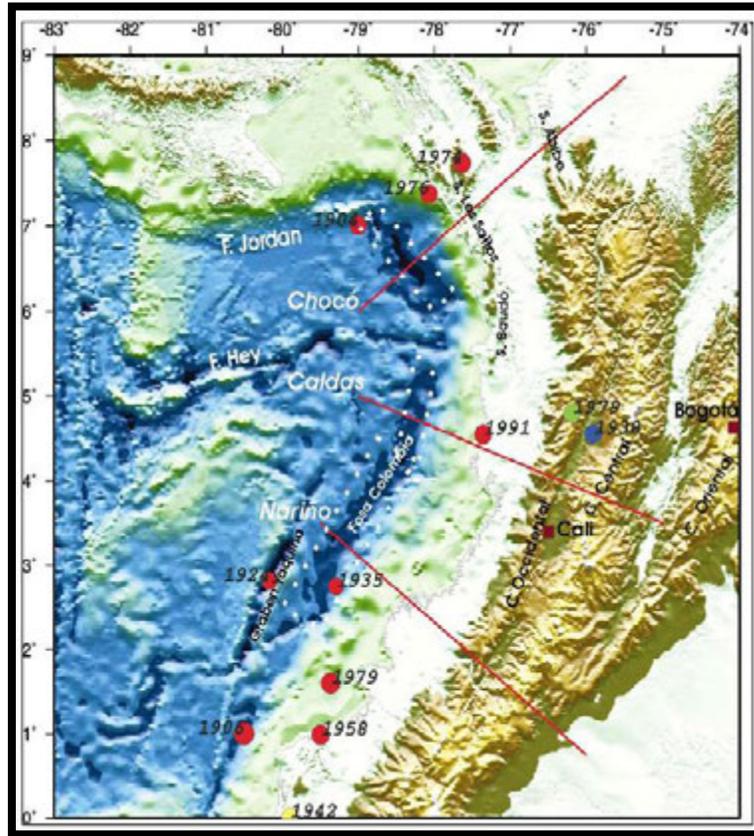
3.2 DEFINICIÓN ESCENARIOS SÍSMICOS PRECURSORES DE TSUNAMI

La determinación de los escenarios sísmicos precursores de tsunami para el Litoral Pacífico colombiano, se fundamenta en la revisión y análisis de la sismicidad histórica, la sismo-tectónica, las regiones sismo - tectónicas homogéneas y magnitudes sísmicas probables en el Pacífico Colombo-Ecuatoriano, con base en estudios reportados y publicados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y diferentes autores de la comunidad científica internacional. Adicionalmente a partir de la definición de los escenarios extremos por el método determinista, se aplicó el método de Análisis Probabilístico de la Amenaza por Tsunami (PTHA siglas en ingles).

2.2.1 Patrón Sismo-Tectónico

A partir del análisis de los rasgos topográficos mayores del mapa artificial para la topografía y la sismicidad, se ha determinado la geometría de la *fosa Colombia-Ecuador* y se han definido diferentes segmentos. Las zonas de fosa con profundidad superior a 3500m, frente a las costas de Colombia y Ecuador, permiten diferenciar tres segmentos (figura 50)[26].

Figura 50. Definición de los Tres Segmentos Propuestos para la Fosa Colombiana, Y Localización de las Secciones Verticales Perpendiculares a los Mismos. Se Indica la Localización de los Sismos más Importantes Registrados en esta Área [26].



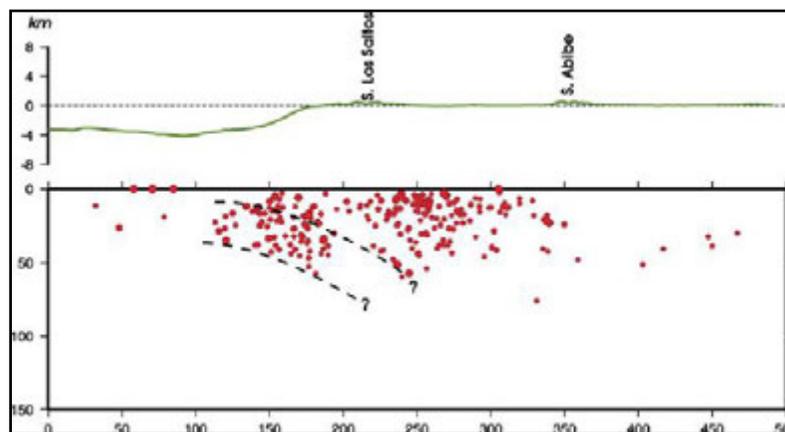
Zona Norte Colombiano(Localizado entre 5.5° y 7.5° de latitud)

Se encuentran frente a la costa norte del departamento del Chocó, con un azimut de 310° y 170 km de longitud. Sus límites son, al norte termina contra una pequeña elevación en la zona de falla de Jordan, ubicada al sur del archipiélago de Las Perlas, que interrumpe la sismicidad asociada a esta estructura oeste-este. Al sur la zona norte colombiano, se localiza frente al cabo Corrientes, lugar donde converge la falla Hey, límite sinistral entre la placa de Nazca y el bloque Coiba. La sismicidad más cercana a la fosa es de carácter superficial (< 60 km), con

aumento en la profundidad hacia el noreste y concentrada hacia los extremos del segmento. Este segmento ha registrado sismos de magnitud importante, siendo el del 20/01/1904 el máximo reportado ($M_w = 7.4$).

En el perfil de la figura 51, se observan dos concentraciones principales de sismos. La primera, inmediatamente posterior a la fosa, en la zona de acoplamiento (sismicidad interplaca), a profundidades entre 10 y 50 km. La segunda concentración se localiza contigua a ésta, asociada a la gran actividad que se registra en la frontera con Panamá, en una zona donde posiblemente se superponen diferentes procesos tectónicos, generando fallas corticales [26].

Figura 51. Sección Norte Perpendicular al Segmento Chocó, Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad Vs la Profundidad. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de la Sección [26].

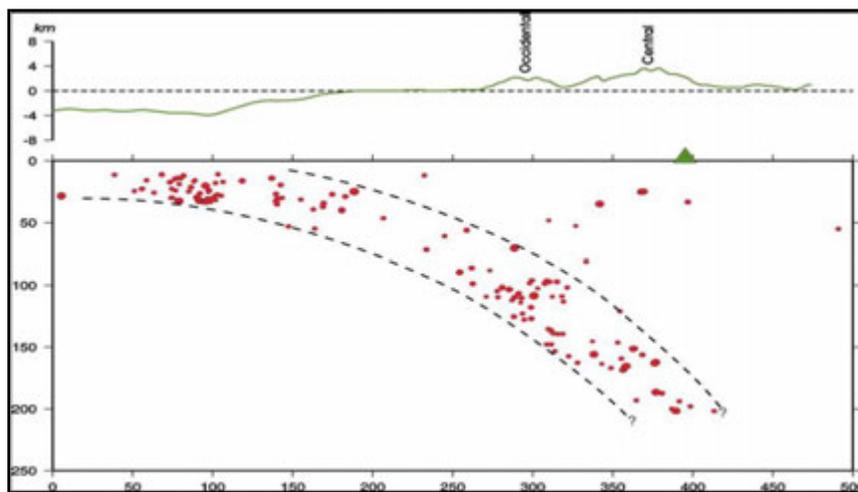


Zona Centro Colombiano(Localizado entre 4.0° y 5.5° de latitud)

Frente a la costa sur de Chocó, con 20° de azimuth en un tramo de 160 km. Su extremo norte es perpendicular a la falla Hey, y está separado de ésta por una

elevación en el piso oceánico. El límite sur lo constituye un cambio de dirección en la fosa, ubicado aproximadamente en la dirección (78°.0W, 4°.0N). La sismicidad superficial (< 60 km) se concentra en la parte norte del segmento, aumentando la profundidad hacia el oriente bajo las cordilleras Occidental y Central, con sismos hasta 210 km de profundidad. El mayor sismo instrumental en la zona de fosa se registró el 19/11/1991 ($M_w= 7.2$), y en la zona de Benioff, el 23/11/1979 ($M_w= 7.2$). En relación a esta última zona, se define un plano con 40° de buzamiento, que se introduce hasta los 210 km de profundidad bajo la cordillera Central, donde se localiza el vulcanismo activo en esta zona del país.

Figura 52. Sección Central Perpendicular al Segmento Caldas Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad Vs la Profundidad Bajo el Centro-Oeste de Colombia. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de la Sección. En el Inferior, el Triángulo Verde Indica la Localización del Vulcanismo[26].



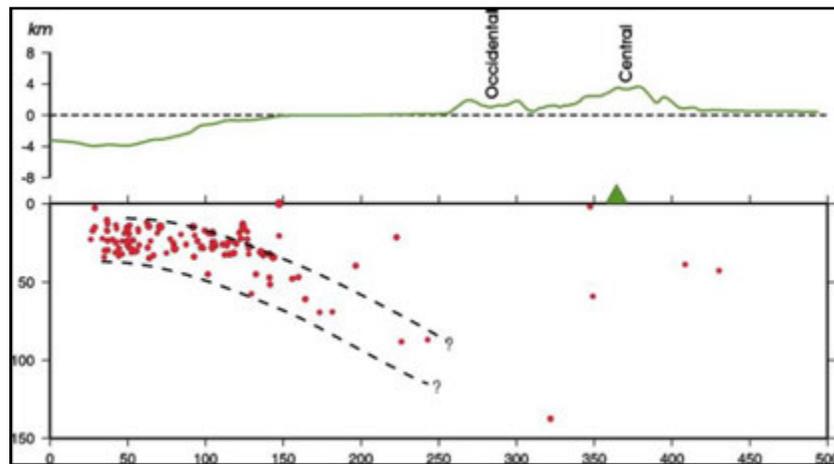
En el corte de la figura 52, se reconocen dos fuentes: La primera, asociada al acoplamiento interplaca en la zona de subducción, con sismicidad entre 10 y 30

km, que paulatinamente se incrementa hasta 20 y 40 km, en una distancia aproximada de 100 km desde la fosa. La segunda fuente constituye la zona de Benioff, definida por sismicidad intermedia (70 a 200 km), a distancias entre 200 y 350 km desde la fosa [26].

Zona Sur Colombiano (Localizado entre 0° y 4° de latitud):

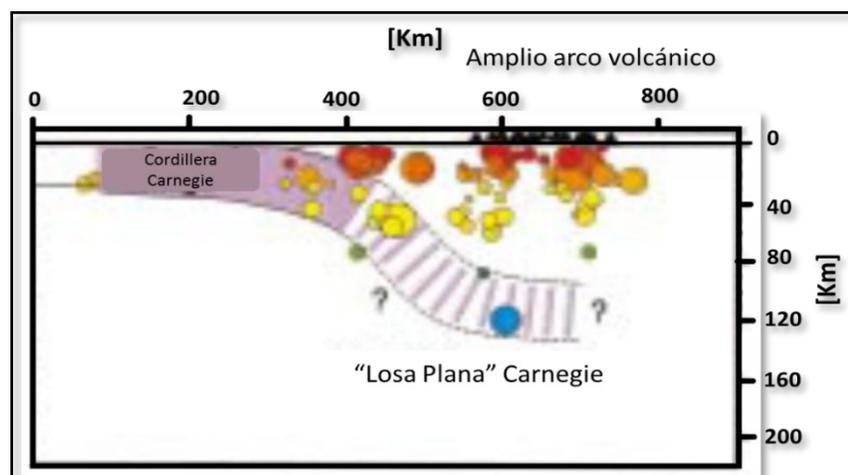
Se ubica frente a las costas de Valle, Cauca, Nariño y norte de Ecuador, presenta 40° de azimut, con una longitud cercana a 550 km. El límite sur de este segmento queda claramente marcado por el extremo nororiental de la Cordillera de Carnegie. En esta zona, la sección vertical muestra una geometría horizontal en los primeros 100 km, y posteriormente una geometría con 30° de inclinación, penetrando hasta 100 km de profundidad costa fuera en el sur de Colombia, y bajo la costa norte de Ecuador.

Figura 53. Sección del Segmento Sur Perpendicular ala Fosa, Donde se Muestra la Distribución de la Sismicidad en Profundidad Bajo el Suroeste de Colombia. El Gráfico Superior es un Perfil Topográfico de la Parte Central de La Sección. En El Gráfico Inferior el Triángulo Verde Indica la Localización del Vulcanismo Activo[26].



En el corte (Figura 53) se distingue que la actividad sísmica se encuentra en profundidades someras con poca presencia en intermedias y altas profundidades (se encuentra solo un evento con profundidad mayor a 90 Km.). En cuanto a la actividad volcánica es amplia en este sector y se localiza en torno a los 300 - 350 km de la fosa. Este segmento representa la fuente que ha registrado los mayores sismos de subducción en la historia de Colombia (31/01/1906 y 12/12/1979), y un sin número de eventos importantes, sobre todo por los efectos sobre el litoral pacífico colombiano. El mayor sismo instrumental registrado en la zona de fosa fue el terremoto del 31/01/1906, según [27], la zona de ruptura de 1906 presentó un evento tsunamigénico de magnitud $M_w=8.8$, y fue reactivada por 3 eventos, 1942 ($M_w=7.8$), 1958 ($M_w=7.7$), y 1979 ($M_w=8.2$). En cuanto a su longitud de ruptura, esta se encuentra cerca de los 500Km [28]. Aproximadamente la misma que se rompió con los 3 eventos de empuje mencionados anteriormente [29]. Lo que significa que existe una estrecha correlación entre los límites de las placas.

Figura 54. Corte del Segmento Sur Ubicado Entre 0° y 2.5° . [31]



Si se toma un corte adicional en el segmento Sur, comprendido entre las latitudes 0° y 2.5° (Figura 54), se confirma una profundidad de la actividad sísmica somera, presentando una pendiente suave en el encuentro de las placas. Adicional se muestra una amplia actividad volcánica y se confirma presencia de la laguna sísmica por los catálogos de registros de SISRA (Sistema de Información Sísmica Regional de América) y PDE (por sus siglas en inglés, Preliminary Determination of Earthquakes); junto con los registros de la red en 54 estaciones sismológicas operadas durante el experimento Lithoscope[31].

2.2.2 Región Sismo-Tectónica Homogénea

A partir de la definición de las tres zonas sismo-tectónicas del Pacífico Colombiano analizadas en el literal 2.2.1, es posible deducir dos zonas con características sismo-tectónicas homogéneas, la primera es la zona Sur del Pacífico Colombiano, identificada como un área importante para la generación de sismos precursores de tsunami; de hecho cada evento mencionado (1906, 1942, 1958 y 1979) confirma que existe un alto potencial para la generación de este tipo de eventos y más si se tiene en cuenta que sus mecanismos de acoplamiento interplaca son del régimen tectónico [32]. La segunda zona se encuentra al Norte del Pacífico Colombiano, frente a las costas norte del departamento de Chocó, aunque se presenta mayores profundidades para la fosa Colombia, se exhibe una densa sismicidad superficial ($<60\text{Km}$), donde se ha registrado sismos de magnitud importante, como el evento de principios de 1904, donde se presentó una magnitud, $M_w=7.4$.

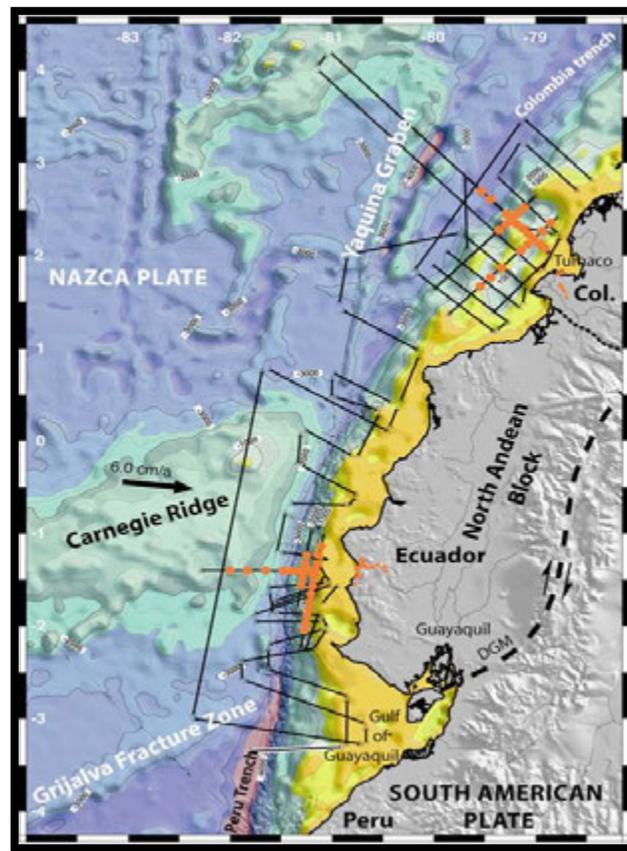
El segmento Centro del Pacífico Colombiano analizado en el literal anterior, no se toma en consideración debido a que presenta una actividad sísmica más dispersa y mucho menos notoria, por lo que en temas de homogeneidad no es posible tenerla en cuenta por su característica sismo-tectónica poco uniforme y representativa, sobre todo cuando se trata de sismos tsunamigénicos.

Pacífico Sur Colombiano:

La zona de subducción, es una región donde se presentan esfuerzos en constante acumulación. [32]. Esta área, creada por el límite activo entre las placas tectónicas de Nazca y Suramericana, presenta alta actividad sísmica [7]; en esta zona se generaron sismos precursores de tsunami, registrados en 1906, 1942, 1958 y 1979, los cuales afectaron la costa Pacífica colombiana [8]; y sus áreas de ruptura se vieron limitadas por la presencia de barreras en la zona de subducción, esto es posible confirmarlo, en el caso del evento de 1906 donde la longitud del extremos sur de la zona de ruptura se vio interrumpido debido al paso de la Cordillera de Carnegie por la Zona Sur del Pacífico Colombiano (Figura 55) [32].

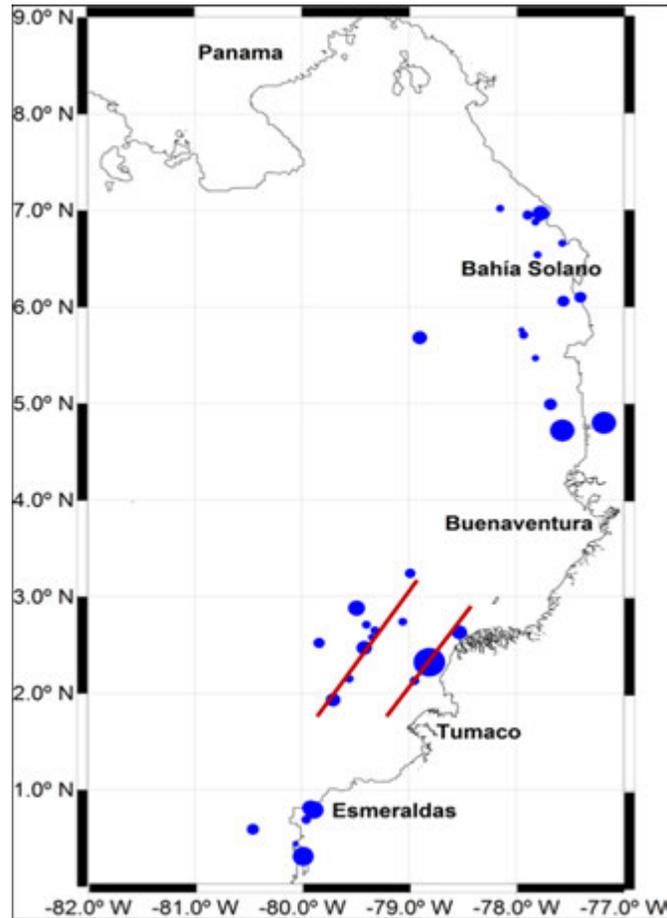
La costa Nariñense es catalogada según el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS), como una zona de alta sismicidad, debido principalmente a su proximidad con la zona de subducción creada por el límite activo entre las placas de Nazca y Sudamérica. De esta manera, el sismo como elemento fundamental para la generación de ondas de tsunami en esta región del país, tiene asociada una alta probabilidad de ocurrencia, ya que las zonas de subducción son sistemas de alta y regular actividad [7].

Figura 55. Yaquina Graben, Colombian Trench, Carnegie Ridge, la Zona de Fractura Grijalva, El Bloque Norte de los Andes [32].



En la figura 56, es posible inferir que existen dos segmentos en la zona de subducción, entre las placas tectónicas Nazca y Suramericana, paralelos entre sí, donde se presenta la mayor actividad sísmica de la franja Colombo-Ecuatoriana. Además se debe considerar que está siguiendo un patrón en dirección NE, y que coincide con la zona donde se han producido los epicentros de tsunamis históricos de los últimos 100 años. [27].

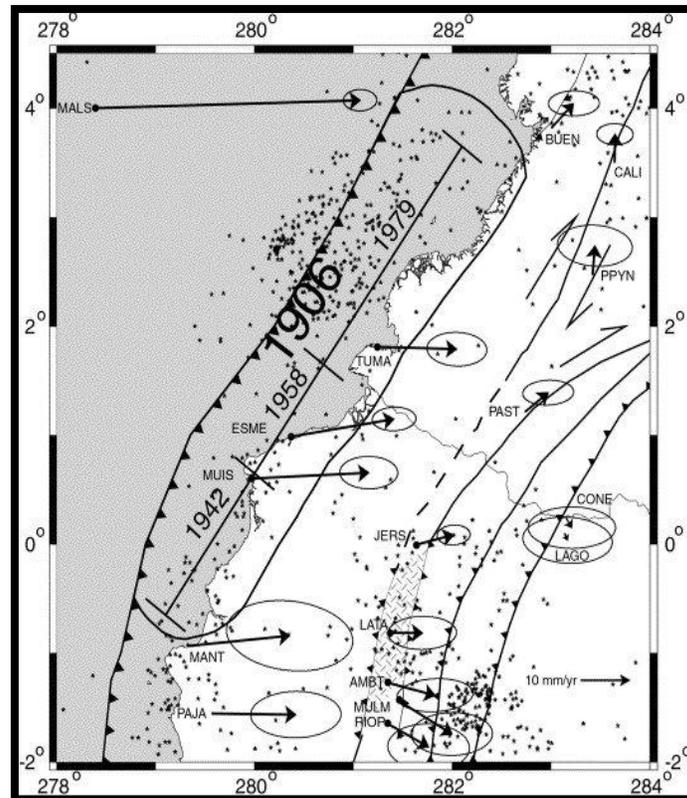
Figura 56.Eventos Sísmicos Tipo Normal o Inverso con $M_w > 5.0$ Y $H = 0-70$ Km Registrados en el Pacífico Colombo-Ecuatoriano Durante el Periodo 1976-2010. El Área del Círculo es Proporcional a la Magnitud del Sismo; Círculos Grandes $M_w = 8.1$; Círculos Pequeños $5 < M_w < 8.1$ (Fuente: Harvard CMT Catalog; NEIC-USGS). Las Líneas Rojas Indican Los Patrones Sísmicos Señalados Por [33] [34].



La selección del segmento sur como región sismo-tectónica homogénea, también está asociada al hecho de que a esta región se le atribuye el evento tsunamigénico más grande registrado en la historia del Pacífico Colombiano, y se trata del sismo presentado en el año 1906 ($M_w=8.8$), donde se registra una longitud de ruptura significativa en comparación a otros eventos presentados en esta misma zona; este valor se sustenta con base en estudios de sismo-tectónica

desarrollados en el margen Colombo- Ecuatoriano [27][31] [14], y se representa por medio de la figura 57.

Figura 57.Rupturas de los Terremotos de 1942, 1958 y 1979 [32].



Pacífico Norte Colombiano:

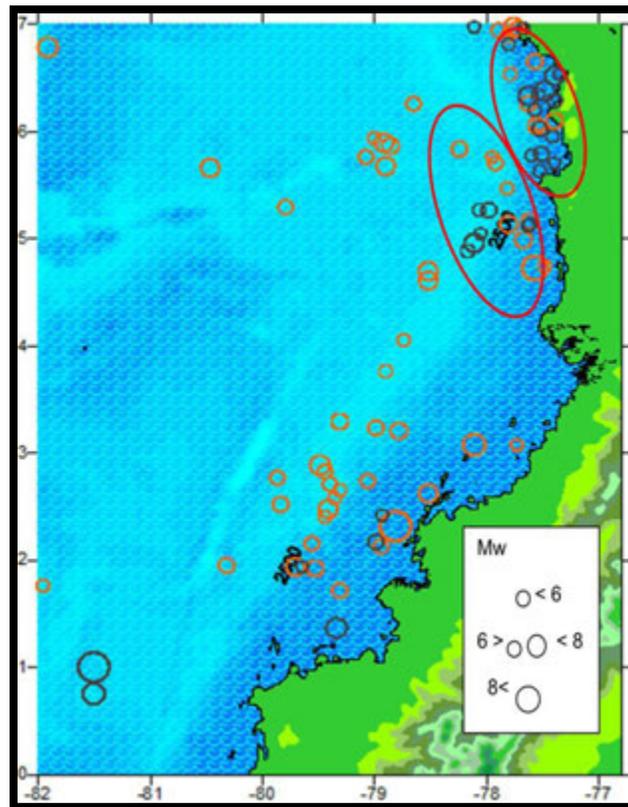
La actividad sísmica en la zona de la falla de Bahía Solano y de los segmentos asociados es reconocida, a lo largo de esta zona se registran varios eventos de magnitud importante, entre los que se destaca el sismo de 1970 (Mw=6.5) que destruyó en un 80% el municipio de Puerto Mutis (Bahía Solano) [35].

El 8 de Enero del 2003 se reportaron dos (2) sismos de magnitud $M_w = 5.5$ y $M_w = 4.8$ respectivamente. El sismo principal ocurrió al sur de Bahía Solano (al occidente de Bahía Utría), sobre una falla superficial de rumbo E-W y movimiento dextral, que sería la continuación continental de una zona de cizalla que segmenta la placa Nazca a esta latitud. La interpretación tectónica plantea que la subducción de la placa Nazca se ve frenada por colisión del bloque del Chocó con la franja continental, transmitiendo los esfuerzos (que resultan de la convergencia) a las dos placas y fracturándolas [36].

[37], plantean que en la esquina noroccidental en Suramérica, donde convergen las placas Caribe, Cocos, Nazca y Suramérica, existen regímenes compresivos, que generan fallas inversas y normales. Además, en la zona del extremo norte de la zona de subducción Nazca – Bloque Andino se encuentra la zona con mayor componente compresiva horizontal, frente al área del Golfo de Cúpica.

En la figura 58, se presenta la ubicación de los eventos obtenidos de los catálogos Harvard CMT y SISRA. Se pueden identificar dos zonas en la región norte del Pacífico colombiano, donde se concentra la mayoría de la actividad sísmica (círculos rojos).

Figura 58. Sismos Superficiales, de Magnitud $M_w > 5$. Bloque Norte Pacífico Colombiano [15].



De esta manera se identifican dos fuentes generadoras de tsunami, el primero corresponde al segmento Cabo Corrientes - Arusí y el segundo segmento, Arusí – Cabo Marzo. Aunque en la actualidad no se cuente con registros históricos de eventos tsunamigénicos destructivos para la zona, se recomienda no descartar la actividad sísmica de la falla de Bahía Solano.

2.2.3 Mecanismos de falla Dominantes

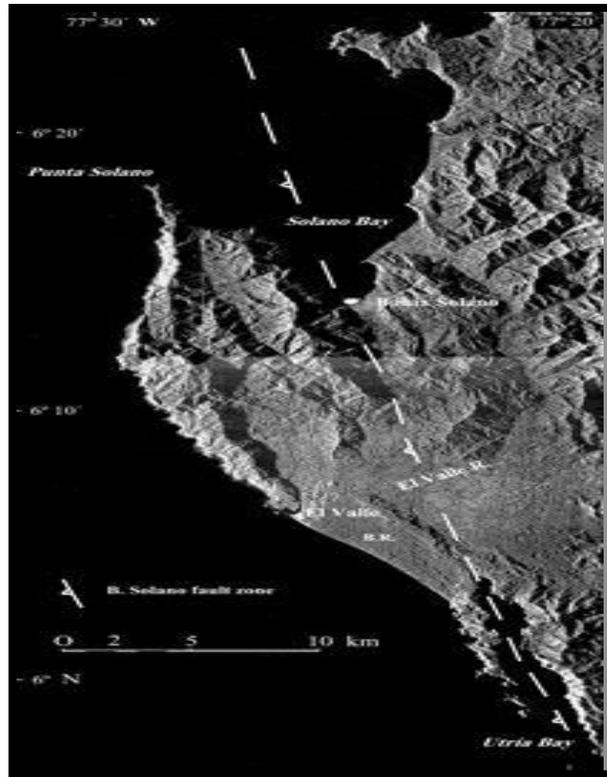
El mecanismo focal de un evento sísmico es una de las representaciones más útiles en la interpretación tectónica, y el análisis conjunto de mecanismos focales permite caracterizar el régimen actuante de una zona [26]. Como se mencionó en

los literales anteriores, el Pacífico Colombiano, se clasificó en dos regiones homogéneas, de acuerdo a su comportamiento sísmico, bloque norte y bloque sur. Estudios realizados por [37], evidencian que la zona de subducción (zona de acople interplaca), se caracteriza por presentar fallas inversas y fallas inverso direccionales. Así mismo, en esta zona sur del pacífico colombiano, donde la actividad sísmica se encuentra concentrada a profundidades entre 10 y 40 km [31], estudios de perfiles sísmicos obtenidos en el mar, señalan la existencia de un apilamiento sedimentario, deformado por fallamientos inversos, con convergencia al oeste y componentes de rumbo lateral izquierda [38]. Esta falla de subducción que se encuentra bajo el prisma de acreción del Pacífico, se caracteriza por tener un ángulo débil y es el responsable de la ocurrencia de los grandes sismos de subducción que se han registrado en la zona de Tumaco [35].

La región norte del Pacífico colombiano, corresponde a la serranía del Baudó, un bloque exótico acrecionado contra el continente durante el terciario superior [35], cuya fortaleza estructural de la morfología costera, es exhibida muy bien en la zona Bahía Solano-Bahía Utría (figura 59), donde los 8 Km de la depresión de la Bahía de Utría coinciden muy de cerca con la falla de Bahía Solano, la cual es una falla inversa con una velocidad de echado (slip) de 0.2 a 1 mm/año [39], responsable del sismo de septiembre 26 de 1970, de una magnitud de 6.5, que dejó a Ciudad Mutis parcialmente destruida y afectada por hundimientos de 20 a 30 cm como resultado del terremoto. Se reportaron por lo menos tres eventos de hundimientos costeros durante los últimos 800 años, probablemente asociados con terremotos de magnitud similar [40].

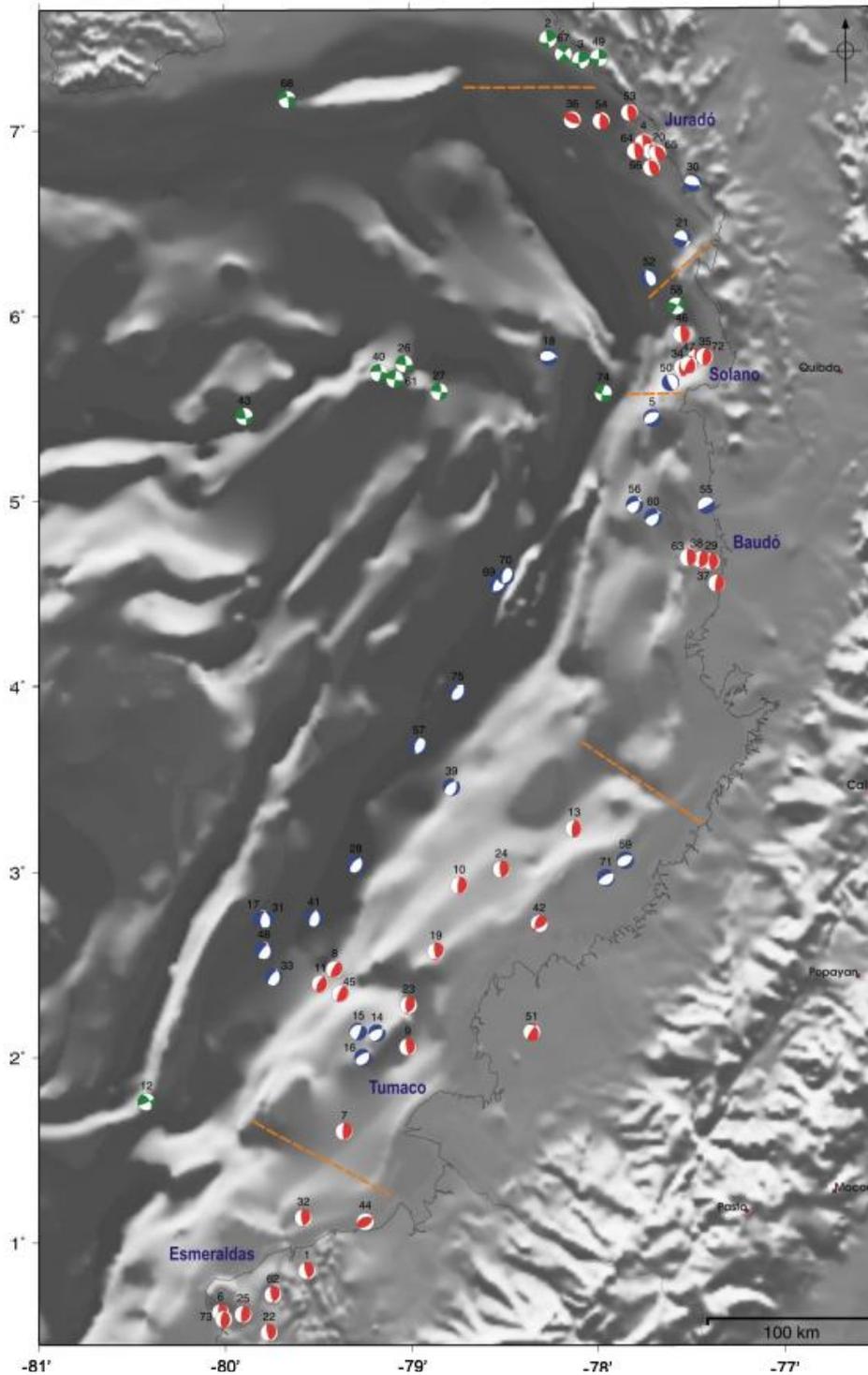
Figura 59. Imagen de Radar de Bahía Solano y Bahía Utría, Mostrando el Fuerte Control Estructural en la Morfología de la Costa y el Trazo de la Falla Inversa de Bahía Solano que Atraviesa la Bahía.

Fuente: Reproducido por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e INTERA Información Technologies (STAR-1 Radar).



En el catálogo de Harvard CMT (Centroid Moment Tensor), se encuentran disponibles 189 soluciones de planos de falla en el Pacífico [41]. En la figura 60, se exponen 75 eventos representativos con magnitudes $M_w \geq 5.0$, desde 1976 hasta 2008, identificando mecanismos de fallas presentes en el Pacífico Colombiano, a partir de los cuales se observa que tanto para la zona norte como sur, predominan mecanismos de falla de cabalgamiento superficial, con ángulo de buzamiento entre 10° y 30° [26]; y fallas normales [31].

Figura 60. Mecanismos Focales de Terremotos Asociados al Proceso de Subduccion Bajo El Occidente Colombiano Reportados en el Catalogo CMT de Harvard para el Periodo 1976-2008. Los Colores del Cuadrante en Extension del Mecanismo Focal Representan el Tipo de Movimiento: en Rojo los Inversos, en Verde los de Rumbo-Deslizantes y en Azul los Normales [26].



2.2.4 Magnitudes sísmicas y probabilidades de Ocurrencia

Desde los años 70, la sismología ha propuesto métodos de predicción a corto, mediano y largo plazo. Los métodos a mediano y corto plazo hacen uso de datos geofísico como las variaciones del campo magnético, del eléctrico, del campo gravimétrico, de las temperaturas del agua, presencia o no de eventos precursoros, patrones de sismicidad, contenido de radón, entre otros; mientras que los métodos a largo plazo consisten en identificar lagunas sísmicas, es decir, áreas que han tenido ausencia de sismos de gran magnitud durante las últimas décadas o siglos [16]. Los métodos a largo plazo, son los más confiables y han logrado una exitosa aplicación en zonas de convergencia de placas.

La interfaz de contacto entre dos placas, no tienen una distribución uniforme de energía y esfuerzos, sino que existen zonas donde hay una constante liberación de energía, dejando otras áreas con una mayor acumulación de energía (asperezas), donde se espera que ocurra el siguiente sismo [16]. A partir de lo anterior, [17] hace un análisis de tipo estadístico descriptivo e inferencial, con base a catálogos sísmicos actualizados, que permitan determinar la sismicidad en la costa Pacífica Colombina y estimar el periodo de retorno de los eventos sísmicos; y con ello inferir la ubicación geográfica de las lagunas sísmicas, las cuales han experimentado la ocurrencia de grandes sismos, pero a la fecha, después de haber transcurrido varias décadas, no se han repetido; situación que incrementa la probabilidad de dar origen a sismos de gran magnitud[17].

La metodología adoptada por [17], consiste en resolver la ecuación de frecuencia sísmica propuesta por Richter (1954), $\text{Log } N = a - b M$. Donde, **N** es el número de sismos, **b** es la pendiente que representa la proporción entre número de sismos grandes y pequeños en la zona, **a** es la ordenada en el origen a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de sismos; y **M** la magnitud del Momento (M_w); es decir, conocer el número de sismos para un determinado rango de magnitud que ocurren en una región durante un periodo de tiempo previamente establecido.

Para los eventos reportados durante los periodos del 1 enero de 1520 hasta 1 enero de 1973 y de 1 enero de 1973 hasta 15 de abril de 2013 de los catálogos de CERESIS (Ecuador) y USGS (U.S.A.), respectivamente. De cada año, se extrajo el sismo de mayor Magnitud de Momento (M_w) y se clasificaron en dos zonas: desde 0°N hasta 4°N , abarcando desde la Costa del Ecuador hasta la Costa sudeste del Pacífico Colombiano y desde 0°N hasta 7.5°N , abarcando desde la Costa del Ecuador hasta la Costa de Panamá, cuya distribución en el tiempo se muestra en las siguientes figuras (figura 61-62, respectivamente).

Figura 61. Variación de Sismo Máximo Anual para el Pacífico Colombiano Data (1520-15 Abril 2013, CERESIS, USGS) Latitud 0 ° a 4 °.

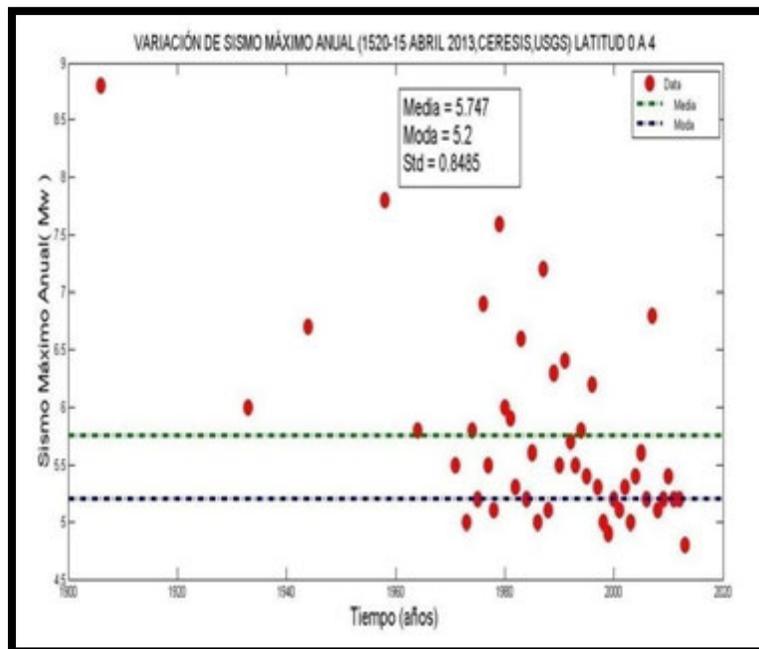
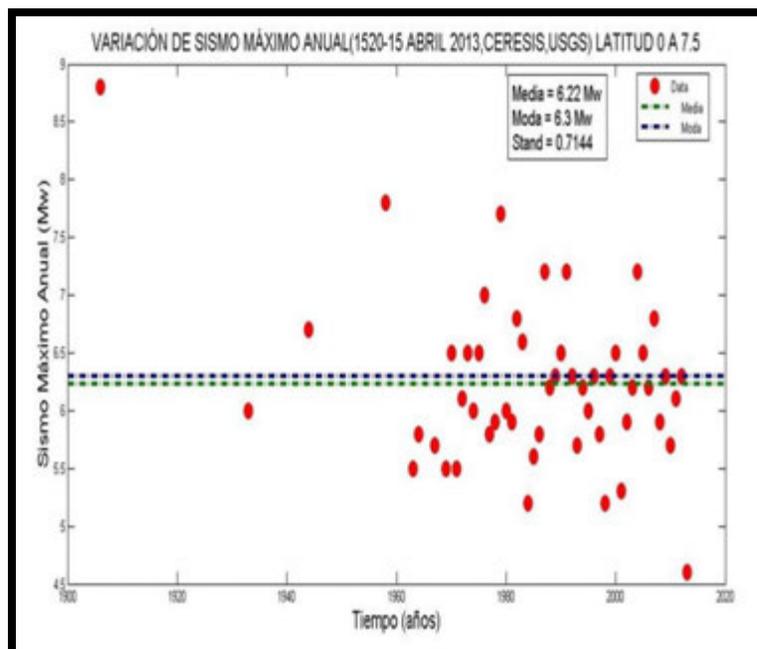


Figura 62. Variación de Sismo Máximo Anual para el Pacífico Colombiano Data (1520-15 Abril 2013, CERESIS, USGS) Latitud 0 ° a 7.5 °.



Para establecer la probabilidad de no excedencia de un sismo de magnitudes más grande que M , en un año, se calcula la distribución de Gumbel Tipo I $G(M) = e^{-\alpha e^{-\beta M}}$. Donde M es la magnitud del sismo, α y β son parámetros de la ecuación de Gumbel tipo I [42].

La relación existente entre las ecuaciones de Gutenberg – Richter y la distribución de Gumbel, se define mediante las siguientes expresiones [43].

$$\alpha = 10^a (1)$$

$$\beta = b / \text{Log}e (2)$$

$$N = \alpha e^{-\beta M} = -LNG (3)$$

Con los valores de a y b obtenidos mediante la Ecuación Gutenberg – Richter en cada zona y utilizando las ecuaciones (1) y (2) se obtienen los dos parámetros de Gumbel tipo I. Se han utilizado las siguientes fórmulas para el cálculo de riesgo sísmico y el periodo de retorno [43].

$$N = \alpha e^{-\beta M} (4)$$

El Riesgo Sísmico ($R(M)$), para un periodo de 1, 25, 50,75,100, 125, 150 añoses, $R1(M)$, $R25(M)$, $R50(M)$, $R75(M)$, $R100(M)$, $R125(M)$ y $R150(M)$ respetivamente, con su correspondiente periodo de retorno (τ_r), se muestra en la tabla XXIV , y se graficó la magnitud contra periodo de retorno (Figuras 63-64)para las zonas establecidas.

Tabla XXIV. Probabilidades de Sismos para Diferentes Magnitudes (Mw) y Diferentes Periodos en Latitud 0 ° a 4 °.

Mw	N(M)	Tr (años)	R1(M)	R25(M)	R50(M)	R75(M)	R100(M)	R125(M)	R150(M)
4.8	1,81970	0,54954	0,83792	1	1	1	1	1	1
4.9	1,60324	0,62373	0,79875	1	1	1	1	1	1
5.0	1,41253	0,70794	0,75647	1	1	1	1	1	1
5.1	1,24451	0,80352	0,71191	1	1	1	1	1	1
5.2	1,09647	0,91201	0,66595	1	1	1	1	1	1
5.3	0,96605	1,03514	0,61941	1	1	1	1	1	1
5.4	0,85113	1,17489	0,5730	0,99999	1	1	1	1	1
5.5	0,74989	1,33352	0,5275	0,99999	1	1	1	1	1
5.6	0,66069	1,51356	0,48350	0,99999	1	1	1	1	1
5.7	0,58210	1,71790	0,44127	0,99999	1	1	1	1	1
5.8	0,51286	1,94984	0,40122	0,99999	1	1	1	1	1
5.9	0,45185	2,21309	0,36355	0,99998	1	1	1	1	1
6.0	0,39810	2,51188	0,32840	0,99995	0,99999	1	1	1	1
6.2	0,30902	3,23593	0,26584	0,99955	0,99999	1	1	1	1
6.3	0,27227	3,67282	0,23835	0,99889	0,99999	0,99999	1	1	1
6.4	0,23988	4,16869	0,21328	0,99751	0,9999	0,99999	1	1	1
6.6	0,18620	5,37031	0,16989	0,99048	0,99990	0,99999	0,9999	1	1
6.7	0,16405	6,09536	0,15130	0,98345	0,99972	0,99999	0,9999	0,9999	1
6.8	0,14454	6,91830	0,13458	0,97304	0,99927	0,99998	0,9999	0,99999	1
6.9	0,12735	7,85235	0,11957	0,95857	0,99828	0,99992	0,9999	0,99999	0,9999
7.2	0,08709	11,4815	0,08341	0,88666	0,98715	0,99854	0,9998	0,99998	0,9999
7.6	0,05248	19,0546	0,0511	0,73072	0,92749	0,98047	0,9947	0,99858	0,9996
7.8	0,04073	24,5470	0,039	0,6388	0,869	0,952	0,9829	0,9938	0,9977
8.8	0,01148	87,0963	0,01141	0,24951	0,43677	0,5773	0,6827	0,76193	0,8213

Figura 63. Magnitud (Mw) Contra Periodo de Retorno Latitud 0 ° a 4 °.

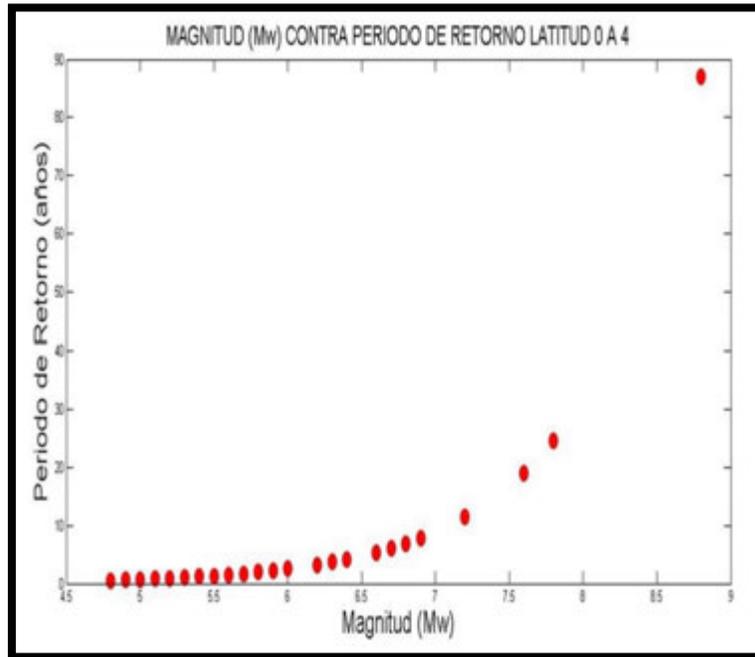
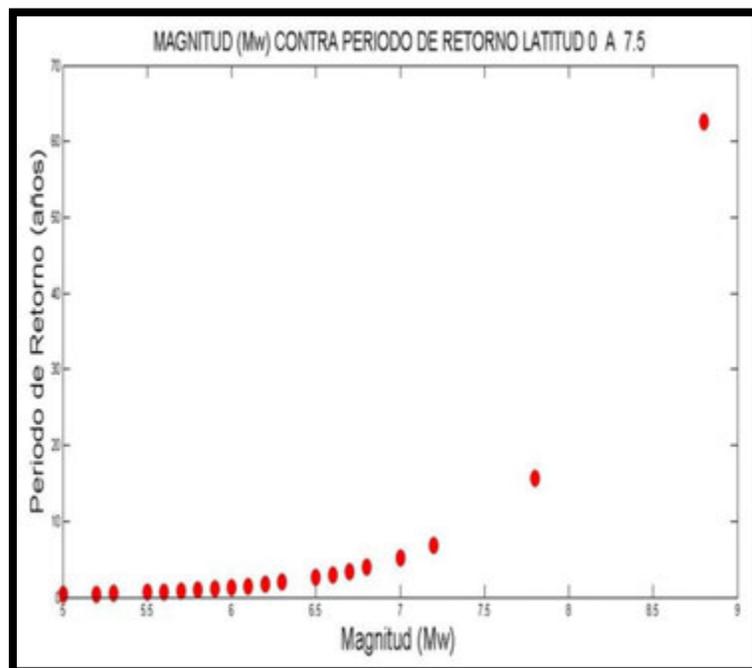


Figura 64. Magnitud (Mw) Contra Periodo de Retorno Latitud 0 ° a 7 °.



A partir del análisis anterior, se puede concluir que mediante la Estadística de Valores Extremos, utilizando la Ecuación de Gumbel tipo I, se obtuvieron los tiempos de retorno para diferentes Magnitudes, en un espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de Magnitud 7.8 Mw es del 99% con periodo de retorno de 15.65 años en las latitudes de 0°N a 7.5°N. En el mismo espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw es del 98% con periodo de retorno de 24.54 años en las latitudes de 0°N a 4°N [17].

2.2.5 Definición Sismos Precursores

Para la definición del escenario sísmico extremo de generación de tsunamis en la zona Sur del Pacífico colombiano, se tomó como referencia los parámetros macrosísmicos reportados para el sismo ocurrido en 1906 en la zona de subducción Colombo-Ecuatoriana [12] [13][14][15][44]. El parámetro de la fuente sísmica que más estrechamente se relaciona con su potencial tsunamigénico es el momento sísmico M_0 [45], que cuantifica la energía sísmica liberada. Para el caso en estudio se calcula el Momento Sísmico, a partir de la siguiente relación propuesta en [46], ecuación (5).

$$\text{Log } M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (5)$$

Según [47] la magnitud de momento máxima para el segmento sur de la zona de subducción Colombo - Ecuatoriana es de $M_w = 8.8$ que coincide con el valor reportado en [12] [13] [14] [15] [44]. Para el evento de 1906, valor que a su vez se

sustenta con base en estudios de prospección geofísica y sísmica desarrollados en el margen Colombo- Ecuatoriano [27] [34]. A partir de (5) se establece un Momento Sísmico de $2.0 \times 10^{22} \text{ Nm}$, el cual es igual al valor de momento sísmico reportado por [14].

Con el valor de Momento Sísmico se calculó el desplazamiento vertical utilizando la relación de momento sísmico [45].

$$M_0 = \mu D A \quad (6)$$

Dónde: μ , representa la rigidez del medio aproximadamente igual a $3.7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ reportado por [48]. D , representa el desplazamiento medio vertical en m y A , el área desplazada en unidades de km^2 .

Tomando como área de ruptura 67500 Km^2 [44], corroborado por las relaciones empíricas propuestas por [49], las cuales permiten obtener aproximaciones con un alto grado de confiabilidad según [15] [50]. La longitud y ancho de la falla serían $L = 581 \text{ Km}$ y $W = 116 \text{ Km}$. Lo que permite deducir a partir de (6), un desplazamiento vertical promedio de $D = 8.06 \text{ m}$, para un evento sísmico de $M_w = 8.8$.

Para el caso del tsunami de 1979, cuya magnitud de momento $M_w = 7.9$, el momento sísmico fue de $9.02 \times 10^{20} \text{ N m}$, [51], con una longitud de ruptura (L) de 180 Km , y desplazamiento vertical promedio de la falla fue de 5 metros [52]. En cuanto a los mecanismos focales, el sismo de 1979 tuvo como características focales un rumbo (Strike) de 31° , un ángulo de buzamiento (Dip) de 16° , una dirección de buzamiento (rake) de 118° y una profundidad (h_0) de 26.6 Km [53].

Además, los trabajos realizados por [27][53] [54]muestran que los mecanismos focales para los eventos sísmicos de 1906, 1942 y 1958, que dieron origen a tsunamis, fueron similares a los del evento de 1979. A su vez el Servicio Geológico Colombiano SGC [13], establece como mecanismo focales (rumbo/ángulo de buzamiento/dirección de deslizamiento: $31^{\circ}/25^{\circ}/129^{\circ}$), para el sismo de 1906.

Con base en los rangos de variación de los parámetros geométricos, en estudios sobre tsunamis históricos ocurridos en el Litoral Pacífico colombiano [31] [27] [52], estudios de prospección geofísica y sísmica desarrollados en el margen Colombo-Ecuatoriano [27] [34], y reporte históricos de catálogos [55]. Se propone para la Zona de Subducción dos (2) escenarios sísmicos extremos precursores de tsunami (E1, y E2), con características similares al evento de 1906. El escenario E2 es idéntico al reportado por el SGC[13], calculando un promedio en la Dislocación basados en la ecuación (6).

También se tomó como referente para la definición del escenario sísmico la profundidad del sismo de 1979 ($h = 20.0$ km) [13][54].

La tabla XXV muestra los parámetros de los sismos, para los dos escenarios extremos de generación de tsunami.

Tabla XXV. Escenarios Sísmicos Precursores de Tsunami en la Zona De Subducción.

Parámetros	Escenarios	
	E1	E2
Dislocación (m)	8.06	8.4
Longitud (Km)	581	500
Ancho (Km)	116	120
Strike (°)	31	31
Dip (°)	25	25
Rake (°)	129	129
Profundidad (Km)	20	20
Magnitud (Mw)	8.8	8.8

Las tablas XXVI y XXVII, presentan los parámetros de los escenarios sísmicos extremos de generación de tsunamis para el norte del Pacífico colombiano, basados en el trabajo realizado por [40].

Tabla XXVI. Escenario Sísmico Extremo Creíble para el Segmento Cabo Corrientes-Arusi.

Parámetros	Escenario
	E3
Dislocación (m)	4
Longitud (Km)	140
Ancho (Km)	70
Strike (°)	21
Dip (°)	11
Rake (°)	114
Profundidad (Km)	16
Magnitud (Mw)	7.92

Tabla XXVII. Escenario Sísmico Extremo Creíble para el Segmento Arusi– Cabo Marzo.

Parámetros	Escenario
	E4
Dislocación (m)	4.2
Longitud (Km)	147
Ancho (Km)	73
Strike (°)	349
Dip (°)	14
Rake (°)	53
Profundidad (Km)	15
Magnitud (Mw)	7.96

3.3 ACONDICIONAMIENTO DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA Y ALTIMÉTRICA

La información base corresponde a los parámetros de entrada que se deben introducir al ejecutar el modelo numérico. Para el caso en estudio, esta información debe ser batimétrica, altimétrica y de mareas; y su acondicionamiento consiste en el análisis, filtrado y organización de la información, con el fin de formar los archivos generadores que permitirán la obtención de cada una de las mallas de trabajo.

La información batimétrica correspondiente al Litoral Pacífico Colombiano fue suministrada por el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP), el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) y la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO) por sus siglas en inglés) a la cual DIMAR aporta información, la resolución de la información llega hasta los 15m en las zonas donde se evalúa la inundación del tsunami. A esta información es necesario realizarle en primera instancia, un filtrado que permita extraer las zonas de interés y esto a su vez garantice

eficiencia en los procesos a emplear. En segundo lugar se debe tener en cuenta el MLWS (por sus siglas en inglés, Mean Low Water Spring) de cada zona de estudio, esto con el fin de llevar a un mismo nivel de referencia todos los datos, (apartado 1.4)[56].

En cuanto a la información topográfica, la Dirección General Marítima cuenta con datos basados en técnicas Light Detection And Ranging (LIDAR por sus siglas en inglés). Esta nube de puntos, es almacenada en un fichero digital conforme al formato estándar **LAS** que contiene para cada punto sus coordenadas (x, y, z), número de retorno, intensidad, tiempo de captura, ángulo de escaneo, así como una clasificación. La clasificación es un proceso que se realiza a posteriori y permite al usuario final disponer de una categorización de cada punto con base a su naturaleza (Suelo, vegetación, construcción, etc.)[57]. Para el caso en cuestión, se utilizan software geográficos (ArcGis 10.1 y MARS 8.0), para extraer el retorno de suelo, el cual permite introducir en el modelo, información sobre las alturas del terreno bajo estudio. Adicionalmente, estas herramientas geográficas son utilizadas para llevar la información altimétrica a alturas ortométricas y realizar una proyección de ésta a coordenadas geográficas, requeridas por el modelo numérico.

A continuación se plasma en las figuras 65 a 68 la información batimétrica y altimétrica acondicionada, que corresponde a las zonas de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco.

Figura 65. Información Batimétrica Correspondiente alas Zonas de Juanchaco yBuenaventura.

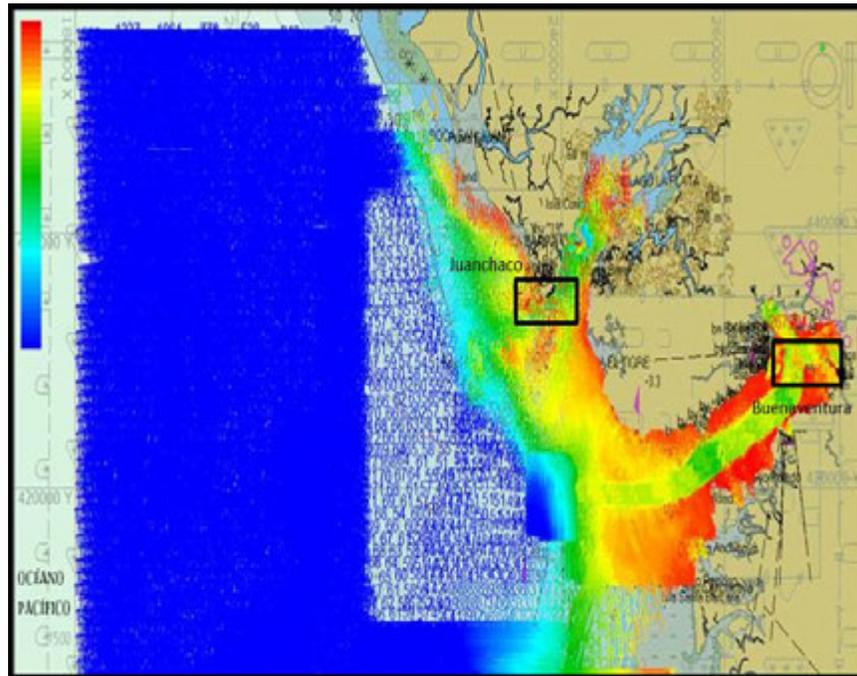


Figura 66. Información Batimétrica Correspondiente alas Zonas de Salahonda, CurayyTumaco.

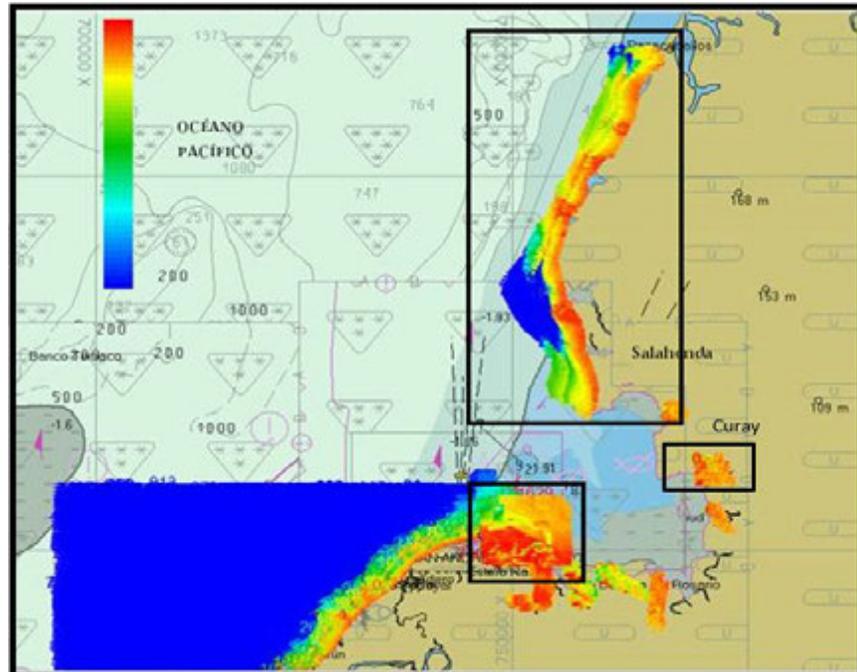


Figura 67. Información Topográfica Correspondiente alas Zonas de Salahonda, Curay y Tumaco.

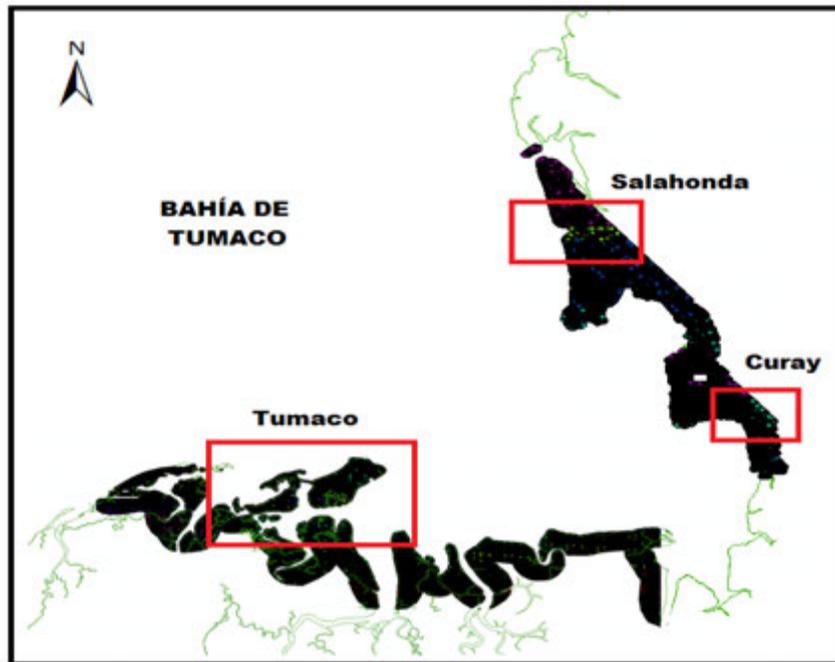
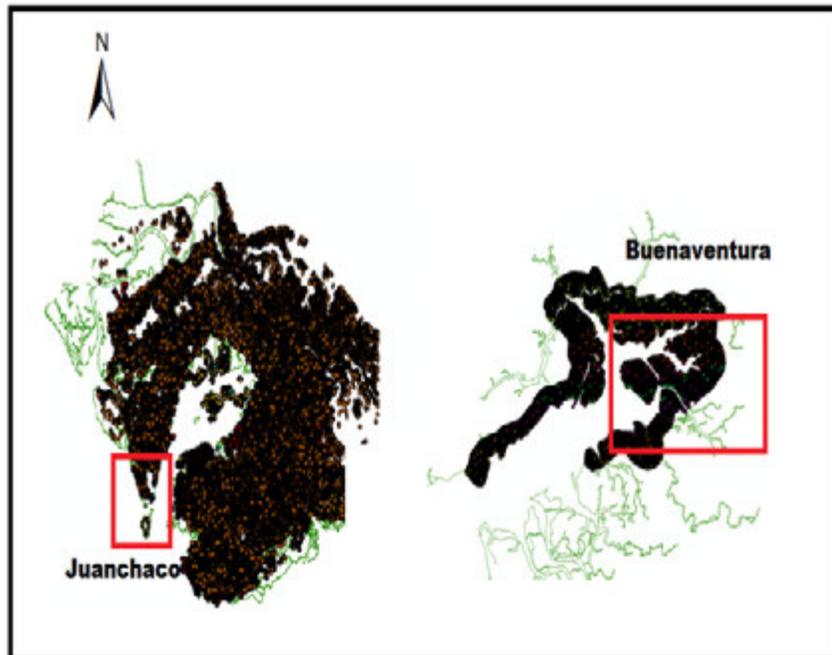


Figura 68. Información Topográfica Correspondiente alas Zonas de Juanchaco y Buenaventura.



2.3.1 Generación y Acondicionamiento de los Dominios de Cálculo

Para obtener resultados acordes a la realidad a partir de modelos numéricos de tsunami, se requiere generar y acondicionar de una manera precisa el dominio sobre el cual el modelo realizará la generación, propagación e inundación del tsunami. Para tal fin se recurrió a la siguiente metodología.

Generación de dominios de cálculo

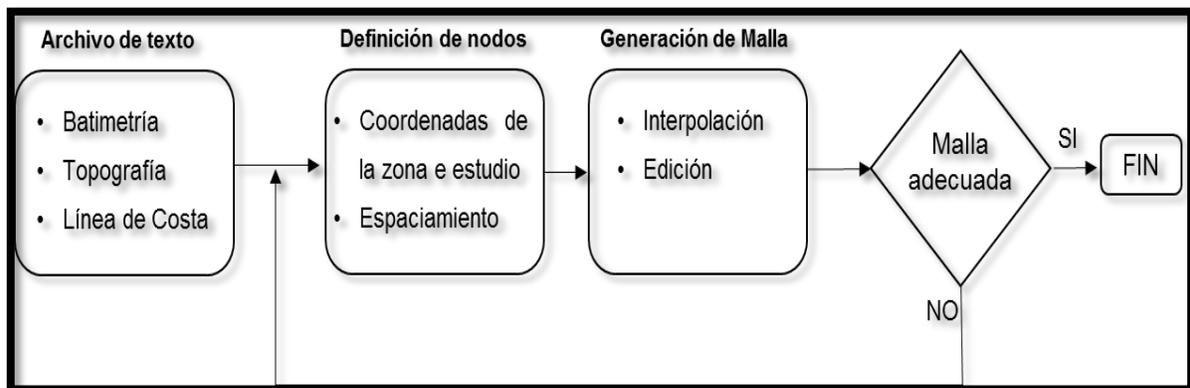
Para la generación de los dominios de cálculo, se hace uso de algoritmos y herramientas computacionales (Matlab, Surfer y ArcGis), que permiten unificar toda la información topo-batimétrica y la línea de costa en un archivo que contiene características específicas para toda la información, y además con un formato compatible con el modelo numérico a utilizar. Todo esto con el fin de construir utilizando el método de interpolación geoestadístico *kriging*[58], las mallas de cálculo según las necesidades del modelo, garantizando un dominio con información suficiente y espaciamiento uniforme, y que represente de manera adecuada la realidad.

Acondicionamiento de dominios de cálculo

Con el objetivo de generar dominios computacionales lo más reales posibles, y teniendo en cuenta que los procesos de interpolación no son exactos, es necesario verificar si las mallas generadas están acorde a la realidad. Para ello, se analizan cuidadosamente los dominios y de ser necesario se recurre a ediciones manuales basadas en conocimientos de campo, cartas náuticas, ortofotografías e

información base de la zona de interés, con el fin de corregir los posibles "**saltos**" que se puedan presentar en el proceso de interpolación y con ello garantizar que los resultados de la modelación sean más confiables. A continuación (figura 69) se muestra el proceso que se realiza desde la generación, hasta el acondicionamiento de las retículas computacionales.

Figura 69. Diagrama de Generación de Dominios de Cálculo.



El resultado de los procesos de acondicionamiento y validación de las mallas de cálculo se presenta en las figuras 70 a 74.

Figura 70. Malla de Detalle para la Zona de Tumaco.

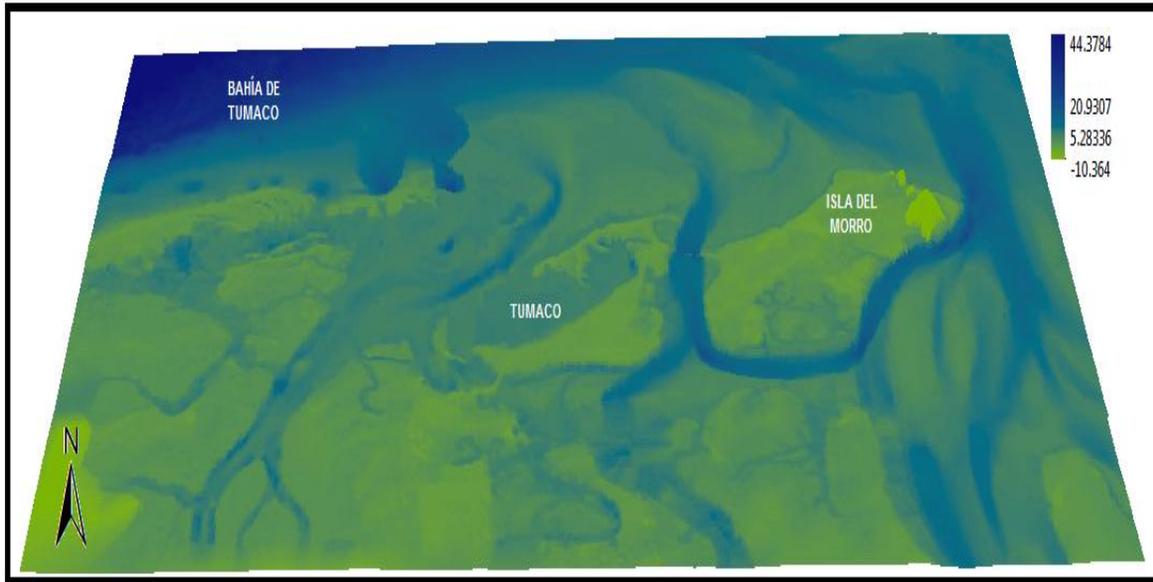


Figura 71. Malla de Detalle para la Zona de Buenaventura.

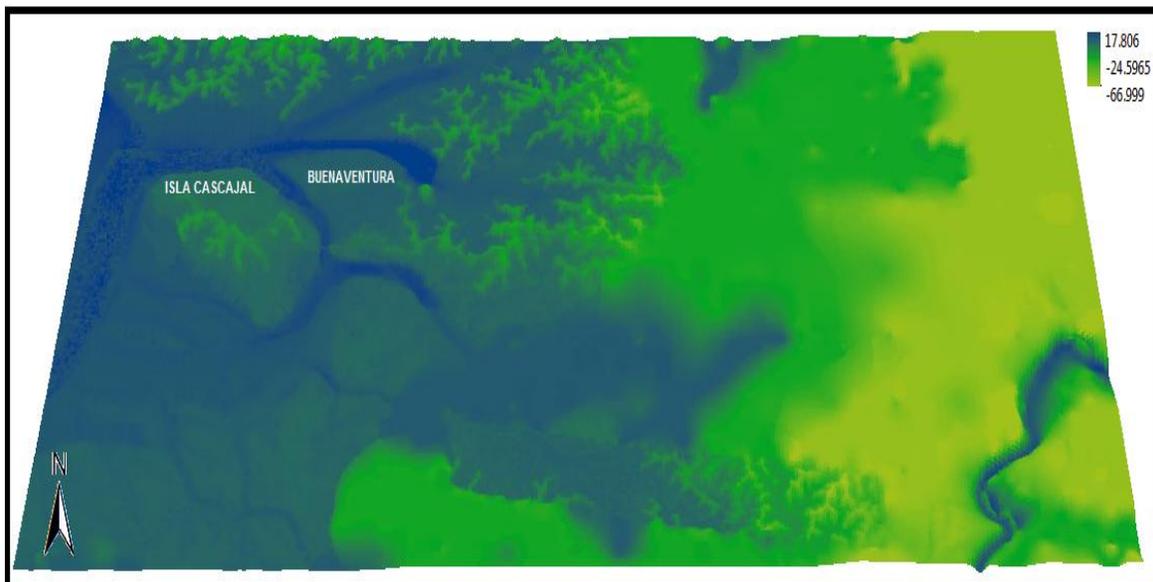


Figura 72. Malla de Detalle para la Zona de Juanchaco.

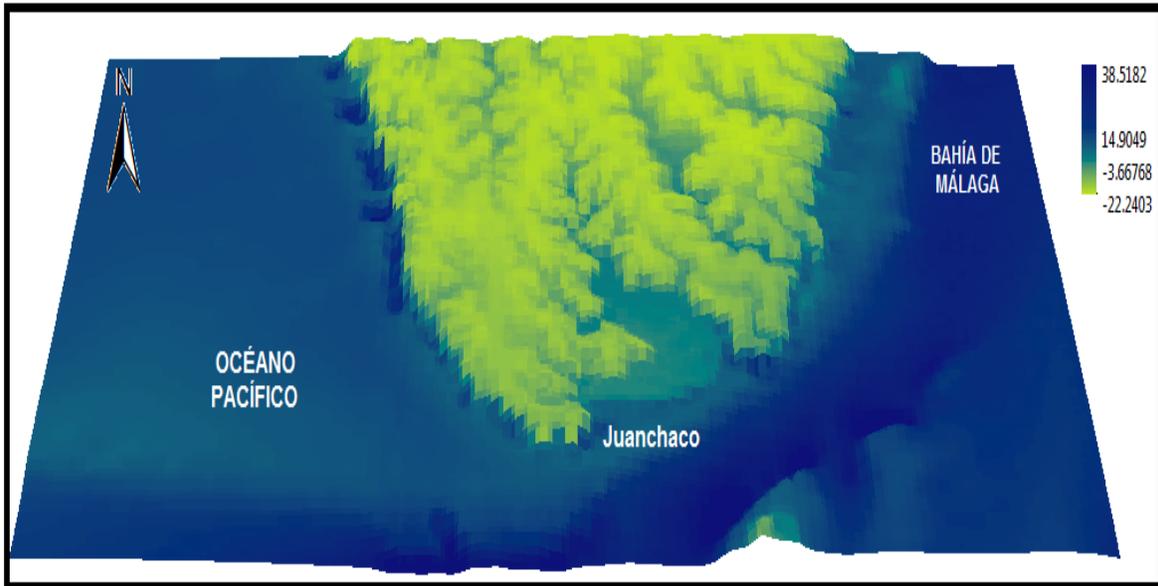


Figura 73. Malla de Detalle para la Zona de Curay

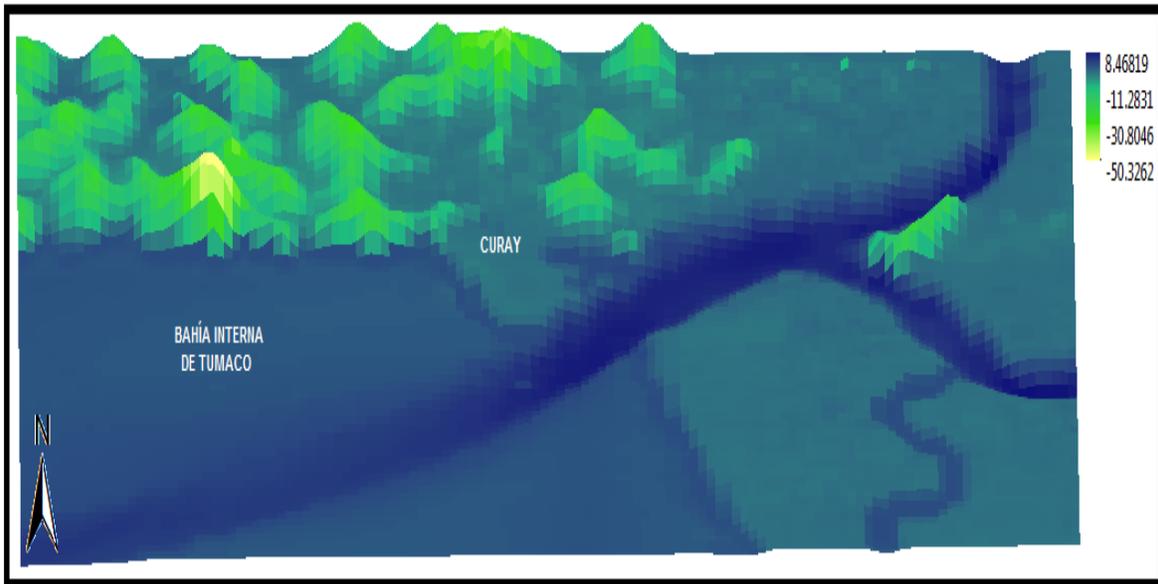
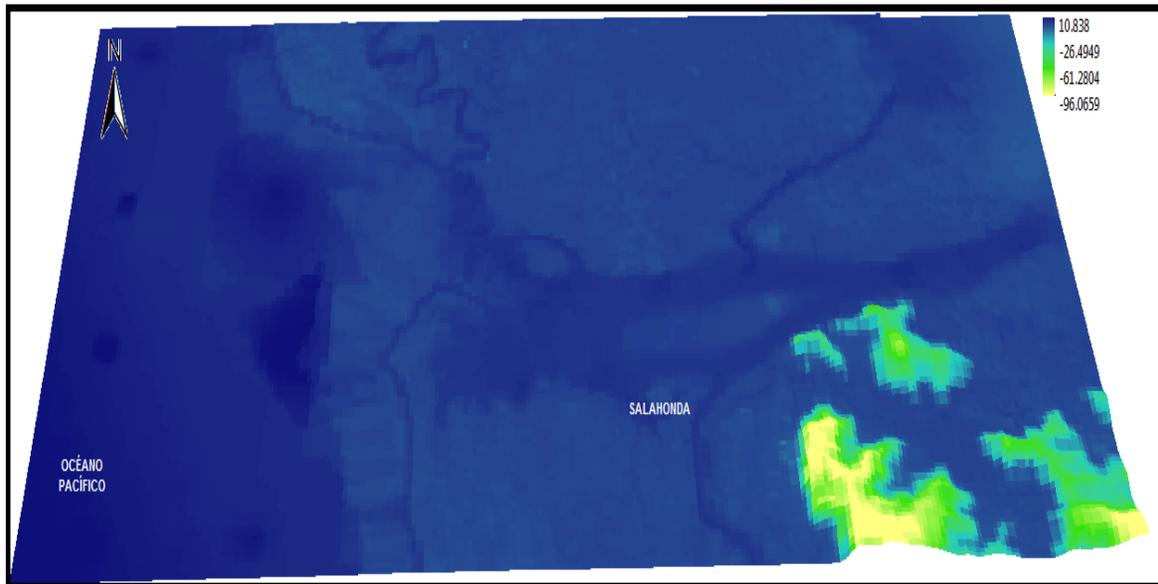


Figura 74.Malla de Detalle para la Zona de Salahonda



3.4 APLICACIÓN MODELOS DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE ONDAS DE TSUNAMI

Es importante tener claro, cuál es el papel fundamental que cumplen los modelos numéricos en este tipo de aplicaciones. El modelo simula las etapas de un tsunami, desde su generación, propagación e inundación o “runup/rundown” en las regiones costeras. El software que se usó fue el COMCOT V1.7 (Cornell multi-grid Coupled Tsunami Model), desarrollado por Yongsik Cho y SN Seo, basado en el trabajo teórico y numérico de [59] y [60].

El COMCOT adopta esquemas de diferencias finitas para resolver ecuaciones de aguas someras tanto en coordenadas esféricas como en cartesianas. Permite una jerarquización de mallas de hasta doce niveles, que mediante una correcta predisposición permiten obtener resultados bastante exactos. Este modelo ha sido utilizado para la investigación de eventos históricos de tsunamis, como son el

tsunami chileno en 1960 [61], el de islas Flores en Indonesia en 1992 [62] y el del océano indico en 2004 [63]. Para el desplazamiento de la superficie del agua se asume la misma perturbación que para la deformación del fondo del mar, siempre y cuando el movimiento de elevación sea mucho más rápido que la propagación de las ondas, de lo contrario, el modelo debe incluir efectos transitorios [64].

Cuando una onda gravitacional larga se propaga sobre el fondo oceánico no uniforme, los cambios de profundidad y refracción, pueden tener un efecto transformador en la onda. Consecuencia de los cambios batimétricos, la onda cambia su amplitud y longitud de onda, permitiéndole conservar la masa y el momento. En una onda larga como lo es un tsunami, la dispersión de frecuencia puede considerarse nula, cuando la longitud de onda es del orden de 100 km en aguas profundas, es decir, es considerablemente mayor que la profundidad del agua [65]. Por lo tanto, el enfoque habitual para describir la evolución del tsunami es tomar cualquiera de los modelos de aguas someras no lineales o lineal como las ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Física gobernante

Las ecuaciones no lineales superficiales incluyendo efectos de fricción de fondo en forma conservadora son:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \tau_x = 0,$$
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \tau_y = 0,$$

En el cual ζ es la superficie de elevación, h es la profundidad del agua todavía, $H = h + \zeta$ es la profundidad total del agua, y M, N son el flujo del volumen en las direcciones x, y , definido respectivamente como Hu y Hv . Los términos fricción del fondo τ_x, τ_y en las ecuaciones de momento son aproximadamente en COMCOT a través de la fórmula de Manning:

$$\tau_x = \frac{gm^2}{H^{7/3}} M(M^2 + N^2)^{1/2},$$

$$\tau_y = \frac{gm^2}{H^{7/3}} N(M^2 + N^2)^{1/2},$$

Donde m es el coeficiente de rugosidad relativo Manning. Se debe considerar que la ecuación anterior se establece en el modo no lineal; la solución lineal deja de lado los términos de convección en las ecuaciones de momento, y sí incluye la fuerza de Coriolis cuando se resuelve en coordenadas esféricas.

Esquema numérico

El esquema numérico empleado por COMCOT es la explicación del método de diferencias "salto de rana". Los términos no lineales en el modelo son aproximaciones con diferencias finitas, utilizando un esquema numérico estable y robusto, aunque es posible que sea susceptible a errores numéricos de dispersión y disipación. Para generar el tsunami de un terremoto submarino, COMCOT utiliza el modelo de falla de Okada (1985). Las principales hipótesis de este modelo son un plano de falla rectangular dentro de una deformación elástica. El modelo predice la deformación del fondo marino, lo que corresponde directamente a la deformación inicial de la superficie libre del agua, siendo capaz de propagar la perturbación inicial a través de los océanos. En aguas poco profundas es posible usar las ecuaciones lineales siempre y cuando la altura de la ola de tsunami sea una fracción muy pequeña de la profundidad, prácticamente menos de $1/25$ – $1/50$. Cuando se supera este umbral, se requiere la versión no lineal para obtener resultados más precisos.

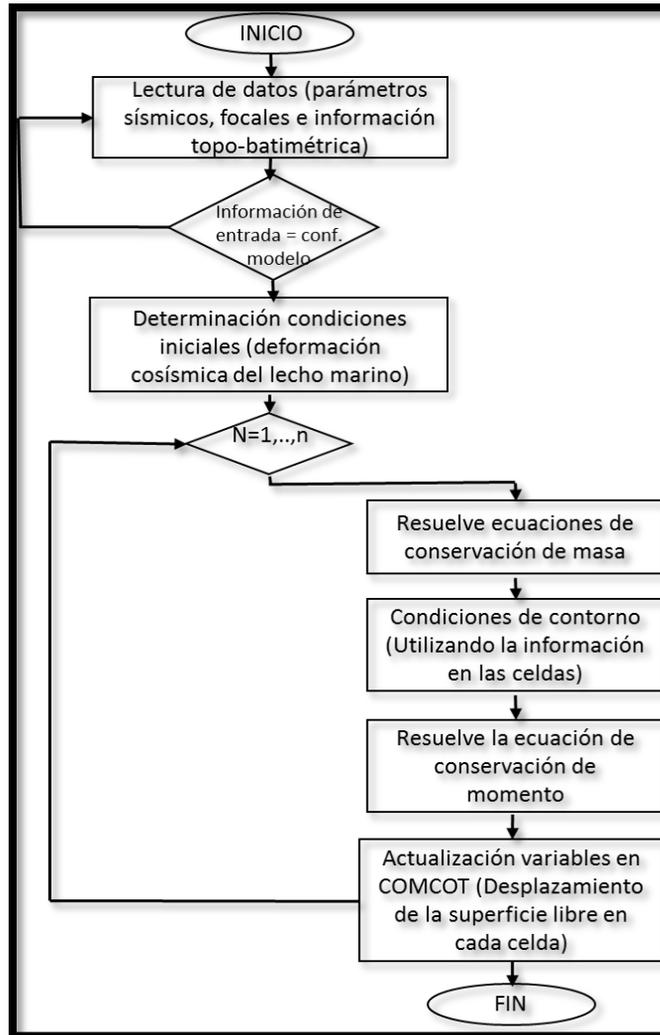
Para el run-up, COMCOT utiliza un simple pero preciso algoritmo de línea de costa móvil. Cuando el nivel del agua supera la cota de la "escalera", las inundaciones de agua "pasan" y la costa se mueve hacia la tierra (la inundación).

Parámetros de entrada

El modelo COMCOT, se usará para estudiar los tsunamis de origen tectónico, originados por un sismo en el fondo marino. Para este tipo de tsunamis el modelo

debe ser alimentado con una serie de parámetros propios del sismo, como son la longitud, el ancho y el área de la falla, la profundidad del hipocentro con respecto a la Tierra, los mecanismos focales (strike, dip y slip), además de la batimetría y topografía propia del lugar. Esta información suministrada al modelo, es comparada para ver si coincide con la configuración previa que se le hace al modelo. En caso de ser una respuesta afirmativa, el modelo genera las condiciones iniciales de deformación del lecho marino, y continúa desarrollando las ecuaciones de conservación de masa y momento para cada uno de los nodos de los dominios de cálculo. Si la respuesta es negativa, es necesario revisar la información de entrada y volver a introducirla al modelo. Como salida se obtiene el desplazamiento de la superficie libre en cada una de las celdas (figura 75).

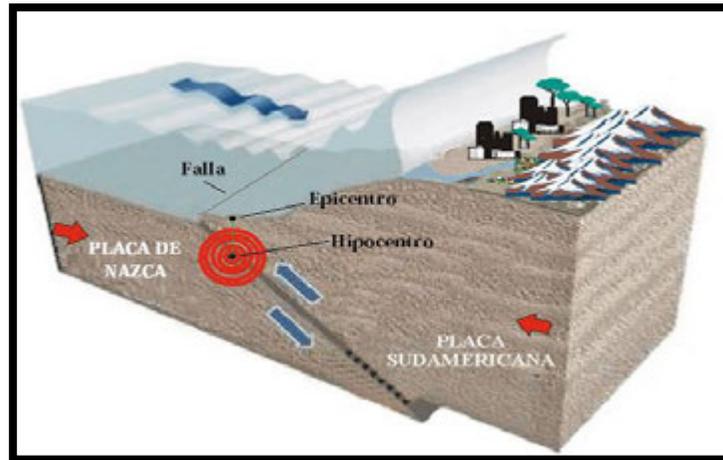
Figura 75. Diagrama de Flujo Funcionamiento COMCOT



2.4.1 Generación Ondas de Tsunami: Simulación numérica para evaluar el desplazamiento vertical cósmico del lecho marino.

Cuando el borde frontal de la placa superior se libera por la tensión ejercida por la placa inferior en la zona de subducción, se genera un desplazamiento vertical del lecho marino (sismo), quien a su vez desplaza la columna de agua, dando origen a un tsunami, este evento se representa en la figura 76.

Figura 76. Representación de una Falla Sísmica Sobre la Zona de Subducción.



Haciendo uso de técnicas de simulación numérica es posible representar esta deformación inicial o desplazamiento vertical cosísmica del lecho marino, al simular un evento precursor de tsunami. Esta simulación se realizó utilizando el modelo de deformación elástica propuesto por Okada[50], el cual es integrado en el modelo numérico COMCOT de simulación de tsunami [1]. Las figuras 77-78 presentan la afectación cosísmica para los escenarios E1 y E2, los cuales se generan en la zona de subducción, las figuras 79-80 presentan la deformación para los escenarios E3 y E4; y las figuras 81-82 presentan la superposición de la deformación producidas por los escenarios E1 y E2, y la figura que esquematiza el área de afectación del sismo de 1906 reportada por [32] en Google Earth; asimismo las figuras 83-84, muestran la superposición de la deformación producidas por los escenarios E3 y E4 con la sismicidad de la tierra reportada por [66]; donde se puede concluir que la zona afectada por estos escenarios es congruente, comparado con lo reportado por la literatura [32], las figuras superpuestas fueron realizadas aplicando técnicas de georreferenciación con errores de +/- 0.5. Los

niveles de deformación vertical del lecho marino están medidos en metros, teniendo en cuenta que en la zona donde se encuentra la ruptura se genera un mayor desplazamiento.

Figura 77. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E1.

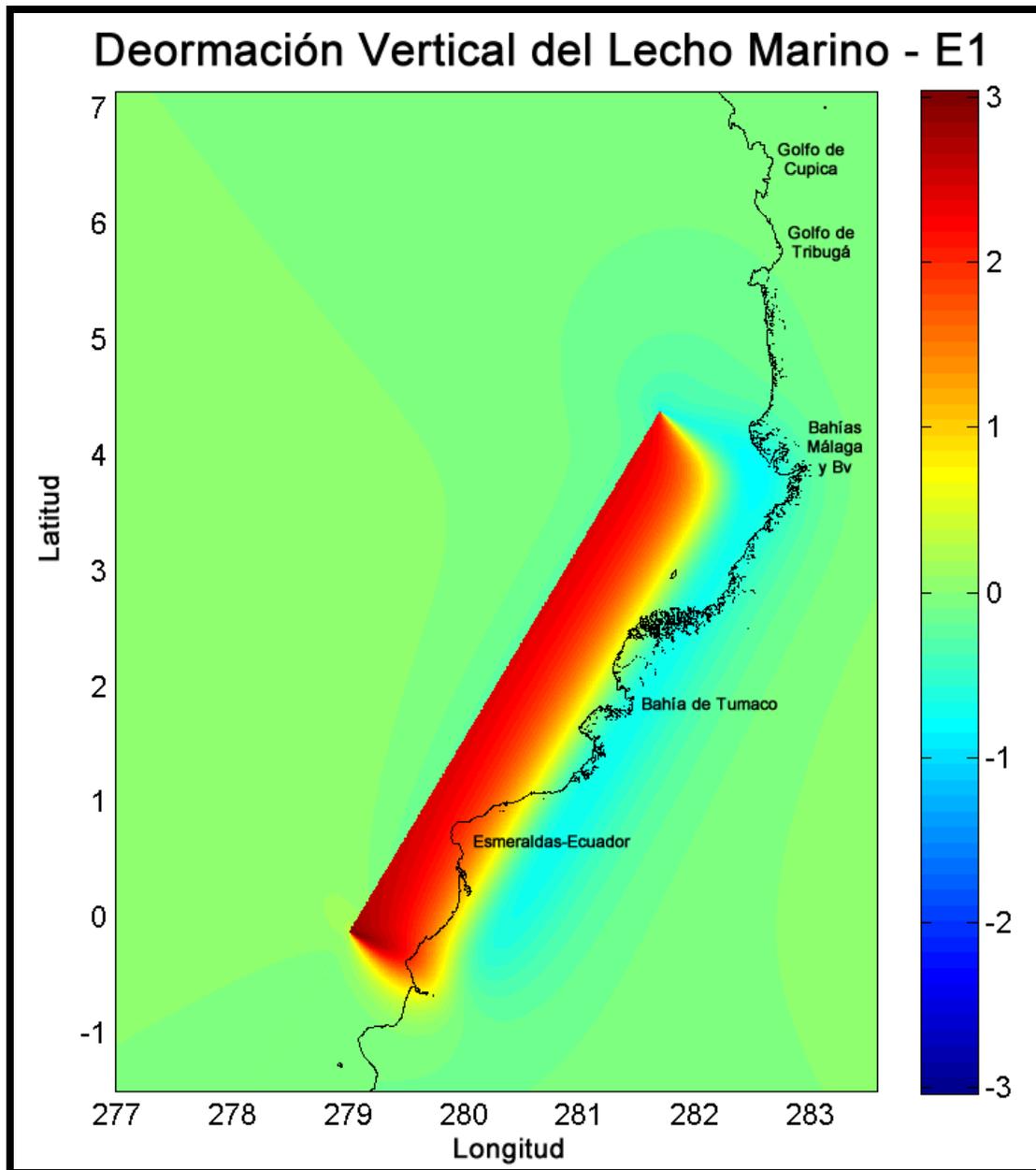


Figura 78. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sismico E2-SGC.

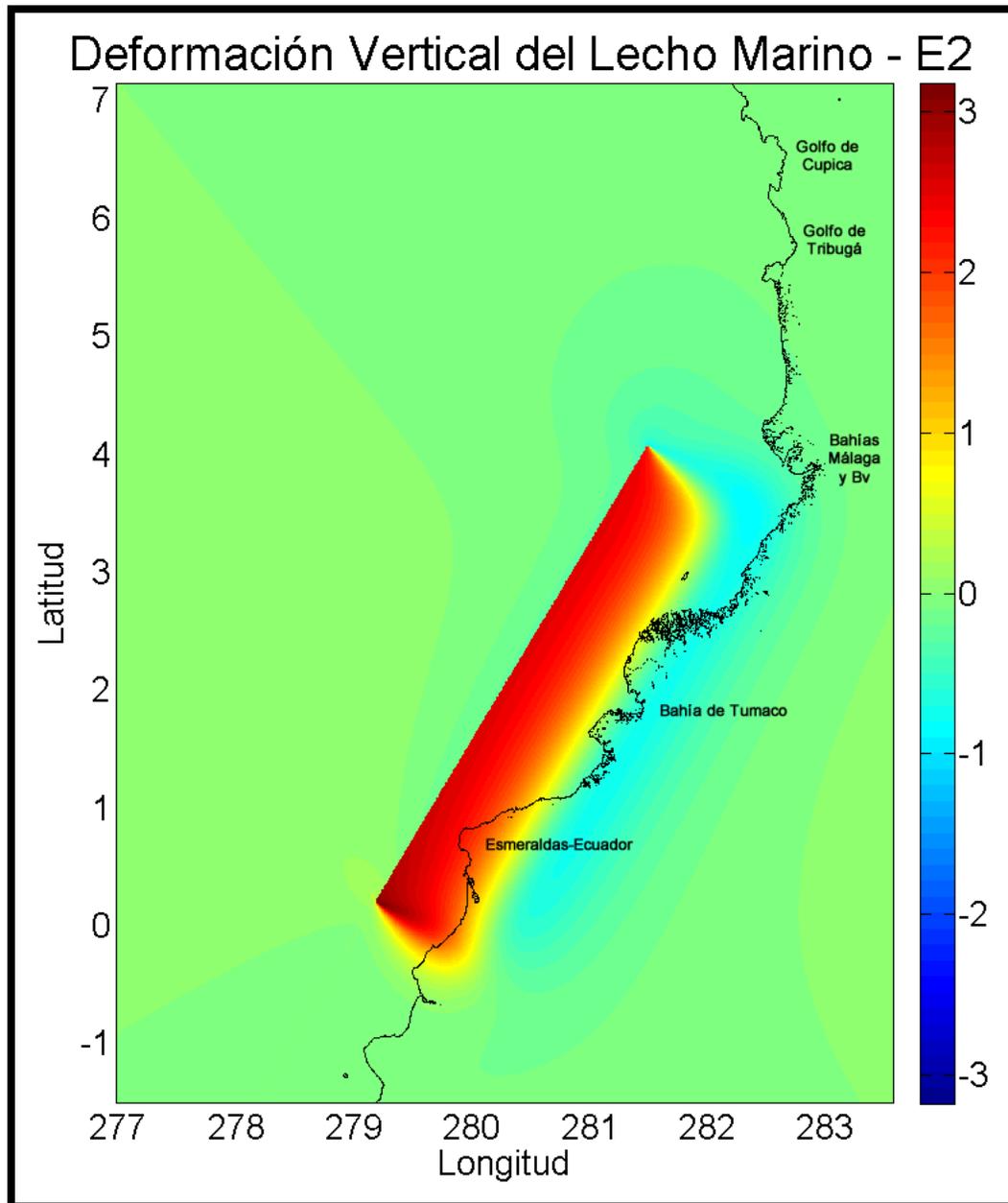


Figura 79. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E3 (CCA).

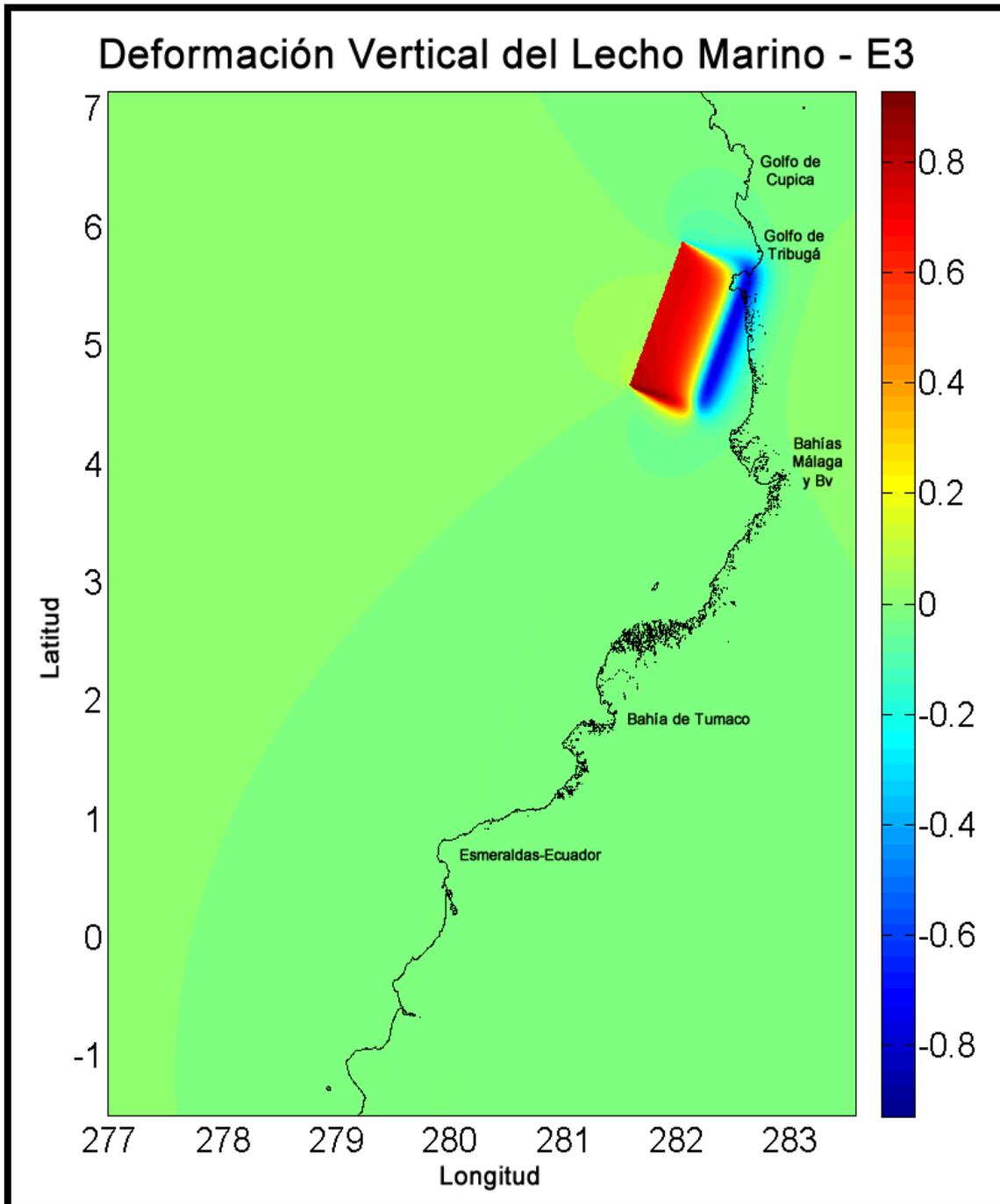


Figura 80. Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E4 (ACM).

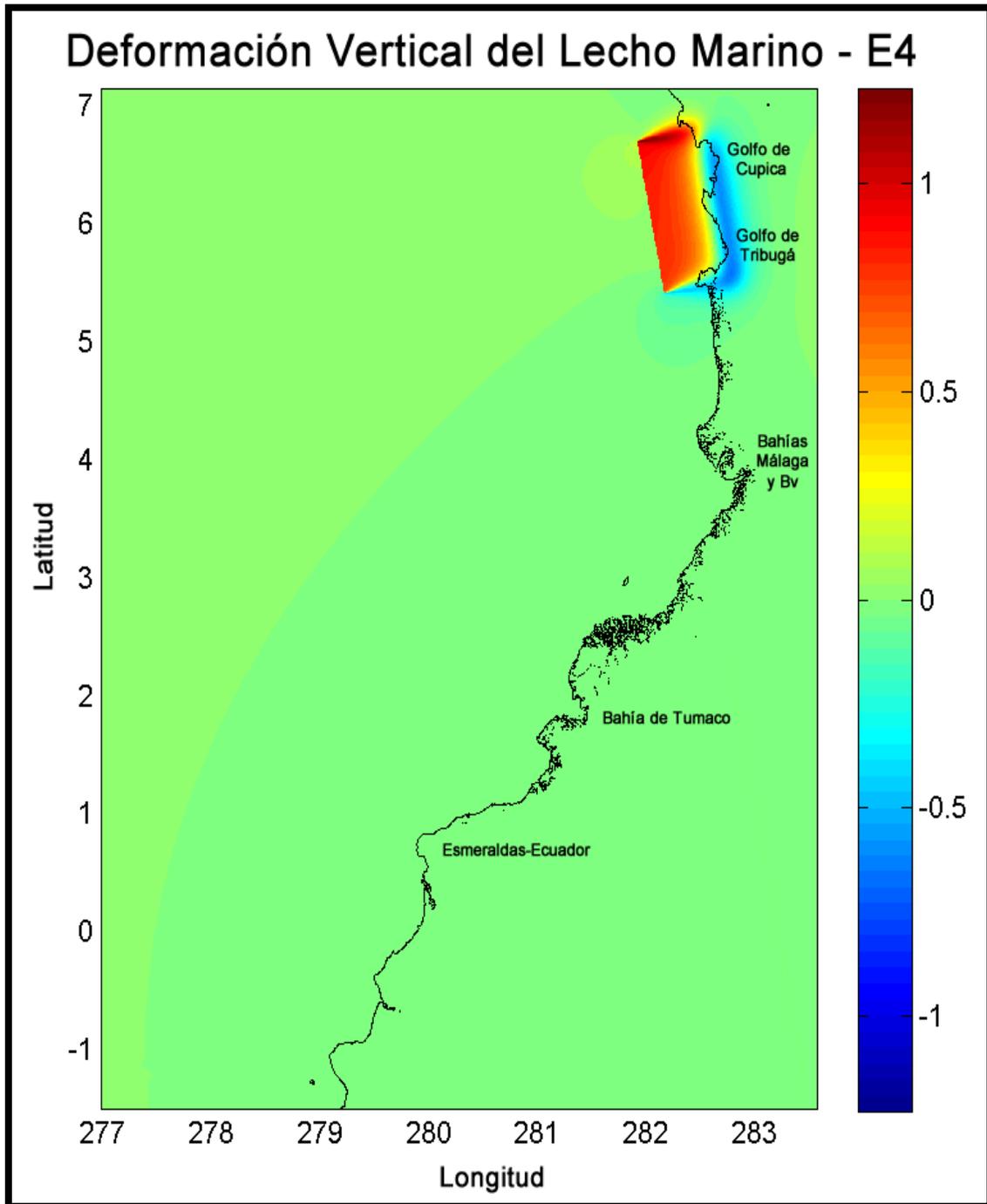


Figura 81. Superposición Deformación Vertical Cosísmica del Lecho Marino, Escenario Sísmico E1 con el Estudio De Pararas 2012.

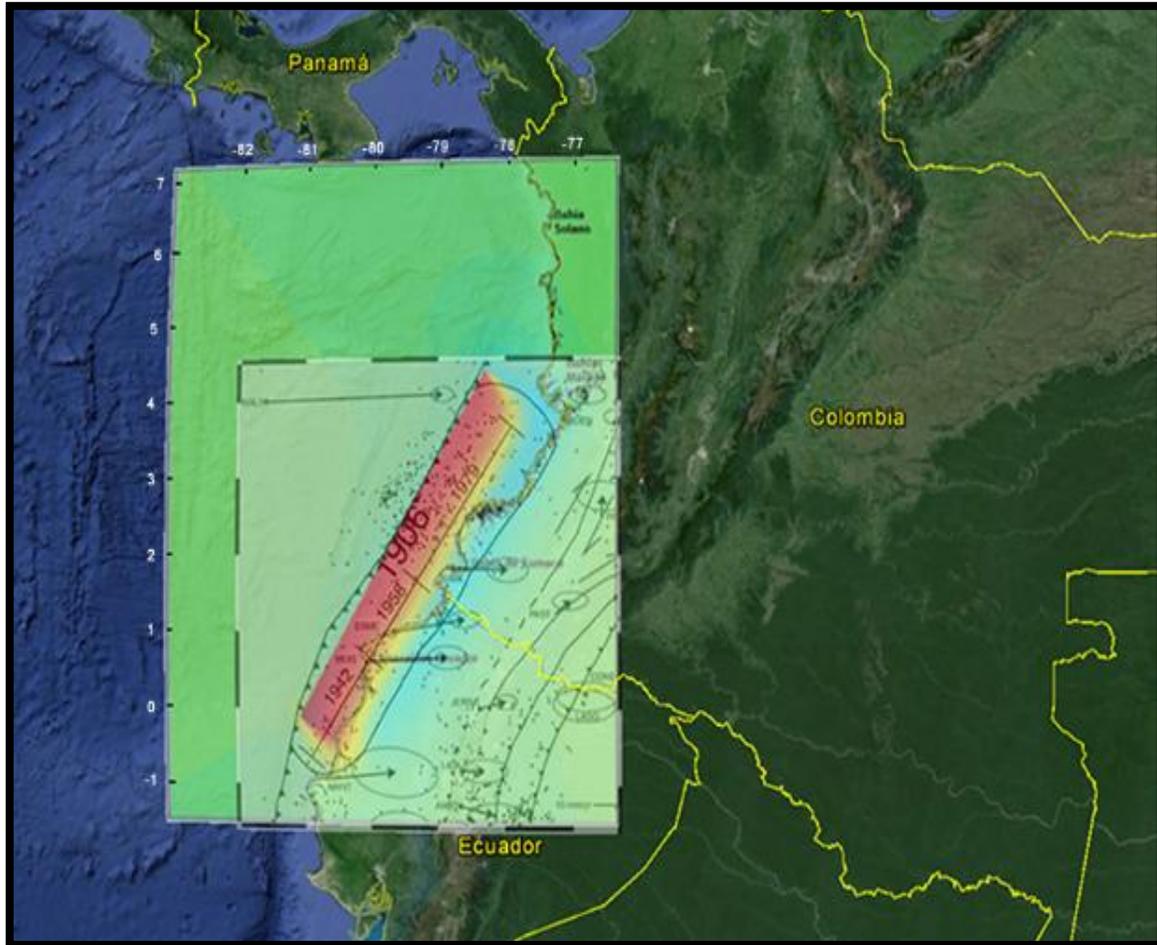


Figura 83. Superposición Deformación Vertical Cosmática del Lecho Marino, Escenario Sísmico E3, con la Sismicidad de la Tierra de USGS 2010.

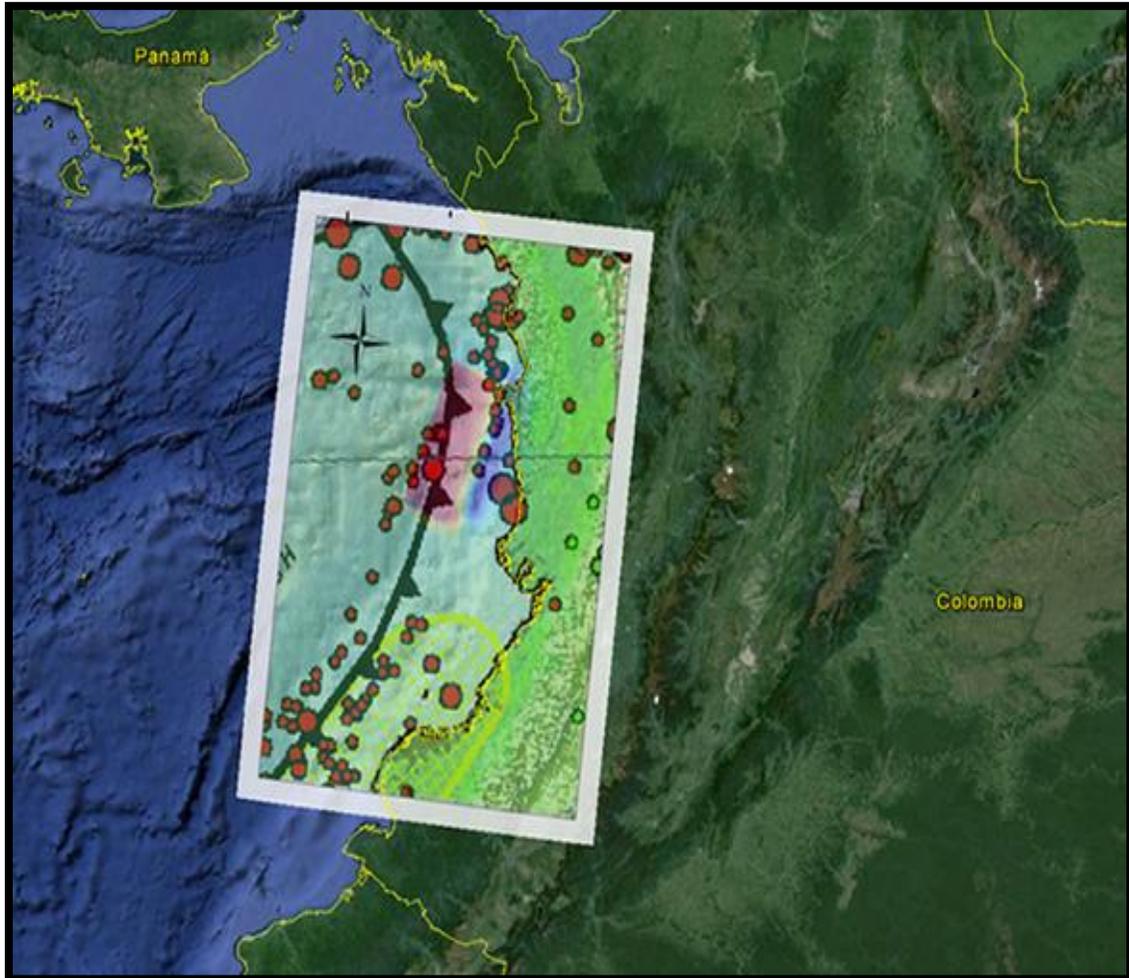
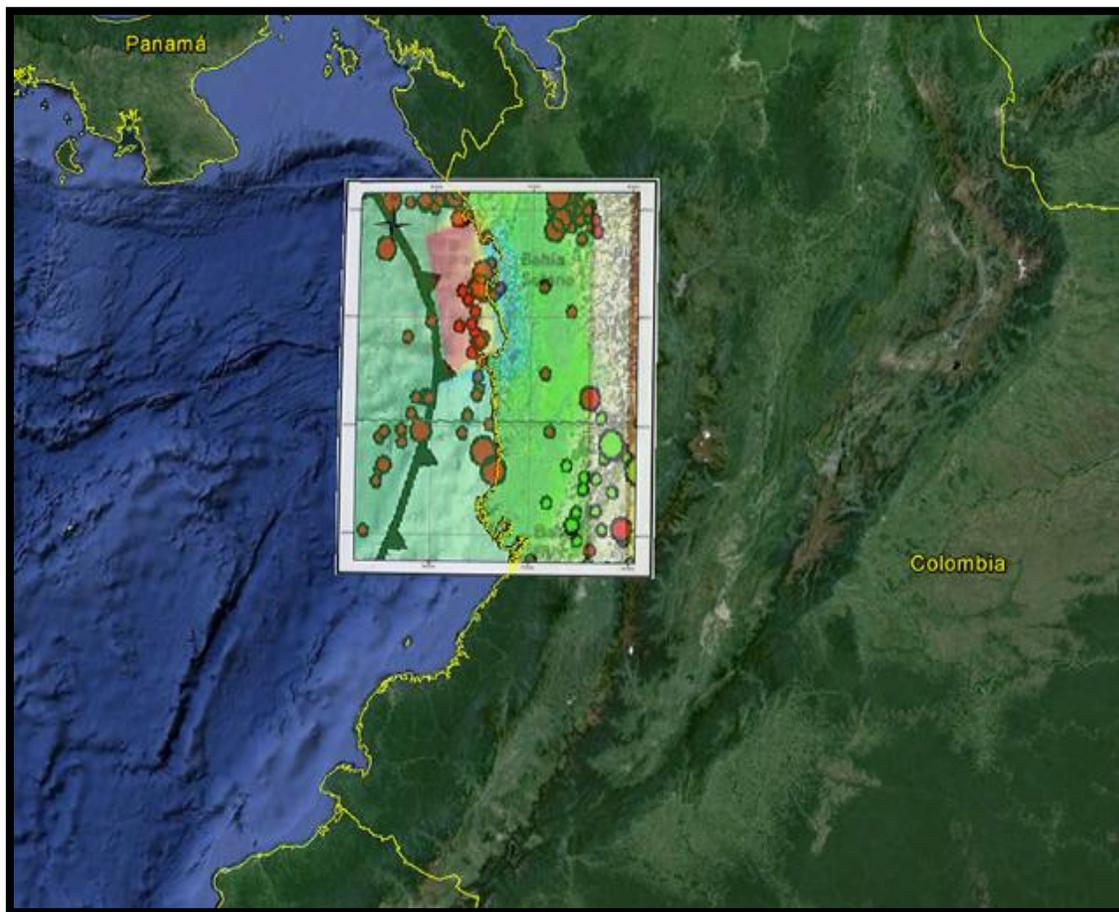


Figura 84. Superposición Deformación Vertical Cosmática del Lecho Marino, Escenario Sísmico E4, con la Sismicidad de la Tierra de USGS 2010.



2.4.2 Propagación e Inundación de Ondas de Tsunami: Simulación numérica para evaluar la altura, el tiempo de llegada y la inundación producida por el tren de ondas de tsunami, en las zonas de estudio.

La deformación vertical del lecho marino producida por la ruptura de la falla, genera un desplazamiento en la columna de agua como se mencionó anteriormente; esta onda se propaga desde aguas profundas hasta la costa, y la inundación generada por la misma, es representada por el modelo numérico encada una de las zonas bajo estudio. La inundación productodel desplazamiento

máximo de la superficie libre del mar durante un evento de tsunami en un estado de marea alta en los cascos urbanos de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco, se ve representada en las siguientes figuras (figuras 85-104).

Buenaventura

Figura 85. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Buenaventura.

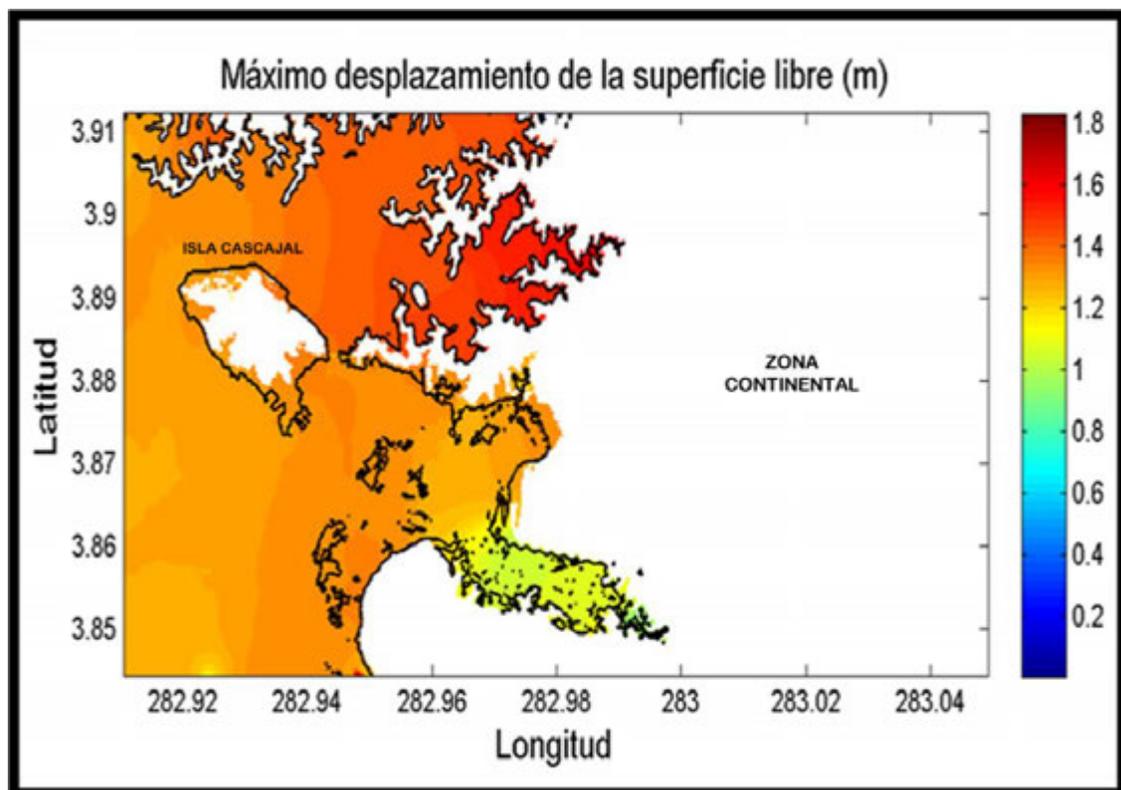


Figura 86. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Buenaventura.

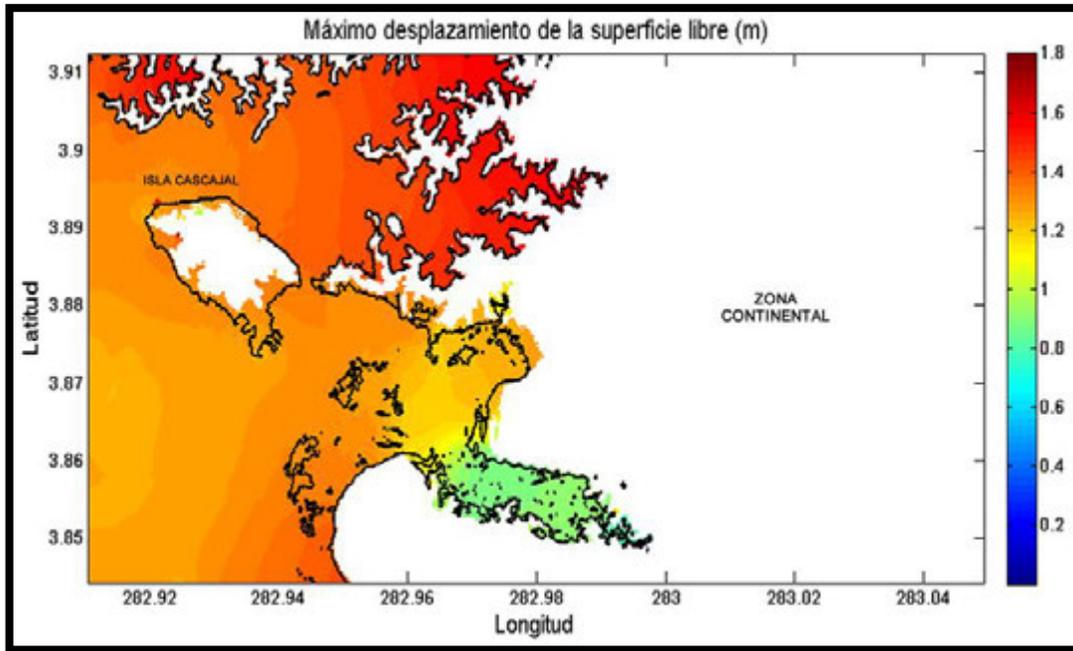


Figura 87. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Buenaventura.

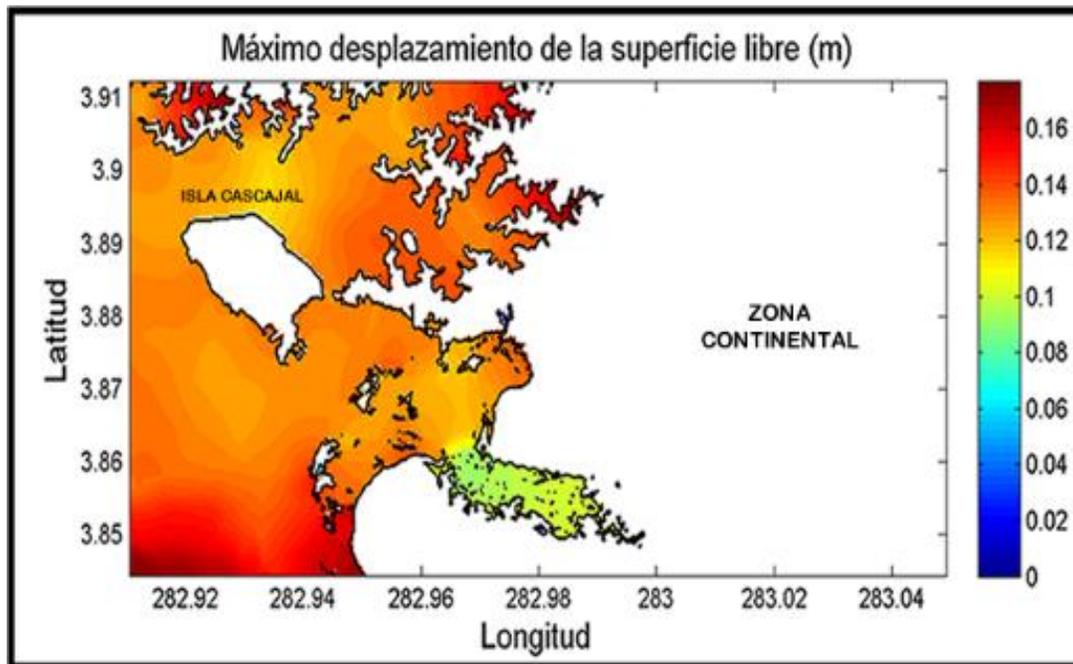
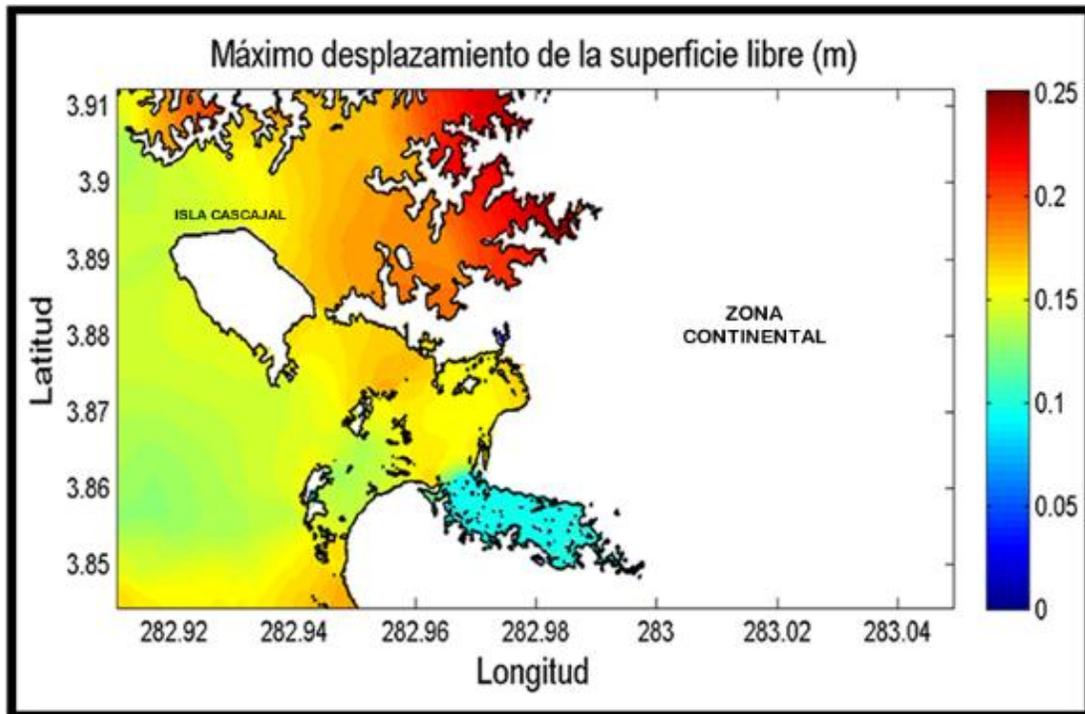


Figura 88. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Buenaventura.



Se aprecia que la altura máxima de la lámina de agua inundante en la Bahía de Buenaventura tiene un valor máximo de 1.8 m y 1.7 m para los escenarios E1 y E2. Mientras que, el casco urbano de Buenaventura (Isla Cascajal), recibe olas de máximo 1.5 m y 1.4 m respectivamente en el costado oriente debido a efectos de reflexión, para estos mismos escenarios (figuras 85-86).

Para el caso de los escenarios ubicados en el bloque norte del Pacífico Colombiano (E3 y E4), se evidencia una lamina de agua inundante de aproximadamente 0.14 m y 0.20 m respectivamente (figuras 87-88), ya que la onda que se propaga desde su fuente de origen, golpea principalmente sobre los acantilados que albergan la población de Ladrilleros, generando una atenuación

en la onda que ingresa hasta la Bahía de Buenaventura, motivo por el cual no se genera ninguna inundación en la población.

Juanchaco

Figura 89. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Juanchaco.

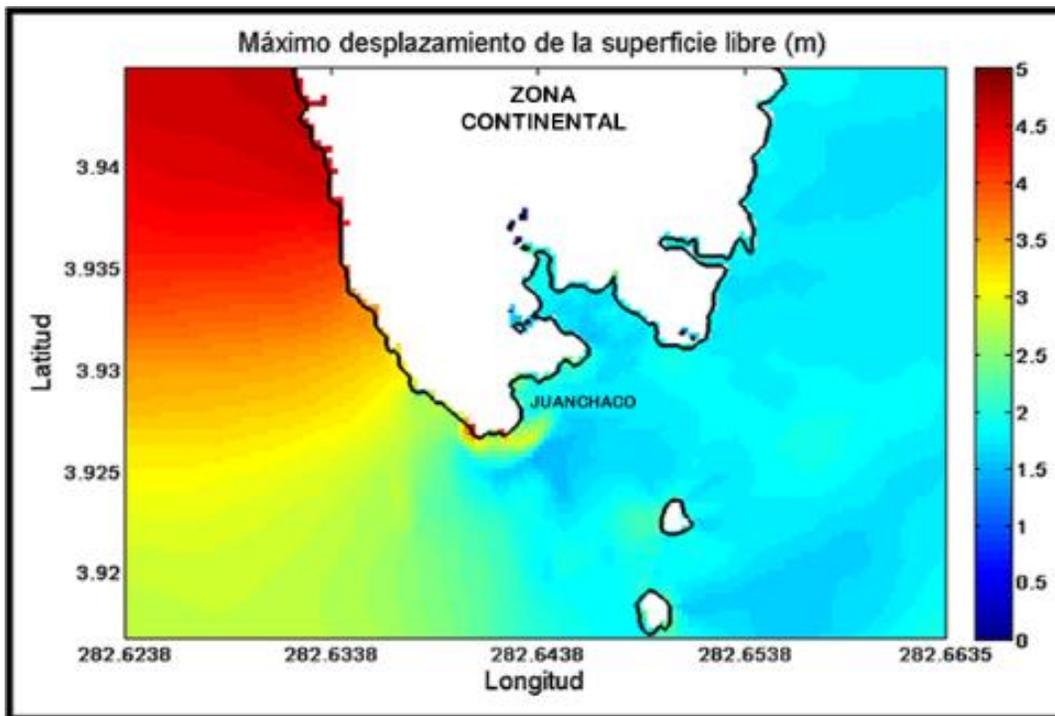


Figura 90. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Juanchaco.

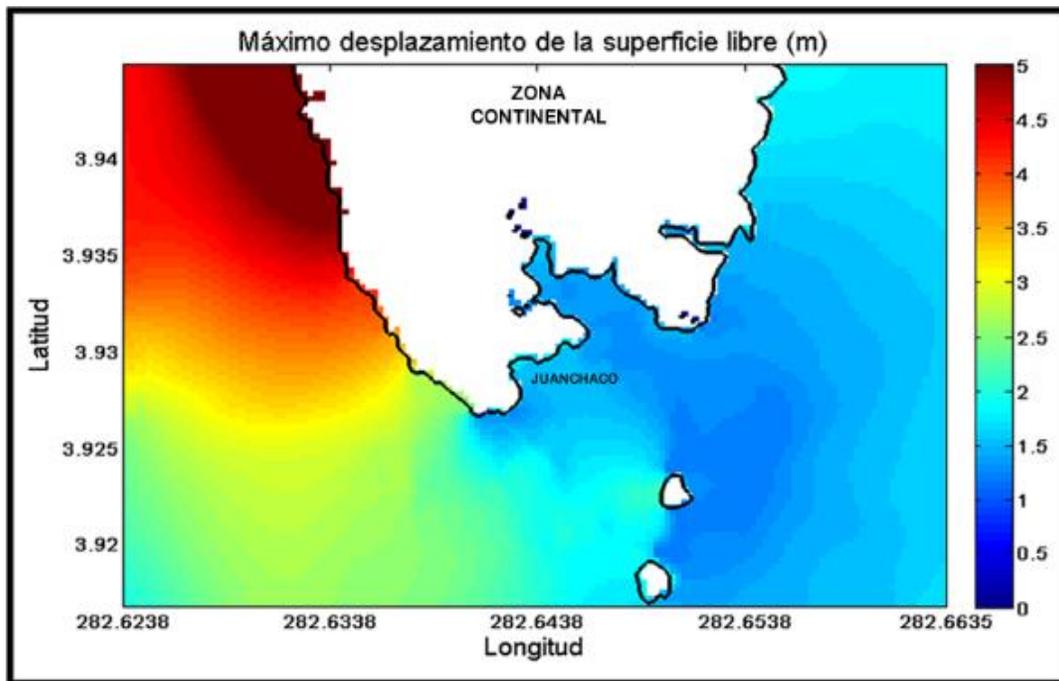


Figura 91. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Juanchaco.

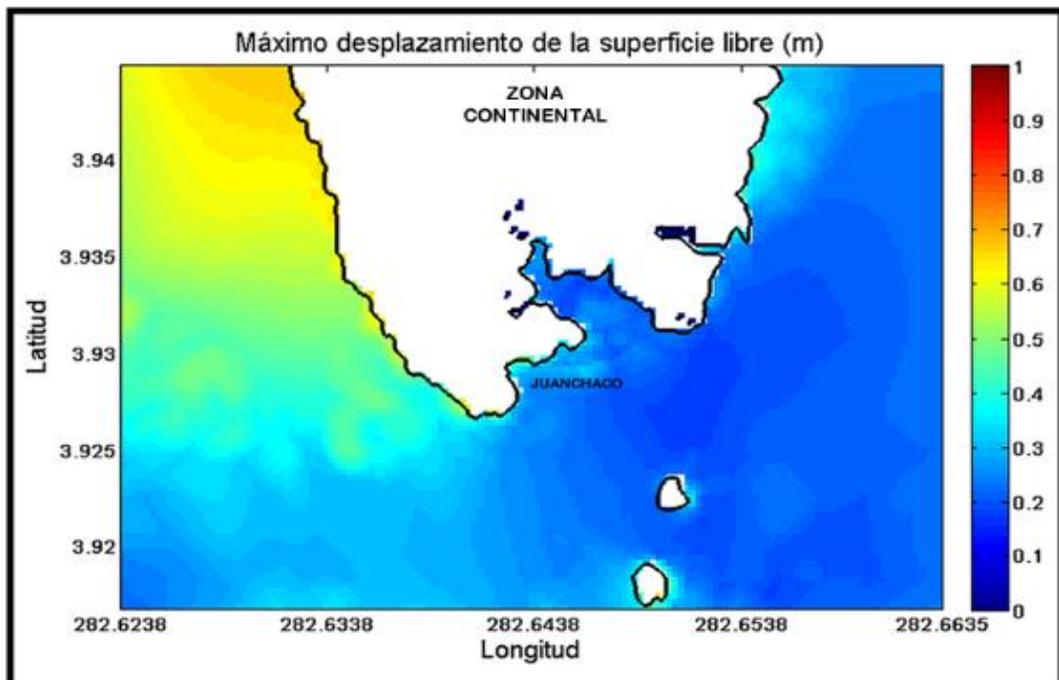
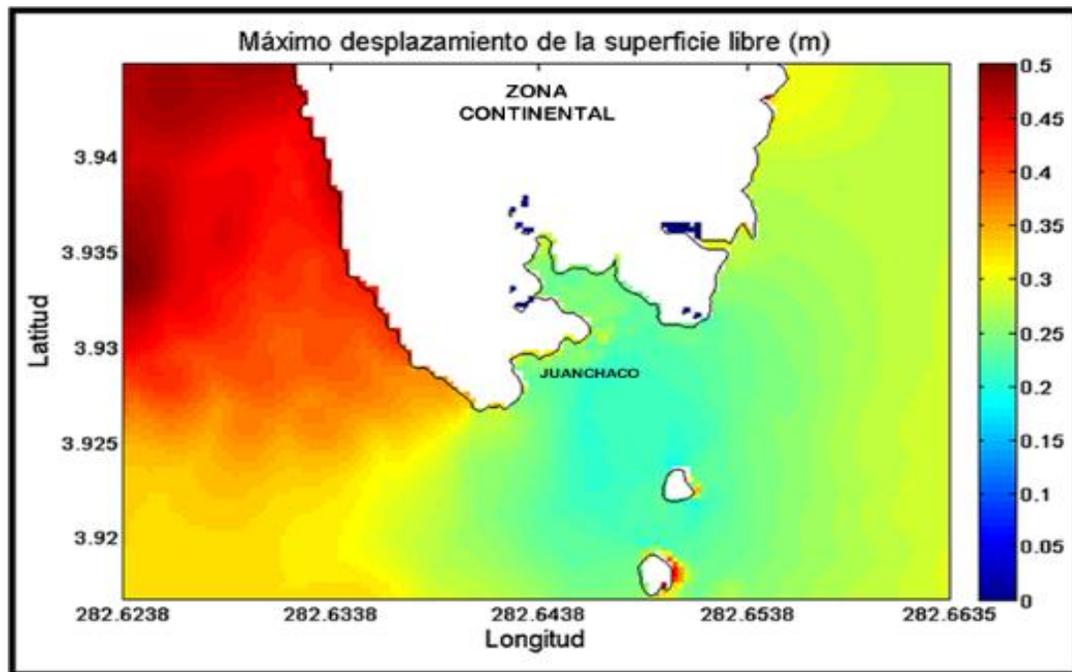


Figura 92. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Juanchaco.



La inundación generada por la onda que se propaga desde los epicentros de los escenarios E1 y E2 en el casco urbano de Juanchaco (Figuras 89-90), varía desde 1.8 hasta 2 m en la zona baja de esta población; ya que el impacto inicial es recibido por los acantilados que se encuentran en la zona occidental, generando una disminución en la energía y amplitud de la onda en aproximadamente un 40%. En cuanto a la inundación generada por los E3 y E4, obedecen a una onda cuya altura máxima es de 0.40 m y 0.30 m aproximadamente, que igualmente inunda la zona baja de la población de Juanchaco (Figuras 91-92).

Salahonda

Figura 93. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Salahonda.

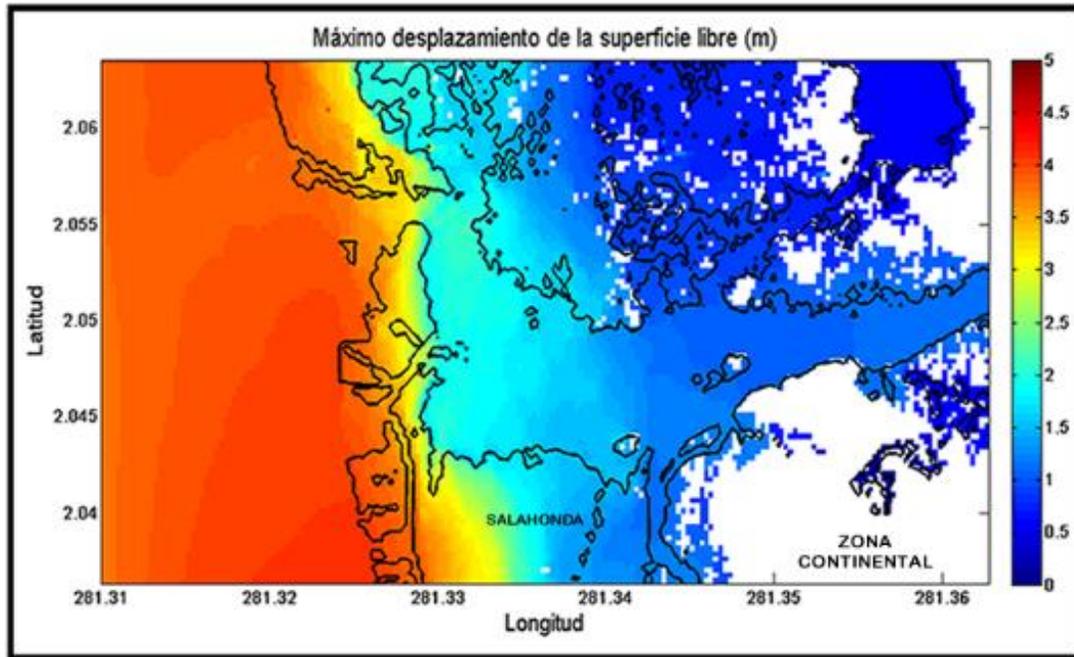


Figura 94. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Salahonda.

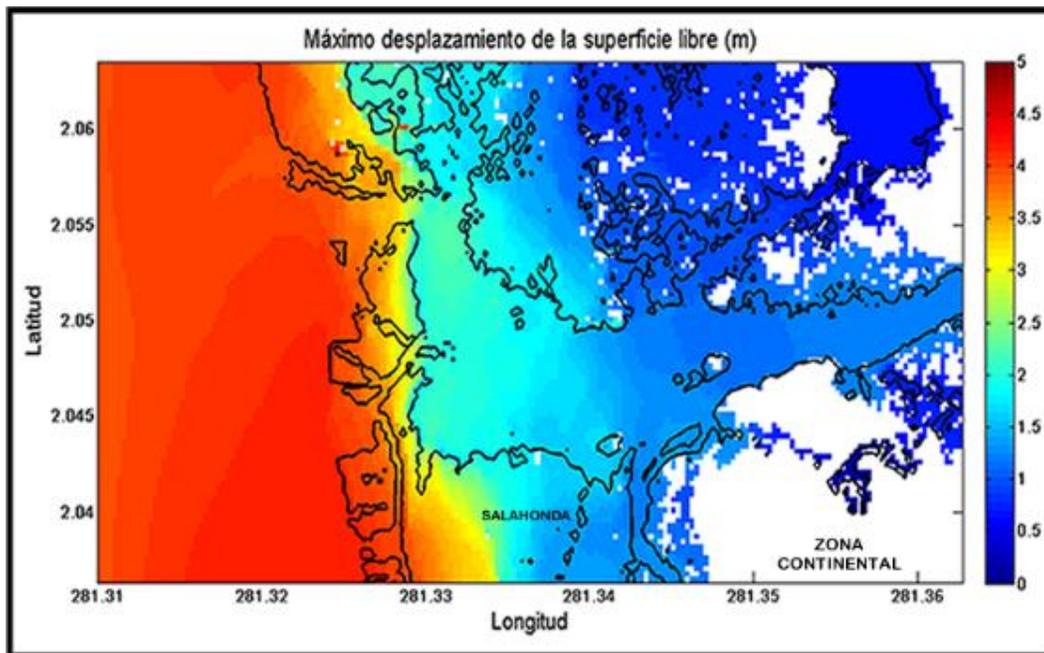


Figura 95. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Salahonda.

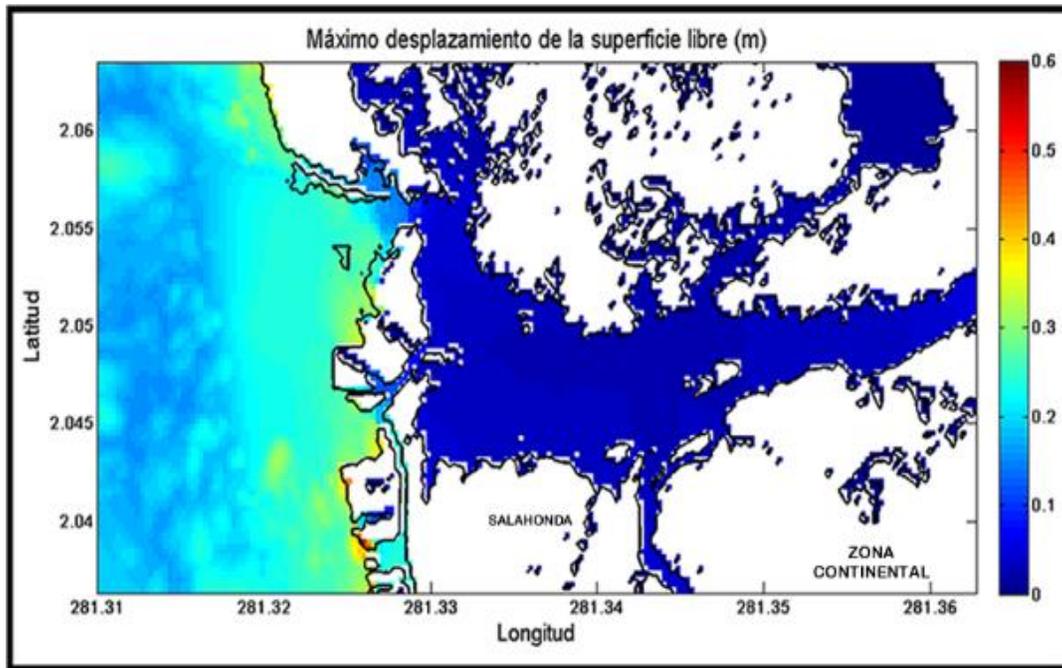
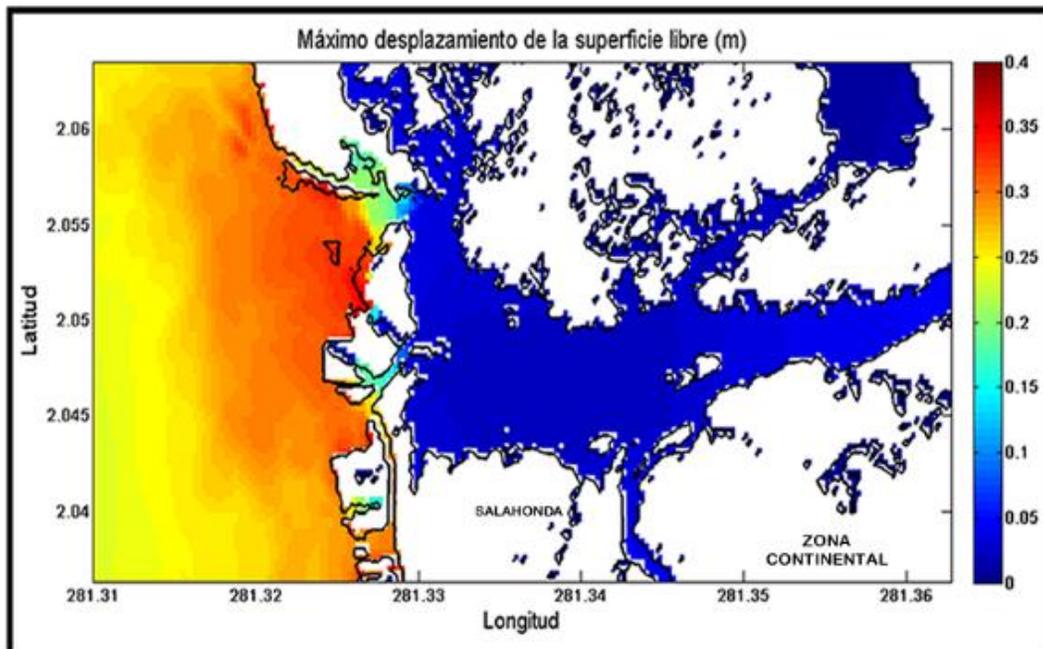


Figura 96. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Salahonda.



El casco urbano de Salahonda, recibe un impacto mayor que las anteriores poblaciones, esto debido a su cercanía con los epicentros de los escenarios E1 y E2, lo cubre un lamina inundante 1.5 m aproximadamente gracias el impacto directo de la onda que tiene una altura próxima a los 4 m, la cual choca contra la espiga litoral que resguarda la población, generando una atenuación de la misma(Figuras 93 - 94).

Para el caso de los escenarios E3 y E4, la afectación sobre esta población, es mínima, con un aumento en el nivel del mar en marea alta de 0.05 m, una vez la onda ha pasado por la barrera de protección en el costado occidente de la población, la cual no genera ninguna inundación (Figuras 95 - 96).

Curay

Figura 97. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Curay.

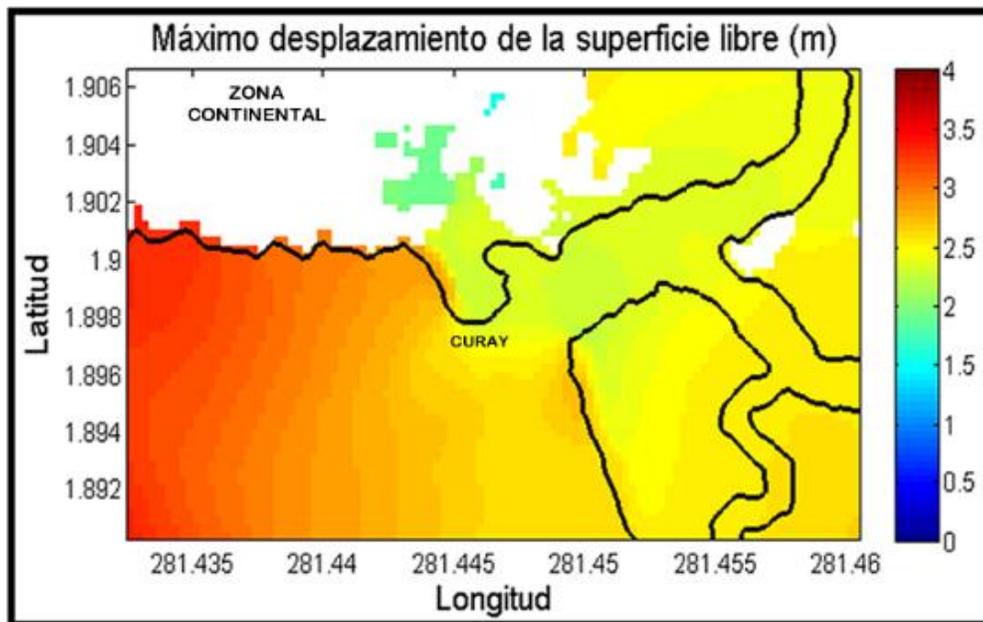


Figura 98. Propagación e Inundación Generada por el escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Curay.

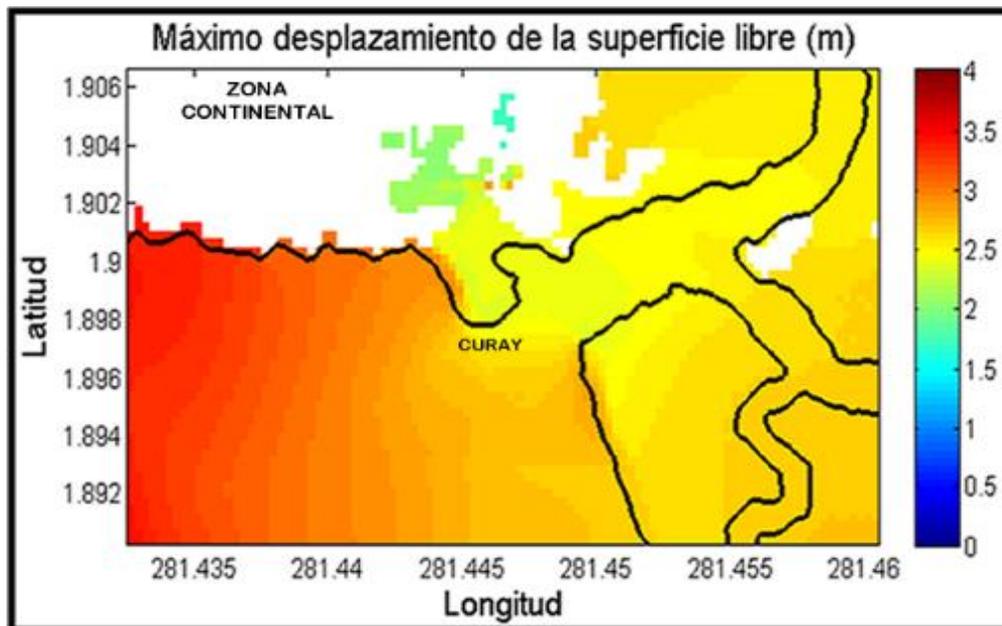


Figura 99. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Curay.

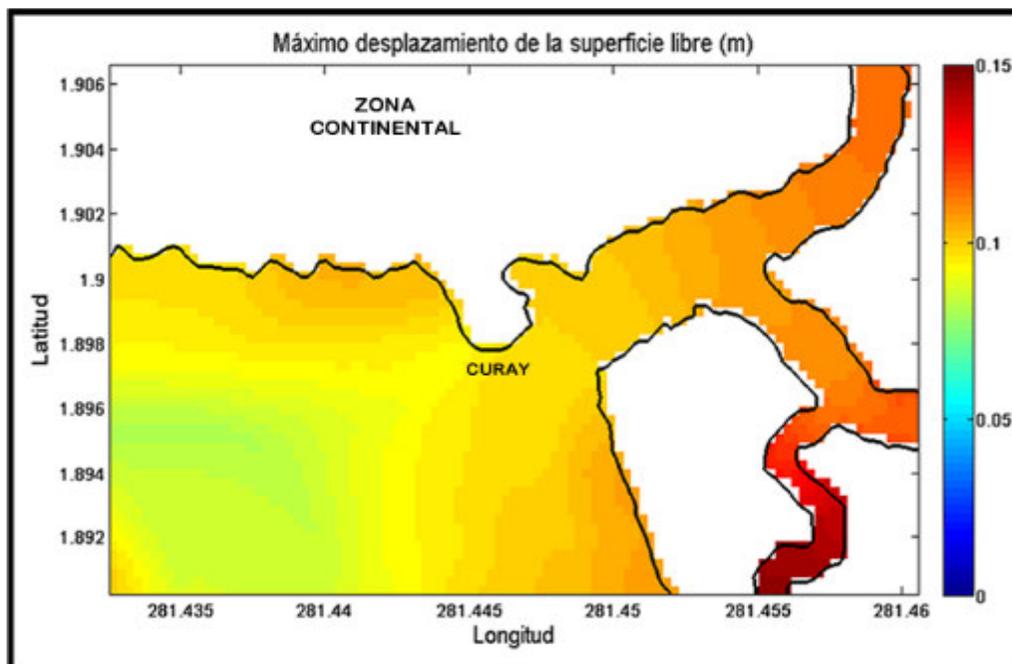
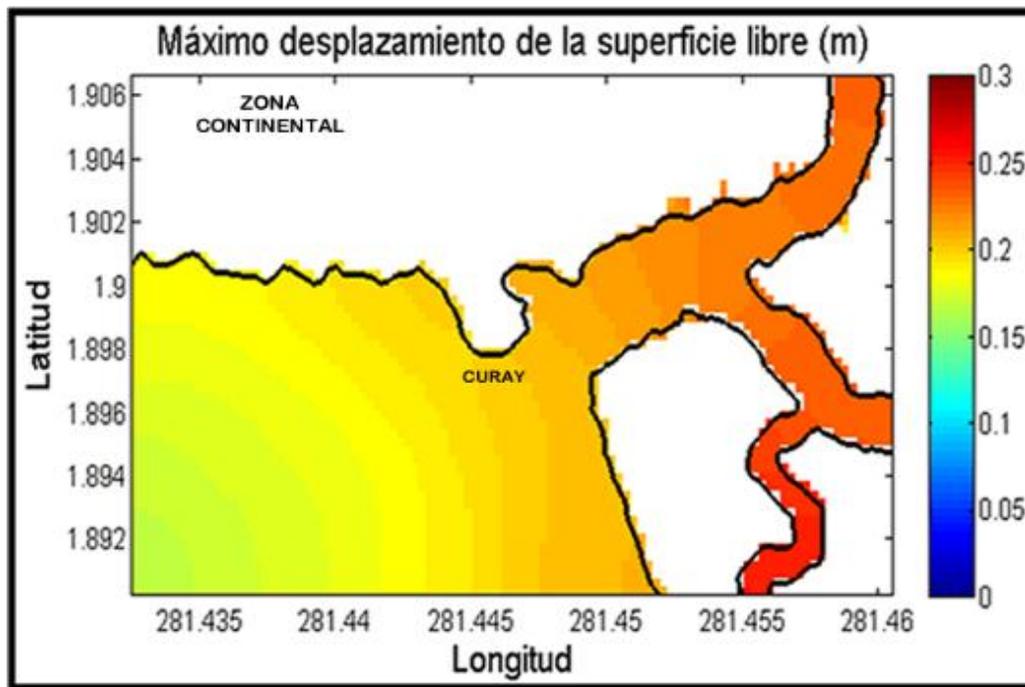


Figura 100. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Curay.



La población de Curay que se encuentra ubicada en la parte interna de la bahía de Tumaco, y recibe un impactodirecto de la onda con una altura de aproximadamente 3 m, generada por los escenarios E1 y E2, sobre el costado occidental de la población; ocasionando una ampliainundaciónsobre esta vereda, con una lámina de agua inundante que va desde los 2 m hasta los 2.7 m(Figuras 97 - 98).

El caso de los escenarios E3 y E4, al igual que en algunos casos anteriores, no representan un riesgo para la población en cuestión, puesto que la onda que llega es de 0.08 y 0.2 m respectivamente, y no causa ninguna inundación sobre la vereda (Figuras 99 - 100).

Tumaco

Figura 101. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E1, en el Casco Urbano de Tumaco.

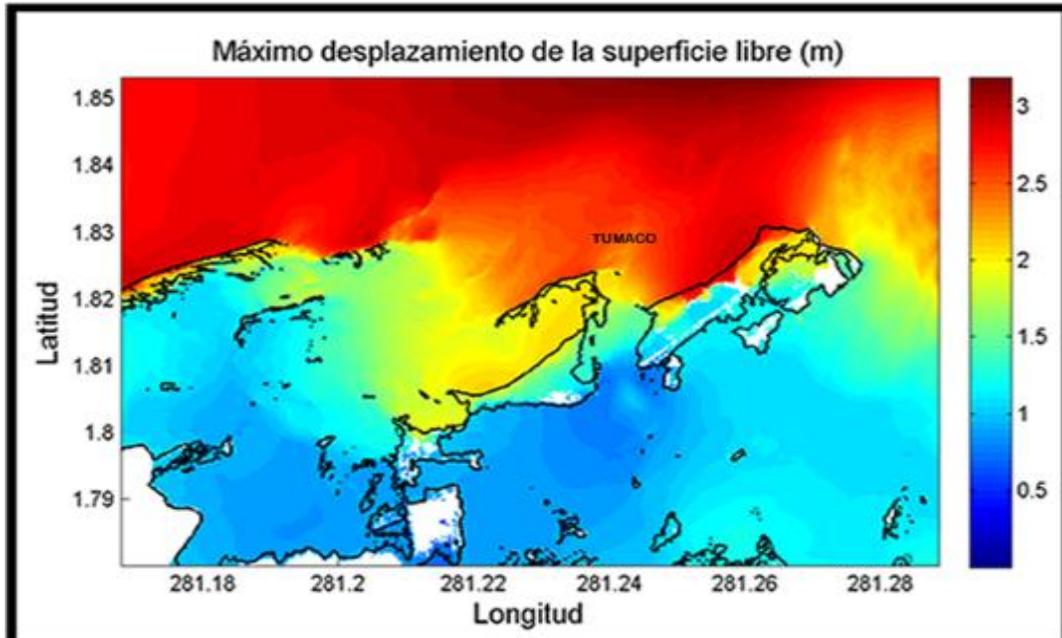


Figura 102. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E2, en el Casco Urbano de Tumaco.

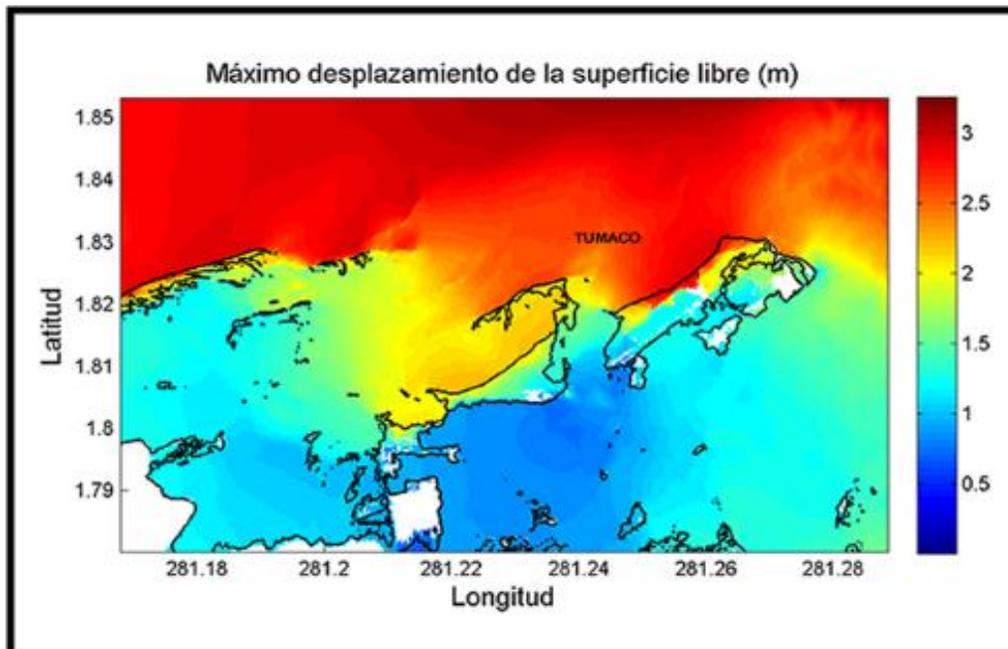


Figura 103. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E3, en el Casco Urbano de Tumaco.

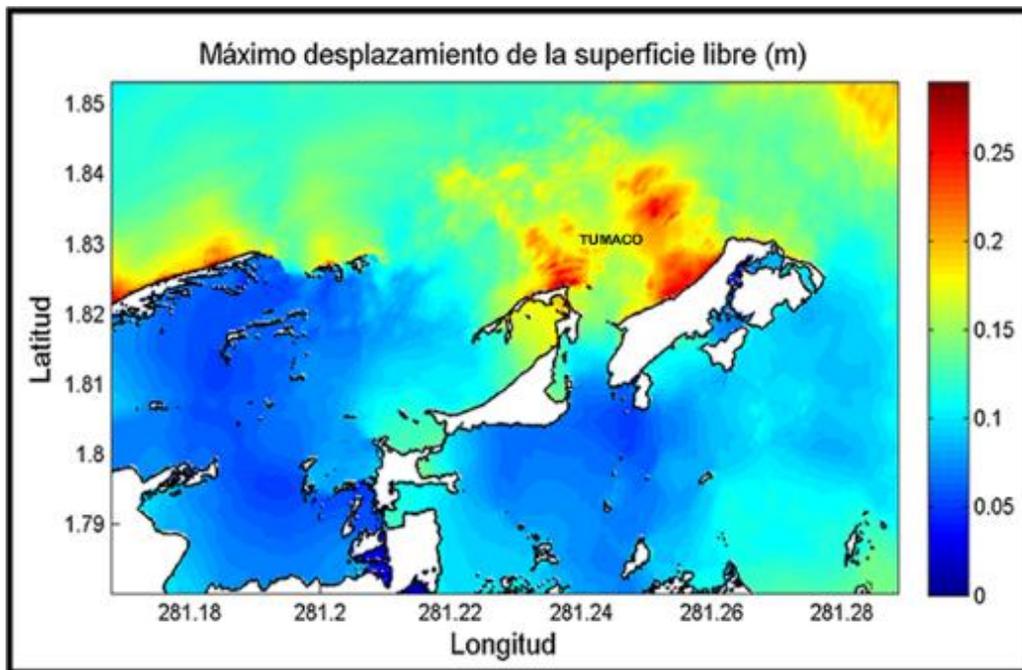
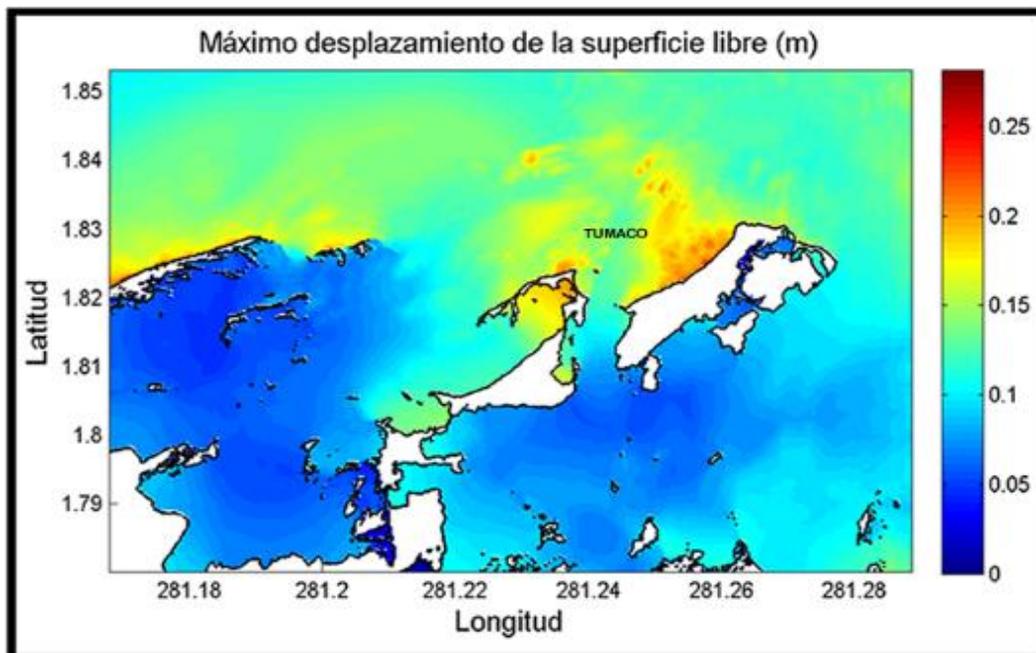


Figura 104. Propagación e Inundación Generada por el Escenario Sísmico E4, en el Casco Urbano de Tumaco.



La onda que impacta directamente con la población de Tumaco es de aproximadamente 3 m para los escenarios sísmicos E1 y E2, generando una amplia inundación que va desde 1.3 m para las zona más altas, hasta 3 m para las zonas más bajas, quienes tienen el primer contacto con la onda (Figuras 101-102). Mientras que, la afectación generada por los escenarios E3 y E4 son de aproximadamente 0.25 m y 0.20 m respectivamente (figuras 103-104), lo cual implica que no generaría ningún riesgo para las partes bajas y mucho menos para las partes altas de esta población.

En general se evidencia que el escenario E1 genera una mayor inundación, que los escenarios E2, E3 y E4. Esto es debido a las características propias del tsunami.

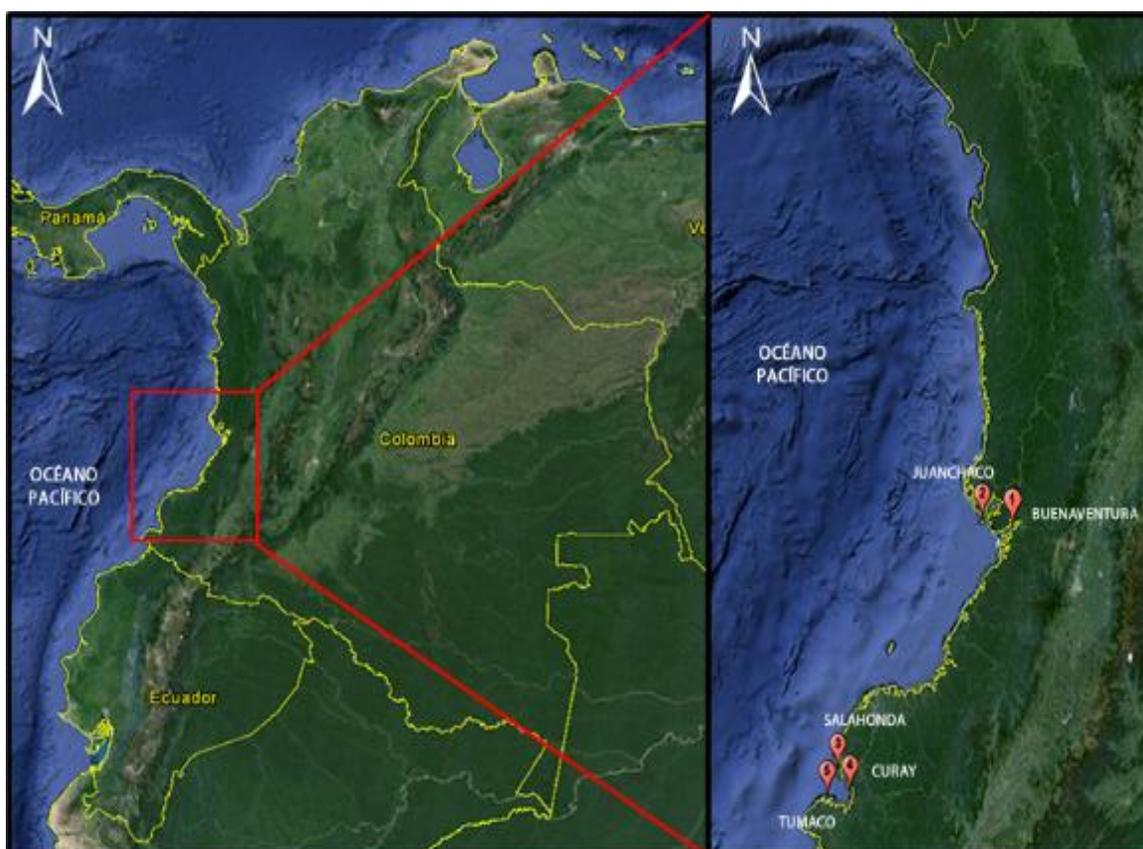
Otro factor importante para tener en cuenta en el caso de presentarse un evento tsunamigénico, es el tiempo de llegada de la onda, pues esta variable permite estimar el tiempo con el que cuenta una población antes de que llegue la onda a la costa.

Para determinar esta variable, se establecieron puntos costeros en las poblaciones de Buenaventura, Tumaco, Juanchaco, Salahonda y Curay (tabla XXVIII, Figura 105). Las figuras 106 a 125 presentan las señales sintéticas o mareogramas por escenarios, obtenidas en los puntos de interés seleccionados en el casco urbano de las poblaciones anteriormente mencionadas.

Tabla XXVIII. Ubicación Geográfica de los Puntos de Interés en el Casco Urbano de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco.

Población	Coordenadas
1. Buenaventura	77.086511°W – 3.8701111°N
2. Juanchaco	77.357833°W – 3.9251666°N
3. Salahonda	78.565599°W – 1.8908890°N
4. Curay	78.565599°W – 1.8908888°N
5. Tumaco	78.776466°W – 1.843966°N

Figura 105. Ubicación de Mareogramas Sintéticos en el Casco Urbano de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco.



Buenaventura

Figura 106. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E1.

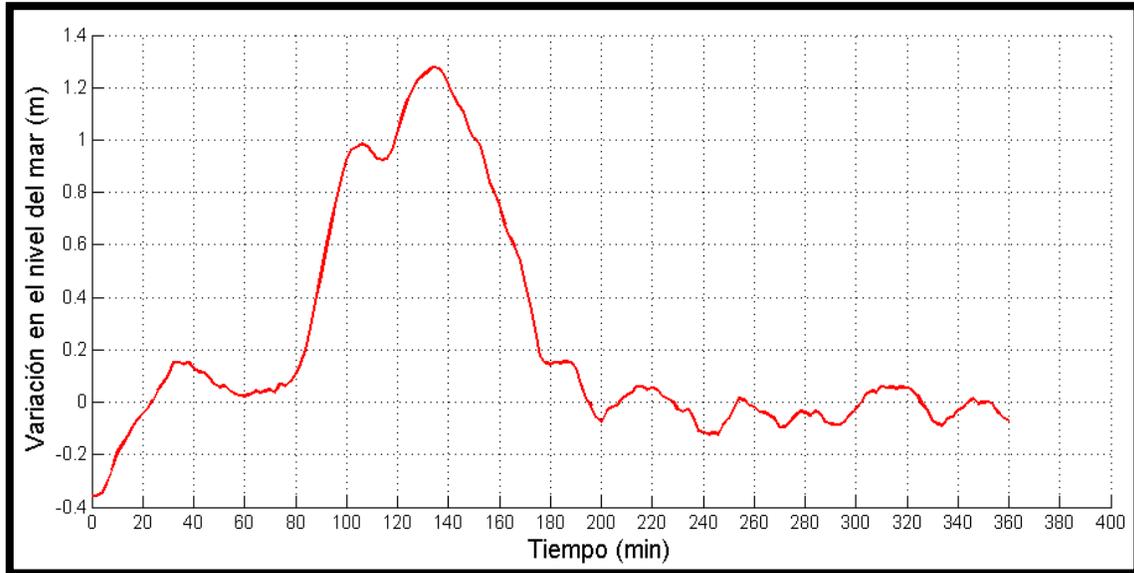


Figura 107. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E2.

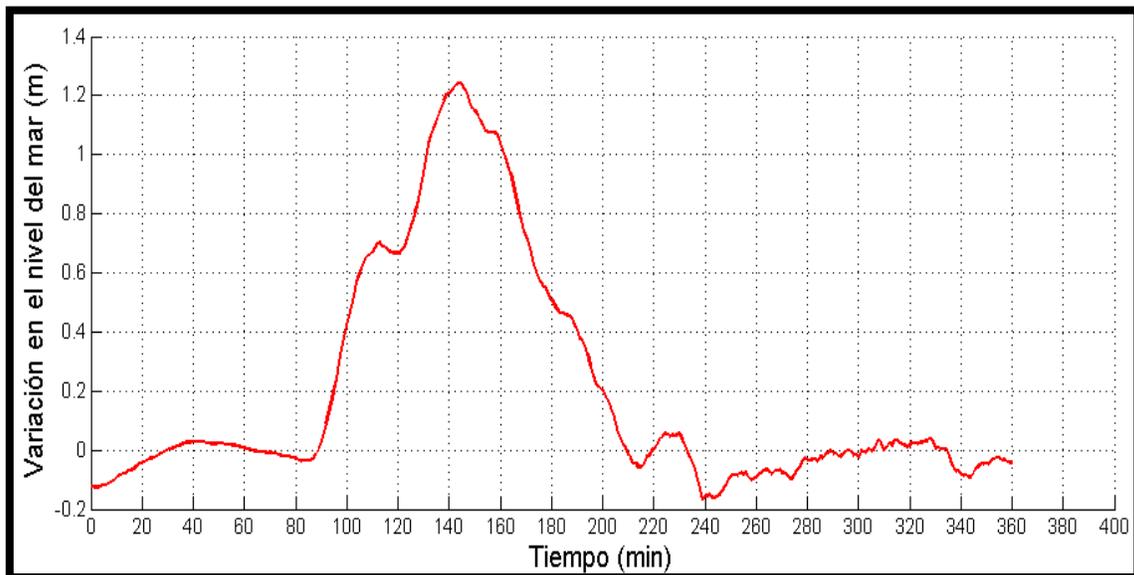


Figura 108. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E3.

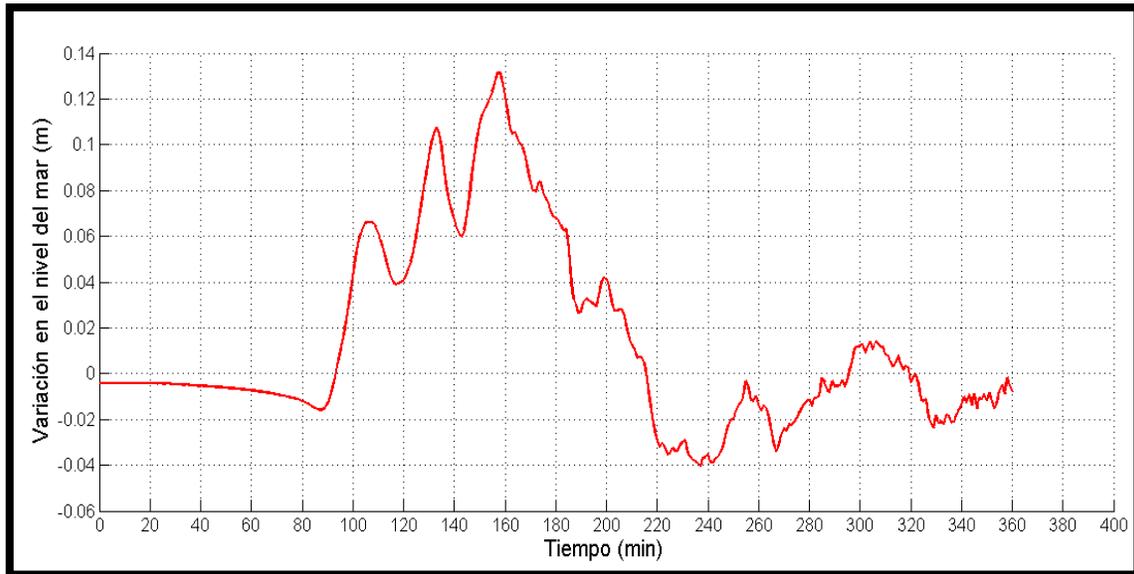
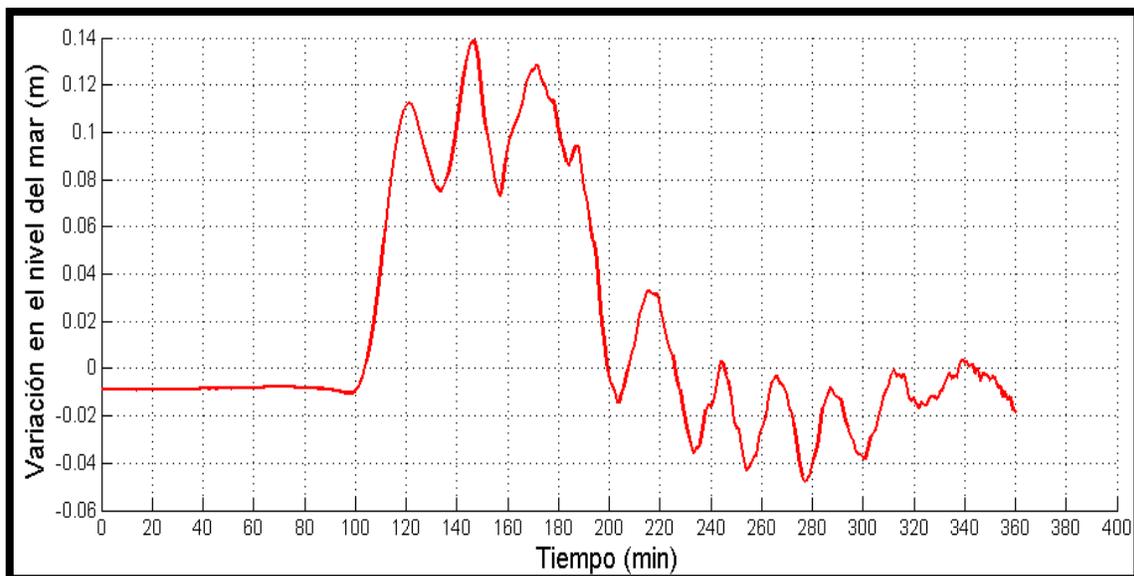


Figura 109. Señal Sintética Punto Costero en Buenaventura, para el Evento de E4.



A partir de las señales sintéticas obtenidas sobre la población de Buenaventura, se aprecia que la primera ola generada por el escenario E1 (Figura 106), llega a la

población en 105 minutos aproximadamente, mientras que las ondas generadas por los escenarios E2, E3 y E4 tiene un tiempo de arribo a la población de 113, 106 y 121 minutos, respectivamente (Figuras 107-109). Sin embargo, por las características geomorfológicas de la bahía (bahía cerrada), para los dos primeros escenarios, la ola con mayor es la segunda, con alturas próximas a 1.3 m y 1.2 m respectivamente, llegando 30 min después de la primera ola. Haciendo el mismo análisis para los escenarios E3 y E4 a partir de los mareogramas, se deduce que del tren de ondas entrante a la bahía de Buenaventura, la onda que presenta una mayor altura es la tercera con 0.13 m y la segunda con 0.14 m respectivamente.

Juanchaco

Figura 110. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E1.

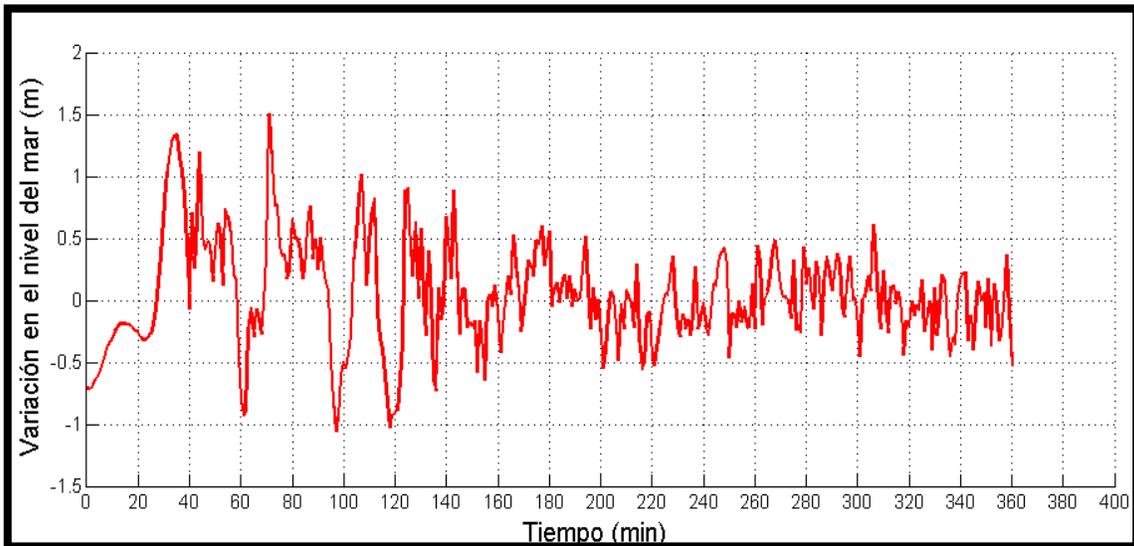


Figura 111. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E2.

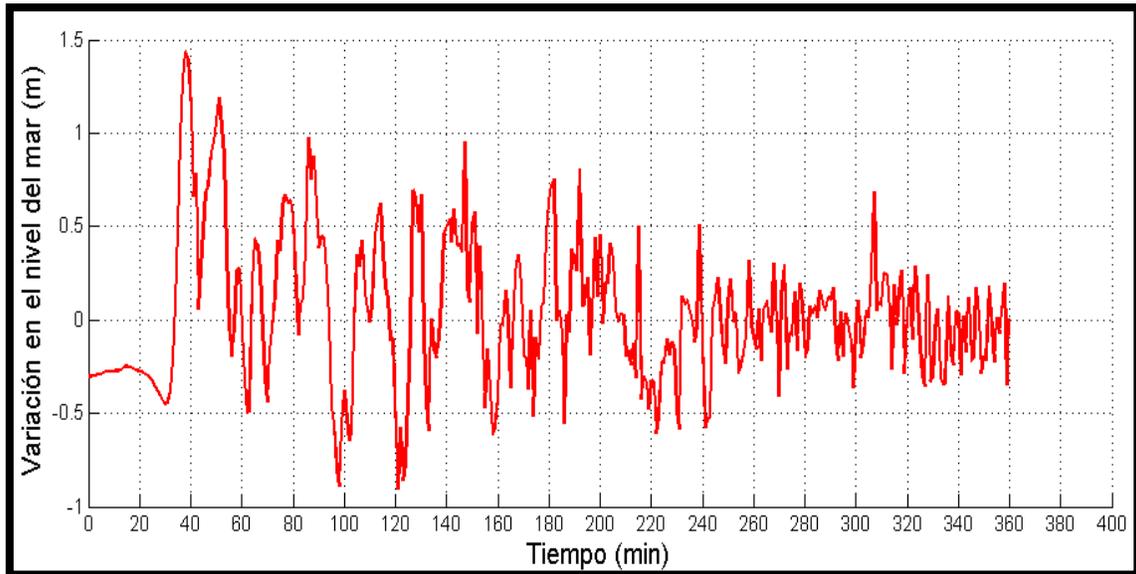


Figura 112. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E3.

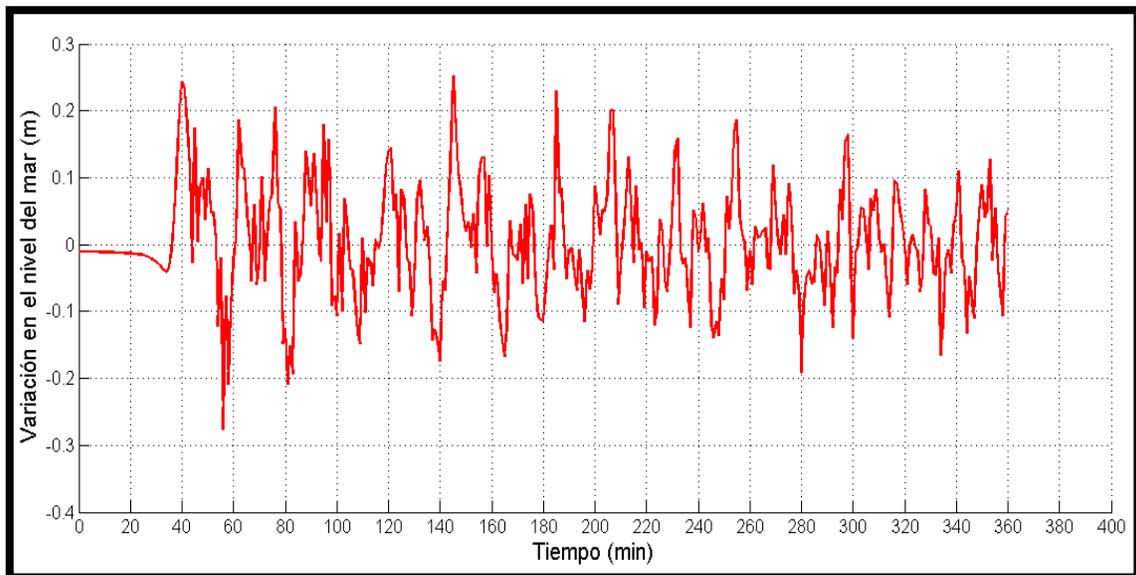
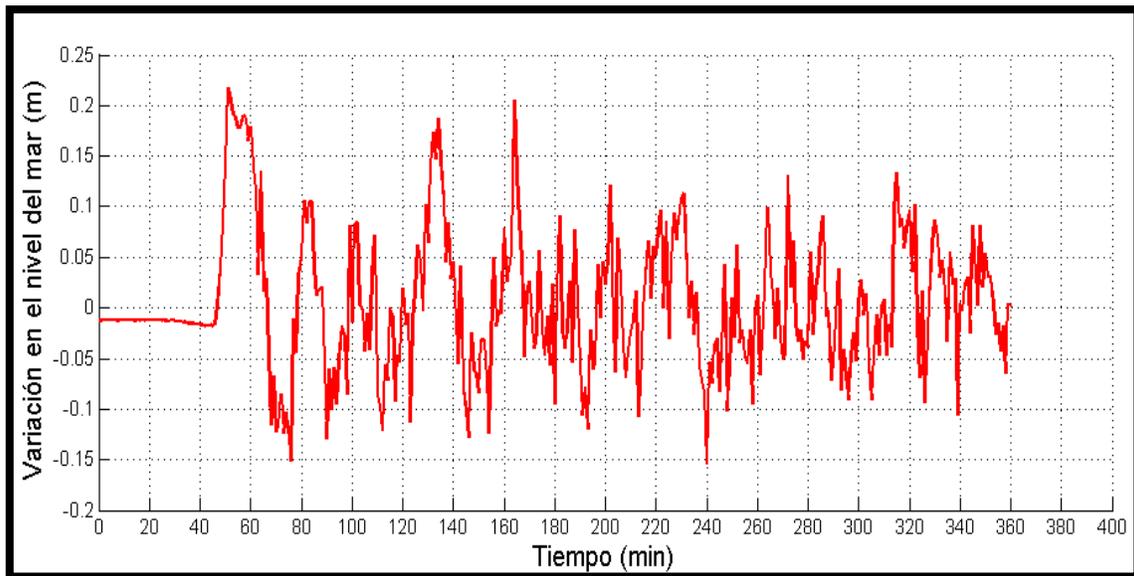


Figura 113. Señal Sintética Punto Costero en Juanchaco, para el Evento de E4.



A partir del análisis extraído de las señales sintéticas obtenidas a partir de la simulación, se pudo establecer que el escenario E1 genera un tren olas de las cuales, la primera llega a la población de Juanchaco en 34 minutos aproximadamente con una altura de 1.3 m (figura 110). En cuanto a los efectos generados por el escenario E2, se muestra una ola con altura de 1.4 m arribando a los 38 minutos a la población bajo (figura 111).

Los escenarios E3 y E4 (figuras 112-113), quienes tiene una menor afectación en la zona de interés, presentan olas de 0.2 m, con un tiempo de llegada de 40 y 51 minutos respectivamente, una vez ha ocurrido el evento.

Salahonda

Figura 114. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E1.

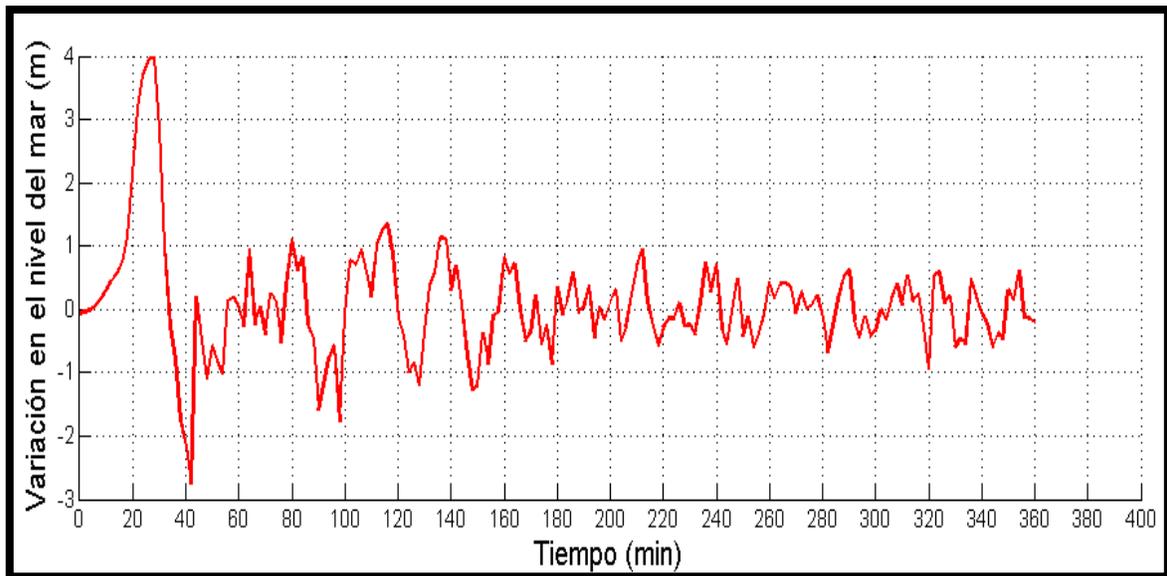


Figura 115. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E2.

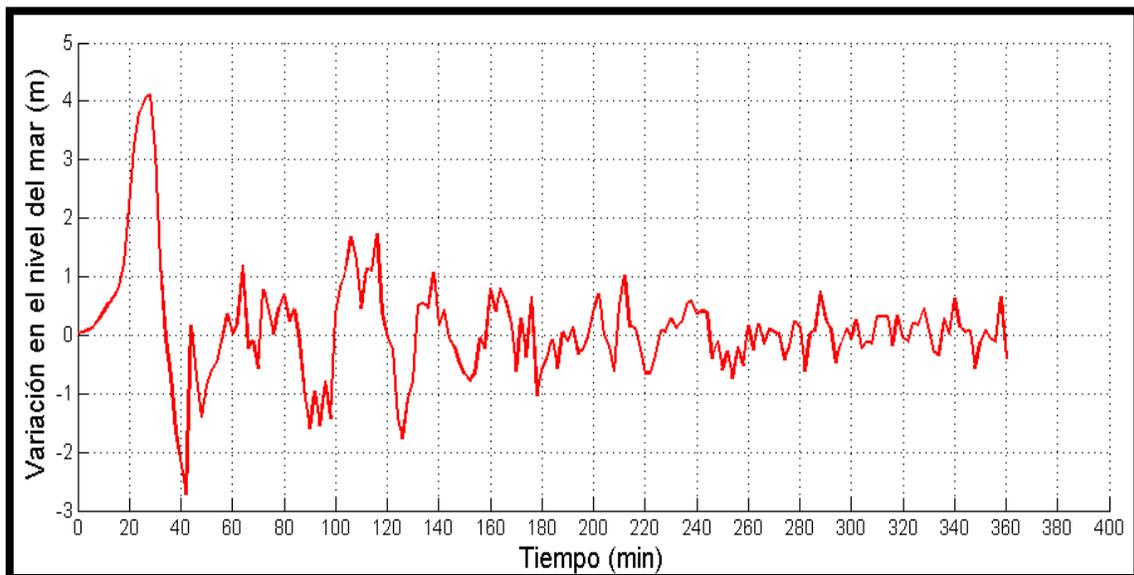


Figura 116. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E3.

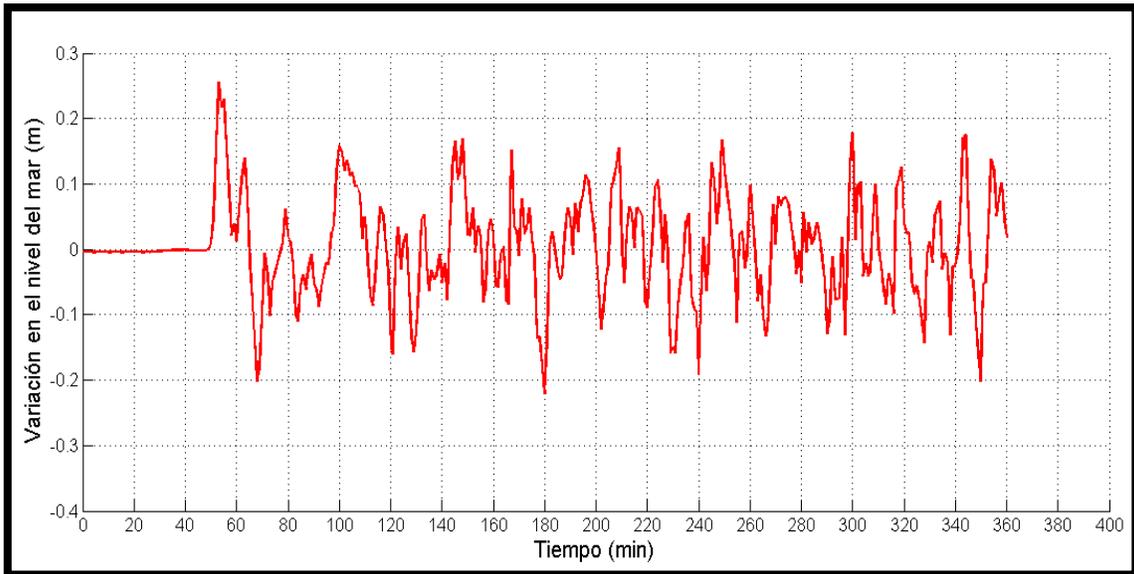
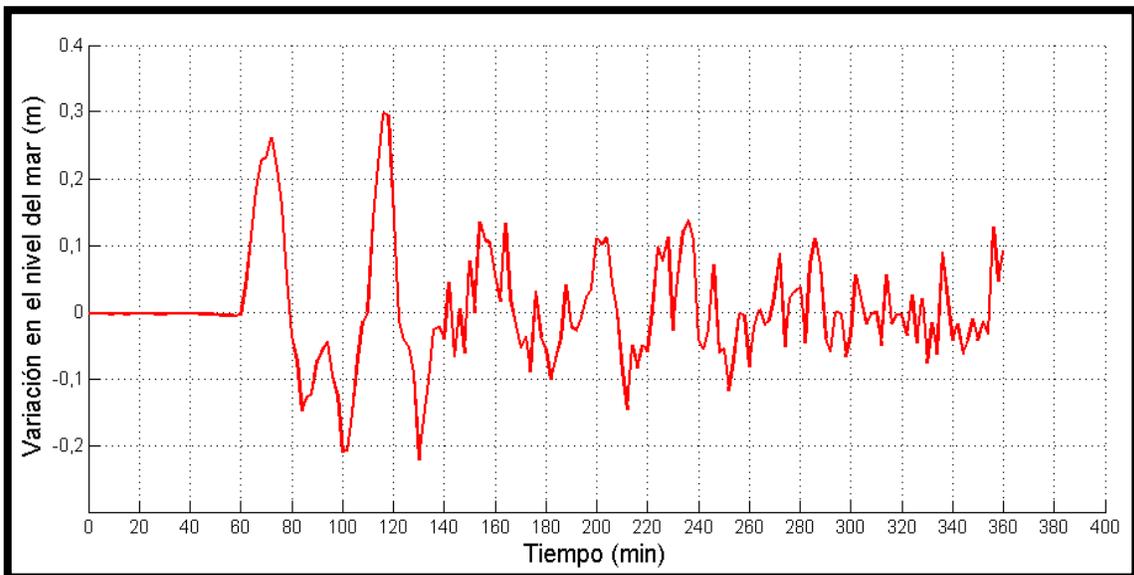


Figura 117. Señal Sintética Punto Costero en Salahonda, para el Evento de E4.



Una vez ocurre el evento sísmico en los epicentros E1 y E2, la primera ola en arribar al punto costero ubicado frente a la población de Salahonda debida a estos dos escenarios es de aproximadamente de 4 m de altura en 28 minutos(Figura 114-115), siendo éstas la que presentan una mayor amplitud. Para el caso de los escenarios E3 y E4, el tiempo de llegada de la primera ola a la costa es de 53 y 72 minutos con alturas de 0.25 y 0.26 m respectivamente(Figura 116-117), teniendo en cuenta que para el primero (E3) de estos escenarios, la primera ola es la que tiene una mayor amplitud, mientras que para el otro (E4), la segunda ola supera a la primera en 0.03 m.

Curay

Figura 118. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E1.

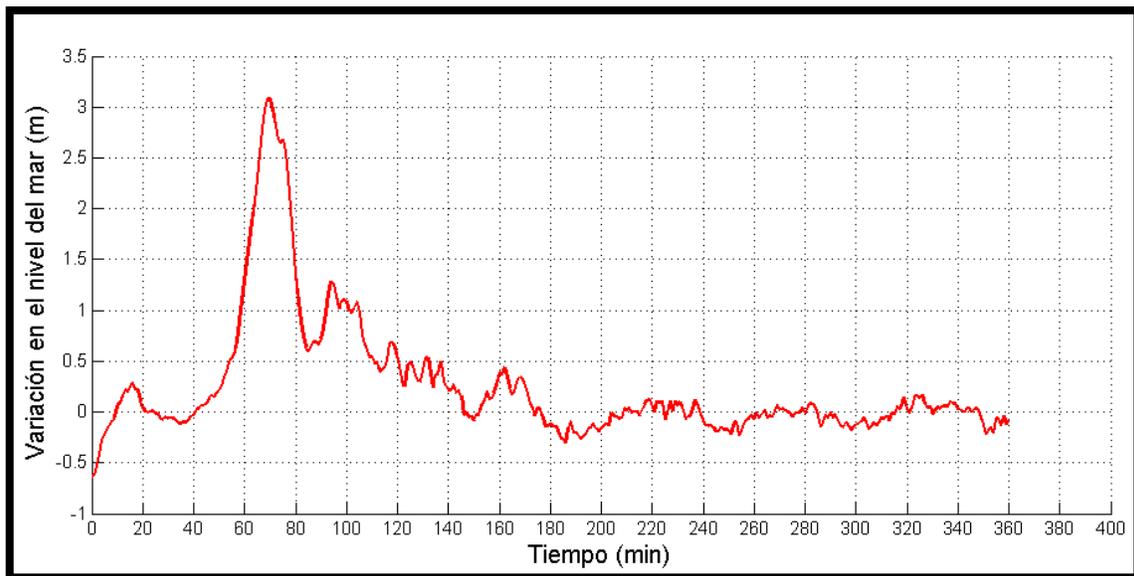


Figura 119. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E2.

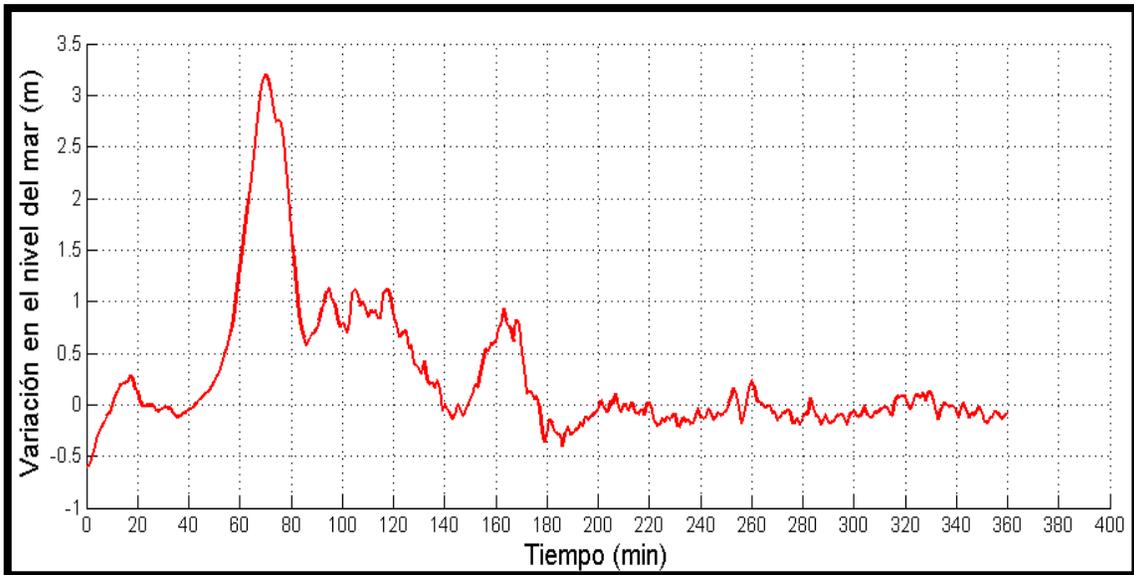


Figura 120. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E3.

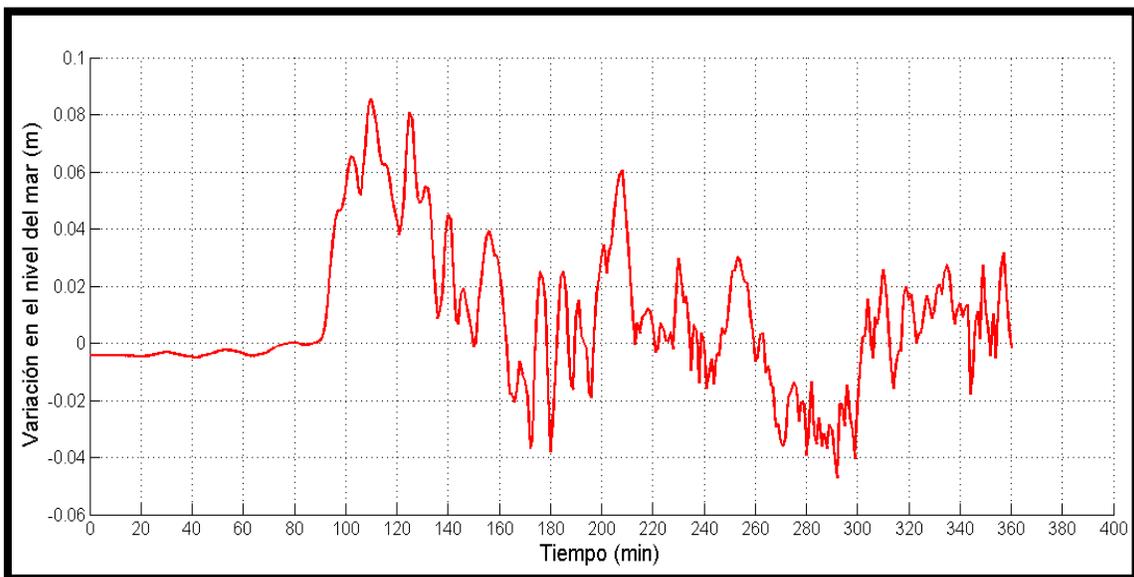
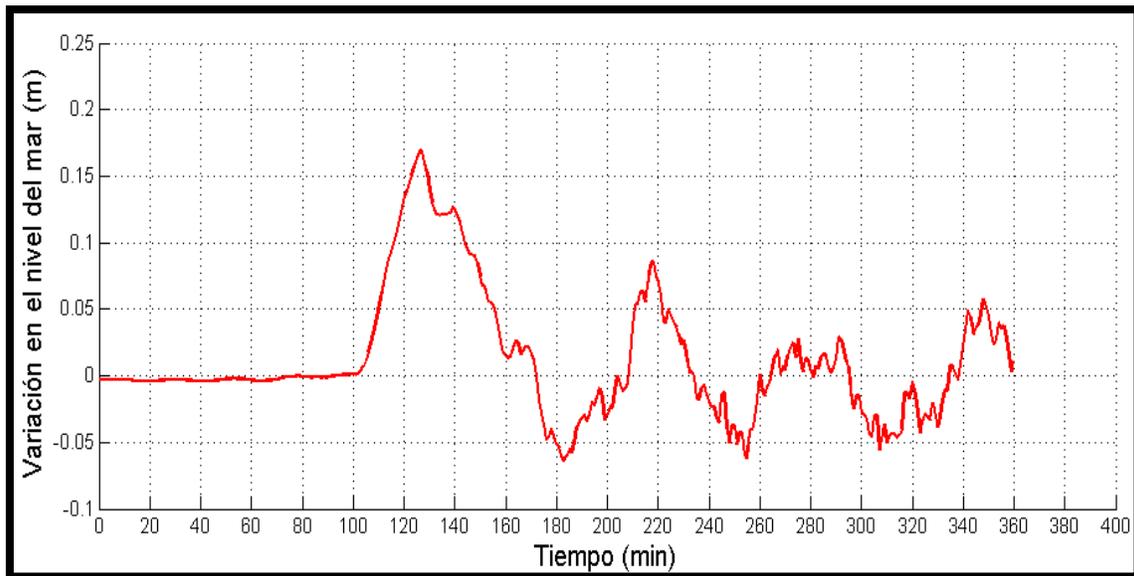


Figura 121. Señal Sintética Punto Costero en Curay, para el Evento de E4.



En la población de Curay, al igual que en las anteriores poblaciones, se evidencia una mayor afectación por el tren de ondas generadas a partir de los eventos E1 y E2, las cuales arriban a la población en mención, en aproximadamente 70 minutos, con alturas de 3.1 y 3.2 m(Figura 118-119).A partir de los mareogramas generados debido a los escenarios E3 y E4, se exhiben olas llegando a la población de interés de aproximadamente 0.06 y 0.17 m, con un tiempo de arribo de 103 y 126 minutos(Figura 120-121).

Tumaco

Figura 122. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E1.

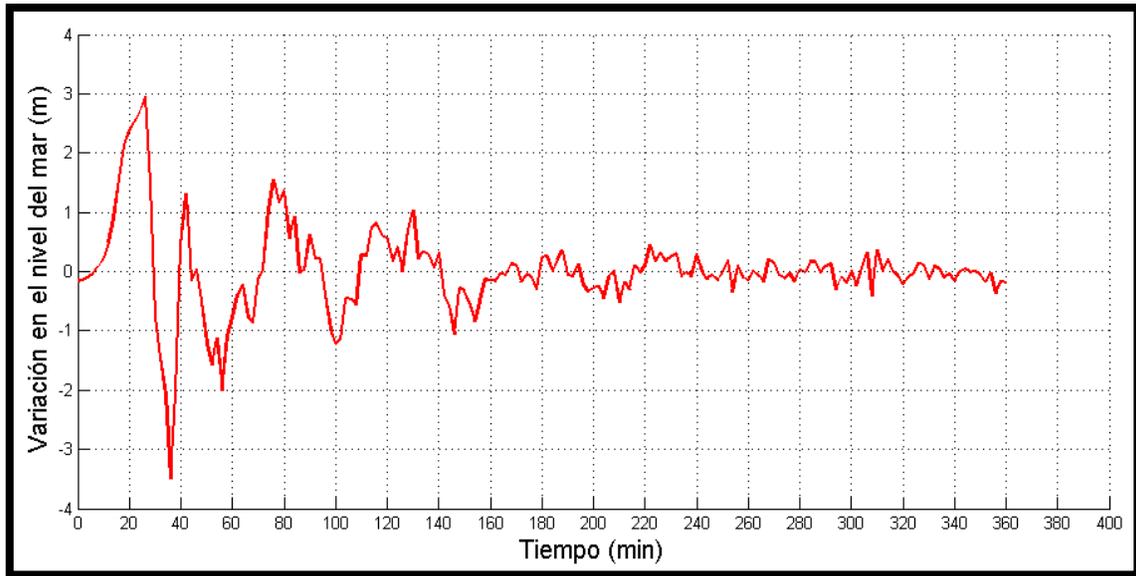


Figura 123. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E2.

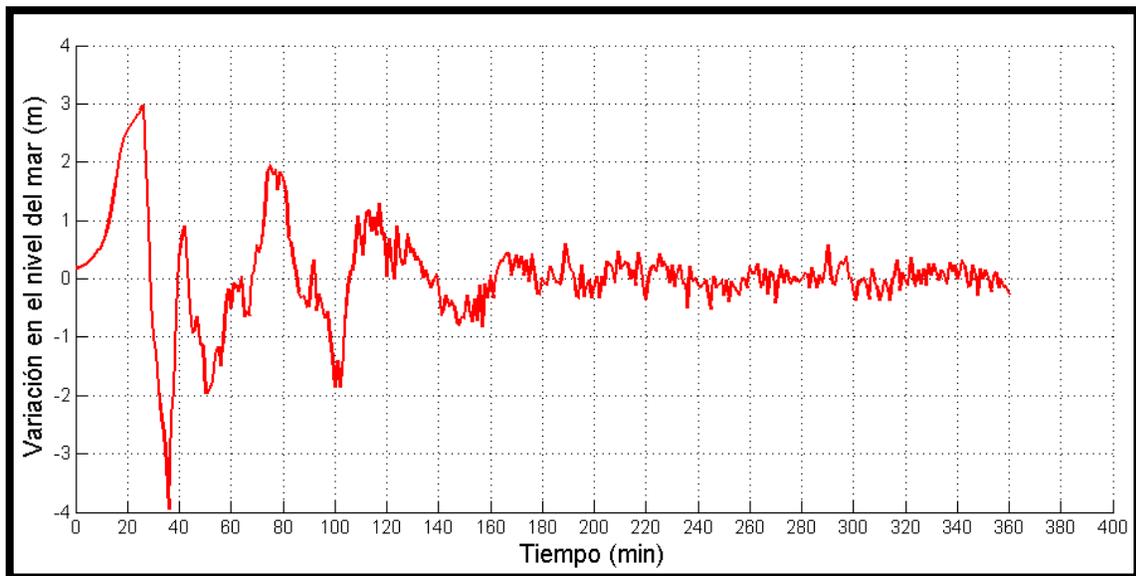


Figura 124. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E3.

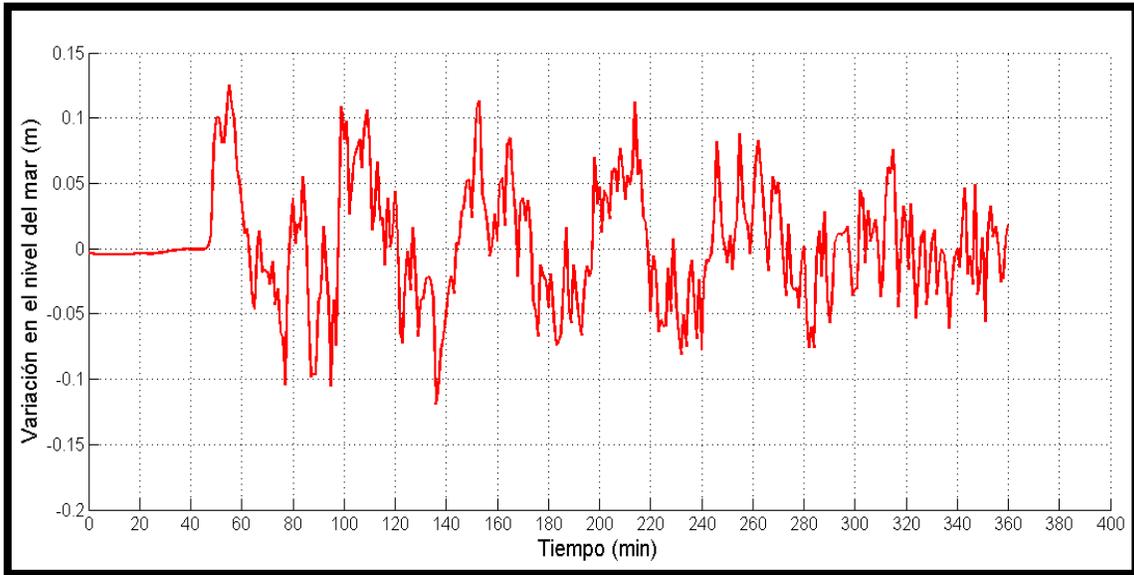
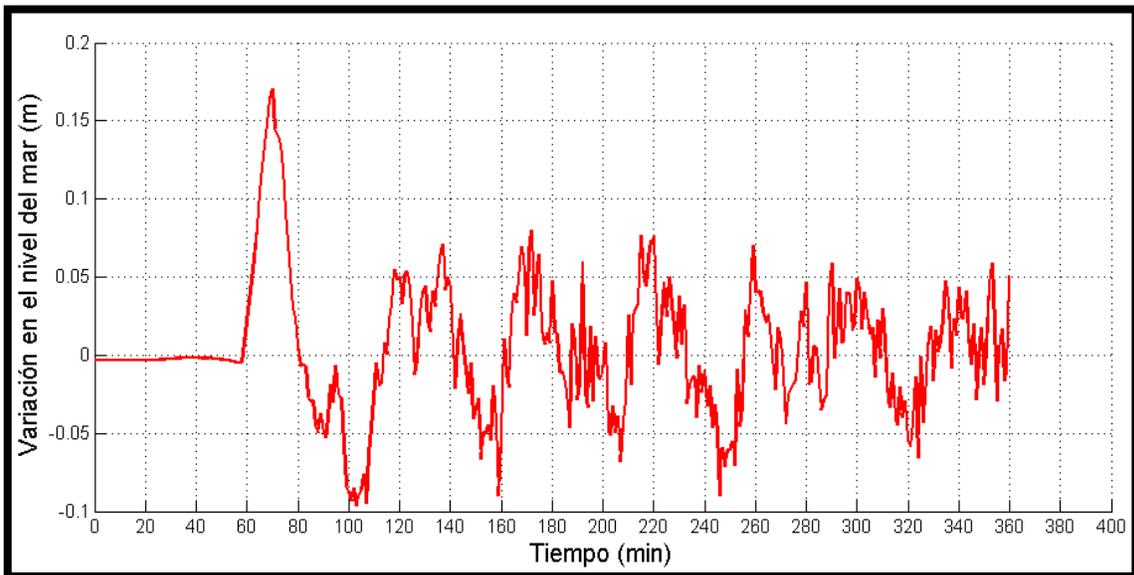


Figura 125. Señal Sintética Punto Costero en Tumaco, para el Evento de E4.



Las figuras 122 y 123 muestran las señales sintéticas generadas por los escenarios E1 y E2, las cuales permiten establecer el tiempo de llegada de las olas a la costa de Tumaco. Se puede apreciar que el tiempo de llegada de la primera ola a Tumaco es de 26 minutos aproximadamente para ambos escenarios. En cuanto a los escenarios E3 y E4 (figuras 124-125), los tiempos de arribo de la primera ola a Tumaco son de 55 y 70 minutos, respectivamente. Cabe resaltar que esta zona, al ser una bahía abierta no presenta efectos de reflexión tan marcados como los presentados en la bahía de Buenaventura mostrando en los mareogramas que la primera ola en llegar a la población es la que tiene mayor amplitud.

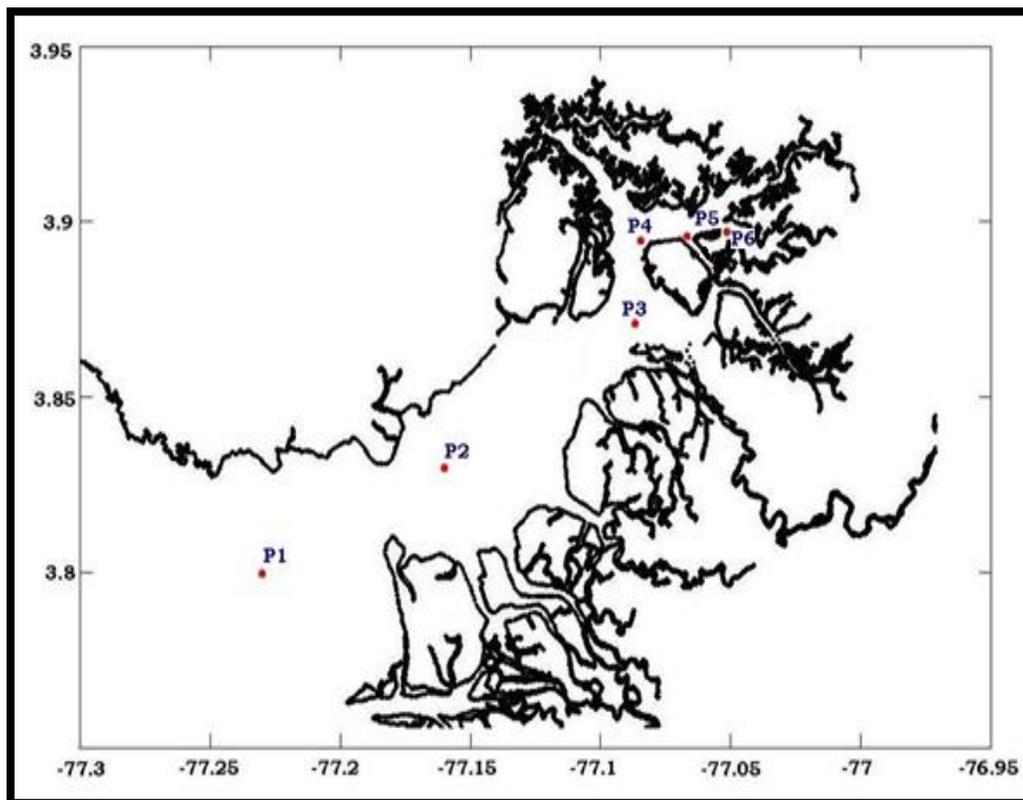
Con base en lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el escenario E1, presenta menores tiempos de llegada a las poblaciones de Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco, en comparación a los tiempos obtenidos resultado de la simulación de los escenarios E2, E3 y E4.

Con el fin de evaluar la evolución del tren de olas de tsunami durante su tránsito por la bahía de Buenaventura, se establecieron 7 puntos de interés (Tabla XXIX), teniendo en cuenta que los mareógrafos (virtuales) deben estar ubicados en puntos de profundidades similares para hacer efectiva la comparación. El primero se ubicó a la entrada de la bahía donde se evidencia el cambio abrupto en la línea de costa; el segundo se ubicó en la mitad del canal de acceso, los 4 siguientes alrededor de la isla Cascajal. En la figura 126, se muestra la ubicación de los mareogramas.

Tabla XXIX. Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.

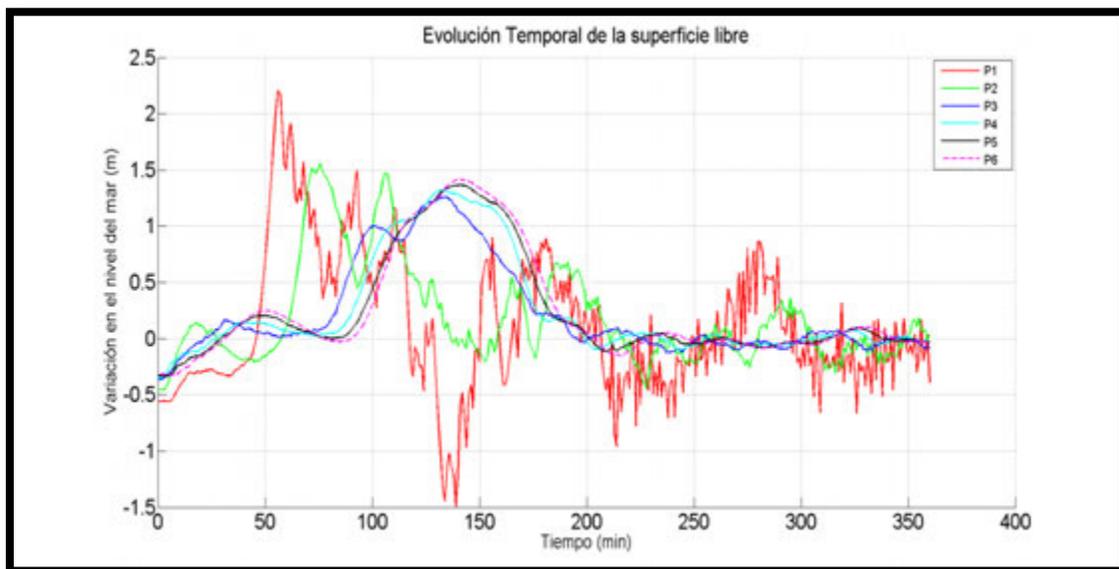
Mareograma	Coordenadas	nx	ny	H(m)
P1	77.2300°W – 3.800°N	11	32	7.54
P2	77.1600°W – 3.8300°N	92	72	7.58
P3	77.0808°W – 3.8712°N	176	111	7.21
P4	77.0848°W – 3.8954°N	186	146	6.77
P5	77.0673°W – 3.8954°N	207	146	7.36
P6	77.0515°W – 3.8971°N	222	148	8.25

Figura 126. Ubicación Espacial de Los Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.



La figura 127, muestra una superposición de las señales sintéticas generadas por el evento E1, para cada uno de los puntos mencionados anteriormente. Aproximadamente en el minuto 50 la primera ola llega al punto P1 con una altura mayor a 2m, se puede deducir que la ola va perdiendo altura a medida que se acerca al casco urbano, debido a la disipación de energía que sufre la misma por la fricción con el fondo a medida que se propaga, sin embargo en algunos puntos al interior de la bahía sufre aumentos, ya que por encontrarse confinada en el canal, la reflexión de la onda en los contornos, aporta a la amplitud de la misma.

Figura 127. Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Buenaventura.

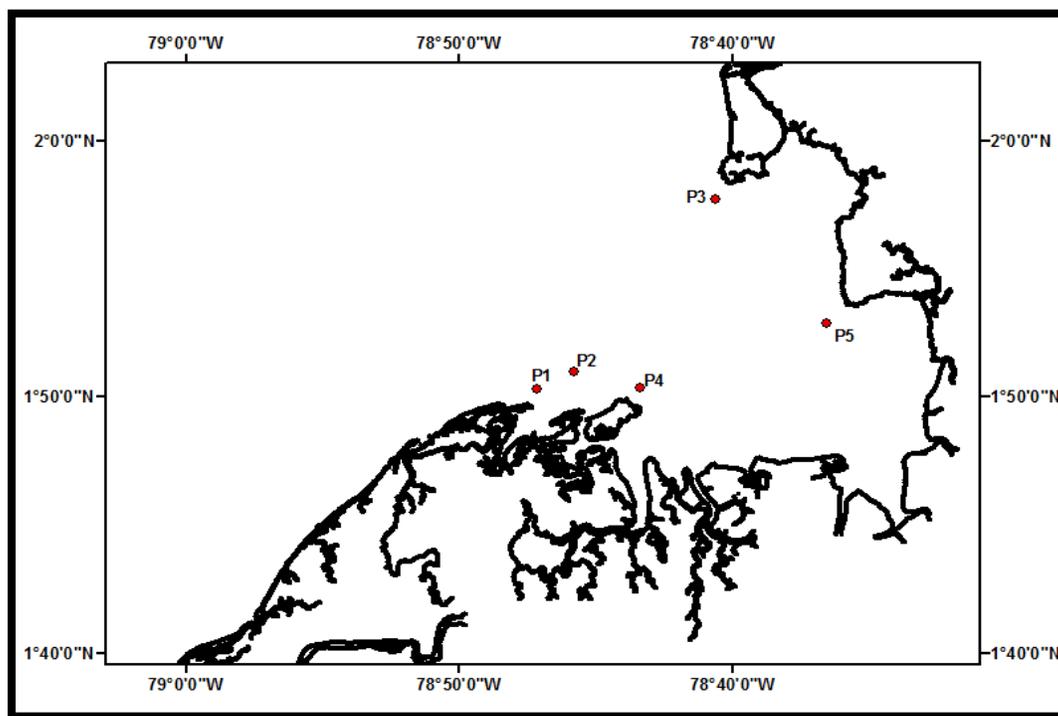


El mismo análisis se realizó en la bahía de Tumaco con el fin de establecer el comportamiento de las olas en esta bahía, para lo cual se establecieron 5 puntos ubicados desde el inicio de la bahía hasta la parte interna, conservando una profundidad semejante, como se observa en la figura 128.

Tabla XXX. Puntos De Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de la Superficie Libre en la Bahía de Tumaco.

Mareograma	Coordenadas	nx	ny	H(m)
P1	78.7859°W– 1.838688°N	324	215	7.55
P2	78.763411°W – 1.849522°N	351	227	7.63
P3	78.676744°W – 1.962022°N	400	215	7.60
P4	78.722577°W– 1.83950°N	536	265	7.67
P5	78.776466°W – 1.843966°N	455	362	7.46

Figura 128. Ubicación Espacial de los Puntos de Interés Seleccionados para Evaluar la Evolución Temporal de La Superficie Libre en La Bahía de Buenaventura.



Al igual que en el caso anterior, se superponen las señales de los mareogramas sintéticos ubicados en los puntos mencionados. A partir de la gráfica (figura 129),

2.5 DETERMINACIÓN DEL ESCENARIO DE AMENAZA MÁS DESFAVORABLE.

Para la determinación del escenario de amenaza más desfavorable en las poblaciones bajo estudio se ejecutaron un conjunto de simulaciones de Tsunami de origen cercano, en donde se combinaron condiciones de marea de referencia, magnitudes del sismo precursor, dislocación y epicentros. Los resultados de las simulaciones permitieron definir por medio de un análisis de probabilidad conjunta, la peor condición de amenaza, que junto con el análisis de vulnerabilidad física, permitieron determinar el escenario más desfavorable en caso de tsunami de origen cercano para Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay, Tumaco.

2.5.1 Peor Condición de Amenaza

La determinación de la peor condición de amenaza en caso de un tsunami de origen cercano para las poblaciones bajo estudio en el Pacífico Colombiano, parte del análisis sistemático o probabilidad conjunta de los resultados de los casos de simulación (Explicado en detalle en [67]), con base en los siguientes criterios de evaluación. Máximo desplazamiento de la superficie libre que describe las alturas Máximas del tren de ondas de tsunami que llegan a las poblaciones, Máximo run-up y niveles de inundación que permiten calcular las porciones de área inundada en las poblaciones, Tiempo de arribo del tren de ondas descrito por las señales sintéticas o mareogramas, y Comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras de las poblaciones de interés.

Se analizaron 990 casos de simulación, los cuales se obtuvieron a partir de la aplicación de los métodos determinista y probabilista, el primer método permitió definir los casos extremos para las tres fuentes de tsunami establecidas en este estudio para el Pacífico colombiano, el segundo método parte de los escenarios extremos y a través de la técnica de análisis probabilístico de la amenaza por tsunami (PTHA sigla en inglés) permitió obtener escenarios de tsunami, con diferentes magnitudes, epicentros, dislocación, y niveles de marea.

De esta manera el escenario extremo denominado E1, con magnitud de momento $M_w=8.8$ y en estado de marea alta, se define como el que presenta la peor condición de amenaza en todas las poblaciones de estudio.

Buenaventura.

Máximo de desplazamiento de la superficie libre de 1.8 m, mayor proporción de áreas inundadas (Ver figura 85), con tiempos de arribo del primer tren de olas de 100 minutos, tomando como punto de referencia Isla Pájaro al interior de la bahía, próximo a Isla Cascajal, y complejo comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras, teniendo en cuenta la propagación en la zona de rompiente con “bores” turbulentos y el ángulo de impacto del frente de onda. El comportamiento complejo del tren de ondas al llegar a la costa fue recurrente para todas las poblaciones de interés, un análisis más profundo y detallado sobrepasa el alcance planteado en este trabajo y sería objeto de investigación teniendo en cuenta otros objetivos y entregables.

Juanchaco

Máximo de desplazamiento de la superficie libre de 4.5 m, mayor proporción de áreas inundadas (Ver figura 89), menor tiempo de arribo del primer tren de ondas 34 minutos tomando como punto de referencia la entrada a bahía Málaga, y complejo comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras, teniendo en cuenta la propagación en la zona de rompiente y el ángulo de impacto del frente de onda.

Francisco Pizarro (Salahonda)

Máximo de desplazamiento de la superficie libre de 3 m para, mayor proporción de áreas inundadas para las poblaciones de interés (Ver figura 93), menor tiempos de arribo del primer tren de ondas aproximadamente 28 minutos tomando como punto de referencia el borde costero, y complejo comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras, teniendo en cuenta la propagación en la zona de rompiente y el ángulo de impacto del frente de onda.

Curay

Máximo de desplazamiento de la superficie libre de 3 m, mayor proporción de áreas inundadas (Ver figura 97), menores tiempos de arribo del primer tren de ondas aproximadamente 69 minutos, tomando como punto de referencia el veril de los 20 m, complejo comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras, teniendo en cuenta la propagación en la zona de rompiente y el ángulo de impacto del frente de onda.

Tumaco

Máximo de desplazamiento de la superficie libre de 3 m para Tumaco, mayor proporción de áreas inundadas (Ver figura 101), menores tiempos de arribo del primer tren de ondas aproximadamente 26 minutos para Tumaco, medido desde el origen del evento de tsunami (epicentro) hasta el punto de referencia en la entrada de la bahía, complejo comportamiento del tren de ondas al llegar a las zonas costeras, teniendo en cuenta la propagación en la zona de rompiente y el ángulo de impacto del frente de onda.

2.5.2 Análisis de Vulnerabilidad Física

Vulnerabilidad hace referencia a la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad, de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. (Ley 1523 de 2012).

La amenaza de tsunami en el Pacífico Colombiano, es una constante por encontrarse ubicado geográficamente frente a la zona de convergen las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana, lo cual ocasiona que se presenten una gran cantidad de sismos potencialmente generadores de tsunami.

La amenaza de tsunami toma fuerza en los asentamientos del litoral Pacífico Colombiano, debido a que estos se encuentran en constante crecimiento y tienden a extenderse a zonas próximas al mar. Sumado a esto, el proceso de urbanización

no es concebido bajo políticas de planificación del territorio, que tengan en cuenta las amenazas naturales como antrópicas.

Las características de las poblaciones ubicadas sobre el litoral Pacífico Colombiano, en un gran porcentaje son invasiones sobre terrenos de Bajamar los que se conocen como viviendas palafíticas, estas son viviendas construidas con estructuras y cimientos de baja calidad y con una alta densidad poblacional, lo cual se convierten en factores que aumentan las posibilidades de sufrir daños y pérdida de vidas humanas ante un evento de tsunami.

Otro factor que eleva el grado de vulnerabilidad ante un potencial tsunami, es la geomorfología que presentan las zonas en donde están ubicadas estas poblaciones, en su gran mayoría son planicies costeras, salvo algunos casos que presentan acantilados. Estas geoformas por ser relativamente planas son más vulnerables, porque ante un tsunami permite libre entrada de la ola lo cual hace que se presente una mayor inundación y por consiguiente un mayor daño.

.Adicionalmente, existe una vulnerabilidad social cada vez más progresiva, debido al aumento de población y las condiciones de vida, desencadenando una vulnerabilidad física; relacionada con la falta de mantenimiento de los elementos que hacen parte de las poblaciones (viviendas, sistemas urbanos, líneas vitales) [68].

En la zona del litoral Pacífico, el 55% de las viviendas tienen como material predominante de las paredes el bloque o ladrillo, sin embargo se encuentra una participación importante de viviendas (45%) construidas con materiales más

sensibles a los efectos de la inundación a corto y largo plazo. Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco, se encuentra dentro de los sectores que presentan mayor vulnerabilidad estructural y funcional en el litoral Pacífico en cuanto a población expuesta a algún tipo de amenaza por inundación (IDEAM, 2001).

La vulnerabilidad física de las áreas de este estudio, se evaluó a partir de la determinación del grado de exposición y tipo de estructura de viviendas, frente a inundación. De igual manera se manifiesta que la metodología para el análisis de la vulnerabilidad física de las poblaciones es de manera cualitativa, es decir sin llegar al grado de detalle de evaluación de las estructuras. Uno de los criterios manejados para llegar a este análisis de vulnerabilidad es observar el grado de exposición de los elementos, a partir de su localización en áreas de menor o mayor amenaza [68], construidos a partir de insumos geográficos con los que cuenta en el CCCP, tales como;

- ✓ Ortofotos (2006)
- ✓ Datos LiDAR (2006)
- ✓ Fotografía antiguas suministradas por IGAC.
- ✓ Capa Geográfica de la Línea de Mas Alta Marea.
- ✓ Capa Geográfica de terrenos Bajamares Actuales.
- ✓ Capa Geográfica de terrenos Bajamares históricos.
- ✓ Modelo Digital de Altura de Terreno.

De igual forma se recopiló información secundaria de diferentes instituciones a nivel local y nacional.

- ✓ Plan de Ordenamiento Territorial de Tumaco. (Alcaldía de Tumaco 2008-2019)
- ✓ Plan de Desarrollo Buenaventura. (Alcaldía Buenaventura 2012-2015)
- ✓ Toponimia San Andrés de Tumaco – Buenaventura (IGAC 1988)
- ✓ Ley 1523 de 2012 –(UNGRD)

Con base en los insumos geográficos (capas) anteriormente nombrados, se trazó a una escala de digitalización 1:600 las zonas con mayor grado de exposición y tipo de estructurade viviendas palafíticas en Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay, Tumaco. Logrando establecer que las estructurasubicadas sobre las zonas de bajamar (zonas con mayor grado de exposición) y de tipo vivienda enpalafito presentan mayor vulnerabilidad física.

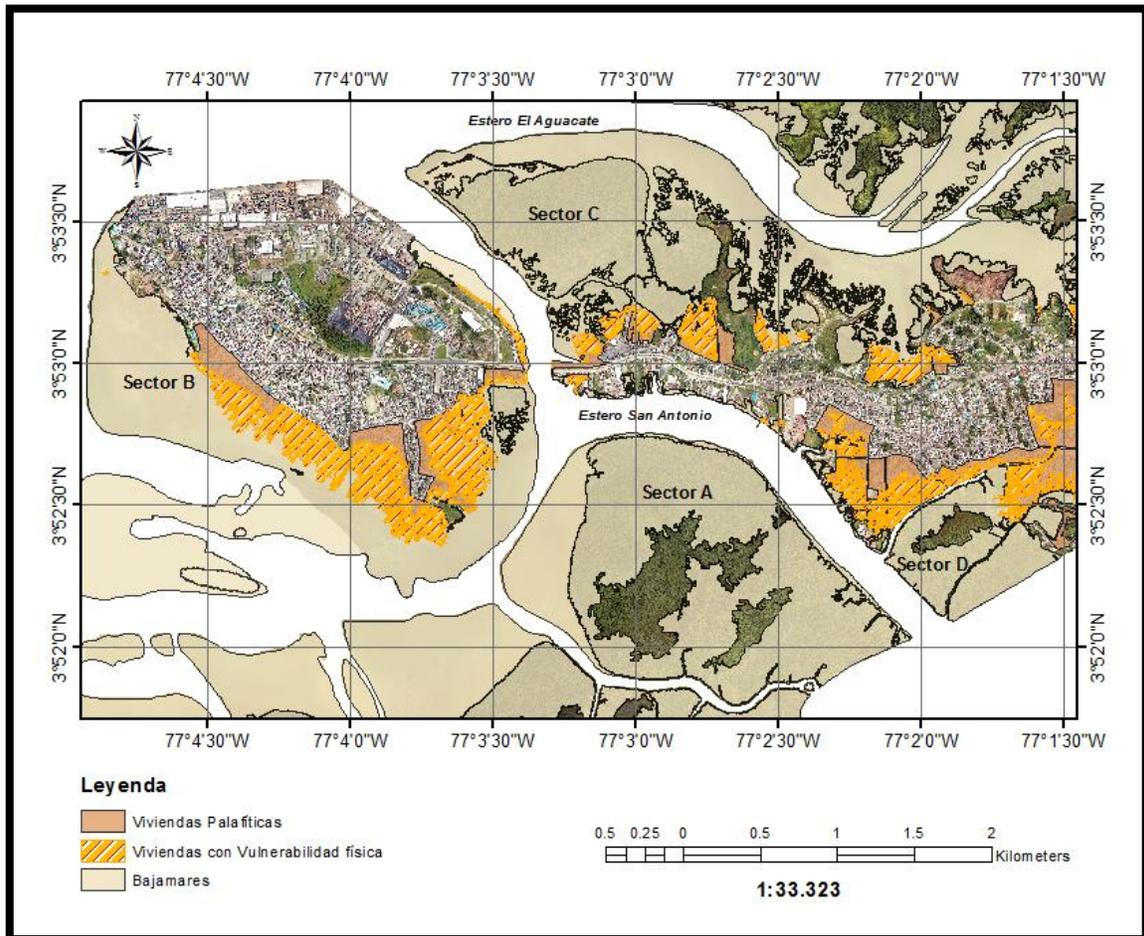
Buenaventura

Después de generar un cruce de información (zonas de mayor exposición - vivienda palafíticas) se puede identificar:

- ✓ la mayoría de viviendas tipo palafíticas se encuentran ubicadas en los terrenos de bajamar.
- ✓ Sector A: existe presencia de zonas de mayor exposición (terrenos de Bajamar), pero después de una fotointerpretación no se logró identificar viviendas de tipo palafíticas, por ende se concluye que la vulnerabilidad física es menor con respecto a los otros sectores.
- ✓ Sector B: el análisis permite identificar que en este sector existe mayor grado de vulnerabilidad física, ya que existen viviendas tipo palafíticas ubicadas en terrenos de mayor exposición.

- ✓ Sector C: igualmente en este sector se identificó, alto grado de vulnerabilidad física ya que existen viviendas tipo palafíticas sobre terrenos de mayor exposición.
- ✓ Sector D: de la misma manera que el Sector A podemos observar que está en terrenos de mayor exposición pero no existe viviendas, por tal motivo el grado de vulnerabilidad física de esta área es menor a las de los sectores B y C.

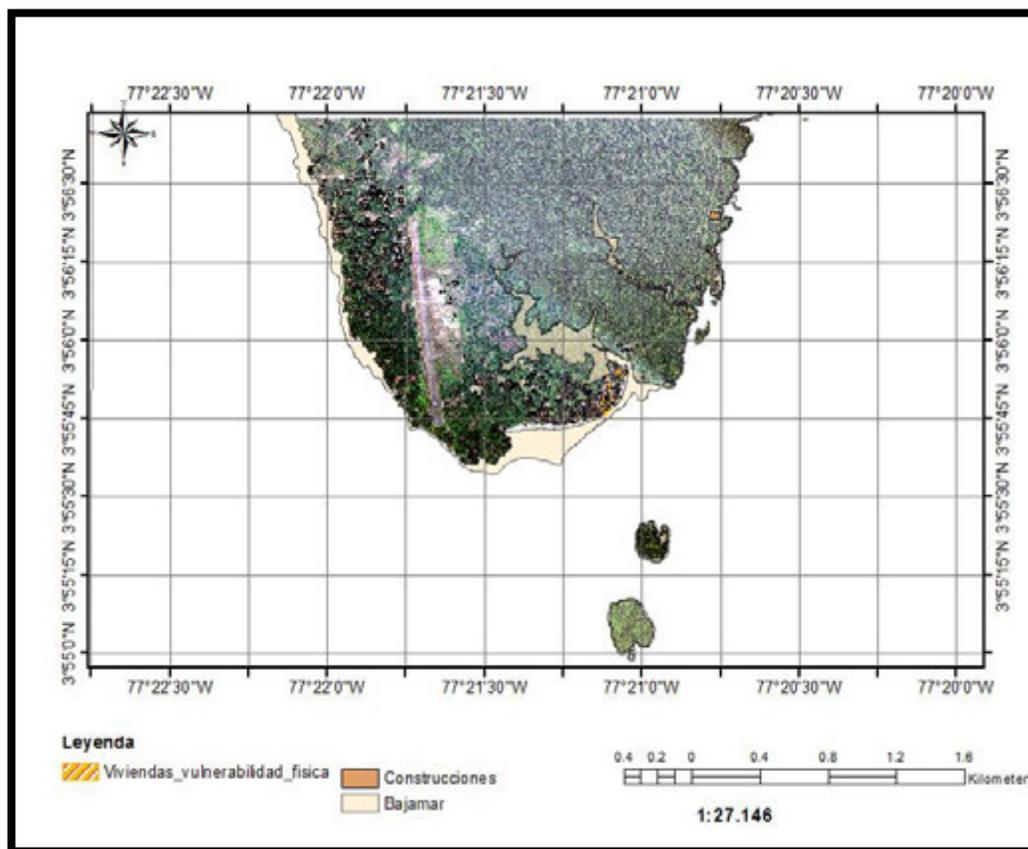
Figura 130. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Buenaventura.



Juanchaco

- ✓ El sector de Juanchaco como se observa en la gráfica 131, es un área donde la presencia de zonas de bajamar es reducida esto debido a la altura de terreno en la esta zona.
- ✓ Gran parte de construcciones palafíticas de este sector, no se cruzan con las zonas de mayor exposición.
- ✓ La zona que se encuentra con mayor vulnerabilidad física se encuentra en límite con la playa.

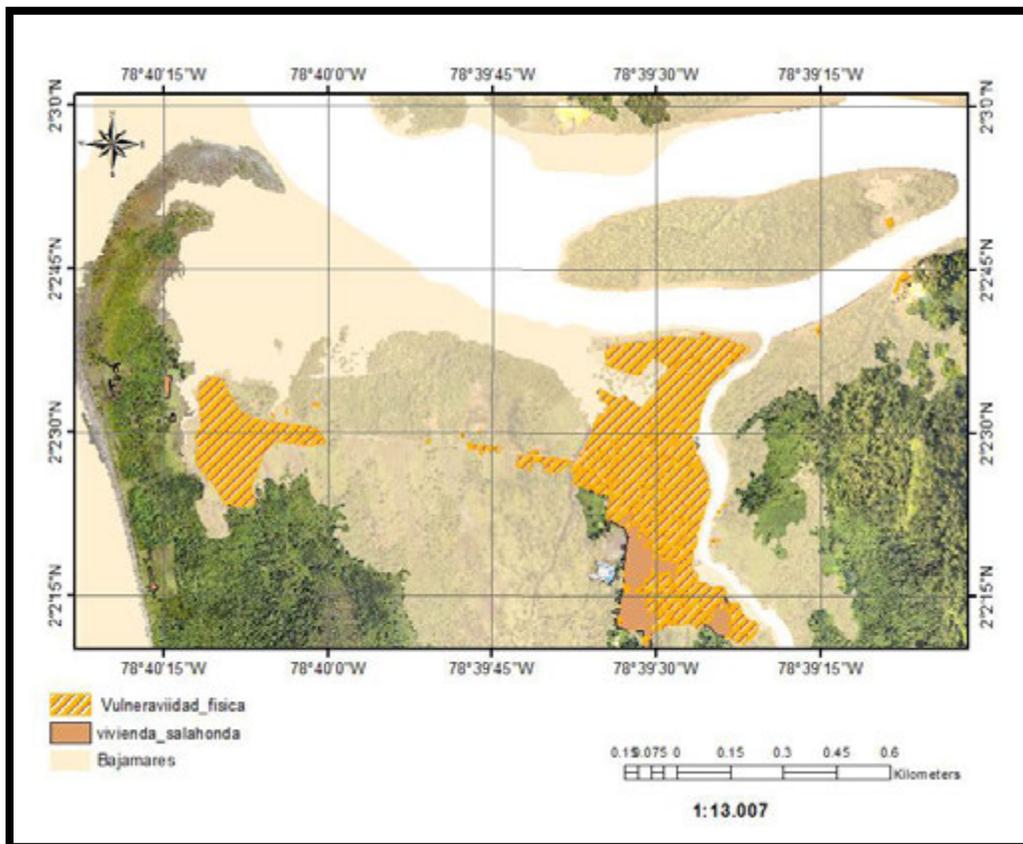
Figura 131. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Juanchaco.



Salahonda

- ✓ Gran Parte de El casco Urbano de este municipio se encuentra, en zona de mayor exposición, limitando con esteros y playas.
- ✓ Aproximadamente entre el 82% y 84% de las viviendas de esta zona se encuentran construidas sobre terrenos de bajamar con un tipo de construcción palafíticas, logrando identificar un alto grado de vulnerabilidad física para este Municipio.

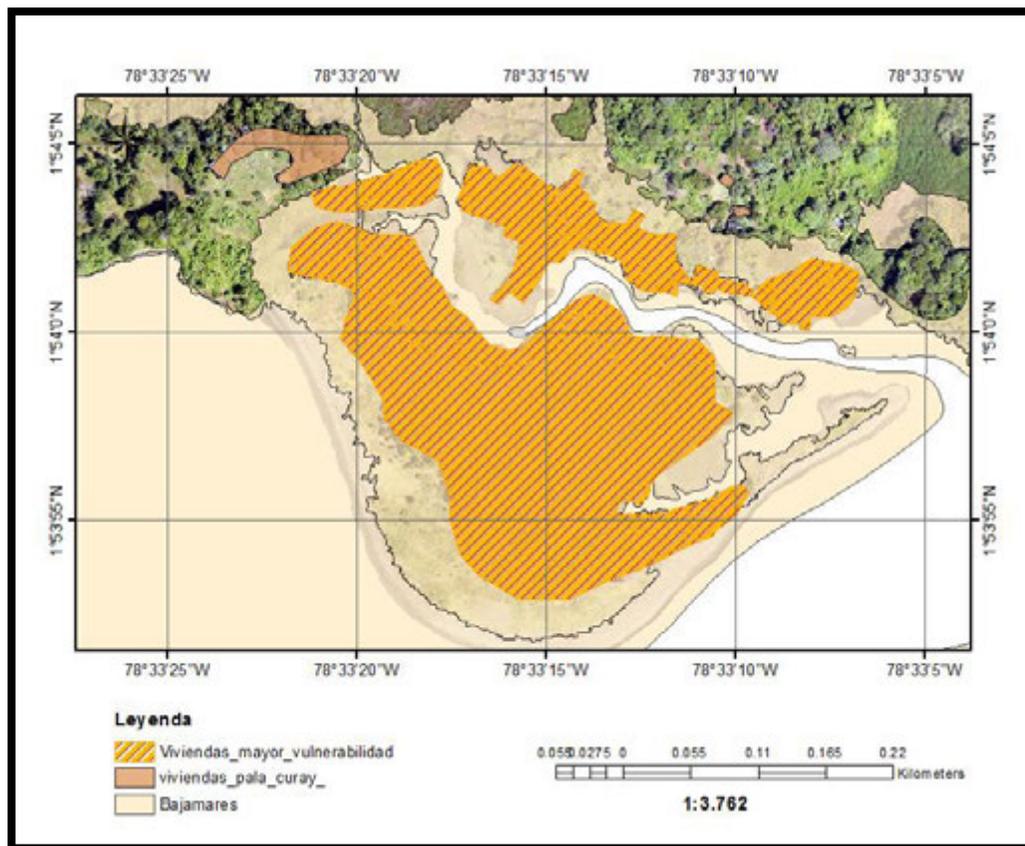
Figura 132. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Salahonda.



Curay

- ✓ La mayoría de viviendas tipo palafíticas se encuentran ubicadas en los terrenos de bajamar.
- ✓ el 91% de las viviendas de esta zona se encuentran construidas sobre terrenos de bajamar con un tipo de construcción palafíticas, logrando identificar un alto grafo de vulnerabilidad física para este sector.

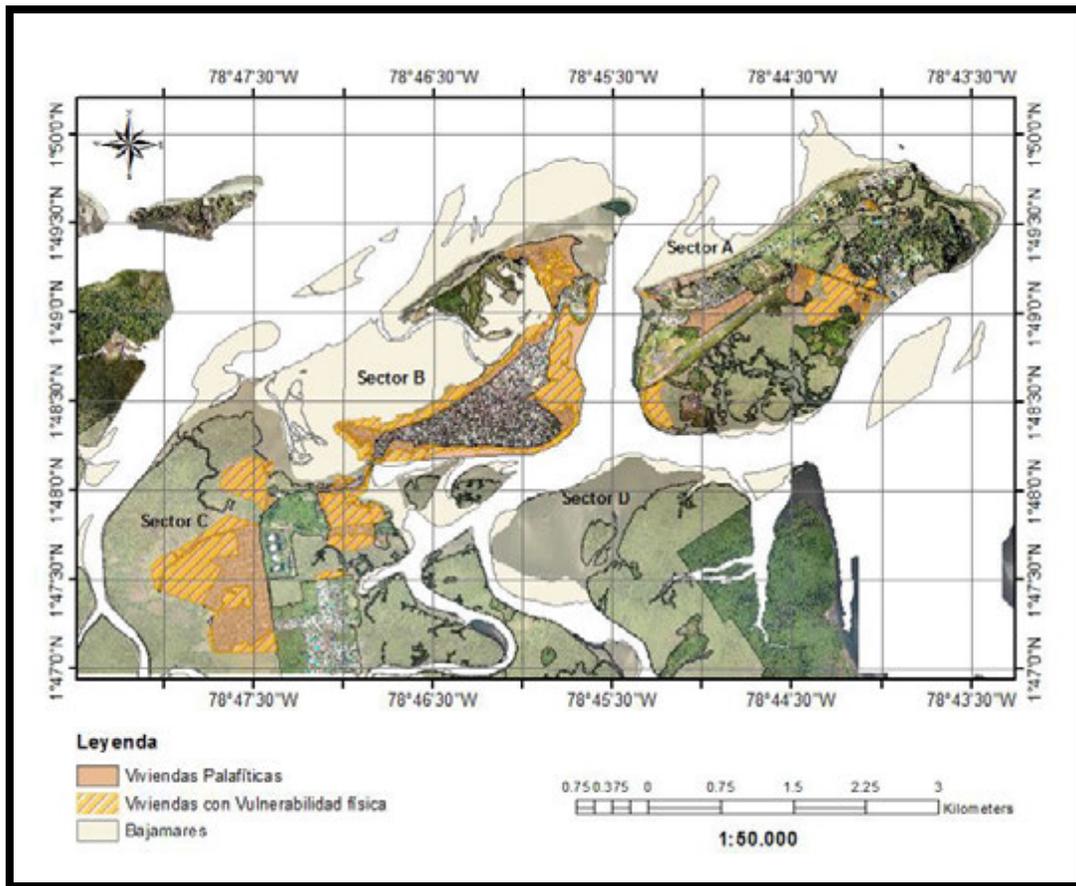
Figura 133. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Curay.



Tumaco

- ✓ Sector A: al sobreponer viviendas palafíticas vs zona de mayor exposición, se logró identificar que en este sector existe vulnerabilidad física en algunos lugares que limitan con esteros.
- ✓ Sector B: se logró identificar, alto grado de vulnerabilidad física ya que en el sector existen construcción de viviendas tipo palafíticas sobre terrenos de mayor exposición, de igual forma se logró identificar mayor cantidad de construcciones tipo palafíticas con respecto a otros sectores.
- ✓ Sector C: cabe resaltar que este sector se encuentra ya en la parte continental a diferencia de los anteriores, más sin embargo todavía existe presencia de construcciones tipo palafíticas en terrenos de bajamar, los cuales en este caso se encuentra en límite con esteros.
- ✓ Sector D: existe presencia de zonas de mayor exposición, pero después de una fotointerpretación no se identifica viviendas de tipo palafíticas y de ninguna otra clase, por ende se concluye que la vulnerabilidad física es menor con respecto a otros sectores.

Figura 134. Definición Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física en Tumaco.



2.5.3 Escenario de amenaza más desfavorable

Las figuras 135-139, presentan la sobre posición de la peor condición de amenaza, con las zonas de mayor vulnerabilidad física en Buenaventura, Juanchaco, Salahonda, Curay y Tumaco. Se puede observar que las zonas con mayor inundación presentan la mayor vulnerabilidad física, esto pone de manifiesto que el escenario más desfavorable para las poblaciones bajo estudio, es un evento de tsunami en la Zona de Subducción (origen cercano) producido por

un sismo con características del escenario extremo E1 que se presentase en estado de marea alta.

Figura 135. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Buenaventura.

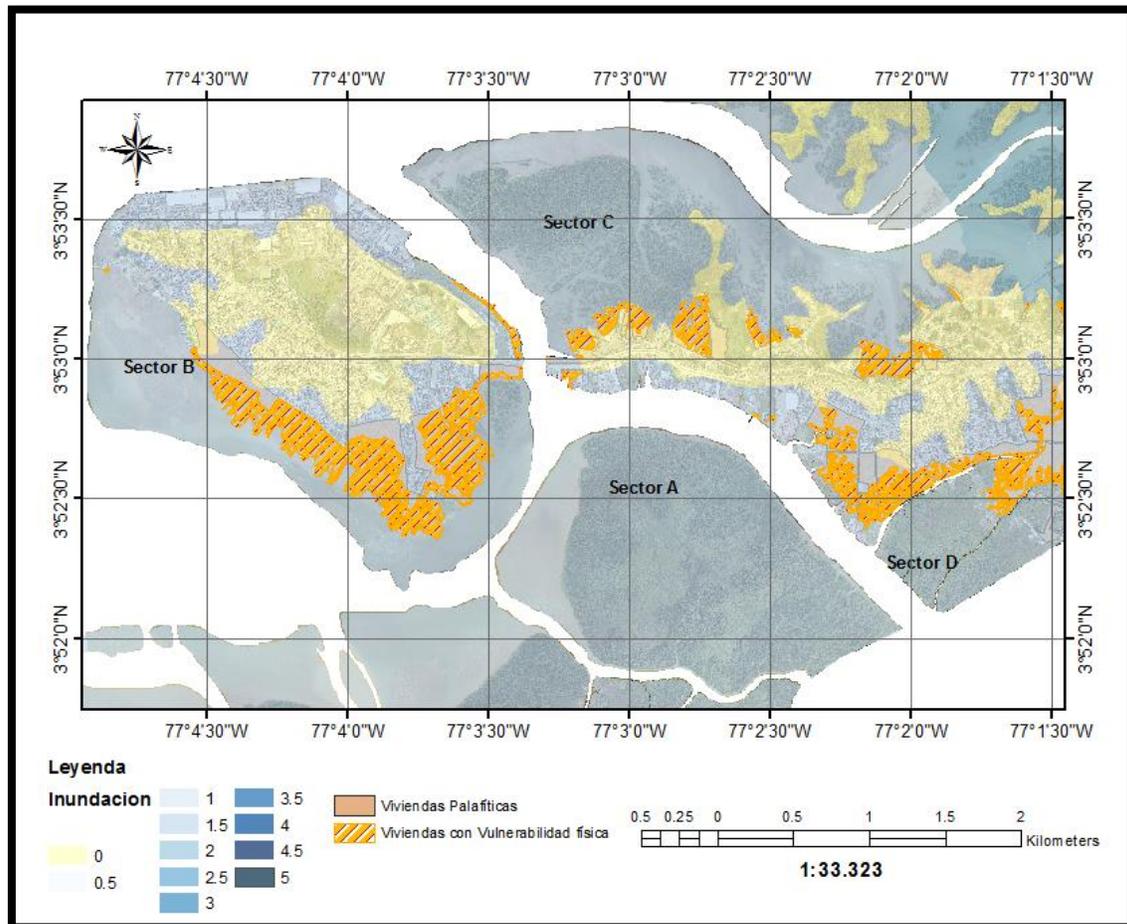


Figura 136. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Juanchaco.

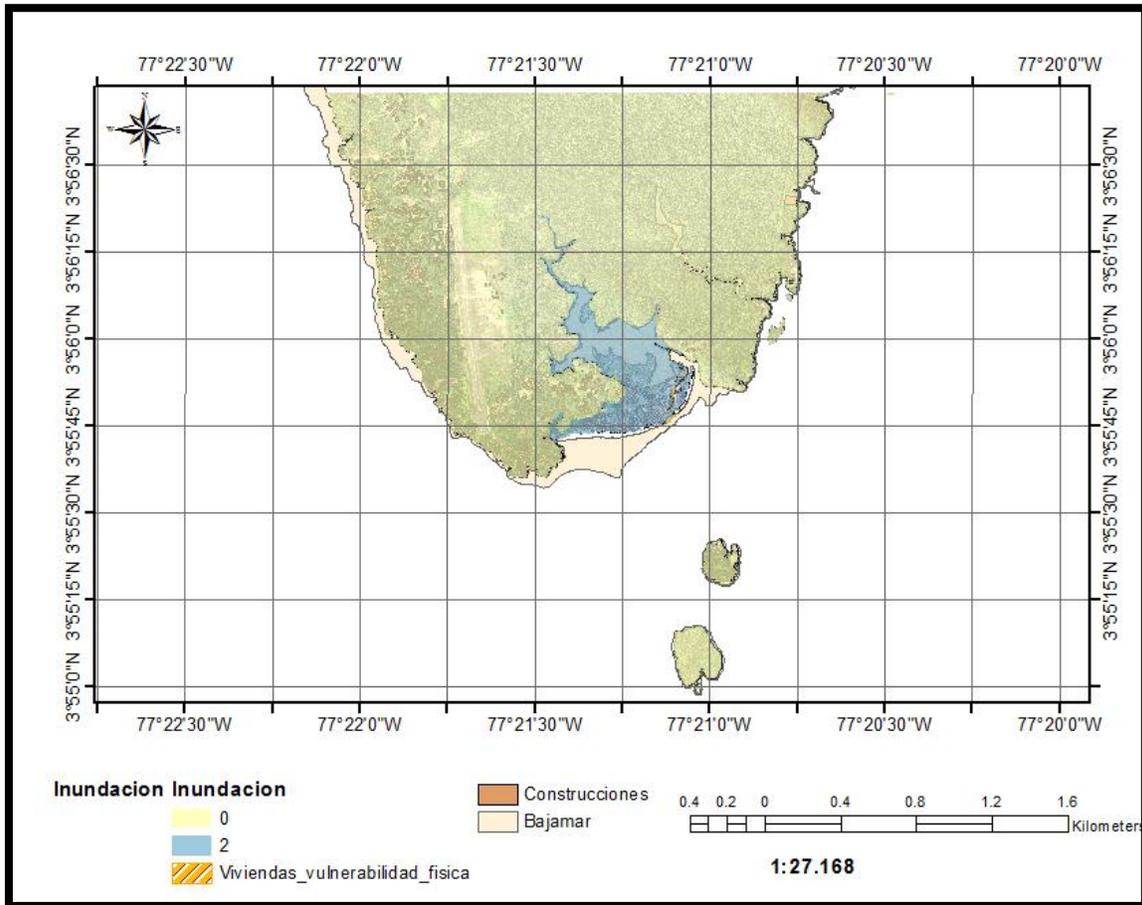


Figura 137. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Salahonda.

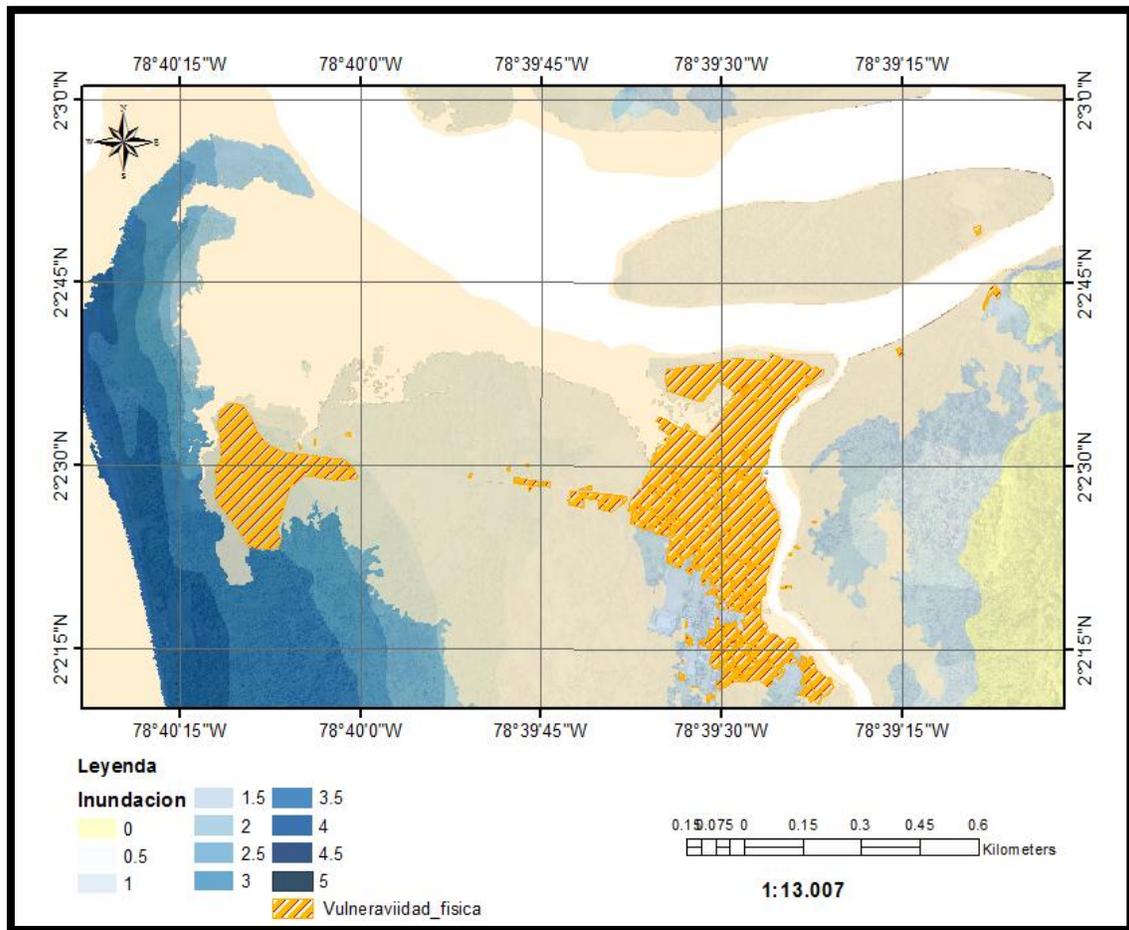


Figura 138. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Curay.

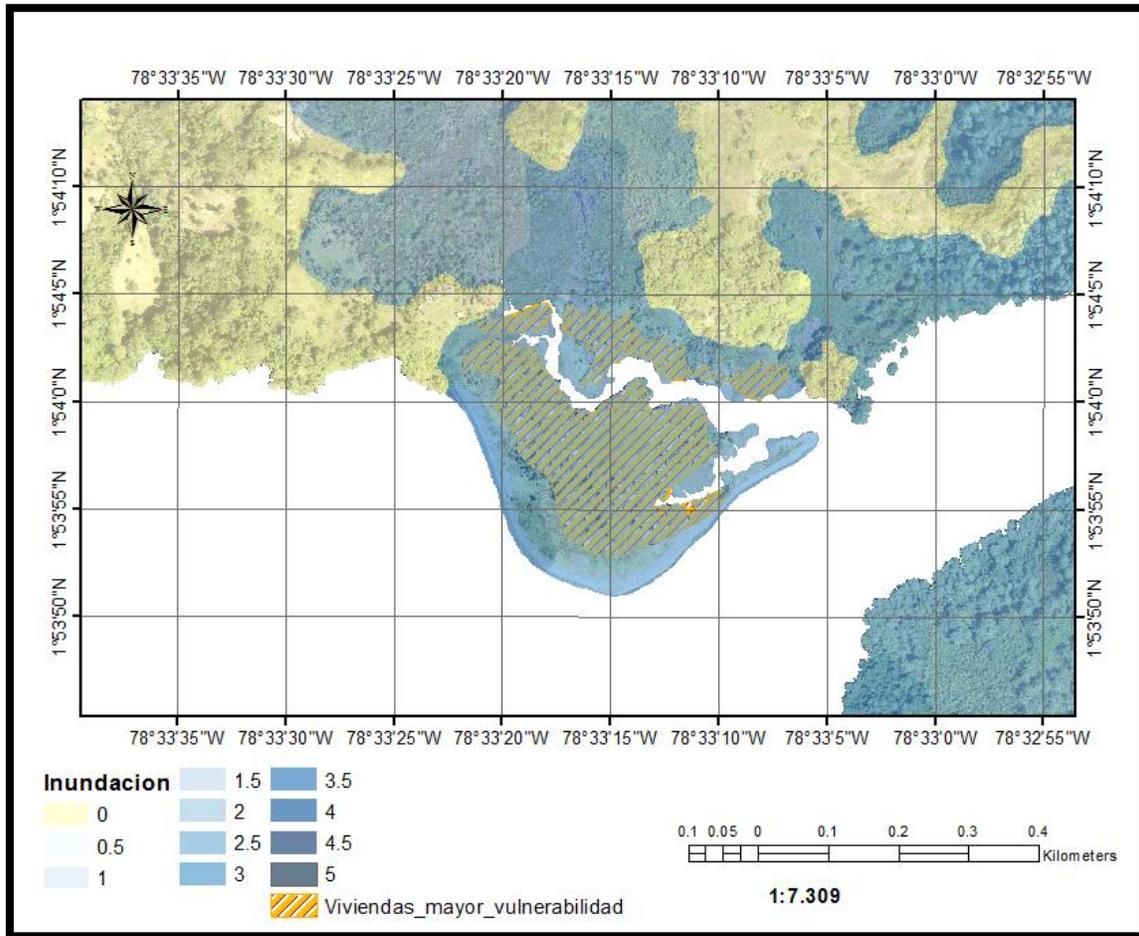


Figura 139. Superposición Condición de Peor Amenaza Vs Zonas de Mayor Vulnerabilidad Física para Tumaco.

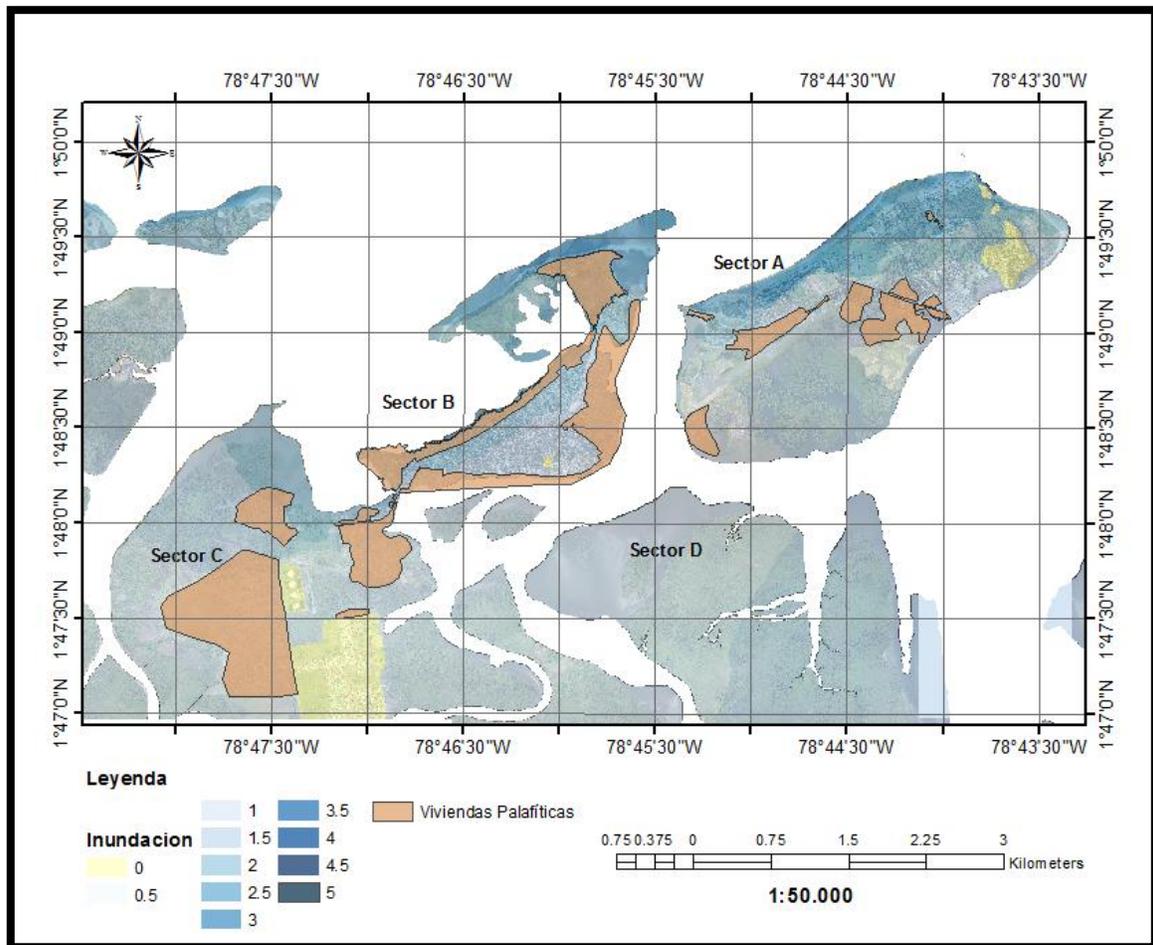


Tabla XXXI. Consolidado Ejecución Fase II

ACTIVIDADES PROGRAMAS	PORCENTAJE DE EJECUCIÓN
Delimitación del área de trabajo	100%
Definición del escenario sísmico	100%
Acondicionamiento de información batimétrica y altimétrica	100%
Aplicación de los modelos de generación y propagación	100%
Definición del escenario de inundación	100%

4 FASE III: GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

El riesgo es entendido como cualquier fenómeno de origen natural o antrópico que signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una comunidad determinada, que sea vulnerable a esté; hay riesgos relacionados con la pérdida de ilimitados bienes materiales y, aún peor, de irrecuperables vidas humanas. La falta de toma de medidas preventivas de la ciudad, el mal diseño de la infraestructura, la carencia de capacitación poblacional y la apatía a los planes de emergencia, generalmente contribuyen a amplificar el problema [69]. Los mapas de amenazas determinan el grado de exposición de las personas, actividades económicas e infraestructuras de un territorio a determinados peligros naturales, como pueden ser inundaciones, deslizamientos, sequías, temporales, sismicidad, vulcanismo, etc. Para el ordenamiento territorial de las poblaciones involucradas en este estudio, y comunidad en general, estos mapas pueden resultar muy útiles, ya que antes de construir, comprar o alquilar una vivienda, un terreno, etc., permiten conocer el riesgo de la zona.

En esta sección se presenta las actividades desarrolladas para la generación de cartografía temática de inundación por tsunami de origen cercano para las poblaciones de Buenaventura y Juanchaco en el Valle del Cauca; y Tumaco, Salahonda y Curay en Nariño.

4.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende dos grandes zonas que son las siguientes:

1.3.1 Costa del Municipio de Buenaventura:

Ubicada en el departamento del Valle del Cauca, la costa del municipio de Buenaventura tiene aproximadamente 415Km de extensión, se caracteriza por presentar una geomorfología variada de costas altas con acantilados y colinas en las áreas de la bahía de Buenaventura y bahía de Málaga, y costas bajas en la parte de las desembocaduras de los ríos Anchicayá, Cajambre y Yurumanguí (figura 140).

Desde las Bocanas de las Bahías de Buenaventura y Málaga, predominan las georfomas de costas altas erosivas, lomas y colinas. Sin embargo, en la base de estos lomeríos encontramos planos depositacionales con vegetación tipo manglar.

Desde el estero San Antonio hasta Punta Limones en el S-E de la Bahía de Buenaventura, son costas bajas depositacionales de génesis marino fluvial. Allí desemboca el Río Dágua y se observan los esteros de San Antonio y Limones.

Las unidades geomorfológicas encontradas en esta zona son: islas, planos y llanuras con vegetación halófitas, planos de inundación, plataformas intermareales no vegetadas, lomas y colinas, lagunas costeras y playas. También se encontraron algunos rasgos geomorfológicos asociados a las lomas y colinas presentes en esta zona como: acantilados.

A continuación se describen cada una de estas unidades y rasgos geomorfológicos:

Lomas y Colinas

Se observan principalmente lomas de pendientes muy suaves, redondeadas, con alturas entre los 30 y 40 m y con vegetación tipo arbustal sobre ellas. Las colinas se pueden observar hacia la parte N-W de la bahía, estas son de alturas que alcanzan los 70 m, son columnares, de pendientes abruptas, con rasgos geomorfológicos como acantilados.

Islas

En la Bahía de Buenaventura hay dos islas llamadas Alba y Cascajal, son rocosas, Cascajal está completamente urbanizada mientras que Alba se encuentra rodeada de planos de inundación con vegetación de tipo manglar que la cubre el mar cuando la marea esta alta.

Playas

Las playas en la Bahía de Buenaventura se encuentran en el sector conocido como La Bocana, son de arena media, color gris oscuro, con abundantes minerales ferro-magnesianos. Son bastante amplias cuando la marea baja y contienen bastantes escombros de troncos y ramas de árboles que indican hasta donde sube la marea.

Planos de inundación

Estos planos están ubicados en la base de las lomas y colinas de la bahía, y hacia el sector de Punta Limones y donde desemboca el río Dagua. Son planos muy fangosos de sedimentos finos y abundante materia orgánica en donde crece vegetación de tipo manglar. Cuando la marea es alta son inundados totalmente.

Planos y llanuras con vegetación halófito

Son planos que se encuentran por encima del nivel de marea alta, son más firmes que los planos de inundación ya que no reciben constante inundación, solo se inundan cuando hay oleaje extremo, sobre estos planos crece vegetación halófito. Estos planos se observan desde Punta Limones hasta el estero San Antonio.

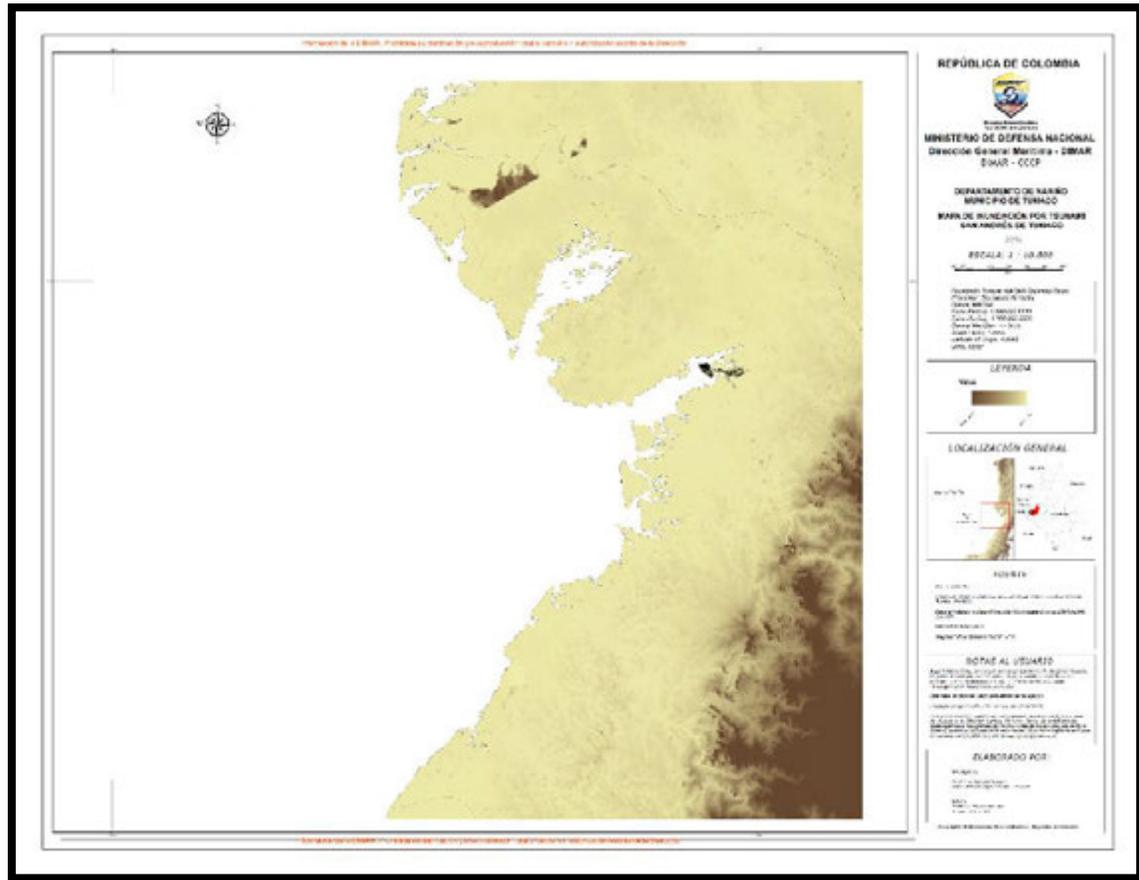
Plataformas intermareales no vegetadas

Se observan en toda la Bahía de Buenaventura junto a los planos con manglar, las islas, las playas, las colinas etc. Estos depósitos de sedimentos no consolidados y no vegetados quedan descubiertos cuando la marea baja totalmente y cubiertos cuando esta sube, son bastante fangosos, constituyen los fondos someros y están ubicados principalmente a lo largo de la línea de costa. Cuando estas plataformas están adyacentes a los manglares contienen gran cantidad de materia orgánica.

Lagunas costeras

Se observan cerca al estero Doscientos Pesos hacia el noroeste de la bahía, ocupadas parcial y totalmente por agua cuando la marea sube, están separadas del estero por una zona de manglar.

Figura 140. Mapa de la Bahía de Buenaventura.



3.1.2 Costa del Municipio de San Andrés de Tumaco:

Ubicada en el departamento de Nariño, en el municipio de Tumaco y Francisco Pizarro (Salahonda), con una extensión de línea de costa de km 218 (Figura 141).

Hacia la parte centro y sur de la Bahía de Tumaco las unidades geomorfológicas tienen una génesis marina fluvial debido a la depositación de sedimentos transportados por los ríos y por el oleaje del mar. Estas unidades son características de las costas bajas (o depositacionales pasivas) y corresponden a una región geomorfológica o macrounidad geomorfológica llamada planicie

deltaica asociada a la desembocadura de los ríos Mira principalmente, Rosario, Tablón, Chagui etc.

Hacia el norte las unidades además de tener características de costas bajas depositacionales, tienen características de costas altas erosivas debido a la presencia de otras macrounidades como lo son los lomeríos y las colinas.

Las unidades geomorfológicas encontradas en esta zona son: islas, planos y llanuras con vegetación halófila, planos de inundación, plataformas intermareales no vegetadas, espigas, lagunas costeras y playas. También se encontraron algunos rasgos geomorfológicos asociados a las lomas y colinas presentes en esta zona como: pilares, cantos rodados (bloques caídos), cavernas, arcos y acantilados.

A continuación se describen cada una de estas unidades y rasgos geomorfológicos:

Islas

Hacia el sur de la Bahía de Tumaco encontramos tres islas llamadas La Viciosa, Isla de Tumaco y El Morro. Dentro de estas encontramos otras unidades como lo son las playas que se caracterizan por presentar sedimentos de color gris oscuro compuestos principalmente de minerales ferro-magnesianos y materia orgánica proveniente de los manglares. La isla El Morro también contiene colinas y vegetación tipo herbáceas de playa, manglar, bosque y arbustales. La isla Tumaco está totalmente urbanizada y La Viciosa contiene vegetación tipo herbáceas de playa, arbustales y manglar.

Espiga

Hacia el sur de la Bahía encontramos la espiga del sector de Bocagrande, se encuentra ubicada en sentido N-E, unida en su extremo sur a un bajo firme, su extremo norte tiene forma de gancho elongado en dirección de la deriva litoral y contiene otras unidades como playas y lagunas costeras, también contiene vegetación tipo herbáceas de playa y manglar denso alto.

Lagunas Costeras

Se encuentran ubicadas dentro de la espiga litoral, hacia el mar están limitada por la playa con herbáceas y hacia el continente están limitadas por manglar. Cuando la marea sube inunda el manglar y a su vez inunda la laguna.

Playas

En la Bahía de Tumaco se encontraron playas en casi toda la línea de costa, sin embargo, las principales playas utilizadas para el turismo se encuentran en la isla El Morro, La Viciosa y en la espiga de Bocagrande. Sus sedimentos son de color gris medio a oscuro debido al contenido de minerales ferro-magnesianos y materia orgánica. Hacia el sector de Salahonda también se observan playas, son muy amplias cuando la marea baja y con poca intervención antrópica.

Planos de inundación

Son planicies de origen fluvio marino que están a la misma altura o un poco por debajo del nivel del mar, se inundan completamente cuando la marea sube lo cual hace que este suelo sea bastante fangoso, compuestos de sedimentos finos y

materia orgánica, sobre esta unidad generalmente crece manglar, aunque también otras especies halófitas. Estos planos se encuentran en casi toda la Bahía de Tumaco y contienen principalmente vegetación tipo manglar.

Planos y llanuras con vegetación halófitas

Son planicies de origen fluvio marino, se encuentran un poco por encima del nivel de marea alta, tienen un alto nivel freático, se inundan solo cuando hay oleajes extremos o por desborde de los ríos, se componen de sedimentos finos y abundante materia orgánica y sobre esta unidad crece vegetación halófitas que soporta condiciones salobres pero que no soporta una inundación total del agua de mar como si lo hace el manglar. Generalmente se encuentran en toda la Bahía de Tumaco en menor proporción que los planos de inundación y casi siempre rodeados de estos.

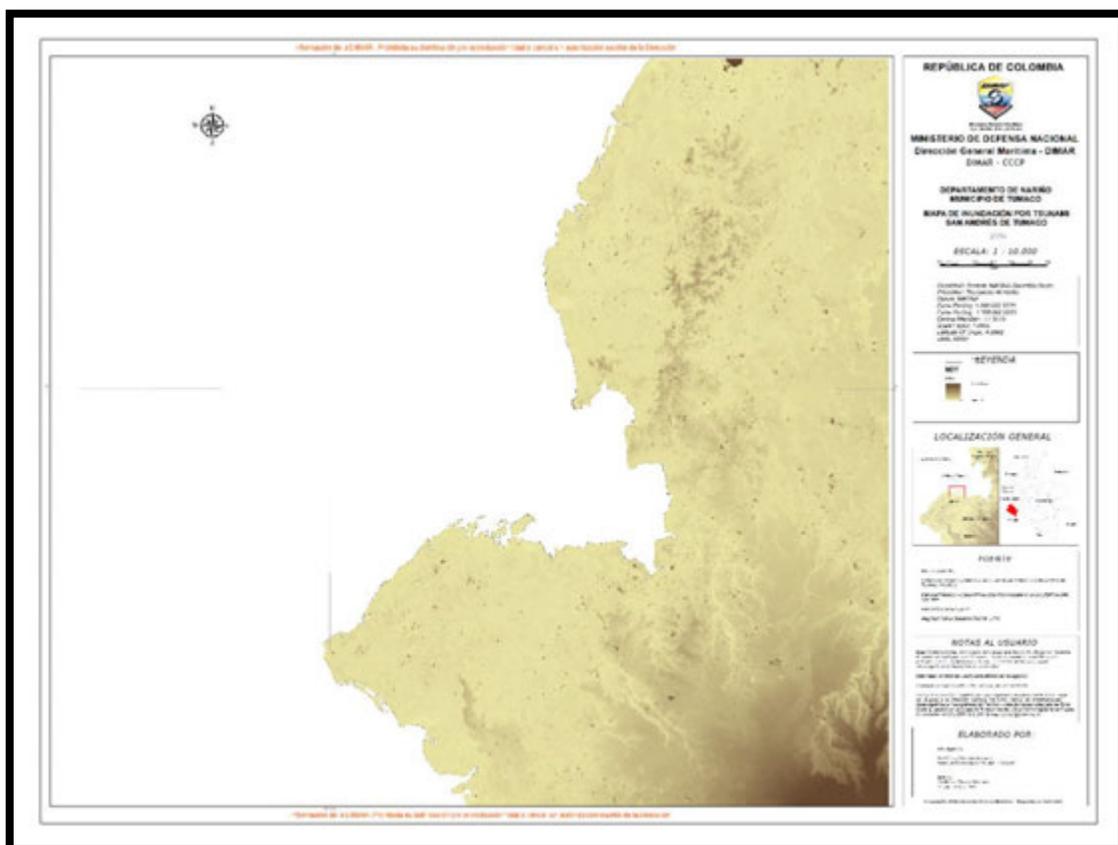
Plataformas intermareales no vegetadas

Se observan en toda la Bahía de Tumaco junto a los planos con manglar, las islas, las playas, las colinas etc. Estos depósitos de sedimentos no consolidados y no vegetados quedan descubiertos cuando la marea baja totalmente y cubiertos cuando esta sube, son bastante fangosos, constituyen los fondos someros y están ubicados principalmente a lo largo de la línea de costa. Cuando estas plataformas están adyacentes a los manglares contienen gran cantidad de materia orgánica.

Lomas y Colinas

En la Bahía de Tumaco se observan lomas y colinas en los sectores de La Bocana Colorado, de Punta Laura a Punta de Cruz Chola, Ensenada de Tumaco, en Punta Isla del Gallo y Punta Cascajal. Las colinas presentan alturas de hasta 140 m en las zonas más altas, son de laderas muy escarpadas de roca sedimentaria. Las lomas presentan alturas menores, son de laderas con pendientes suaves y formas redondeadas con vegetación tipo bosque.

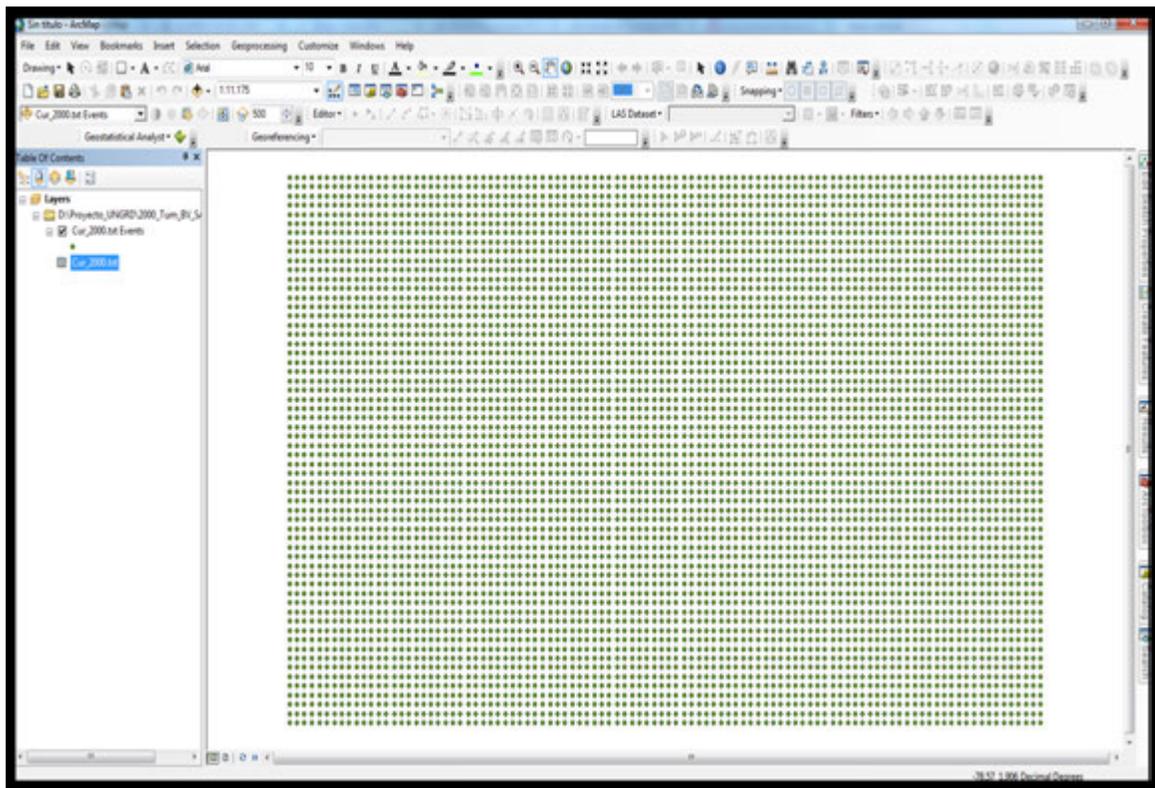
Figura 141. Mapa de la Bahía de Tumaco.



4.2 INTEGRACIÓN DE LA INUNDACIÓN A UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

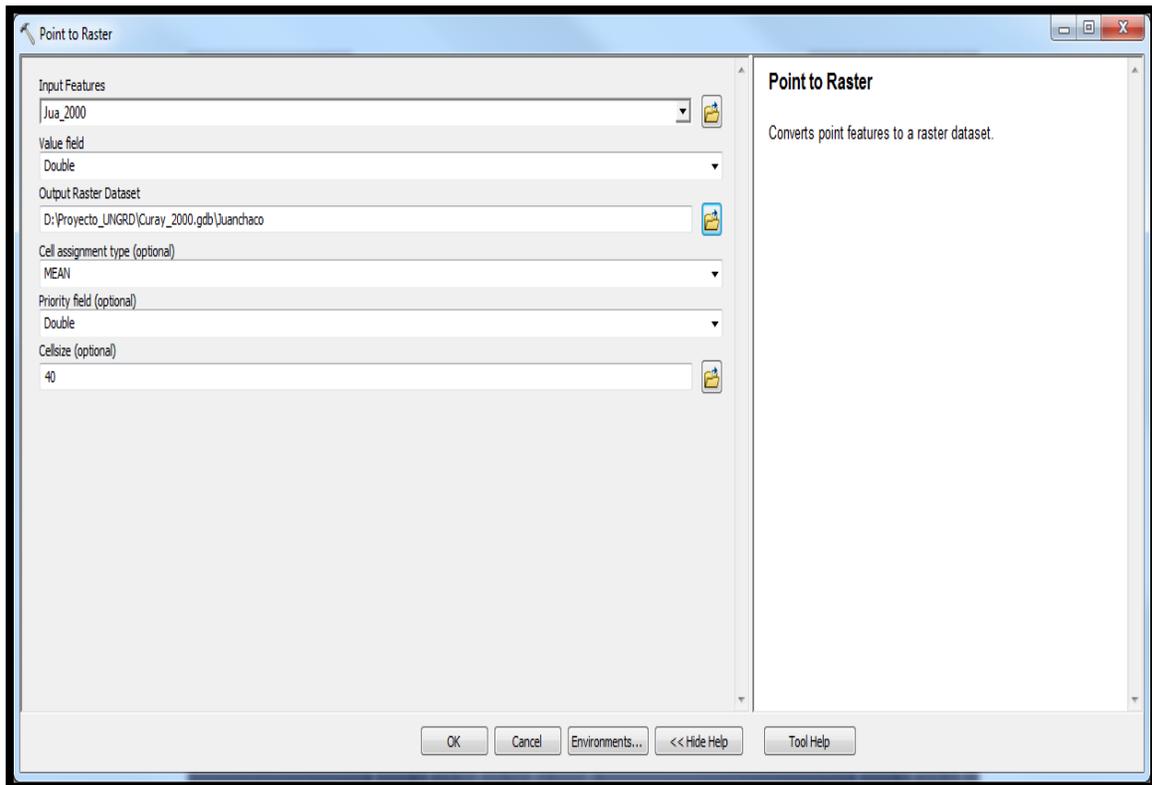
Al obtener los modelos de inundación por tsunami de origen cercano, se transformaron a archivos XYZ con geometría de punto (Figura 142). Estos datos se integraron a una geodatabase en el sistema de información geográfica ArcGis 10.1, para la generación de una superficie en formato *Raster* que representara la altura de la ola en un área que abarcaba todo el modelo de propagación e inundación.

Figura 142. Datos del Modelo de Propagación e Inundación por Tsunami de Origen Cercano, con Geometría Tipo Puntual, Desplegados en el Sistema de Información Geográfica.



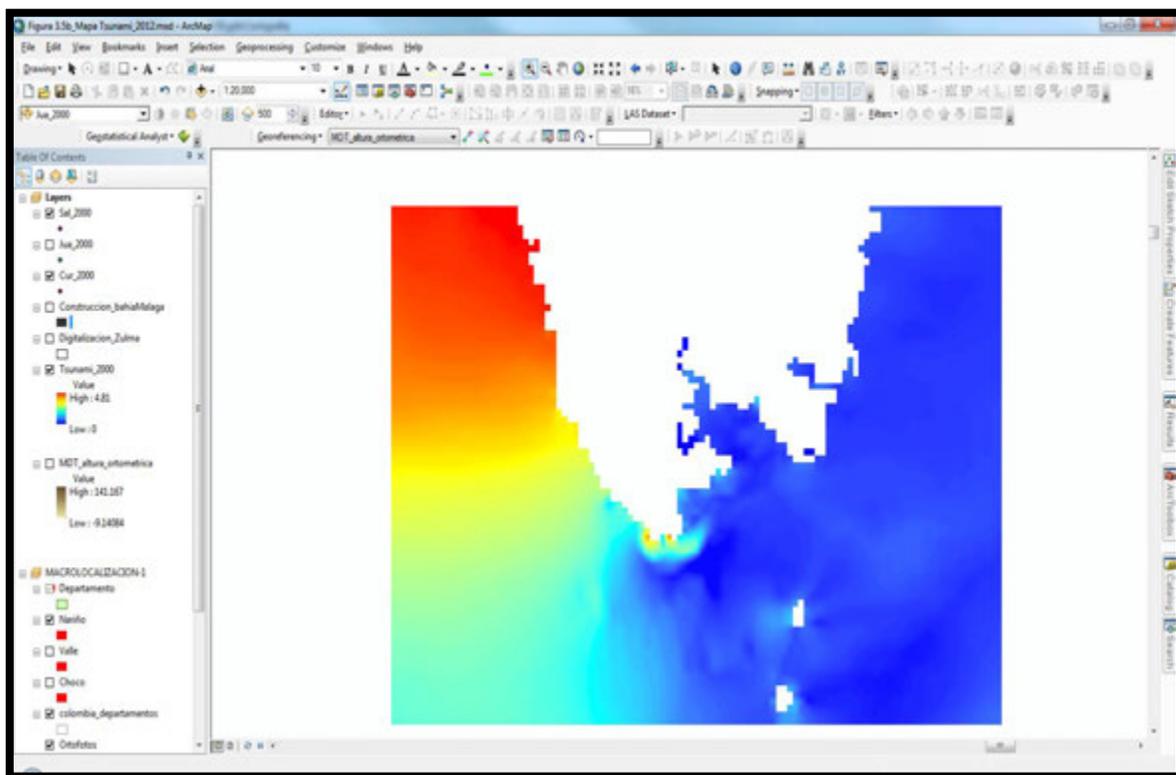
Al generar el *Raster*, se tuvo en cuenta el espaciamiento de los puntos para las diferentes escalas, ya que este espaciamiento representó la resolución de estas capas. Para las escalas de 1:100000 el espaciamiento de los datos fue 270 metros y se utilizó un tamaño de celda de 300 para asegurar que la superficie *Raster* no presentara vacíos en el resultado final. Para la escala de 1:50000 el espaciamiento fue de 90 metros y el tamaño de la celda fue de 110; y la escala de 1:2000, tuvo un espaciamiento de 30 metros y se utilizó un valor de celda de 40 metros (Figura 143).

Figura 143. Parámetros para la Construcción de la Superficie *Raster*, A Partir de los Puntos Generados por los Modelos de Propagación e Inundación de Tsunami de Origen Cercano.



Para generar cada una de las celdas del *Raster*, se escogió un tipo de asignación por celda con el promedio de la altura de la ola del modelo de propagación e inundación (figura 143). Para el despliegue y la creación del *Raster*, en los parámetros del SIG, se escogió un método de remuestreo de tipo cubico que permite ver los cambios en la superficie de visualización del *Raster*, mucho más suavizados que con un método de remuestreo como el “vecino más cercano” o el “bilinear” (figura 144).

Figura 144. Modelos de Inundación XYZ Transformado a Formato *Raster*.



4.3 GENERACIÓN DE LAS CAPAS DE INFORMACIÓN

Obtención de los datos

El conjunto de datos recopilado dependió de la escala de la cartografía que se elaboró a partir de los modelos de inundación por Tsunami. Para todas las capas de información se utilizó la proyección Magna-Sirgas Colombia Oeste (EPSG: 3115) con el Datum Magna.

MAGNA_Colombia_Oeste

WKID: 3115 Authority: EPSG

Projection: Transverse_Mercator

False_Easting: 1000000.0

False_Northing: 1000000.0

Central_Meridian: -77.07750791666666

Scale_Factor: 1.0

Latitude_Of_Origin: 4.596200416666666

Linear Unit: Meter (1.0)

Geographic Coordinate System: GCS_MAGNA

Angular Unit: Degree (0.0174532925199433)

Prime Meridian: Greenwich (0.0)

Datum: D_MAGNA

Spheroid: GRS_1980

Semimajor Axis: 6378137.0

Semiminor Axis: 6356752.314140356

Inverse Flattening: 298.257222101

Para la cartografía de las escalas 1:100000, de las áreas del municipio de Buenaventura y de Tumaco-Francisco Pizarro (Salahonda), el modelo de terreno que se utilizó para generar la cartografía base fue el modelo ASTER-GLOBAL DEM, que tiene una precisión vertical de 8.60 metros, obtenido del “Jet Propulsion Laboratory” [70].

El conjunto de datos utilizados para la cartografía base de las escalas 1:2000 y 1:50000 (Figura 145 y 146), estuvo conformado por ortofotografías y datos LiDAR, para la zona comprendida desde Bocagrande hasta Salahondita y para la zona desde estero limones hasta Bazán-Bocana.

Figura 145. Mapa de la Bahía de Buenaventura.

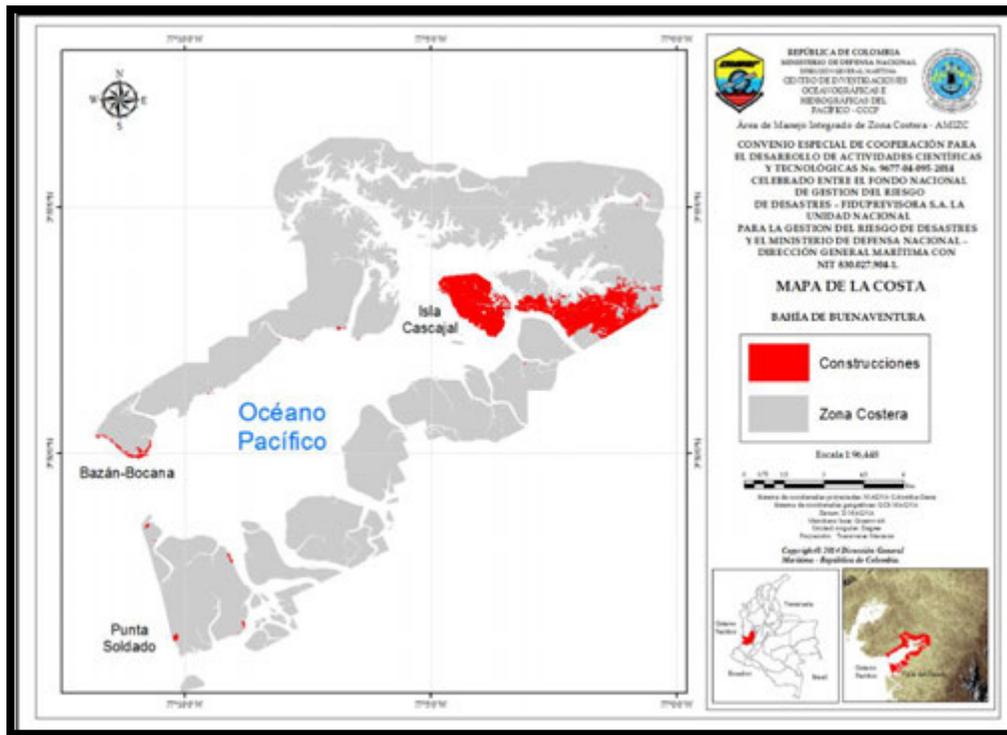
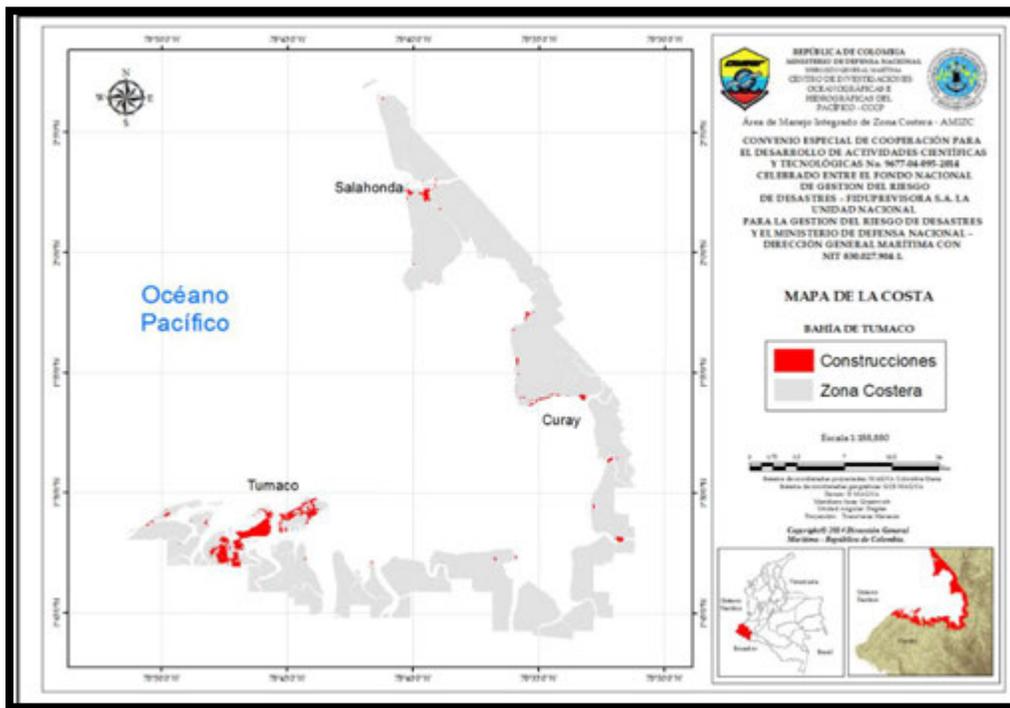


Figura 146. Mapa de la Bahía de Tumaco.



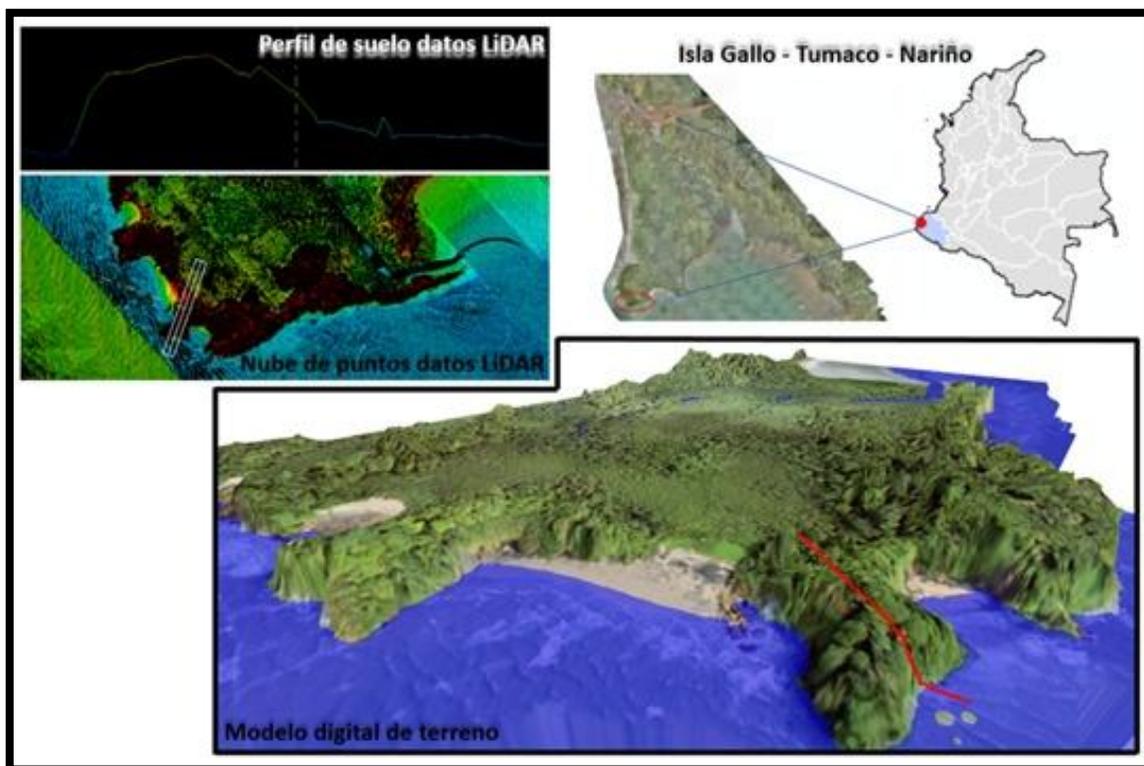
Las ortofotografías se capturaron con una resolución espacial de 25 cm por pixel, brindando mayor detalle de la información, cuya toma se hizo con una cámara métrica digital paralelamente a la captura de datos LiDAR. Estos últimos, fueron capturados con un sistema ALS40 aerotransportado en un avión Cessna 402B, cuyos parámetros de calibración fueron: FOV de escaneo de 30°, altura de vuelo de 1219 m, velocidad del avión de 125 nudos, frecuencia de escaneo de 29 Hz, longitud de onda del láser de 1084 nm [71], y cumplen con las especificaciones técnicas para la generación de la base cartográfica digital de DIMAR, que plantea una exactitud vertical máxima de ± 15 cm y una exactitud horizontal máxima de ± 0.5 m. El espaciamiento promedio de la nube de puntos es de 0,98 metros, valor determinado a través de un muestreo y está clasificada en las siguientes categorías: Suelo, Construcción, Vegetación, y Agua, entre otras.

Los datos LiDAR presentaron el estándar de la Sociedad Americana para Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS) en la versión 1.0 del 9 de mayo de 2003 que normaliza la estructura, forma y el contenido de los archivos “.LAS”, para facilitar el intercambio, traslado y almacenamiento de estos datos [72].

Se usaron además las escenas de octubre de 2013 del satélite LandSat 8 y de junio de 2003 de LandSat 7, con resolución espacial de 30 m. Específicamente se generó una combinación a color con las bandas 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Infrarrojo medio) y 4 (Rojo), que corresponden a 4, 5 y 3 para LandSat 7, ya que esta combinación permite separar muy bien la costa de las aguas marítimas. Estas imágenes se utilizaron para generar la cartografía de escala 1:100000.

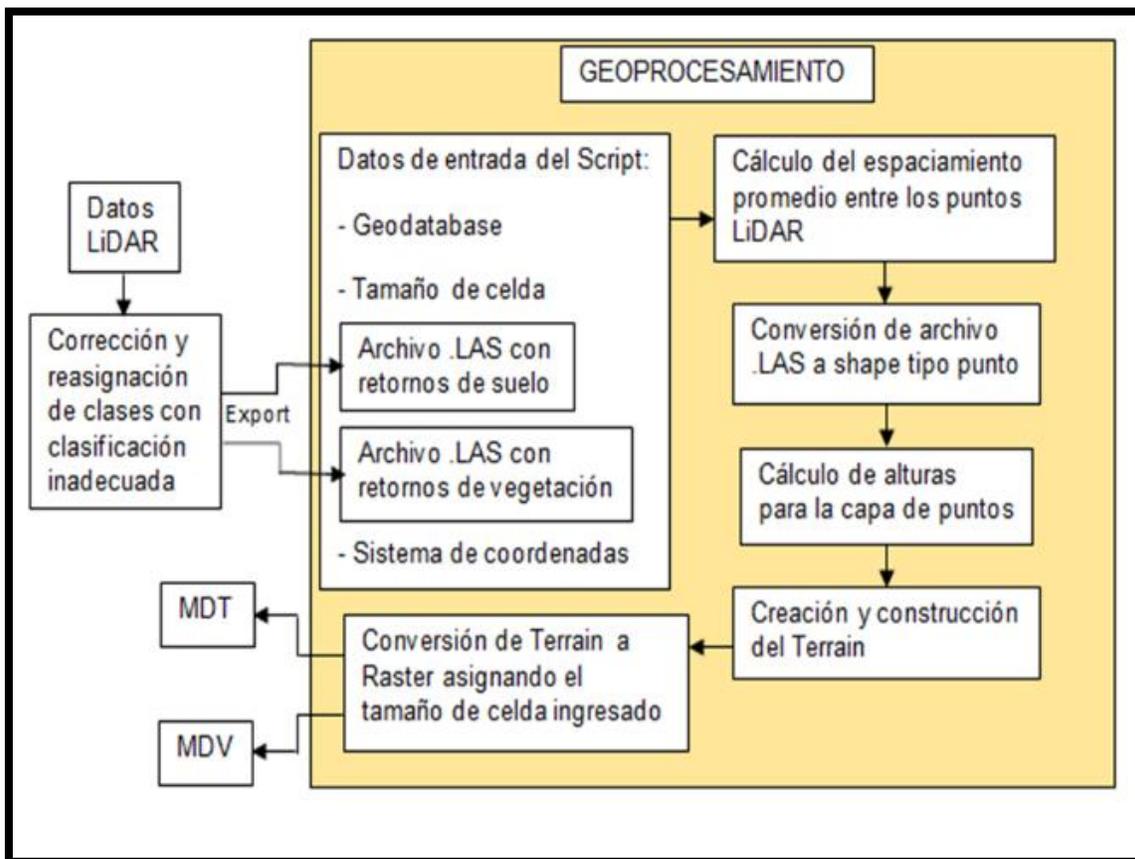
El primer paso para generar los productos derivados fue realizar un diagnóstico, revisión y corrección de la nube de puntos que componen los datos LiDAR, donde se reasignaron los puntos que no correspondían a la clase inicialmente establecida por la clasificación automática en el postproceso. El segundo paso fue generar un modelo digital del terreno (MDT) con los puntos de retorno del suelo (Ground – Retorno 2), que describe las alturas del terreno de la zona de estudio. Estos modelos se crearon con una resolución de 1m\pixel (figura 147).

Figura 147. Modelo Digital en 3D, Perfil de Suelo y Datos LiDAR de los Bosques de Manglar de la Isla Del Gallo en La Bahía de Tumaco, Nariño.



Además de lo anterior, para la generación de los MDT se implementó un geoprocésamiento en Python para optimizar la creación de estos modelos (figura 148).

Figura 148. Modelo Conceptual del Proceso de los Datos LiDAR y la Creación de los Modelos de Terreno y Vegetación.



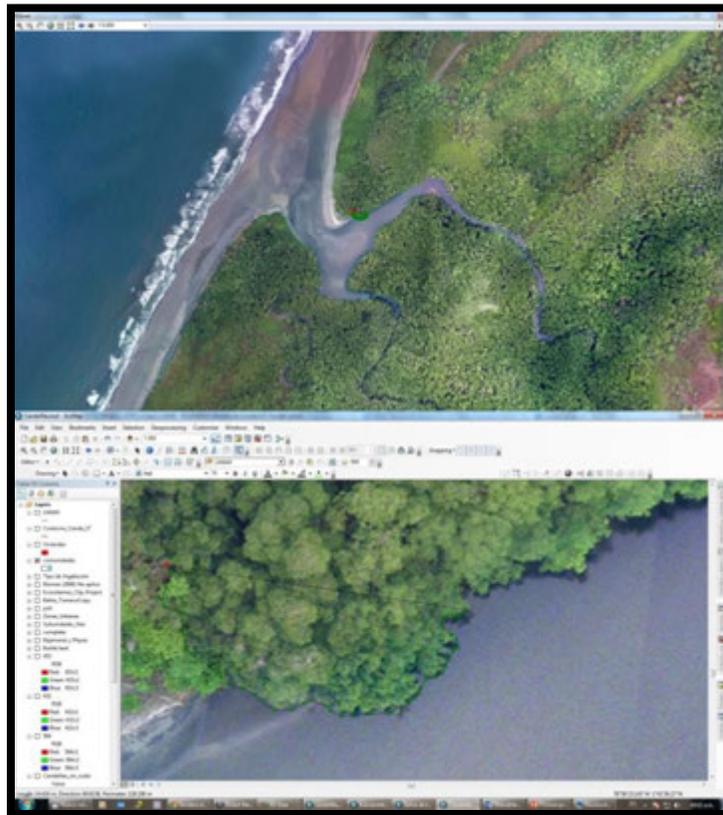
Otros productos derivados fueron las composiciones a color RGB 453 y RGB 564 de las bandas de LandSat 7 y 8 respectivamente, que permitieron la diferenciación entre respuestas espectrales del suelo y el agua.

3.3.1 Digitalización

Cartografía básica

Este proceso se hizo con el software ArcGis® 10.1 y la herramienta “Editor”. Con esta herramienta se generaron los polígonos que definieron geográficamente los límites de cada elemento (Figura 149). Para el caso de la cartografía básica, la digitalización se hizo a una **escala < 1:500**, para tener un nivel de detalle superior a cualquier cartografía generada con anterioridad. La escala recomendada para la visualización y estudio de esta cartografía es de **1:2000**.

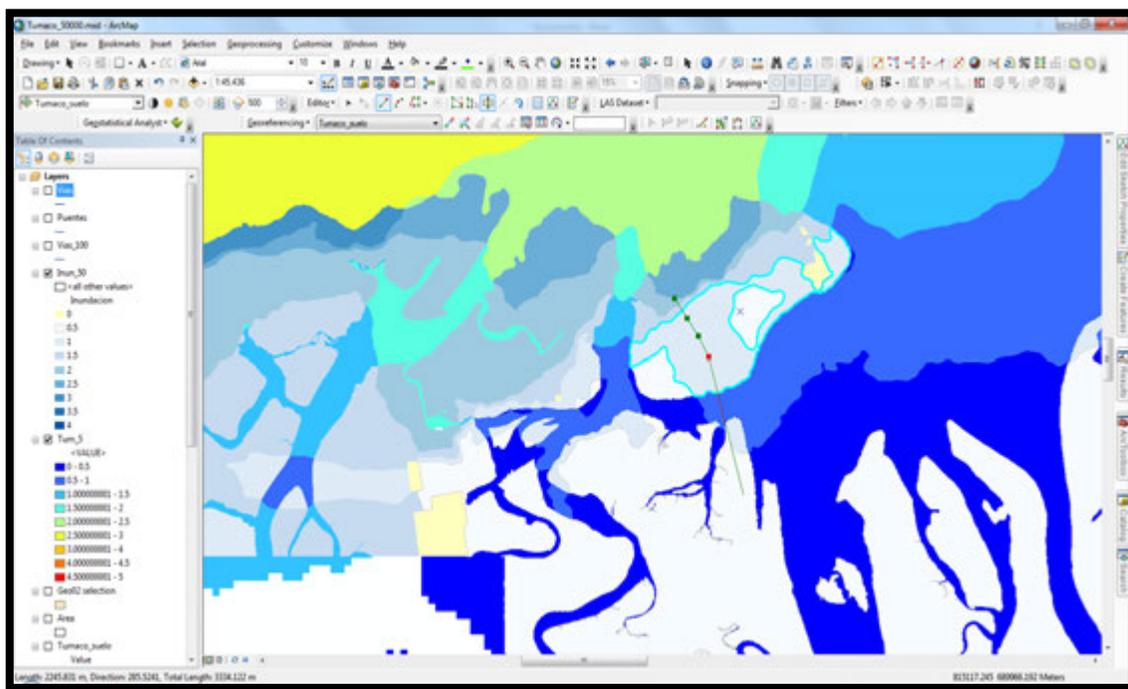
Figura 149. Digitalización a Escala 1:250 de la Costa en Arcgis®. Isla Gallo, Tumaco, Nariño.



Cartografía de inundación.

En esta parte se utilizaron los *Raster* de inundación de cada escala, para generar la capa de geometría poligonal de inundación por tsunami. Una vez desplegado el *Raster* de inundación, sobre el polígono se dividieron los rangos de inundación cada 50 centímetros (figura 150).

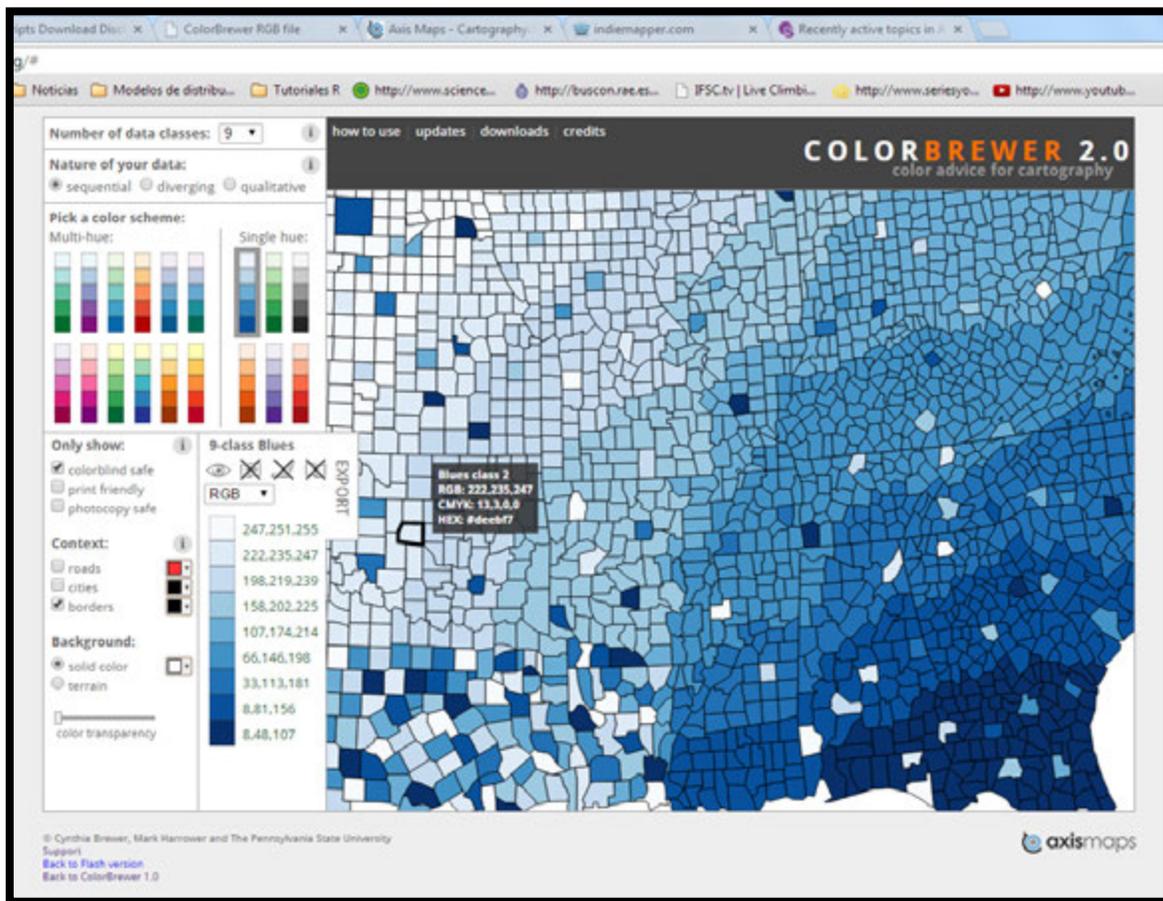
Figura 150. Creación de la Capa de Inundación por Tsunami con Geometría Poligonal, para el Área de Tumaco.



Los rangos de inundación que se obtuvieron van desde 0 hasta máximo 4.5 metros de altura de la ola. Para separar estos rangos en la cartografía, se utilizó una paleta de colores obtenida de la aplicación web ColorBrewer2 (AxisMaps) desarrollada por la Universidad del estado de Pensilvania (The Pennsylvania State

University), para designar colores que fueran fácilmente identificables para los usuarios.

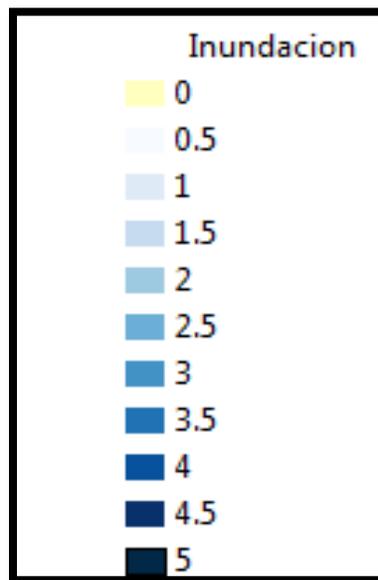
Figura 151.Aplicativo Web Color Brewer2.0 para la Creación de Paletas de Color en Combinaciones RGB (Colorbrewer2.Org).



Esta aplicación permitió obtener los números de la composición RGB para generar cada uno de los rangos de inundación así:

Tabla XXXII.Combinaciones RGB para la Separación de las Alturas de la Ola de Inundación por Tsunami, Generadas A Partir De Color Brewer2 (Colorbrewer2.Org).

Altura de la Ola (m)	R	G	B
No inundación	255	255	190
0.5	247	251	255
1	222	235	247
1.5	198	219	239
2	158	202	225
2.5	107	174	214
3	66	146	198
3.5	33	113	181
4	8	81	156
4.5	8	48	107
5	1	40	70



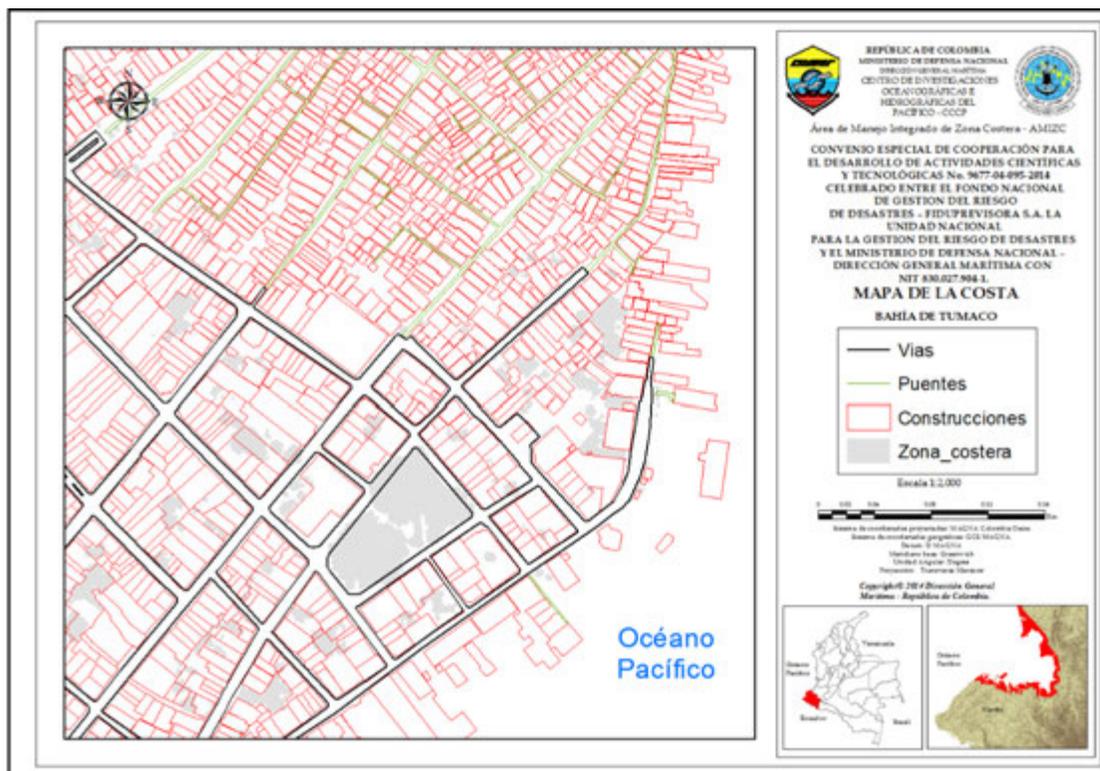
4.4 REVISIÓN CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

Cartografía básica.

Todas las capas se digitalizaron a partir de las ortofotografías, exceptuando las capas que se utilizaron para las escalas de 1:100000 de la bahía de Buenaventura y la bahía de Tumaco. Las capas que se generaron para la cartografía temática de todas las escalas fueron las siguientes:

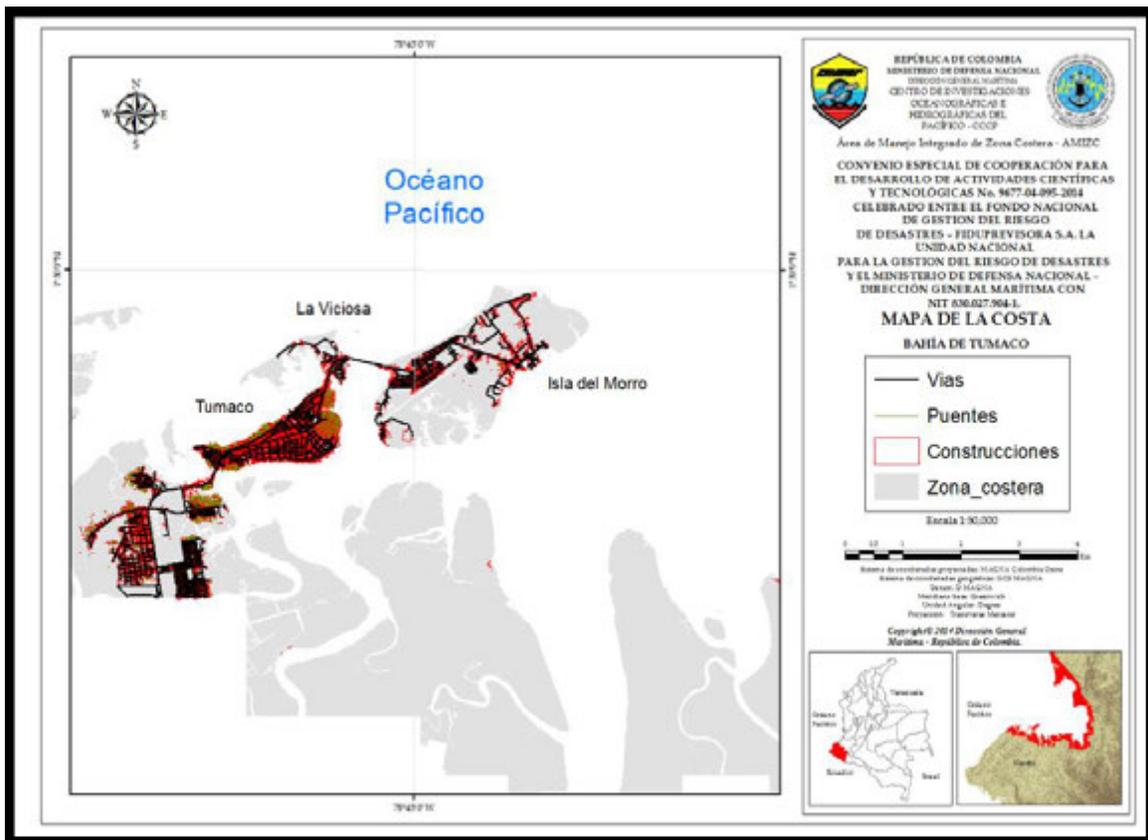
- Construcciones: todas las edificaciones que están en el área costera, sin discriminar el tipo de material del que están hechas.

Figura 152. Construcciones, Vías y Puentes del Centro de Tumaco. Escala 1:2000.



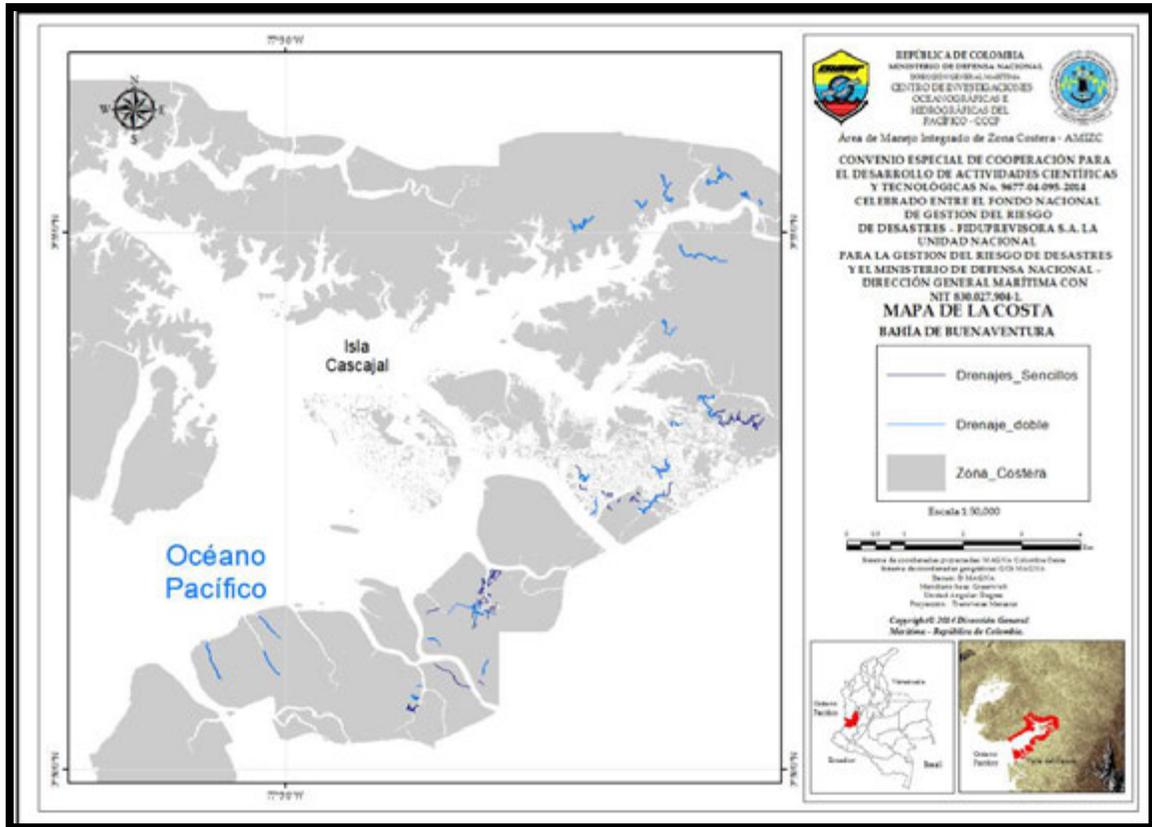
- Vías y caminos: todas las vías y los caminos que aparecen en el área incluidos las vías férreas, sin discriminar si están pavimentados o si son caminos de herradura.

Figura 153. Construcciones, Vías y Puentes del Casco Urbano de Tumaco. Escala 1:50000



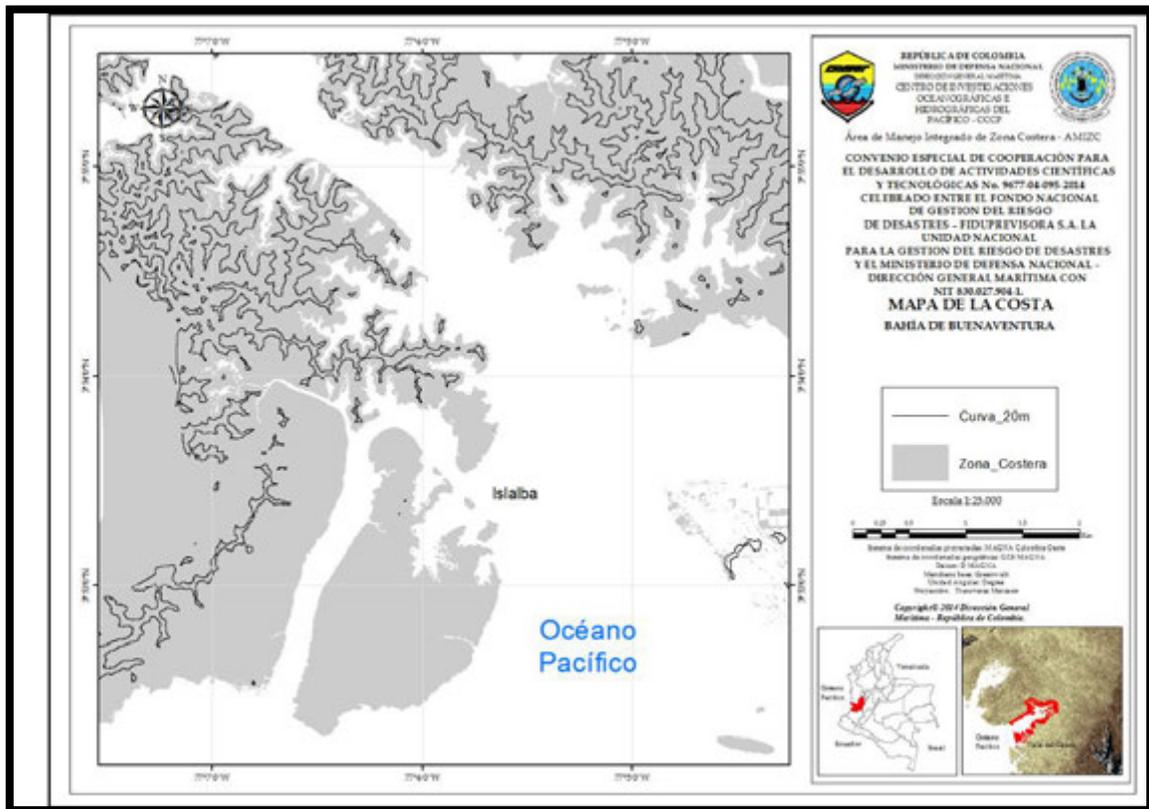
- Hidrografía: Todos los drenajes y lagunas que rodeen los cascos urbanos.

Figura 154. Drenajes de La Bahía de Buenaventura. Escala 1:50000.



- Curvas de nivel: Curvas de elevación del terreno a distancias de 5 y 10 m en escala 1:2000, 20 m en escala 1: 50 000 y 50 m en escala 1:100 000.

Figura 155. Curvas de Nivel de La Islalba, Bahía de Buenaventura. Escala 1:25000.

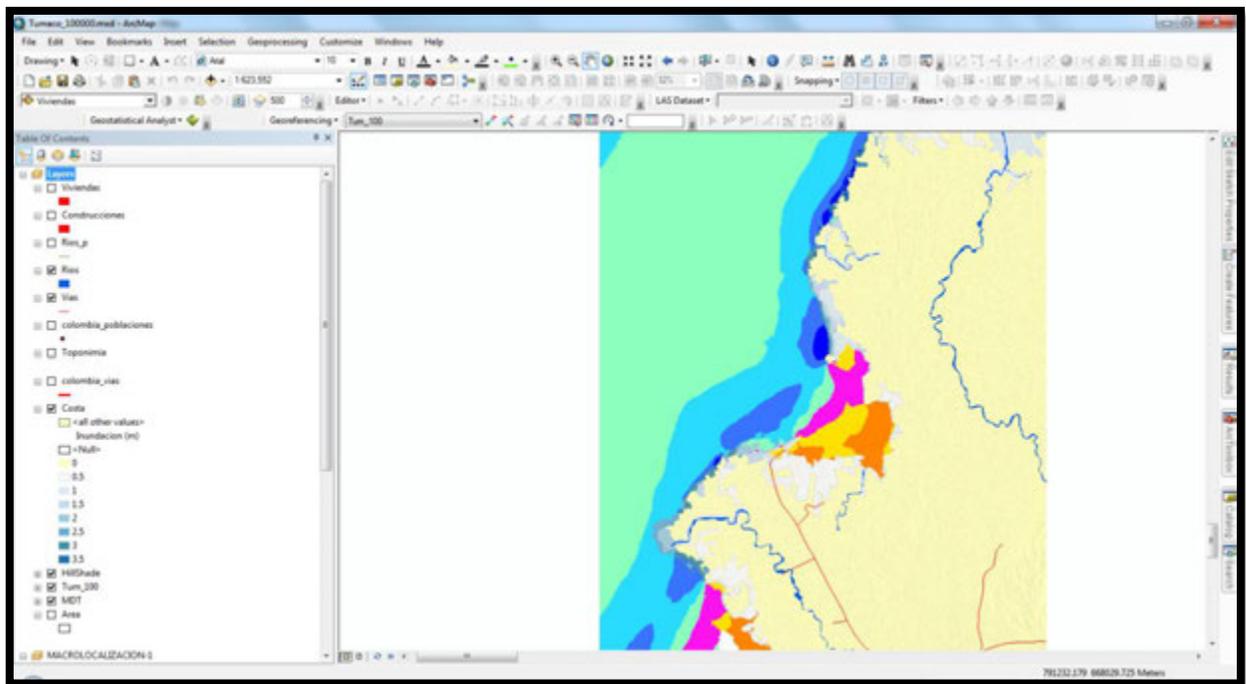


- Toponimias: Lugares de importancia civil como: escuelas y colegios, hospitales, iglesias, puestos de policía, bases militares, aeropuertos, muelles, puentes, piscinas, faros, cementerios y tanques elevados; Además se tomarán los accidentes geográficos.

Cartografía de inundación.

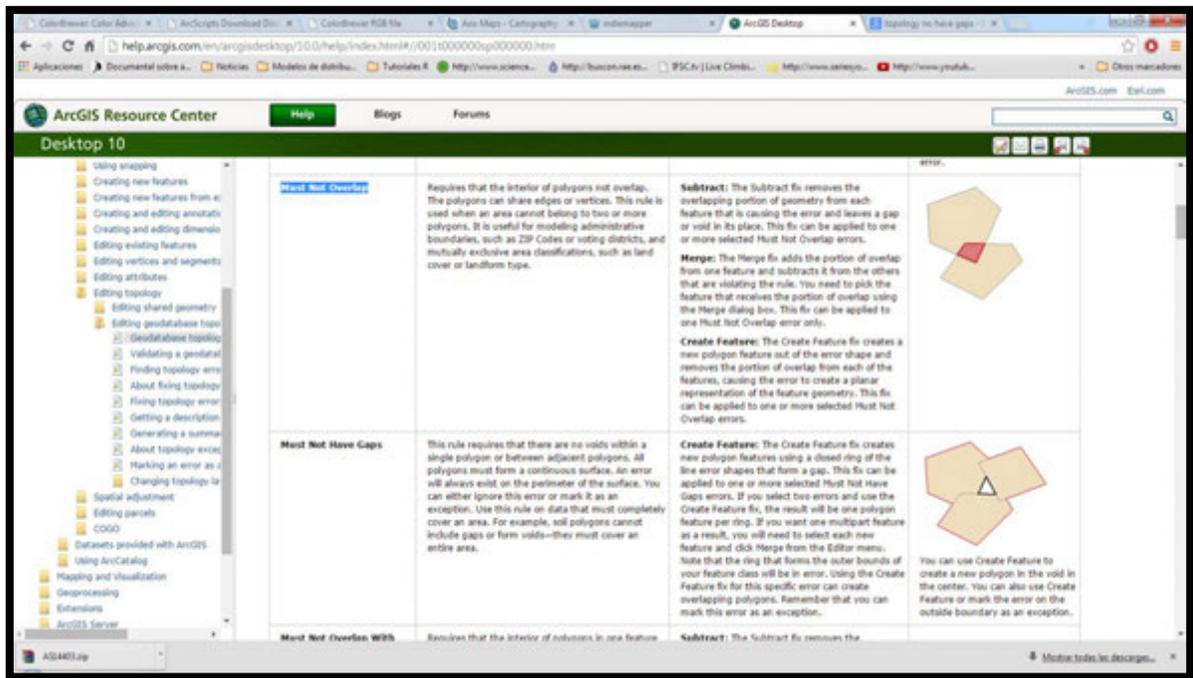
A partir de la digitalización de las capas de inundación, se realizó un proceso de verificación visual de los resultados, para corroborar que la digitalización manual representa adecuadamente la salida gráfica del modelo de propagación e inundación por tsunami de origen cercano.

Figura 156.Revisión Visual de la Correspondencia Entre el Modelo de Inundación y la Digitalización Manual de la Inundación Cuando el Tsunami Toca la Costa.



Todas las capas generadas pasaron por un proceso de revisión topológica donde se consideraron dos reglas: la no superposición de elementos geográficos y la no existencia de vacíos dentro de los polígonos de las capas.

Figura 157. Reglas Topológicas Usadas en las Capas de Inundación. Reglas: Los Polígonos No Deben Solaparse y los Polígonos No Deben Tener Vacíos.

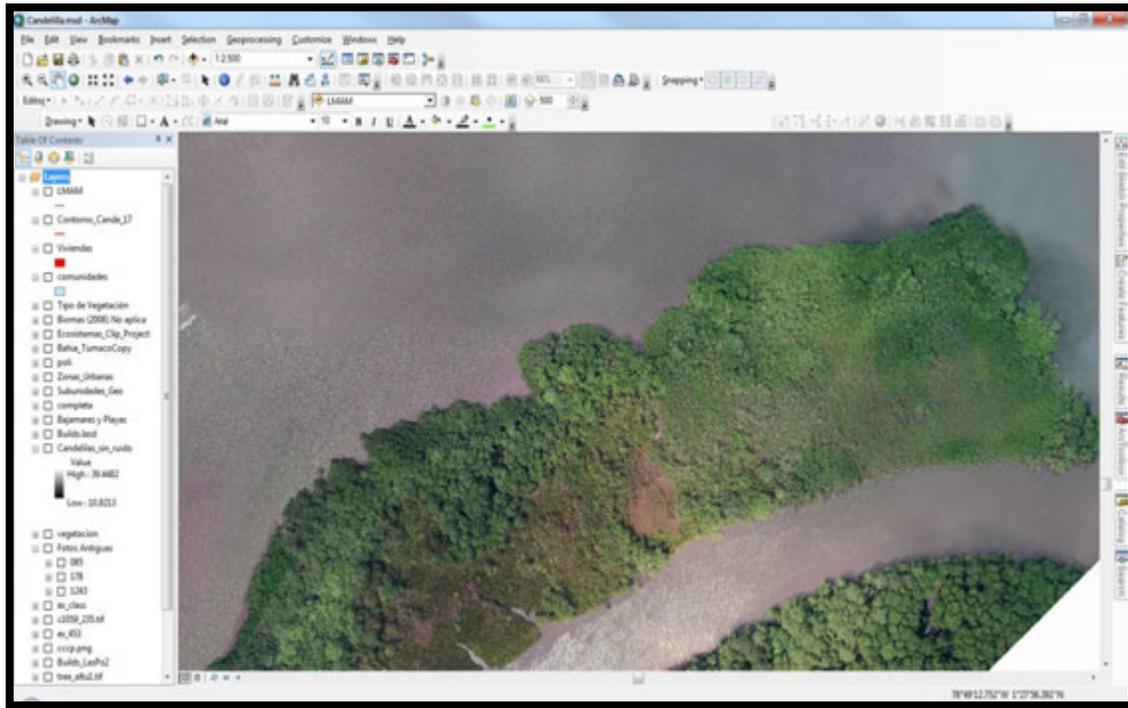


4.5 VALIDACIÓN EN CAMPO

Fase preliminar

En el laboratorio se revisaron las ortofotografías de cada área previo a las salidas de campo en el software ArcGis® 10.1 (Figura 158). Se aprendieron a identificar los elementos espaciales que se observaron en cada imagen y se digitalizaron y etiquetaron provisionalmente, para ser incluidos como capas geográficas que sirvieran como guía en el campo.

Figura 158. Examen Visual de las Orto Fotografías en el Software Arcgis® 10.1.



Salidas de campo

Se corroboraron en el campo las identificaciones previas que se habían hecho de los elementos geográficos en el laboratorio. Se tomaron algunas fotografías en donde se habían cometido errores de identificación en la separación de elementos geográficos.

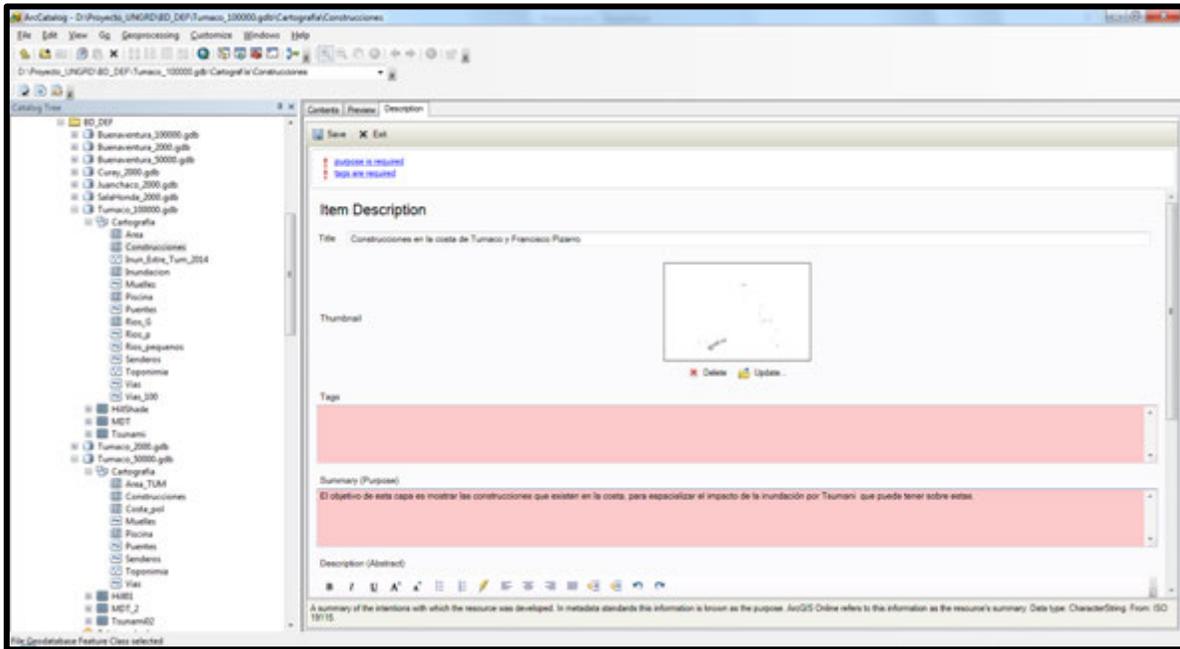
Figura 160. Estructura de la Base de Datos para las Diferentes Escalas de la Cartografía.



Dentro de cada base de datos, se generó un diccionario de términos basado en cada una de las capas y los campos dentro de cada capa; este diccionario se construyó en formato de tabla dentro de la geodatabase y las definiciones facilitarán la interpretación de la cartografía.

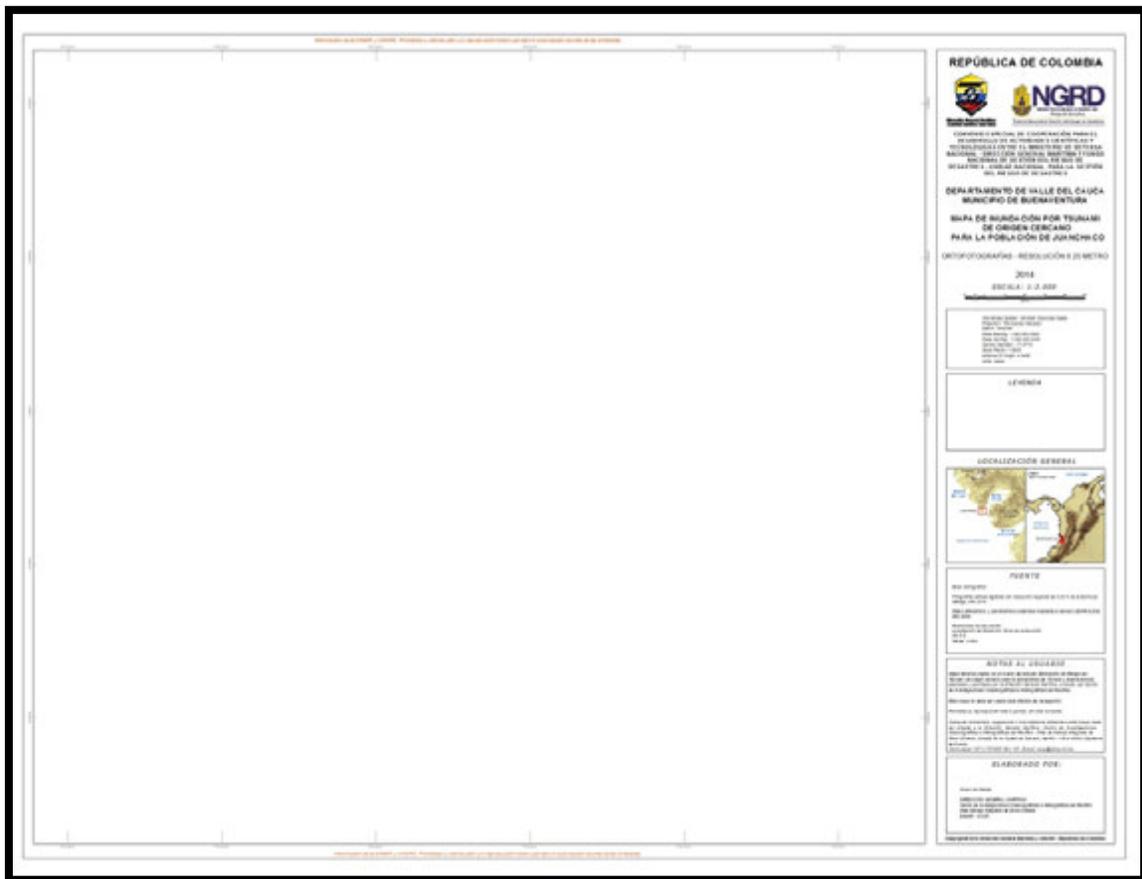
Para cada capa de información se adicionaron los metadatos que consistieron en una descripción de la capa, un propósito de construcción, los créditos, los límites de uso y el rango de escala.

Figura 161. Modelo de Ficha de Metadatos de las Capas de Información de las Diferentes Bases de Datos Geográficas para el Escenario de Inundación por Tsunami.



Para las salidas gráficas definitivas se utilizó una plantilla de ArcGis 10.1 con un tamaño de 34x45 pulgadas, la información marginal está compuesta por un modelo digital de terreno ASTER-DEM de 15 metros de resolución. Para la proyección de esta información se utilizó el datum WGS 84.

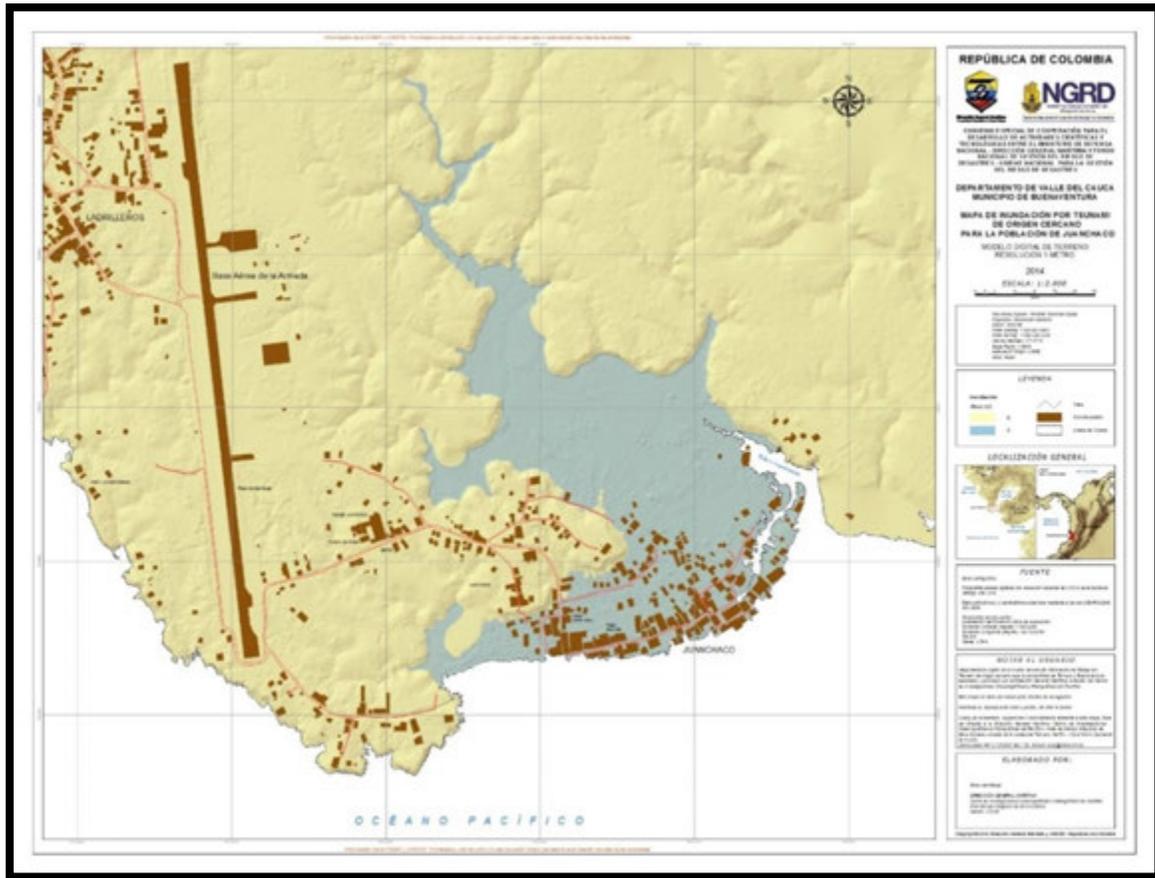
Figura 162. Plantilla de Presentación para los Mapas por Inundación por Tsunami de Origen Cercano para el Pacífico Colombiano.



Los mapas finales que se presentan se dividieron en dos tipos:

Mapas esquemáticos que muestran las construcciones, vías, el *hillshade* que es una representación con efecto tridimensional del terreno, lo cual permite percibir el relieve de algunas zonas. Este tipo de mapa permite apreciar la interacción entre la altura de la ola y la geomorfología, como islas, colinas, drenajes y plataformas de inundación, entre otras.

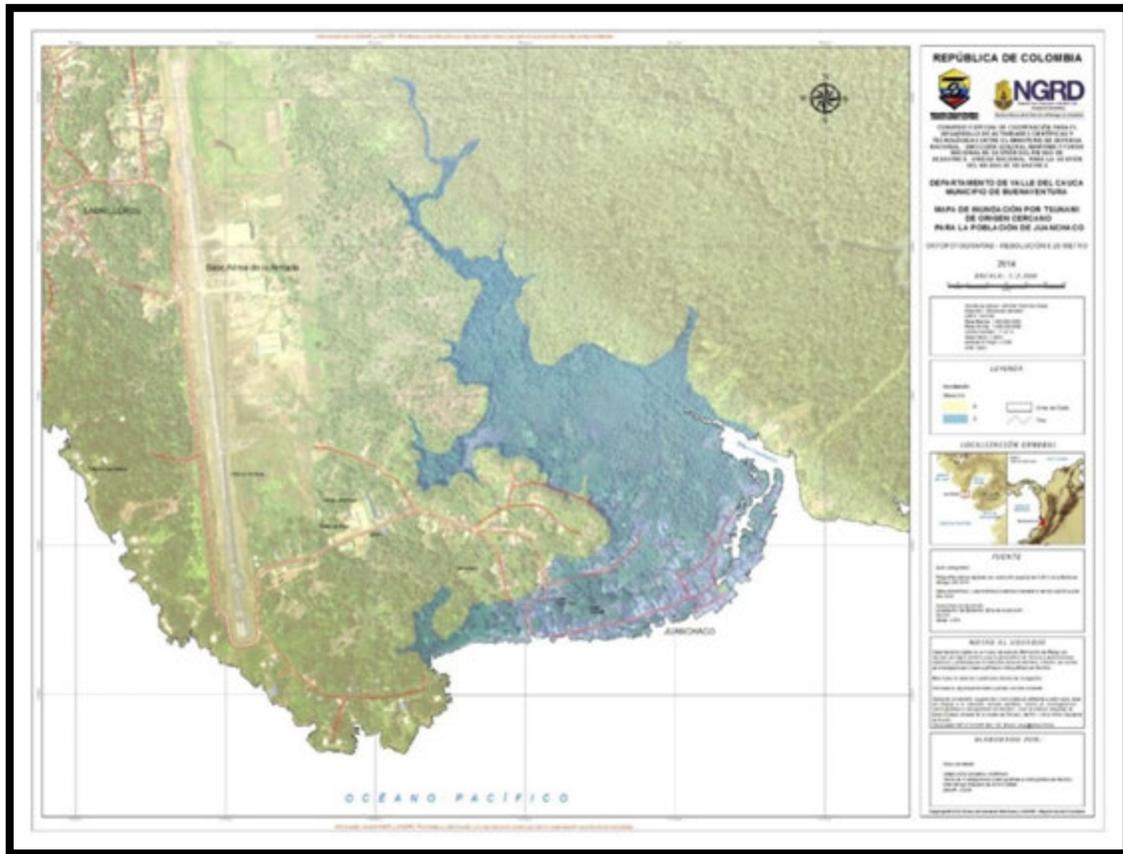
Figura 163. Mapa de Juanchaco a Escala 1:2000, Representando el Relieve con un Hill Shade.



Mapas con ortofotografías estos mapas están compuestos por las ortofotografías y la capa de inundación. Aquí se puede apreciar directamente como afecta la lámina de agua inundante sobre los elementos que hay en la superficie.

Para cada escala de trabajo se generaron ambos mapas, exceptuando los mapas en escala 1:100000, que solo se presentaron en forma de mapas esquemáticos.

Figura 164. Mapa de Juanchaco a Escala 1:2000, Representando la Superficie con la Ortofotografía.



5 CONCLUSIONES

- El levantamiento de información batimétrica de detalle, y su posterior análisis, es la base principal para modelar numéricamente escenarios para eventos tsunamigénicos que se desarrollen en el área determinada, y con ello evaluar la afectación generada por los mismos.
- Siempre que se efectuó un trabajo batimétrico y topográfico en el área de estudio se debe tener en cuenta la cota cero establecida para la zona, con el fin de llevar toda la información base a un mismo nivel de referencia.
- Es importante tener presente que el manejo de la información geográfica tiende a presentar grandes cantidades de datos por lo que es importante saber administrar y gestionar una base de datos que permita el manejo y distribución de esta información de una manera sencilla y ágil donde se garantice la optimización en los tiempos de búsqueda.
- Una buena calidad de las mallas computacionales generadas a partir de información topo-batimétrica permiten obtener resultados de modelaciones numéricas de Tsunami mucho más confiables y próximos a la realidad.
- El escenario más desfavorable para las poblaciones bajo estudio es la ocurrencia de un evento sísmico extremo precursor de tsunami con origen en la zona de

subducción con características similares al escenario E1, con una dislocación de 8.06 m, longitud de 581 Km, ancho 116 km, strike 31°, dip 25°, rake 129°, profundidad de 20 km y magnitud de 8.8 Mw. Base para la elaboración de los mapas de inundación en las zonas de interés.

- Los dos tipos de mapas presentados en este trabajo, permiten analizar la interacción entre la inundación por tsunami de origen cercano y las características de la costa como es el relieve, la geomorfología y los elementos de la superficie como las edificaciones, la cobertura vegetal, las vías, los puentes entre otras.
- Con base en la propuesta establecida por DIMAR para los mapas de inundación, se propone una estandarización de las convenciones cromáticas para los mapas de tsunami, discriminados por la profundidad de la inundación basados en composiciones RGB generadas en el aplicativo web COLORBREWER (colorbrewer2.org), de la Universidad de Pensilvania.

6 BIBLIOGRAFIA

[1] DIMAR-CCCP. (2013). Estudio de la Amenaza Por Tsunami y Gestión del Riesgo en el Litoral Pacífico Colombiano. Dirección General Marítima - Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. Ed. Dimar. Serie Publicaciones Especiales Vol 8. San Andrés de Tumaco, Colombia. 122 pp. 122 pp. ISBN: 958-33-5689-1.

[2] Mansinha, L. y Smylie, D.E. 1971. The displacement of the earthquake fault model, BullSeismoSocSmeri. 61, 1433-1400.

[3] Okada, Y. (1992). Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Vol.82, No. 2 pp. 1018-1040.

[4] Sierra, P. & Pau, J. 2010. Análisis de la generación y propagación de tsunami en la costa Atlántica española. Tesis de Grado, Universidad Politécnica de Catalunya 2010.

[5] Goto, C. & Y.Ogawa, Y. (1992). Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog.

[6] Iwasaki, T. & Mano A., (1979). Two-dimensional numerical computation of tsunami run-ups in the Eulerian description, Proc. Of 26th Conf. onCoastalEng., pp. 70-74.

[7] Cardona, Y. (2005) "Modelación de tsunamis en la costa pacífica colombiana: Caso de aplicación Bahía de Tumaco" En: Colombia V.1 P. 150

[8] Restrepo, J. & Otero, L. (2007). Aplicación de modelos hidrodinámicos para evaluar la dinámica del oleaje y el nivel del mar en el sistema deltaico del río mira (Colombia): bases para la gestión costera. Boletín Científico CCCP No. 14:31 – 48.

[9] Liu, P.L.-F., et al. (1994). Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. Pp. 99–115 in Recent Developments in Tsunami Research, edited by M.I. El-Sabh. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

[10] Sanchez, R. & Puentes, M. (2012). Estimación de la amenaza por tsunami en el municipio de San Andrés de Tumaco, Pacífico colombiano, utilizando información LiDAR. Bol. Cient. CIOH, 30:29-42.

[11] Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada Chilena. (2014). Curso Internacional Capacitación en Cartas de Inundación por Tsunami". MemoriasdelCurso.

[12] Otero, L., Restrepo, J., & Gonzalez, M. (2014). Tsunami hazard assessment in the southern Colombian Pacific basin and a proposal to regenerate a previous

barrier island as protection. *Natural Hazards and Earth System Science*, 14(5), 1155-1168.

[13] Tovar, E., Eraso F., Arcila, M., Sarabia, A., (2014). Servicio Geológico Colombiano, Subdirección de Amenazas Geológico.

[14] Kanamori & McNally. (1982). Variable Rupture Mode of the Subduction Zone along the Ecuador-Colombia Coast, Vol. 72, pp.1241-1253.

[15] Álvarez-Gómez, J. A., Aniel-Quiroga, Í., Gutiérrez-Gutiérrez, O. Q., Larreynaga, J., González, M., Castro, M., & Carreño, E. (2013). Tsunami hazard assessment in The Salvador Central America, from seismic sources through flooding numerical models. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 13(11).

[16] Tavera, H. (2014). Escenario de sismo y tsunami en el borde occidental de la región central del Perú. Biblioteca nacional del Perú No. 2014-09000.

[17] Castilla, E. & Sanchez, R. (2014). Sismicidad Generadora de Tsunami en el Litoral Pacífico Colombiano. *Sometido Bol. Cient. CIOH* (31).

[18] Álvarez, O., Nacif, S., Gimenez, M., Folguera, A., Braitenberg, C. (2014). GOCE derived vertical gravity gradient delineates great earthquake rupture zones along the Chilean margin.

[19] Tsunami Pilot Study Working Group (2006): Seaside, Oregon Tsunami Pilot Study-Modernization of FEMA flood hazard maps. NOAA OAR Special Report, NOAA/OAR/PMEL., Seattle, WA, 94 pp. + 7 Appendices.

[20] Organización Hidrográfica Internacional. (2008). Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos. Bureau Hidrográfico Internacional. Edición No. 5.

[21] VALLS, P., MARIA, J. Medición del nivel medio del mar: Principio y métodos. Universidad Politécnica de Cataluña. España.

[22] CALERO, P., CARTA, J., PADRÓN, J. Energía. España.

[23] OTERO, L. (2005) Metodología para establecer la línea de más alta marea en aguasabrigadas (bahías, estuarios, etc) cuando no se tienen registros instrumentales. CCCP. Colombia.

[24] <http://ceeserver.cce.cornell.edu/pli-group/comcot.htm> Consulta [03 de Noviembre de 2014].

[25] XIAMING, W. (2009). User Manual for Comcot Version 1.7 (first draft). Liu at CornellUniversity, USA.

[26] Instituto Colombiano de Geología y Minas-INGEOMINAS. (2005). Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali. Informe No. 1-6 Caracterización de Fuentes Sísmicas de Subducción. Colombia.

[27] Collot, J. Y., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P. & Spence, G. (2004). Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador–southwest Colombia margin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 109(B11).

[28] Kelleher, J. (1972), Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions, *J. Geophys. Res.*, 77, 2087–2103.

[29] Abe, K. (1979), Size of great earthquakes of 1837 – 1974 inferred from tsunami data, *J. Geophys. Res.* 84, 1561–1568.

[30] Espinoza, J. (1992), Terremotos tsunamigénicos en el Ecuador, *Acta Oceanográfica. Pac.*, 7(1), 21– 28.

[31] Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3), 255-270.

[32] Pararas-Carayannis, G. (2012). Potential of Tsunami Generation Along the Colombia/Ecuador Subduction Margin and the Dolores-Guayaquil Mega-Thrust. Science of Tsunami Hazards. Journal of Tsunami Society International. Vol 31, Number 3.

[33] Mendoza, C. & Dewey, J. W.: Seismicity associated with the great Colombia-Ecuador earthquakes of 1942, 1958, and 1979: implications for barrier models of earthquake rupture, B. Seismol. Soc. Am., 74, 577–593, 1984.

[34] Collot, J. Y., Charvis, P., Gutscher, M. A., & Operto, S. (2002). Exploring the Ecuador-Colombia active margin and interplate seismicogenic zone. Eos, Transactions American Geophysical Union, 83(17), 185-190.

[35] Taboada A. Dimate C., Fuenzalida A. (1998). Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción. Física de la Tierra, N. 10 11-147.

[36] Mejía, J., Hansjürgen M., Velasquez A., Y Racines A., 2003. Los sismos del 8 de enero de 2003 en Bahía Solano. Boletín del Observatorio Sismológico de Occidente (OSSO). Disponible en internet:

http://geoslac.org/memorias2/memorias/resumenes/poster/NACIONALES/sismos_8enero.pdf.

[37] Arcila, M, Muñoz, A., De Vicente, G., 2002. Análisis sismotectónica de la convergencia Caribe, Nazca y Sudamérica. Primer Simposio Colombiano de Sismología. Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas), Memoria digital, Bogotá. Disponible en internet:

<http://fing.javeriana.edu.co/geofisico/simposio2002/Sismotectonica/CONVERGENCIA%20CARIBE%20NAZCA%20.PDF>.

[38] WESTBROOK, O., HARDY, N., HEATH, R.(1995). Structure of the Panama-Nazca plate boundary. Geol. Soc. Am., Spec. Paper 295, págs. 91-109.

[39] Paris G, Machette MN, Dart RL, Haller KM.(2000). Map and Database of Quaternary Fault and Folds in Colombia and its offshores regions. U.S. Geological Survey Open- File Report 00-0284.

[40] Gonzalez, G., Otero, L.(2010). Peligrosidad debido a tsunamis en la Costa Pacífica Colombiana: en el Golfo de Cúpica. Boletín Científico CIOH No. 28, 25-53.

[41] Dziewonski, A.M., Chou, T.-A., Woodhouse J.H.(1981) Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys. Res. 86, 2825–2852. Online Data set (available from Harvard University Centroid Moment Tensor – CMT Project):

<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/CMTsearch.html>

[42] Naser, A., Zulfiqar, A. (2006). Investigation of Seismic Hazard in NW-Himalayas, Pakistan using Gumbel's First Asymptotic Distribution of Extreme Values.

[43] Tezcan, S.S. (1996). Probability Analysis of Earthquake Magnitudes, Turkish Earthquake Foundation, 26p.

[44] Rhean, S., Hayes, G., Villaseñor A., Furlong k., Tarr A., & Benz H. (2010). Seismicity of the Earth 1900-2007 Nazca Plate and South America, US Geological Survey, PA 16802 USA.

[45] Kanamori, H. & Anderson, D. (1975). Theoretical basis of some empirical relations in seismology. B. Seismol. Soc. Am., 65, 1073–109.

[46] Hanks & Kanamori, H. (1979). A moment Magnitude Scale, Volume 84, Issue B5, pages 2348–2350.

[47] Ojeda A. & Pérez J., Subdirección de Amenazas Geológicas de Entorno Ambiental, Ingeominas, Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali, Convenio No. 02 de 2002.

[48] Sanclemente E., Ioualalen M., Navarrete E. (2010). Estimación de los parámetros de ruptura del terremoto de Esmeraldas de Diciembre 12 de 1979, a partir de datos hidrográficos y simulación numérica de propagación de tsunamis. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

[49] Wells & Coopersmith. (1994). New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin of a seismological society of America.

[50] Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, B. Seismol. Soc. Am., 75, 1135–1154.

[51] Engdahl, E. R. & Villaseñor, (2002). A.: Global Seismicity: 1900–1999, in: International Handbook of 5 Earthquake and Engineering Seismology, Part A, Chapter 41, edited by: Lee, W. H. K., Kanamori, H., Jennings, P. C., and Kisslinger, C., Academic Press, 665–690, doi:10.1016/S0074-6142(02)80244-3.

[52] Beck, S. L. & Ruff, L. J. (1984). The rupture process of the great 1979 Colombia earthquake: evidence for the asperity model, J. Geophys. Res., 89, 9281–9291.

[53] Engdahl, E. R., Van der Hilst, R. D., Buland, R. (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth relocation, *B. Seismol. Soc. Am.*, 88, 10 722–743.

[54] Swenson, J. L. & Beck, S. L. (1996). Historical 1942 Ecuador and 1942 Perusubduction earthquakes, and earthquake cycles along Colombia–Ecuador and Perusubduction segments, *Pure Appl. Geophys.*, 146, 67–101.

[55] Harvard University, Harvard Seismology-Harvard CMT Catalog, available at: <http://www.seismology.harvard.edu> (last access: August 2013), 2013.

[56] DIMAR-CCCP. (2014). Informe final del levantamiento geodésico y análisis mareal en las bahías de Buenaventura y Málaga. Dirección General Marítima-Centro de Investigaciones oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico. San Andrés de Tumaco, Colombia.

[57] Carter, J. et all. (2012). LiDAR 101: An Introduction to LiDAR Technology, Data, and Applications. (NOAA) Coastal Services Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. Revised. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.

[58] DÍAZ, M. A. (2005). Geoestadística Aplicada. Instituto de Geofísica UNAM. Pp. 31-57.

[59] Nagano, O., Imamira, F. and Shuto, N. (1991). A numerical model for far-field tsunamis and its application to predict damages done to aquaculture, *Natural Hazards* 4, 235-255.

[60] Imamura, F., N. Shuto and C.Goto. (1988). Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis, 6th Congress APD-IAHR, pp.265-272.

[61] Liu, P.L.-F., et al. (1994). Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii. Pp. 99–115 in *Recent Developments in Tsunami Research*, edited by M.I. El-Sabh. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

[62] Liu, P. L.-F., Y.-S. Cho, S. B. Yoon, and S. N. Seo. (1995). Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii, in *Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning*, edited by Y. Tsuchiya and N. Shuto, pp. 99 – 115, Kluwer Acad., Norwell, Mass.

[63] Wang, R., F. Lorenzo-Martin, and F. Roth. (2006). A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Comput. Geosci.*, 32, 527 – 54.

[64] Correa, R. (2013) Evaluación de la peligrosidad debido al impacto de tsunamis de origen tectónico en el litoral y área insular del Caribe colombiano. Grupo de Física Aplicada. Área de Océano y Atmósfera. Universidad del Norte.

[65] Sangyoung, S., Patrick, J., Dae-Hong, K. (2011). Nested and multi-physics modeling of tsunami evolution from generation to inundation. Ocean Modelling. Vol. 38, Issues 1-2. Pag. 96-113.

[66] Rhea, S. et al. (2010). Seismicity of the Earth 1900-2007 Nazca Plate and South America. United States Geological Survey– USGS.

[67] Otero, L. (2008). Metodología para evaluar la peligrosidad debido a tsunamis en zonas costeras. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. España.

[68] Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano - OSSO. (2003). Evaluación de la vulnerabilidad física por terremoto y sus fenómenos asociados en poblaciones del Litoral de Nariño.

[69] Área de Pensamiento Estratégico. (2012). Análisis preliminar para un estudio de las zonas de riesgo natural y no natural, Cámara Argentina de la Construcción. Buenos Aires, Argentina.

[70] ASTER GLOBAL-DEM. Available in: <http://www.jpl.nasa.gov/>(last access: October2014).

[71] Rengifo Buitrago, M.L. & Puentes Galindo, M.G. (2007). Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro. Boletín científico CCCP, 14, pp.95–108.

[72] ASPRS. (2003). ASPRS LIDAR Data Exchange Format Standard.

[73]http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/sanchu/Seismo_Note/2004/EIC156e.html

Consultada [04 de Agosto 2015].

7 ANEXOS

Anexo 1. Estándar para Levantamientos Hidrográficos, 2008.

Anexo 2. Escenario Sísmico propuesto por UNGRD - SGC como precursor de tsunamis: Zona Centro.

Anexo 3. Mapas de Inundación por Tsunami. Impresos

Anexo 4. Mapas de Inundación por Tsunami Geo Referenciados en Formato PDF, Respectiva Base De Datos Digital.