

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN**



**“ESTUDIO DE LA HIDRO-MORFODINÁMICA DEL ESTERO DE
TEACAPÁN PARA EL DISEÑO DE UNA OBRA DE PROTECCIÓN
CON RELLENO DE ARENA.”**

TESIS.

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN.**

**PRESENTA:
BRANDO ISRAEL VAZQUEZ HEREDIA.**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. CUAUHTÉMOC FRANCO OCHOA.**

CULIACÁN DE ROSALES, SINALOA, MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2018.



UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

Agradecimientos.

Estoy agradecido con el Ing. José Luis Piña y el Ing. Alejandro Murillo de la empresa INPROMEX S.A. De C.V. por permitirme desarrollar mi estancia de intervención allí y en particular me gustaría dar las gracias a Gonzalo Pablo por su gran ayuda con el software MIKE21.

Quisiera agradecer a la asociación civil CONSELVA A.C. por proporcionar la batimetría del estero de Teacapán e información para la calibración del modelo numérico con la que pude terminar mi proyecto de intervención, sin su colaboración esto no habría sido posible.

Agradecimientos al Servicio Mareográfico Nacional por proporcionarme datos de marea de la estación de Mazatlán que utilice en la calibración del modelo numérico.

Expresarle mi gratitud a mi director de proyecto de intervención Dr. Cuauhtémoc Franco Ochoa por siempre motivarme a mejorar continuamente y por compartir su conocimiento durante el desarrollo de mi proyecto de intervención.

Agradezco a mis profesores por compartir toda su experiencia y consejos profesionales.

Agradezco a mis compañeros de clase que pasamos tantos momentos juntos Ing. Christian Karín Valenzuela Leyva, Ing. Alfonso Mirsha Aragón Ayala, Ing. Eliseo Uriarte Vargas, Ing. Luisa Alfaro Valencia, Ing. Jesús Eduardo Ceceña Osuna, Ing. Genaro Bueno León, Ing. Eric Adrián Martínez Jiménez, Arq. Luis Alfonso Gurrola Camero, Ing. Jesús Leyva López, Ing. Adam Alexander Mendoza Lizárraga.

Un agradecimiento especial a mi alma máter la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Y agradezco a CONACYT por apoyarme con la beca sin la cual no habría podido terminar mi proyecto de intervención.

Dedicatoria.

Quiero dedicar esta trabajo a mi familia que me ha apoyado en mis estudios durante toda mi vida, a mi madre Rosa Elvira Heredia Sánchez, a mi padre Rodolfo Vazquez Morales y a mi hermana Shomara Guarina Vazquez.

De una manera muy especial dedico este proyecto de intervención a mi madre ya que hace algunos años cuando se tuvo que decidir sobre si seguiría estudiando, ella siempre me dio su apoyo para seguir y seguir estudiando, hoy en día todo ese apoyo incondicional culminó con este proyecto de intervención de Maestría en Ingeniería la cual es mi mayor logro académico y se lo dedico a ella.

Resumen.

En este proyecto se revisó el campo de la hidrodinámica y los cambios de la línea de costa del estero de Teacapán con el fin de diseñar una obra de protección costera, por medio de modelado numérico con el software MIKE 21 en Versión Demo y del análisis de imágenes de satélite con el módulo DSAS de ArcGis respectivamente.

El modelo se calibró utilizando mediciones in situ de velocidades y niveles de agua, posteriormente se simuló la hidrodinámica del estero bajo diferentes condiciones de clima extremo y a la vez se evaluó el efecto que tendría la construcción de un relleno artificial de arena al interior del estero, a la vez de manera complementaria con el análisis de imágenes de satélite se identificaron zonas y tasas de erosión/acreción en ambos márgenes del estero.

Las simulaciones revelaron que la marea juega un papel más importante que los caudales aportados por dos subcuencas en el campo de hidrodinámica del estero y además el relleno artificial de arena no tiene un gran efecto en éste, por otro lado del análisis de imágenes se comprobó que los márgenes interiores se encuentran en un estado erosivo.

Palabras clave:

Modelación numérica, hidrodinámica, costa, estero, erosión, protección costera, relleno.

Abstract.

In this project, the hydrodynamics and the changes of the coastline of the Teacapán estuary were revised in order to design a coastal structure, by means of numerical modeling with the MIKE 21 software in Demo Version and of the analysis of satellite images with the DSAS module of ArcGis respectively.

The model was calibrated using in situ measurements of velocities and water levels, afterwards the hydrodynamics of the estuary was simulated under different extreme weather conditions and at the same time the effect that the construction of an artificial sand filling inside the estuary would have been evaluated. At the same time with the analysis of satellite images, zones and erosion/accretion rates were identified on both margins of the estuary.

The simulations revealed that the tide is more important than the flows contributed by two sub-basins in the hydrodynamic of the estuary and in addition the artificial sand filling does not have a great effect in this, on the other hand of the image analysis it was proved that the interior margins are in an erosive state.

Keywords:

Numerical modeling, hydrodynamics, coast, estuary, erosion, coastal protection, sand nourishment.

Índice.

I.- Introducción.	12
1.1.- Presentación.....	12
1.2.- Análisis situacional.....	13
1.3.- Definición del problema.	17
II.- Fundamento teórico.	20
2.1.- Hipótesis.....	20
2.2.- Marco histórico y contextual.	20
2.3.- Estado del arte.	21
2.4.- Marco teórico.....	25
2.5.- Marco legal.	29
III.- Proyecto de intervención.	29
3.1.- Objetivo general.	29
3.2.- Objetivos específicos.....	29
3.3.- Justificación.....	30
3.4.- Metodología.....	31
3.4.1.- Recopilación de la información.	32
3.4.2.- Visita de campo.....	33
3.4.3.- Evolución del estero. Revisión de la línea de costa.	34
3.4.4.- Hidrología de la zona.	35
3.4.4.1.- Hidrograma de la Subcuenca El Palote-Higueras.	35
3.4.4.2.- Hidrograma de la Subcuenca R. Las Conchas.	37
3.4.4.3.- Sobreelevación por marea de tormenta.	38
3.4.5.- Modelación numérica usando MIKE 21. Modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos.	38
3.4.5.1.- Hipótesis.....	38
3.4.5.2.- Dominio espacial.....	38
3.4.5.3.- Calibración.	39
3.4.5.4.- Simulaciones.	43
3.5.- Análisis de resultados y discusión.....	44
IV. Estrategias de implementación.	66
4.1.- Plan de acción.....	66
4.1.1.- Proyecto de Ingeniería.	66

4.1.1.1.- Planos y memoria de cálculo.....	66
4.1.1.2.- Especificaciones particulares.	73
4.2 Estrategias usadas para presentar y persuadir a los involucrados en el proyecto.	86
4.2.1.- Evaluación de impacto ambiental.	86
4.2.1.1.- Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales.	87
V. Administración del proyecto.....	100
5.1.- Cronograma de actividades.	100
5.2.- Recursos.	100
VI.- Conclusiones y recomendaciones.....	102
6.1.- Conclusiones.....	102
6.2.- Recomendaciones.	103
6.3.- Futuras líneas de trabajo.	104
Bibliografía.....	105
VII.- Anexos.	109
Anexo A. Ecuaciones de gobierno del modelo MIKE21.....	109
Anexo B.- Solicitud de información.	114
Anexo C.- Carta Náutica.....	115
Anexo D.- Caudal aportado al sistema por la Subcuenca El Palote-Higueras.....	116
Anexo E.- Caudal aportado al sistema por la Subcuenca R. Las Conchas.	134
Anexo F.- Propuesta de periodo de retorno.	149
Anexo G.- Construcción de Hidrograma total.	152
Anexo H.- Sobreelevación por marea de tormenta.	153
Anexo I.- Tasas de erosión-acreción.....	157
Anexo J.- Comparación de velocidad de corrientes (condiciones extremas).	165
Anexo K.- Cambios de velocidad después de la construcción del relleno.	167
Anexo L.- Diseño de tablaestacas.....	178
Anexo M.- Fotografía.	180

Índice de figuras.

Figura 1.- Estero de Teacapán en el Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual.	13
Figura 2.- Se observa que el Río de las Cañas descarga dentro de la Subcuenca El Palote.	14
Figura 3.- Localización del estero de Teacapán.	15
Figura 4.- Evolución de línea de costa en las proximidades del CETMAR N°23	16
Figura 5.- Aumento de construcción de espigones en la margen derecha del estero.	18
Figura 6.- Transectos que cruzan al estero frente al Malecón de Teacapán.	18
Figura 7.- Perfiles del fondo del estero.....	19
Figura 8.- Espigones en forma de T en el Puerto Banús, España.....	26
Figura 9.- Relleno de arena en la playa de Guanyinshan beach, Xiamen, China.....	27
Figura 10.- Relleno de playa en Sand Engine, Holanda.....	27
Figura 11.- Relleno de arena en la isla barrera de Cancún, Quintana Roo.....	28
Figura 12.- Desglose de la metodología seguida en este proyecto de intervención.	32
Figura 13.- Batimetría del estero de Teacapán.....	33
Figura 14.- Ubicación de los sitios de muestreo.....	34
Figura 15.- Fronteras: Frontera Oceánica (código 4) y Frontera Río (código 6).	39
Figura 16.- Marea utilizada para la calibración (UNAM).....	41
Figura 17.- Localización de los puntos al interior del estero donde se midieron los niveles de agua y velocidades.....	41
Figura 18.- Niveles de agua medidos en el estero para la calibración del modelo.....	42
Figura 19.- Condición inicial del nivel del agua dentro del dominio de cálculo.....	42
Figura 20.- Curva granulométrica de la arena nativa.	45
Figura 21.- Identificación de zonas de erosión y acreción en los márgenes del estero.	46
Figura 22.- Resultados del módulo DSAS.....	47
Figura 24.- Hidrograma total forzado en la Frontera Río del modelo numérico.....	48
Figura 25.- Pruebas de calibración del modelo.	49
Figura 26.- Comparación de niveles de superficie libre de agua en el punto HOB0-4.	50
Figura 27.- Comparación de niveles de superficie libre de agua en el punto HOB0-9.	50
Figura 28.- Comparación velocidades en las corrientes estuarinas en el punto HOB0-4....	51
Figura 29.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 10:23:20 a 10:40:00.	52
Figura 30.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 10:56:40 a 11:13:20.	53
Figura 31.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 13:00:00 a 15:00:00	54

Figura 32.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 17:00:00 a 19:00:00.	55
Figura 33.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 10:23:20.	56
Figura 34.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 16:00:00.	57
Figura 35.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 23:26:40.	58
Figura 36.- Cambios en el nivel del fondo del cauce (transporte de arena) en el escenario en condiciones de clima extremo.	59
Figura 37.- Series de tiempo de elevación y velocidad en la sección S-1.	61
Figura 38.- Construcción del relleno artificial de arena.	62
Figura 39.- Campo de velocidades al construir el relleno artificial de arena a las 10:23:20, 16:00:00 y a las 23:26:40.	63
Figura 40.- Cambios en el fondo del estero (transporte de arena) en las proximidades del CETMAR N°23 al construir el relleno artificial de arena.	64
Figura 41.- Puntos de extracción de velocidades al norte (P1, P2, P3, P4, P5), enfrente (P6, P7) y al sur (P8, P9, P10) del relleno artificial de arena.	64
Figura 42.- En el cadenamamiento del relleno artificial se realizó una extracción de secciones para el cálculo de los volúmenes de arena.	66
Figura 43.- Sección tipo del relleno artificial.	68
Figura 44.- Secciones de la 0+000 a la 0+220.	68
Figura 45.- Secciones de la 0+240 a la 0+420.	69
Figura 46.- Vista del hincado de las tablaestacas sobre el eje de proyecto.	69
Figura 47.- Detalle del muro de tablaestacas y bancos de nivel en las cercanías de la obra.	70
Figura 48.- División del eje de hincado en tramos con tablaestacas de distinta longitud.	71
Figura 49.- Programa de obra tentativo del relleno artificial de arena.	100
Figura 50.- Presupuesto del relleno de arena artificial de arena.	101
Figura 51.- Carta de solicitud de información a CONSELVA A.C.	114
Figura 52.- Carta náutica de la SEMAR S.M.412.1 BOCA TEACAPÁN, SIN.	115
Figura 53.- Imagen satelital donde se observan los aportes de caudal en la frontera Sur.	116
Figura 54.- Registro histórico de alturas de precipitación de la estación La Concha.	117
Figura 55.- Grafica Q-Q Plot de los valores observados contra los valores teóricos.	127
Figura 56.- Ajuste entre valores empíricos y teóricos.	129
Figura 57.- Hidrograma de las Subcuenca El Palote-Higueras.	133
Figura 58.- Subcuenca R. Las Conchas.	134

Figura 59.- Registro histórico de caudales en la estación La Ballona del Río Las Cañas..	135
Figura 60.- Grafica Q-Q Plot de los valores observados contra los valores teóricos.	145
Figura 61.- Se muestra el ajuste logrado con la distribución general de valores extremos	147
Figura 62.- Hidrograma de las Subcuenca R. Las Conchas.	148
Figura 63.- Trayectoria del huracán Olivia (Landsea and Franklin, 2013).	149
Figura 64.- Trayectoria del huracán Tico (Landsea and Franklin, 2013).	150
Figura 65.- Trayectoria del huracán Rosa (Landsea and Franklin, 2013).	150
Figura 66.- Trayectoria del huracán Willa (Landsea and Franklin, 2013).	151
Figura 67.- Hidrograma total utilizado para forzar el modelo numérico en el escenario de condiciones extremas.	152
Figura 68.- Gráfica dada en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 para calcular el Índice de ascenso.	154
Figura 69.- Gráfica dada en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 para calcular el factor de corrección.	155
Figura 70.- Gráfica Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 calcula altura de ola rompiente ...	155
Figura 71.- Puntos de extracción de velocidades en tres puntos estratégicos en el estero.	165
Figura 72.- Comparativa con condiciones de clima normales y extremas en el punto V1.	165
Figura 73.- Comparativa de velocidades con condiciones de clima normales y extremas en el punto V2.	166
Figura 74.- Comparativa de velocidades con condiciones de clima normales y extremas en el punto V3.	166
Figura 75.- Intervalos de tiempo para extracción de velocidades.	167
Figura 76.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P1.	168
Figura 77.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P2.	169
Figura 78.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P3.	170
Figura 79.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P4.	171
Figura 80.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P5.	172
Figura 81.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P6.	173
Figura 82.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P7.	174
Figura 83.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P8.	175
Figura 84.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P9.	176
Figura 85.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P10.	177
Figura 86.- Se muestra la Zona D en la Playa de Teacapán ubicada en las cercanías del CETMAR N°23.	180

Índice de tablas.

Tabla 1.- Resumen de la composición de diversos modelos 2D desarrollados en Europa (de Vriend et al., 1993).	22
Tabla 2.- Caracterización de la arena de los bancos y de la arena nativa del lugar frente al CETMAR.	44
Tabla 3.- Resumen de cuantificación de erosión en las zonas señaladas.	47
Tabla 4.- Propiedades de las arenas necesarias para realizar el cálculo del empuje sobre el muro de retención.	67
Tabla 5.- Cálculo de la estabilidad del muro de tablaestacas por secciones.	67
Tabla 6.- Volúmenes de arena calculados.	70
Tabla 7.- Cuadro de construcción del eje de proyecto del muro de tablaestacas.	72
Tabla 8.- Estimación de la reserva natural de las tablaestacas AZ 18-800.	72
Tabla 9.- Matriz de Leopold.	88
Tabla 10.- Total del puntaje de la evaluación de impacto ambiental.	91
Tabla 11.- Medidas de corrección basado en los impactos por etapa de proyecto.	94
Tabla 12.- Medidas de mitigación para la etapa de preparación del sitio.	95
Tabla 13.- Medidas de mitigación para la etapa de construcción.	96
Tabla 14.- Medidas de mitigación para la etapa de construcción.	97
Tabla 15.- Análisis del costo de la obra.	100
Tabla 16.- Datos obtenidos de la aplicación geoespacial del INEGI SIATL.	116
Tabla 17.- Registro de precipitaciones máximas anuales de la estación La Concha.	118
Tabla 18.- Muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor de la estación La Concha.	120
Tabla 19.- Variable reducida de GVE para la primera etapa de iteración por máxima verosimilitud.	121
Tabla 20.- Proceso de búsqueda de parámetros.	124
Tabla 21.- Comparativa de alturas de precipitación observadas con las alturas de precipitación calculadas con la función de distribución.	125
Tabla 22.- Caudales de diseño para distintos periodos de retorno.	129
Tabla 23.- Cálculo de intensidades para el registro de la estación <i>La Concha</i> .	131
Tabla 24.- Valores del umbral de escorrentía o escurrimiento.	132
Tabla 25.- Datos de la Subcuenca obtenidos de la aplicación geoespacial SIATL (INEGI, 2018).	134
Tabla 26.- Registro de gastos máximos anuales de la estación La Ballona.	136

Tabla 27.- Muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor de la estación La Ballona.....	138
Tabla 28.- Variable reducida de GVE para la primera etapa de iteración.....	139
Tabla 29.- Proceso de búsqueda de parámetros de la distribución general de valores extremos por máxima verosimilitud.....	142
Tabla 30.- Comparativa entre gastos observados y gastos calculados.	143
Tabla 31.- Caudales de diseño para distintos periodos de retorno utilizando la distribución general de valores extremos.	147
Tabla 32.- Utilizando la Figura 74 de arriba se calculó la altura de ola de rompiente.....	156
Tabla 33.- La sobre elevación final se obtuvo al sumar la sobreelevación por viento, por oleaje y por la marea astronómica.	156
Tabla 34.- Tasas de evolución en la Zona A.	157
Tabla 35.- Tasas de evolución en la Zona B.....	158
Tabla 36.- Tasas de evolución en la Zona C.....	158
Tabla 37.- Tasas de evolución en la Zona D.	159
Tabla 38.- Tasas de evolución en la Zona E.....	160
Tabla 39.- Tasas de evolución en la Zona F.	160
Tabla 40.- Tasas de evolución en la Zona G.	161
Tabla 41.- Tasas de evolución en la Zona H.	162
Tabla 42.- Tasas de evolución en la Zona I.....	164
Tabla 43.- Localización de los cuatro puntos de extracción.....	165
Tabla 44.- Localización de los 10 puntos de extracción.....	167

I.- Introducción.

1.1.- Presentación.

El estero de Teacapán se localiza en la costa sur del estado de Sinaloa y actualmente se pueden observar en él importantes alteraciones en su entorno debido a numerosas intervenciones antrópicas en las últimas décadas. En consecuencia, se ve incrementado el riesgo de erosión e inundación al que está expuesta la población del lugar.

Ante esta problemática el objetivo general de este proyecto fue revisar el campo de la hidrodinámica y los cambios de línea de costa del estero para encontrar los elementos clave que permitan diseñar una propuesta de actuación que mitigue los problemas de erosión presentados en los márgenes del estero. Para ello se recopiló información base del estero, se realizó un análisis de imágenes de satélite para revisar la línea de costa del estero, se estimó el hidrograma aportado por la Subcuenca El Palote-Higueras y la Subcuenca R. Las Conchas, se calibró e implementó el modelo numérico, se evaluó el impacto en la hidrodinámica por la construcción de un relleno artificial de arena cuyo objetivo es proteger una zona erosiva identificada en el análisis de imágenes de satélite y finalmente se elaboró el proyecto de Ingeniería del relleno.

En este proyecto se utilizaron los módulos de hidrodinámica y transporte de arena del modelo Flow Model FM del software MIKE21 que se basa en un enfoque de malla flexible y ha sido desarrollado para aplicaciones en zonas oceánicas, costeras y estuarinas. El módulo hidrodinámico se basa en soluciones numéricas de dos o tres dimensiones de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo a superficie libre, promediadas en la vertical mediante la aproximación de Reynolds invocando las suposiciones de Boussinesq y de la presión hidrostática. El módulo de transporte de arena se basa en la teoría de Engelund y Hansen que es un modelo de transporte total que necesita información específica para dividir al transporte de sedimento en transporte de fondo y transporte suspendido.

Asimismo se realizó un análisis de imágenes de satélite del estero para el periodo 2003-2018 con el fin de identificar zonas de erosión y cuantificar las tasas de evolución de la línea de costa utilizando imágenes de Google Earth, Autocad, Civilcad y Sistemas de Información Geográfica como el módulo Digital Shoreline Analysis System (DSAS) que es una aplicación de software disponible libremente que funciona dentro del software del Sistema de Información Geográfica (Esri) de ArcGIS. DSAS computa estadísticas de tasa de cambio para una serie temporal de datos de vectores costeros.

La propuesta de actuación en el estero es del tipo de Ingeniería combinada y constó de un relleno artificial de arena (que se obtendrá de montículos de arena residuo de la excavación de jagüeyes locales) protegido con un muro de retención a base de tablaestacas de acero diseñadas en voladizo en una zona erosiva identificada.

1.2.- Análisis situacional.

La localidad de Teacapán se localiza en Escuinapa, Sinaloa, en las coordenadas UTM X= 424, 250 m E y Y= 2, 492, 750 m N a una altura de 1 metro sobre el nivel del mar (msnm). “El estero de Teacapán forma parte del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual (Figura 1) el cual está conformado por un extenso complejo de esteros y lagunas costeras de agua salobre, grandes extensiones de vegetación natural, lodazales o pantanos y cañadas, más una canal artificial denominado Canal de Cuautla que al igual que el estero de Teacapán mantiene comunicación con el Océano Pacífico” (OCHOA, 2014).

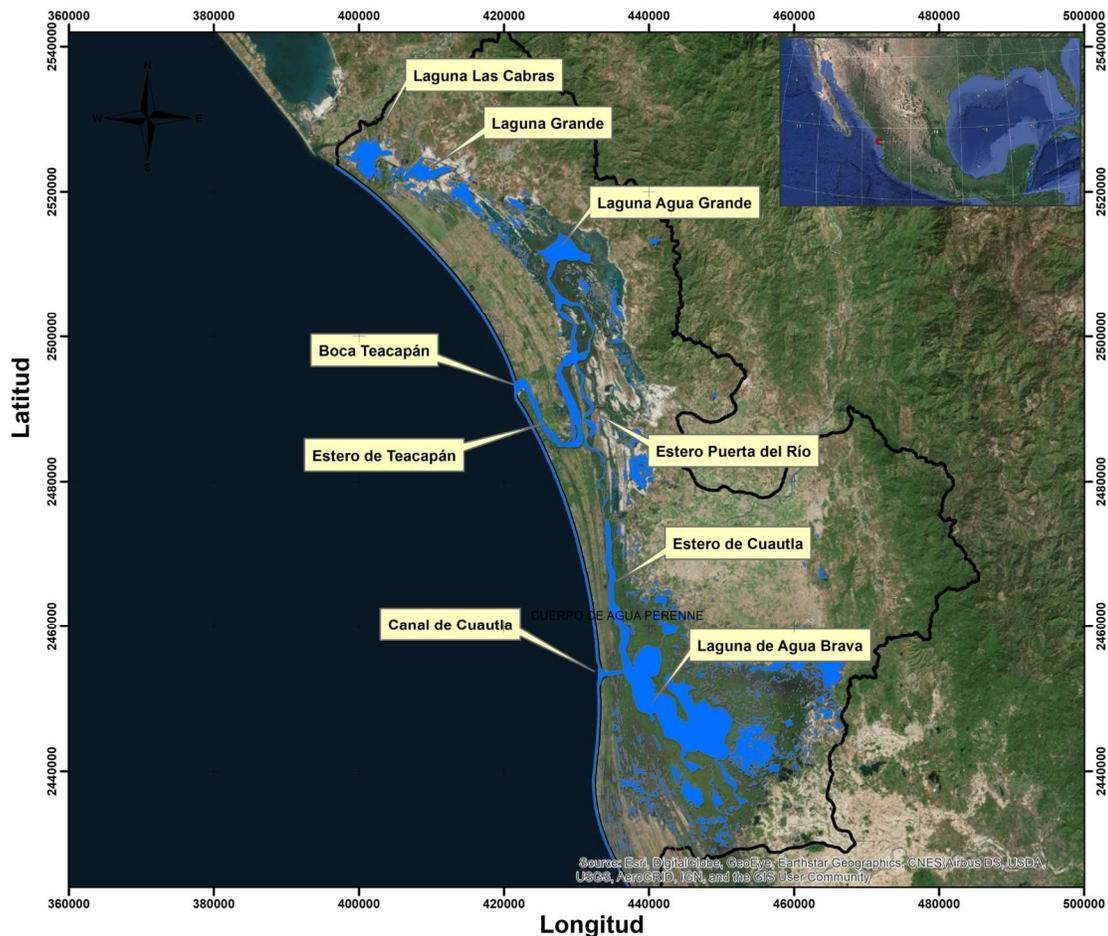


Figura 1.- Estero de Teacapán en el Sistema Lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual.

El clima es cálido húmedo con lluvias en verano (García Amaro, 2004). El tipo de marea es mixta con predominancia semidura (UNAM), es decir, se producen dos pleamares y dos bajamares durante cada día lunar, y los niveles de dos pleamares o bajamares consecutivos son generalmente similares. En cuanto a la amplitud de la marea, esta es de rango micromareal (menor a 2 m) de acuerdo a la clasificación de Davies (Davies, 1964).

Hacia el estero descargan dos subcuencas hidrográficas (Figura 2): la Subcuenca RH11Bf El Palote-Higueras y, la Subcuenca RH11Be R. Las Conchas del Río de Las Cañas.

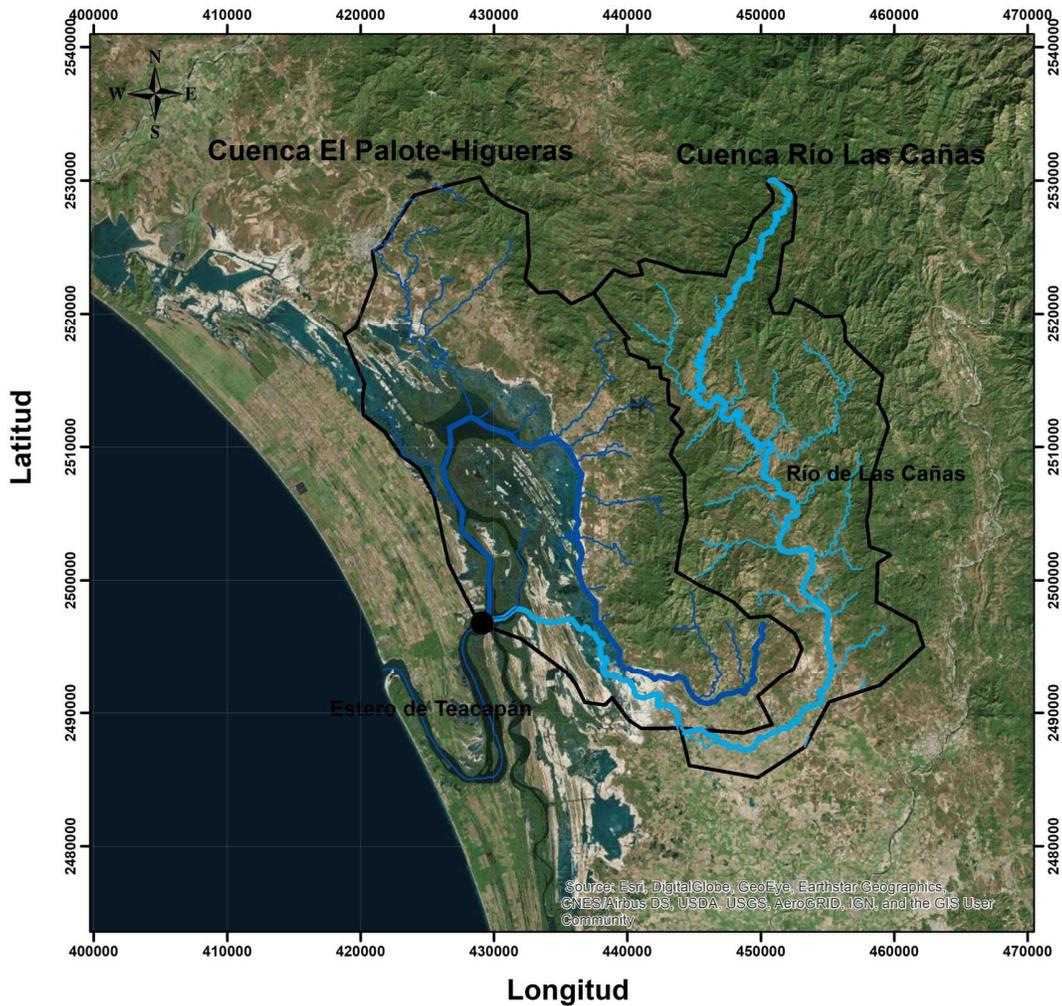


Figura 2.- Se observa que el Río de las Cañas descarga dentro de la Subcuenca El Palote.

El Estero de Teacapán se localiza en la costa sur del estado de Sinaloa; entre los meridianos 419, 500 m y 425, 500 m y los paralelos 2 489 500 m y 2 494 500 m de la zona 13 norte del sistema de proyección UTM (Figura 3).

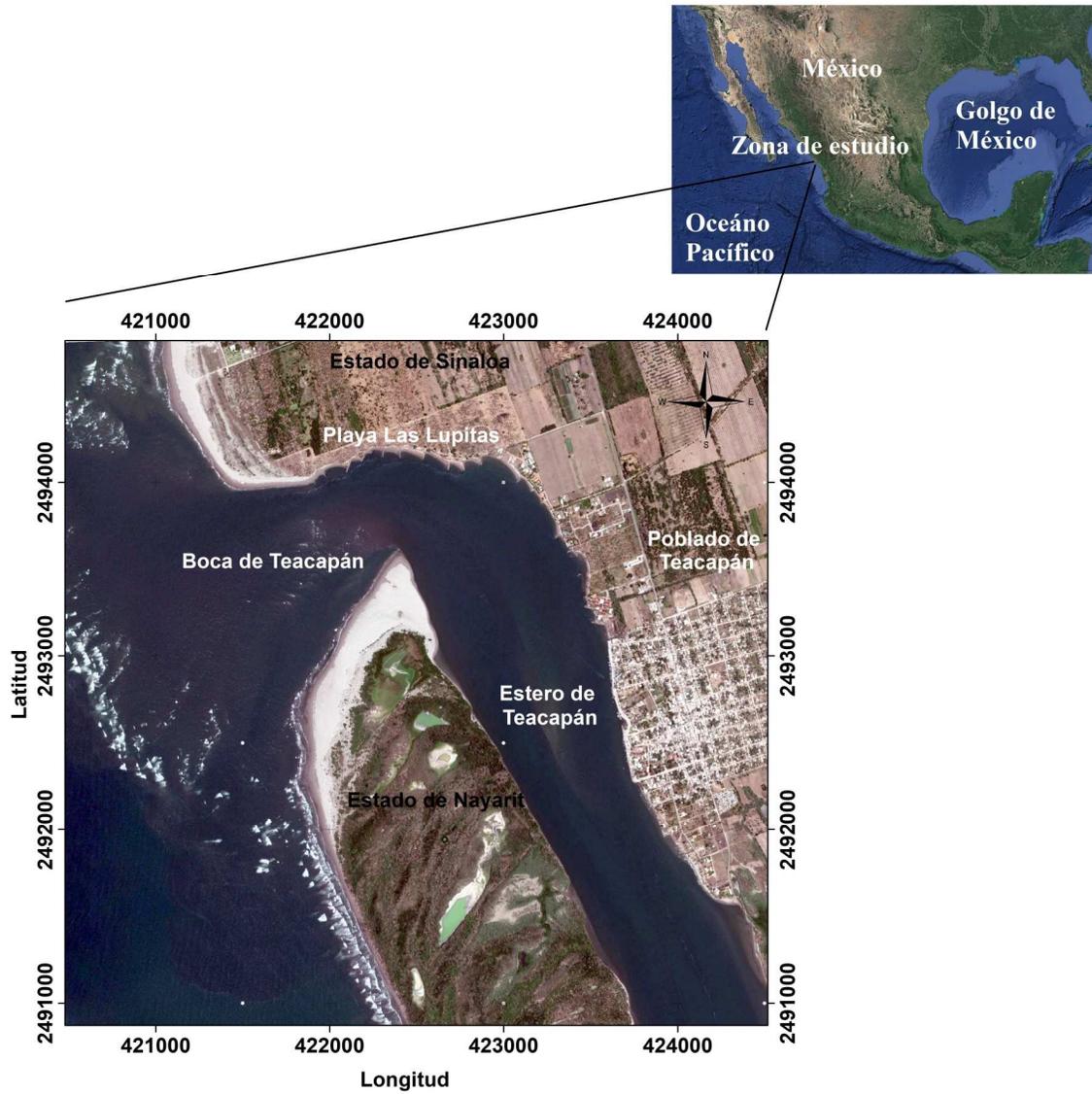


Figura 3.- Localización del estero de Teacapán.

A lo largo de las costas Sinaloenses se han construido diversas estructuras de Ingeniería dura (tales como espigones, escolleras, malecones) que en algunos de los casos no han cumplido con su función de protección posiblemente debido a la falta de un estudio de hidrodinámica en los cuerpos de agua involucrados. Un claro ejemplo de lo anterior son los espigones que se construyeron en el margen derecho del estero de Teacapán y como se observa en la Figura 4 se puede apreciar el marcado retroceso de la línea de costa en una zona de interés.

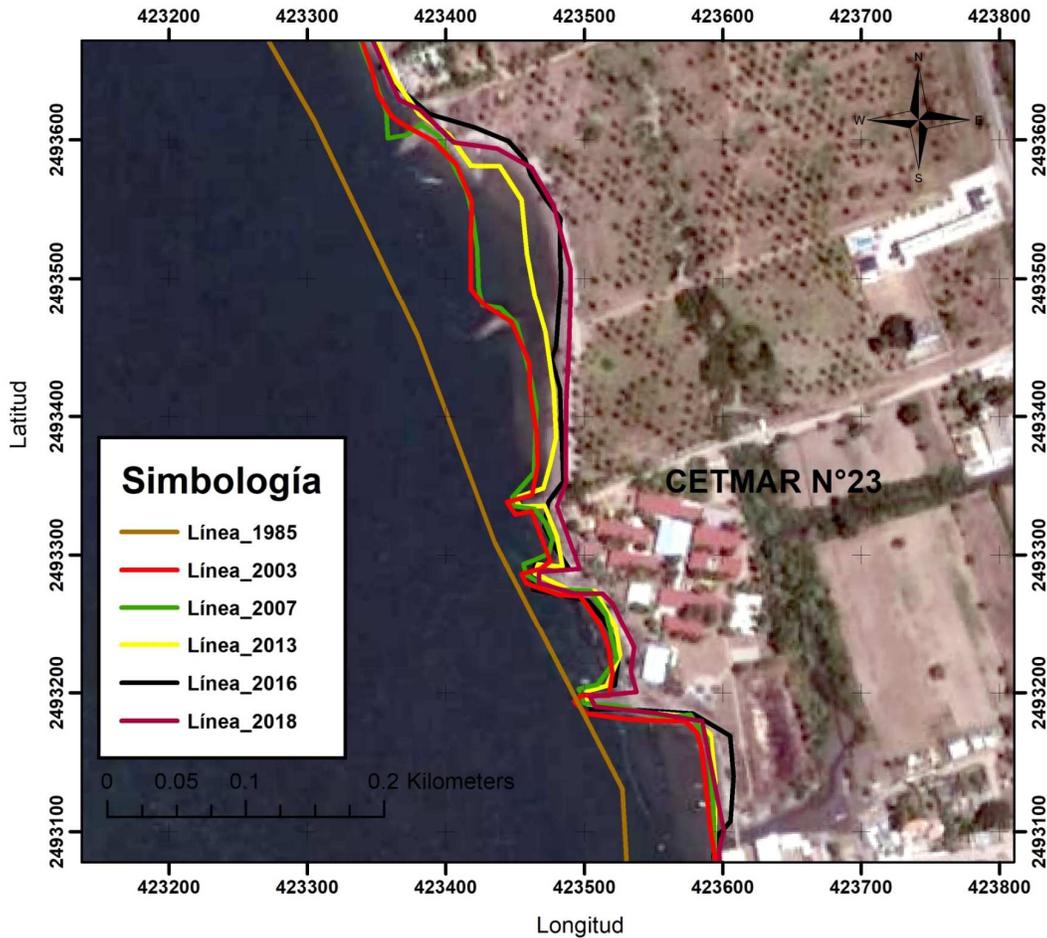


Figura 4.- Evolución de línea de costa en las proximidades del CETMAR N°23

En este proyecto de intervención se presenta un estudio de hidro-morfodinámica en el estero de Teacapán con el fin de generar información valiosa que conlleve al buen diseño de estructuras de protección costera en esta zona, con este proyecto se pretenden mostrar los beneficios que se tienen al utilizar la modelación numérica ante la problemática de ingeniería en la que se omite la realización de estos estudios y terminan por llevar a las obras al fracaso, además del impacto en el carácter social al proponer obras que beneficien a toda infraestructura que se localice en las costas (comercios, poblados, escuelas, etc.).

1.3.- Definición del problema.

“En todo el mundo se observa una tendencia creciente en la erosión costera, que representa un conflicto entre la evolución de la costa, las medidas de mitigación de la erosión y el uso de la tierra. Una de las medidas de mitigación más aplicadas son los revestimientos longitudinales que permiten fijar la posición de la línea de costa, así como proteger a las personas y los bienes en los frentes urbanos de agua” (CIRIA, 2007). Las costas son áreas dinámicas que están en constante cambio, es decir cambian su forma en planta y en perfil a lo largo del tiempo debido al transporte de sus sedimentos ya sea de forma natural o por acciones humanas (Medina et al., 1995), cuando en la celda de una costa salen más sedimentos de los que entran entonces se crean zonas de erosión y en caso contrario (si la entrada de sedimentos aumenta) se crean zonas de acreción.

“La erosión costera inicia cuando, comparando dos estados de una playa en dos momentos distintos, la línea de orilla está retranqueada hacia tierra. Habría que revisar si a ese estado es realmente erosivo, ya que pudiera suceder que el sedimento de la playa que antes estaba en su zona seca se haya movido a la zona sumergida, o que exista un desequilibrio sedimentario a lo largo de todo el sistema litoral. Se puede afirmar que existe erosión cuando el sistema litoral en su conjunto ha perdido sedimento” (González, 2013). Otra cuestión a tomar en cuenta al realizar un análisis de línea de costa por medio de imágenes de satélite es el criterio para definir dicha línea y el tiempo en el que se obtienen las imágenes satelitales debido a que si alguna fue captada en el momento de pleamar se pudiera interpretar como que la línea ha retrocedido y que existe erosión cuando en realidad no lo es.

Revisando imágenes históricas del estero de Teacapán se ha observado que su línea de costa ha presentado un retroceso a lo largo del tiempo, esta erosión posiblemente ha alterado la hidrodinámica y en el sentido ambiental la biodiversidad de flora (manglares) pudo verse afectada al no existir arena en algunas zonas de los márgenes del estero. Ésta erosión impacta negativamente en las actividades que se realizan en la costa y por igual afecta a las construcciones que están sobre las dunas o muy cerca de ellas, lo que se traduce en pérdidas económicas y de turismo.

La erosión que se puede observar en el estero de Teacapán puede deberse a importantes alteraciones en su entorno debido a numerosas intervenciones antrópicas en las últimas décadas. Al revisar la línea de costa del estero de Teacapán con imágenes de Google Earth de los años 2003, 2007, 2013 y 2018, se puede observar un retroceso de dicha línea (Figura 5), la cual puede deberse al efecto que producen los espigones cerca de la boca de Teacapán y al interior del estero en su margen derecha. Estos espigones posiblemente se construyeron en exceso sin haber realizado estudios previos, por lo que en vez de retener sedimento se formó una zona de erosión al interior y la arena se depositó en el extremo norte de la boca.



Figura 5.- Aumento de construcción de espigones en la margen derecha del estero.

Por otro lado, la construcción del malecón enfrente del poblado de Teacapán al ser una estructura rígida y al orientarse de forma paralela a las corrientes estuarinas pudo favorecer la formación de zonas de erosión al pie de la estructura (Figura 6) debido a que los sedimentos no se retendrían fácilmente.



Figura 6.- Transectos que cruzan al estero frente al Malecón de Teacapán.

Asimismo, por medio de la solicitud de la batimetría del estero a la asociación civil CONSELVA A.C. se pudieron extraer perfiles del fondo del cauce frente al malecón (Figura 7), en estos perfiles se observó una acumulación de sedimentos al centro dando lugar a la formación de un banco de arena y de lo que parecen ser canales de circulación a ambos lados de él.

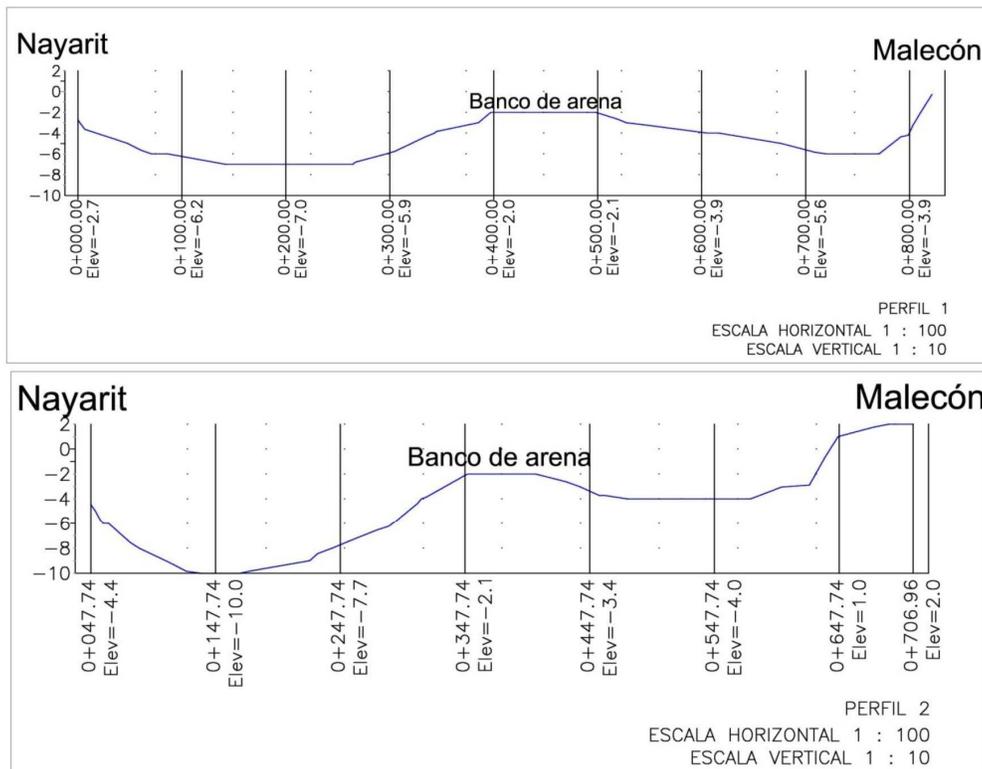


Figura 7.- Perfiles del fondo del estero.

En cuanto al funcionamiento hidráulico de todo el sistema lagunar, según Franco-Ochoa (2014), con la apertura del Canal de Cuautla el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual quedó dividido hidrodinámicamente en dos sistemas casi independientes, por lo que los gastos de agua y el aporte de sedimentos que originalmente salían por la Boca de Teacapán se redujeron drásticamente.

Aunado a estas alteraciones, se presenta una escasez de estudios y de información esencial referente a los procesos físicos ocurientes en el estero. En este sentido este proyecto consistió en realizar un estudio de hidro-morfodinámica en el estero que permita generar información valiosa con el fin de proponer una medida de actuación que sea funcional, que proteja al estero y que no impacte de forma negativa al resto del margen, de no desarrollarse este proyecto no se podrá diseñar una obra eficiente y la línea de costa continuará retrocediendo cada vez más afectando a la infraestructura y a la población de Teacapán y no se podrán sentar las bases metodológicas para futuros estudios.

II.- Fundamento teórico.

2.1.- Hipótesis.

Mediante el estudio de la hidro-morfodinámica del estero de Teacapán es posible encontrar elementos clave para diseñar una obra de protección costera basada en un relleno de arena con una geometría en planta específica que mitigue la erosión en el margen del estero y sea funcional al mantener sin afectaciones al campo de hidrodinámica del estero.

2.2.- Marco histórico y contextual.

La erosión en las costas sinaloenses es un problema grave y de gran importancia debido a los 656 kilómetros de costa que poseemos y que de seguir diseñando obras de protección costera sin realizar estudios de hidro-morfodinámica en los cuerpos de agua involucrados es muy probable que se terminen perdiendo miles de metros de línea de costa. En muchos de los casos el tipo de obra de protección costera se escoge de manera arbitraria y se construye mediante presiones sociales o políticas de la población sobre las autoridades, resultando en una obra que en vez de solucionar problemas termina en desastre.

En las costas sinaloenses ya se han realizado estudios de morfodinámica por ejemplo en Guasave, Sinaloa donde por primera vez se ha documentado de manera directa la erosión que se ha venido sucediendo en playa Las Glorias, mediante el uso de imágenes de satélite, ortofotos digitales y mediciones directas del perfil de playa. El análisis de las fotografías aéreas muestra que entre 1980 y agosto de 2004 la línea de costa en playa Las Glorias retrocedió 149 m lineales, lo que resulta en una tasa promedio de erosión de 6.2 m/año. Encontrándose que la mayor tasa de erosión se presentó entre 1990 y 1994, siendo esta de 9.2 m/año, erosión que podría estar asociada a la construcción de la escollera en los años 1992 y 1993 (ALCANTAR ELIZONDO, 2008).

En el estero de Teacapán se hace presente una escasez de estudios sin embargo comparando imágenes históricas se observan importantes alteraciones antrópicas en sus márgenes tales como la construcción de espigones y del malecón del poblado, la erosión presente en la boca del estero puede deberse a la mala planeación en la construcción de espigones que es un claro ejemplo del problema ingenieril que es diseñar obras de protección costera sin realizar estudios previos en la hidrodinámica del cuerpo de agua involucrado, posiblemente estos estudios no se realizaron en el estero porque las autoridades de la época no exigían la modelación numérica como parte del diseño de las obras y por la falta de tecnologías, sin embargo hoy en día contamos con diversos software de modelación numérica en el mercado que se necesitan implementar en el diseño de cada obra costera para así asegurar su funcionalidad.

2.3.- Estado del arte.

“Los modelos predictivos son herramientas que permiten estimar el efecto que puede generar cualquier acción realizada en la costa sobre la situación evolutiva de la misma. Con ello, se podrían evitar acciones contraproducentes a la vez que permitirían diseñar de forma efectiva actuaciones de protección costera, los modelos físicos y los modelos numéricos forman parte de éstos. Los modelos físicos a escala solamente proporcionan resultados cuantitativos cuando la escala es próxima a la real (para escalas reducidas no es posible reducir el tamaño del sedimento en la misma proporción que las dimensiones geométricas, pues el sedimento quedaría de un tamaño cuasi-molecular). Los modelos numéricos, por otro lado, exigen una simplificación de los procesos actuantes y, solo son capaces de reproducir lo que ocurre, en unos cortos intervalos de tiempo y espacio. Las medidas de campo, por último, son caras y limitadas, aunque cada vez más asequibles y precisas debido a la introducción de técnicas como la teledetección, vehículos autónomos, etc.” (Conejo and Jiménez, 1994).

“Los modelos numéricos o matemáticos son modelos predictivos usados por los ingenieros para comprender los procesos costeros, éstos permiten cuantificar los cambios y detectar tendencias. Los modelos más sencillos son los de 1D una dimensión que corresponden a modelos de perfiles, también existen los modelos 2D en dos dimensiones más completos. Esto ha llevado a una gama de conceptos de modelos numéricos prácticamente útiles, tales como” (de Vriend et al., 1993):

- Modelos costeros, que describen solo el comportamiento a mayor escala (long-shore) después de haberse integrado en las escalas más pequeñas (verticales, transversales).
- Modelos de perfil costero, que ignoran la variación litoral, pero incluyen la dimensión vertical y se concentran en la escala de mediana (cross-shore).
- Modelos de área costera, basados en módulos de corriente promediados en profundidad, en los que se tienen en cuenta ambas dimensiones horizontales, o
- Modelos locales, que ignoran las escalas horizontales más grandes e intermedias y se concentran en fenómenos a pequeña escala (por ejemplo, formación de ondas) en los que la dimensión vertical no se puede ignorar ni parametrizar.

Además, se han desarrollado numerosos tipos de modelos intermedios (por ejemplo, modelos de varias líneas, modelos de múltiples perfiles).

Algunos modelos 2D de hidro-morfodinámica a mediano plazo son los desarrollados por el Danish Hydraulic Institute (DHI), Delft Hydraulics (DH), the University of Liverpool (UL) y HR Wallingford (HR). En el Tabla 1 se presenta un desglose de los módulos que cada modelo utiliza para simular hidrodinámica y morfodinámica.

Tabla 1.- Resumen de la composición de diversos modelos 2D desarrollados en Europa (de Vriend et al., 1993).

Coastal área model concepts in MAST-G6M				
Module	DHI	DH	UL	HR
Waves	PDR	PDR/MSS	KET/WCI	MSS/WCI
Current	2DH	2DH	2DH	2DH
Transport	ID/EQ/W	EQ	EQ	EQ
Topography	LWE/UD	IS/UD	LWE/EBP	LWE/UD

MSS:mild-slope, stationary; PDR: param. Spectral refr., incl. dir. Spreading; WCI: incl. wave-current int.; KET:kinem., energy, time-dep.; EQ: equilibrium transport; W: wave-borne transport; ID: intra-wave, diffusion; ISE: 1-step explicit; LWE: Lax-Wendroff explicit; UD: wave and current update; EBP: emp. Beach profile.

a) Modelo desarrollado por DHI

“Utiliza el módulo MIKE 21 Flow Model FM para determinar los niveles y flujos de agua debido a una variedad de parámetros (por ejemplo, viento, gradientes de presión barométrica, tensiones de radiación) resolviendo las ecuaciones de aguas poco profundas.

La unidad de morfodinámica del sistema describe el transporte de sedimentos y los cambios del nivel del lecho debido a la acción combinada de las olas y las corrientes. El modelo describe el transporte de sedimentos no cohesivo debido a las corrientes y coexistencias bajo ángulos arbitrarios, tanto para romper como para no romper olas.

Se tienen en cuenta los efectos de la asimetría de las olas, las formas de lecho a pequeña escala (ondas onduladas) y los sedimentos graduados. Se usa un método predictor / corrector para avanzar la solución a tiempo, con un criterio de tipo CFL para el paso del tiempo” (de Vriend et al., 1993).

b) Modelo desarrollado por DH

“HISWA que describe la propagación, el crecimiento y la descomposición de los campos estacionarios de onda corta de viento de corto período, se usa como módulo de onda en el modelo DH. Además de las alturas y direcciones de las olas, el módulo de ondas produce fuerzas inducidas por las olas de acuerdo con la formulación de disipación, en lugar de las tensiones de radiación. El módulo de flujo, que resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas en una rejilla curvilínea ortogonal, permite una variedad de mecanismos de forzado, incluido el forzado inducido por ondas. El módulo de transporte de sedimentos da acceso a una opción de transporte fórmulas y modelos de advección / difusión promediados por onda para el transporte de cargas suspendidas” (de Vriend et al., 1993).

c) Modelo desarrollado por UL

“El módulo de onda del modelo UL se basa en la ecuación de conservación cinemática, con difracción y la ecuación de conservación de energía. Describe las olas de cresta larga con una distribución de altura de Rayleigh e incluye los efectos de la interacción onda-corriente y el rompimiento de las olas (basado en la energía). El módulo actual resuelve las ecuaciones de aguas someras e incluye wave-induced forzando a través de gradientes de tensión de radiación. El módulo de transporte de sedimentos comprende una ecuación de transporte empírico, que se basa en datos de laboratorio y de campo disponibles. El módulo que maneja los cambios topográficos resuelve el balance de masa ecuación para el sedimento usando un esquema Lax-Wendroff modificado. Al igual que en el modelo DH, el mecanismo de paso de tiempo consta de dos bucles anidados, con una actualización hidrodinámica completa en el bucle externo y una actualización altamente simplificada en el bucle interno. La longitud de cada paso de tiempo de bucle interno se controla mediante un criterio de CFL, mientras que el número de bucles internos que constituyen un bucle externo se controla mediante una condición de cambio de profundidad límite” (de Vriend et al., 1993).

d) Modelo desarrollado por HR.

“El módulo de onda utiliza una solución de marcha hacia adelante de la ecuación de Pendiente Leve independiente del tiempo, expresada en forma de ecuaciones de transporte y eiconales, esta última incluye los términos de difracción. Representa la refracción de las olas y la compactación, la difracción y la disipación por fricción y ruptura del fondo. Las fuerzas motrices para la generación actual se calculan directamente a partir de la formulación de disipación. El módulo actual resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas. Las corrientes se expulsan de los límites y a través de fuerzas internas (por ejemplo, generadas por ondas). Las condiciones de contorno (niveles de agua o velocidades de flujo) incluyen los efectos de la configuración inducida por la ola y las fuerzas motrices de la plataforma. Hay dos modelos alternativos de transporte de sedimentos disponibles. Uno usa una simple ley de potencia para los efectos de las corrientes con agitación de onda y un criterio de umbral de movimiento. El otro usa un enfoque energético que incorpora corrientes más agitación de onda, efectos de asimetría de onda, transporte de masa de onda y gravedad. El módulo de actualización topográfica resuelve la ecuación del balance de sedimentos usando un esquema Lax-Wendroff, con una condición de estabilidad de tipo CFL. Se usa una prueba de convergencia en el módulo de flujo para reducir el esfuerzo en los cálculos hidrodinámicos” (de Vriend et al., 1993).

El software MIKE 21 Flow Model FM fue el modelo elegido para revisar la hidrodinámica en este proyecto de intervención y se basa en un enfoque de malla flexible y ha sido desarrollado para aplicaciones en zonas oceánicas, costeras y estuarinas. El sistema de modelado también se puede aplicar para estudios de inundaciones terrestres. El módulo hidrodinámico se basa en soluciones numéricas de dos o tres dimensiones de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo a superficie libre, promediadas en la vertical mediante la aproximación de Reynolds invocando las suposiciones de Boussinesq y de la presión hidrostática. Por lo tanto, el modelo consiste en ecuaciones de continuidad, momento, temperatura, salinidad y densidad y está cerrado por un esquema de cierre turbulento.

La discretización espacial de las ecuaciones primitivas se realiza utilizando un método de volumen finito centrado en la celda. El dominio espacial está discretizado por la subdivisión del continuo en elementos o celdas que no se superponen. En el modelo 2D, los elementos pueden ser triángulos o elementos cuadrilaterales.

En México se ha utilizado el software MIKE21 en la realización de diversos estudios tales como:

- “Un estudio realizado en el Estado de Tabasco que consistió en la generación de información y la aplicación de modelos numéricos a fin de valorar los efectos de drenaje de grandes caudales hacia los sistemas lagunares y partes bajas del Estado de Tabasco. Con particular énfasis, en las zonas de la desembocadura del Río González y la laguna de Mecoaacán. Para ello, se consideró el estudio de todos los procesos físicos involucrados en el incremento del riesgo de inundación de las zonas bajas costeras (p.ej. gastos extraordinarios, variación en el nivel del mar y condiciones simultáneas)” (Pedrozo Acuña et al., 2009).
- “Otro estudio realizado con MIKE21 fue el que se llevó a cabo en la Laguna de Cuyutlán, Colima, el cual consistió en implementar un modelo numérico bidimensional de malla no estructurada, basado en las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, que reproduzca de forma confiable las características físicas de la Laguna de Cuyutlán y su comportamiento hidrodinámico, para estimar los impactos por la apertura del canal Tepalcates” (Lara Hernández, 2012).

2.4.- Marco teórico.

“El litoral de Sinaloa se divide en las siguientes regiones: Como extremos a la Bahía de Agiabampo en el norte del estado y la Boca de Teacapán (desembocadura del Río de Las Cañas) en el Sur del territorio, el litoral tiene una extensión de 656 kilómetros de los cuales el 91% está en la zona de aguas del Golfo de California o Mar de Cortés y el 9% restante se inicia en este punto y termina en el límite con el estado de Nayarit. En el área de lagunas litorales se alojan 12 bahías, 15 esteros; 14 marismas, 2 lagunas, una desembocadura, una ensenada y una boca de río” (Sinaloa, 2006).

“Los esteros o estuarios son sistemas de agua únicos; son la interfaz entre el agua dulce del río y el agua salada costera. Tienen una alta productividad biológica, y generalmente se encuentran en zonas densamente pobladas, tal es el caso del Estero de Teacapán que se forma de la descarga del Río de las Cañas en el Océano Pacífico” (Dronkers and van Leussen, 2012). El estero de Teacapán además es de gran importancia al encontrarse dentro del ecosistema de manglares Marismas Nacionales que es un sitio protegido en el Convenio de Ramsar.

“La erosión en las costas es un proceso natural en la dinámica costera, a nivel mundial se han utilizado muchos métodos para disminuir los efectos erosivos de las playas, que se clasifican entre los métodos duros (infraestructura costera) y los métodos blandos (geotubos, restauración)” (Jiménez-Orocio et al., 2015). Atendiendo a la erosión existen estructuras de protección costera que se pueden clasificar como estructurales o duras, o no estructurales o blandas.

- Estructuras duras: Diques, malecones, revestimientos, espolones, rompeolas y escolleras.
- Estructuras blandas: Forestación de manglares, relleno de playas, arrecifes artificiales, drenaje de playa, regeneración de dunas y by-pass de arena.

Ingeniería dura.

Dentro de este tipo de medidas se encuentran las estructuras duras tales como: Diques, malecones, revestimientos, espigones, rompeolas y escolleras. “Los espigones (Figura 8) son estructuras perpendiculares a la línea de la playa construidas en las márgenes de las costas, generalmente de rocas angulosas apiladas y son empleados para proteger bancos de arena, playas o para controlar el curso del agua” (ZAYAS ESQUER, 2012). Sin embargo, los espigones son eficaces sólo sobre un tramo limitado de costa; a continuación, la erosión se acentúa aguas abajo y requiere la extensión del campo de espigones, creando un efecto dominó.



Figura 8.- Espigones en forma de T en el Puerto Banús, España. Imagen tomada de Google Earth.

Ingeniería blanda.

“Dentro de este tipo de medidas se encuentran las estructuras blandas tales como: Forestación de manglares, alimentación de playas, arrecifes artificiales, regeneración de dunas. La alimentación de playa es cada vez más aceptada por la gente para la protección de la costa y la reducción del daño en China (Figura 9). La alimentación de playa, también llamado "alimento artificial", "reposición", "relleno de la playa" y "restauración", comprende la colocación de grandes cantidades de arena de buena calidad para tratar un déficit continuo de arena manifestado por la recesión de la costa” (Dean, 2002).

“La alimentación de las playas (...) se define como la introducción de nuevos sedimentos, colocados en la playa, duna o costa por medios hidráulicos o mecánicos, lo cual tuvo el efecto inmediato de aumentar el ancho seco de la playa o crear una nueva playa.” (Valverde et al., 1999, Cai et al., 2009) mencionado en (Luo et al., 2016). El término “alimentación de playa” se utiliza para describir una aplicación individual de arena a una playa, que puede ser parte de un proyecto de alimentación de playa más grande, que consta de varios episodios a lo largo de años; el relleno de playa y la playa artificial están incluidos en este término (Luo et al., 2016).



Figura 9.- Relleno de arena en la playa de Guanyinshan beach, Xiamen, China.

“Otro caso de éxito de relleno de arena tuvo lugar a lo largo de la costa holandesa en donde se probó un enfoque innovador que utiliza procesos naturales para redistribuir los sedimentos de una mega-alimentación a las playas adyacentes. Después de la implementación de un proyecto de mega-alimentación de arena en la costa holandesa se utilizaron 21,5 millones de m³ de material de dragado para dos alimentaciones de costa y una gran península arenosa (la península de Sand Engine Figura 10) alimentada con 17 millones de m³ de arena en forma de una costa arenosa y que sobresale 1 km de la costa, se midió intensamente en una escala mensual en los primeros 18 meses después de su finalización” (de Schipper et al., 2016).

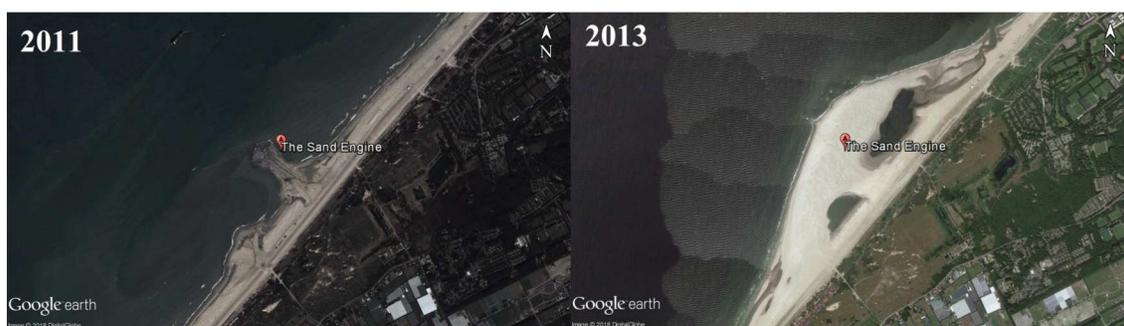


Figura 10.- Relleno de playa en Sand Engine, Holanda.

Ingeniería combinada.

Dentro de este tipo de medidas se encuentran combinaciones de estructuras tales como: relleno artificial de arena + tablaestacas, alimentación de playas + espigones, alimentación de playas + arrecifes artificiales, forestación de manglares + Arrecifes artificiales, y así sucesivamente.

“Las acciones realizadas de ingeniería combinada en la zona turística Quintana Roo (Cancún y la Riviera Maya) han sido sobre la isla barrera de Cancún (Figura 11) con el fin de mantener la actividad turística en la zona. Es de anotar, que luego de la ocurrencia del huracán Gilberto en 1988, el Gobierno Federal tuvo que tomar acciones con el fin de mantener el potencial turístico de la zona con la limitante de no afectar el paisaje, los arrecifes coralinos ni las

actividades náuticas. Por estas razones, la opción de bombear arena (alimentación) se vio como una alternativa viable en el corto plazo. Posteriormente se complementó con la instalación de los geotubos” (Gonzáles, 2013).

Entonces en resumen las actividades desarrolladas en Cancún han sido (Gonzáles, 2013):

- 2006: bombeo de 2.7 millones de m³ de arena.
- 2007: colocación de 1.5 km de geotubos.

El resultado es una combinación de alimentación de arena y geotubos.



Figura 11.- Relleno de arena en la isla barrera de Cancún, Quintana Roo. Imagen tomada de Google Earth.

Como esquema general, se muestra el siguiente proceso de diseño de una estructura de protección de costas con la metodología descrita por la Universidad de Cantabria (SMC, 2000):

1. Definición de objetivos.
2. Formulación de los requerimientos funcionales.
3. Determinación de las condiciones de contorno hidráulicas.
4. Determinación de las condiciones de contorno geotécnicas.
5. Selección de las alternativas tipológicas posibles.
6. Definición geométrica de cada alternativa.
7. Comprobación del comportamiento funcional de cada alternativa.
8. Cálculo de la estabilidad de cada alternativa.
9. Cálculo económico de cada alternativa.
10. Selección de la solución más adecuada.

En este proyecto de intervención se realizó especial énfasis en los pasos 6 y 7 en los que se define la geometría de un relleno artificial de arena en una zona identificada como altamente erosiva y se comprueba el funcionamiento de esta estructura mediante simulaciones realizadas con el modelo Flow Model de MIKE21 desarrollado por DHI (Danish Hydraulic Institute) en las que se extrajeron cambios de velocidades en las corrientes estuarinas antes y después de la construcción del relleno evaluando así los impactos en la hidrodinámica.

2.5.- Marco legal.

Listado de normas.

- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) y su reglamento (SEMARNAT, 2015).
- Normativa de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT) en el área de Puertos.
 - M·MMP·1·06/03, granulometrías (SCT, 2003b).
 - M·MMP·1·05/03, densidad de sólidos (SCT, 2003a).
 - M·MMP·1·09/06, compactación (SCT, 2006).
 - M-PRY-PUE-1-04-005/09, sobreelevación por marea de tormenta (SCT, 2009).
- ASTM C 1444 – 00, ángulo de reposo (ASTM, 2000).

III.- Proyecto de intervención.

3.1.- Objetivo general.

Revisar el campo de la hidrodinámica y los cambios de línea de costa en el estero de Teacapán para encontrar los elementos clave que permitan diseñar una obra de protección costera que mitigue la erosión en el margen del estero.

3.2.- Objetivos específicos.

- Recopilar información base del estero (visita de campo, reconocimiento visual de la zona y muestreo de sedimentos in situ).
- Realizar un estudio de línea de costa en los márgenes del estero de Teacapán mediante la aplicación del módulo de ArcGis Digital Shoreline Analysis System (DSAS).
- Estimar el hidrograma aportado por la Subcuenca El Palote-Higueras y la Subcuenca R. Las Conchas al estero de Teacapán.
- Calibrar e implementar el modelo MIKE21 en Versión Demo desarrollado por DHI (Danish Hydraulic Institute) para evaluar la hidrodinámica del estero bajo distintos escenarios de forzamiento (marea de tormenta, gastos extraordinarios, propuesta de actuación).
- Elaborar el Proyecto de Ingeniería de la propuesta de actuación.

3.3.- Justificación.

Con el fin de proteger las costas se han desarrollado diversas estructuras basadas en Ingeniería dura, Ingeniería blanda e Ingeniería combinada, sin embargo, más allá de la selección del tipo de Ingeniería a utilizar el problema es que estas estructuras se diseñan sin realizar estudios previos de hidrodinámica y sin realizar un análisis de línea de costa en el cuerpo de agua involucrado lo que conlleva en muchos de los casos al fracaso de la obra de protección.

En general de la revisión de imágenes históricas se observa que el estero de Teacapán se encuentra bajo considerables condiciones de alteración antrópica, tanto por obras construidas en su interior como en sitios que ejercen una influencia directa sobre este, incrementado así el riesgo de erosión e inundación. Ante la necesidad evidente de establecer medidas de prevención, se requiere comprender los procesos hidrodinámicos que intervienen en el estero para mitigar la erosión y posibles inundaciones, en el margen del estero se propone como medida de actuación un relleno artificial de arena que modificará la hidrodinámica del estero al modificar la batimetría por lo que cambiarán las corrientes de flujo y reflujos, cabe señalar que evaluar los impactos que dichas modificaciones tendrán sobre las corrientes es un punto importante en la evaluación de impacto ambiental de la obra.

Exigir modelación numérica en los cuerpos de agua involucrados para predecir impactos y evaluar tendencias a la hora de diseñar obras de protección ya lo contempla la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la cual para expedir los permisos de construcción exigen en la elaboración de la Manifestación de Impacto Ambiental el uso de ésta para dar certidumbre sobre las obras que se pretendan construir y que demuestren que no impactarán de forma negativa al medio ambiente circundante.

Este estudio es necesario para asegurar el éxito del diseño de las posibles obras para dar solución a los problemas de erosión, el estudio busca dar certidumbre y tranquilidad a los inversionistas del proyecto, a los habitantes de Teacapán, a las autoridades como SEMARNAT y asociaciones civiles encargadas de la protección del ambiente y las costas como CONSELVA A.C.

3.4.- Metodología.

Para cumplir el objetivo general se utilizó el modelo numérico MIKE 21 Flow Model FM en versión Demo (se utilizaron los módulos de hidrodinámica y transporte de arena), este software se basa en un enfoque de malla no estructurada (malla flexible) y ha sido desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute) para aplicaciones dentro de entornos oceanográficos, costeros y estuarinos. El módulo hidrodinámico se basa en soluciones numéricas de dos o tres dimensiones de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo a superficie libre, promediadas en la vertical mediante la aproximación de Reynolds. El modelo consiste en la solución numérica de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento, un informe detallado sobre ello se muestra en los anexos (Anexo A).

Para que el modelo numérico reproduzca de manera óptima las condiciones físicas del estero fue necesario realizar una calibración por lo cual se solicitó a la Asociación Civil CONSELVA A.C. los registros de mediciones reales en cuanto a velocidad de corrientes y niveles de superficie libre del agua realizadas en el estero durante el verano de 2016 y presentadas en un informe final por la empresa encargada Comunidades Costeras Sustentables, de esta solicitud (Anexo B) se obtuvo información referente a la batimetría del estero y a las condiciones de frontera que el modelo necesita. Además con el fin de recopilar de información se realizó una campaña de muestreo de sedimentos en el verano del 2017.

Por otro lado también se requirió revisar la evolución histórica del estero y para ello se utilizaron tecnologías SIG (Sistemas de Información Geográfica) como el software ArcGis, el módulo DSAS (Digital Shoreline Analysis System) además de Google Earth, Autocad y Civilcad; el resultado de trabajar con estas tecnologías concluyó en un estudio de línea de costa de ambos márgenes del estero.

En cuanto a la obra de protección costera como propuesta de actuación se elaboró el proyecto de ingeniería que constó de: memoria de cálculo en la que se diseñó un muro de tablaestacas en voladizo resistiendo el empuje del relleno de arena y se calcularon los volúmenes de arena necesarios para el relleno trazando un cadenamamiento y levantando secciones a cada 20 metros con Autocad y Civilcad, además para la elaboración de planos y croquis se utilizó Autocad y Civilcad, para la elaboración de especificaciones particulares se consultaron diversas obras de tablaestacas publicadas en la plataforma de COMPRANET, el programa de obra tentativo se elaboró utilizando Microsoft Project 2010 y el presupuesto de la obra utilizando OPUS 2014.

A continuación se muestra un desglose de las actividades (procedimientos) que se realizaron para cumplir con los objetivos específicos.

En la Figura 12 se muestra el diagrama de las actividades que se realizaron para el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo.

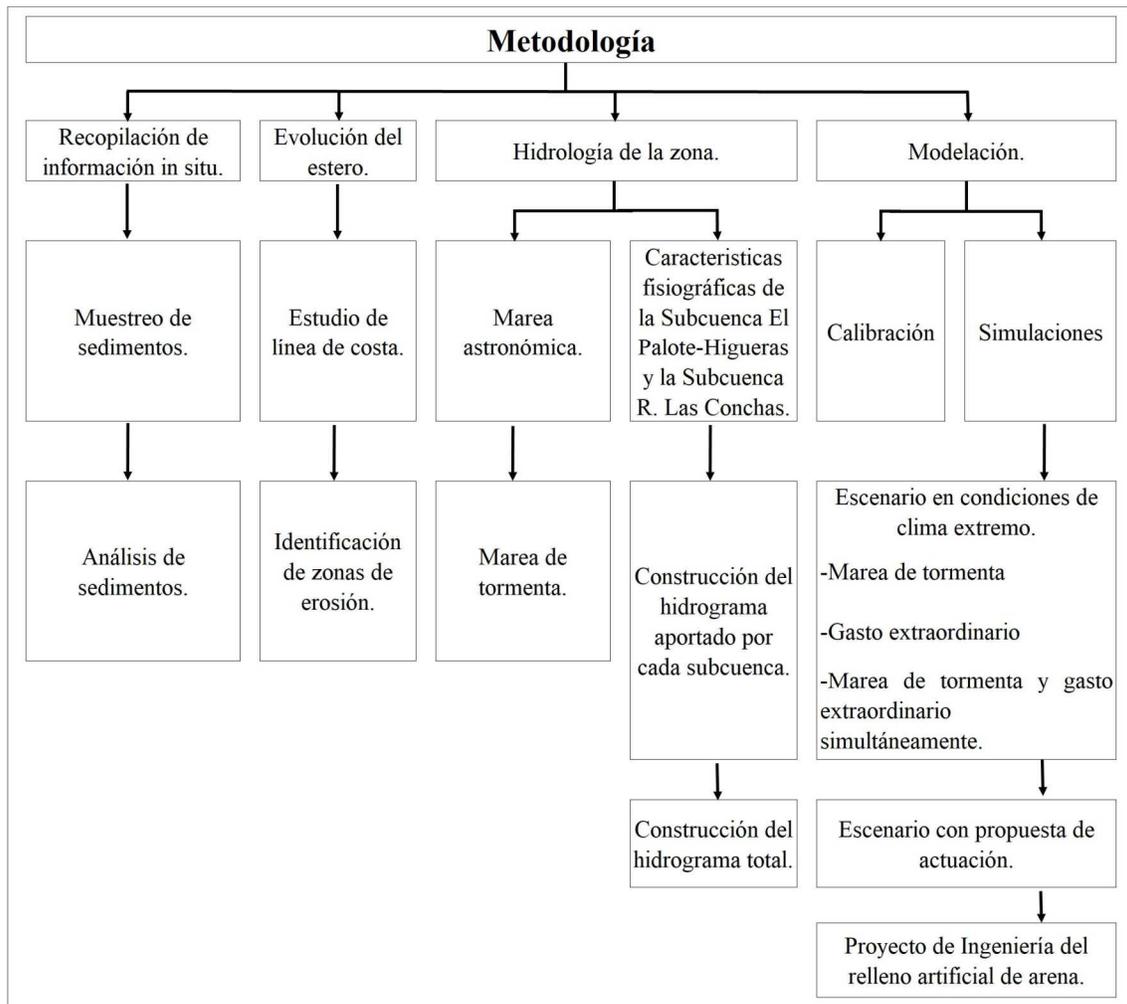


Figura 12.- Desglose de la metodología seguida en este proyecto de intervención.

A continuación se describe cada una de las actividades principales del esquema anterior.

3.4.1.- Recopilación de la información.

Con el fin de implementar el modelo numérico en el estero fue necesario recopilar información base tal como las características físicas del estero así como de las estructuras existentes de origen antrópico y la batimetría general del estero que afectan la hidrodinámica, las características fisiográficas de la Subcuenca El Palote-Higueras con su registro de precipitaciones y las características de la Subcuenca R. Las Conchas cuyo cauce principal es el Río de Las Cañas con su registro histórico de caudales, las condiciones meteorológicas de la zona de estudio y las condiciones de marea para los periodos de calibración y simulación.

La batimetría general se obtuvo de dos fuentes, la primera que consta de la batimetría al interior del estero (extendida desde la Boca de Teacapán hasta el malecón) se obtuvo del Estudio oceanográfico básico de la región de Teacapán, Sinaloa, durante el verano de 2016, estudio realizado por la empresa Comunidades Costeras Sustentables (COCOS) y subsidiado por la asociación civil Conselva A.C. Del mismo estudio oceanográfico se solicitó a Conselva A.C. información registrada en Junio de 2016 en cuanto a los niveles de superficie libre de agua en dos puntos al interior del estero y de esta actividad se desarrolló la calibración del modelo numérico. La segunda fuente provino de la Carta náutica de la SEMAR S.M.412.1 BOCA TEACAPÁN, SIN. (Ver Anexo C) de esta carta se extrajo la batimetría utilizada en la parte oceánica.

En la Figura 13 se observa la batimetría del estero compuesta por la batimetría solicitada a CONSELVA A.C. y por la carta náutica, asimismo se observa una acumulación de sedimentos cerca de la Boca de Teacapán y al interior del estero en la parte central un banco de arena (zonas de color rojo).

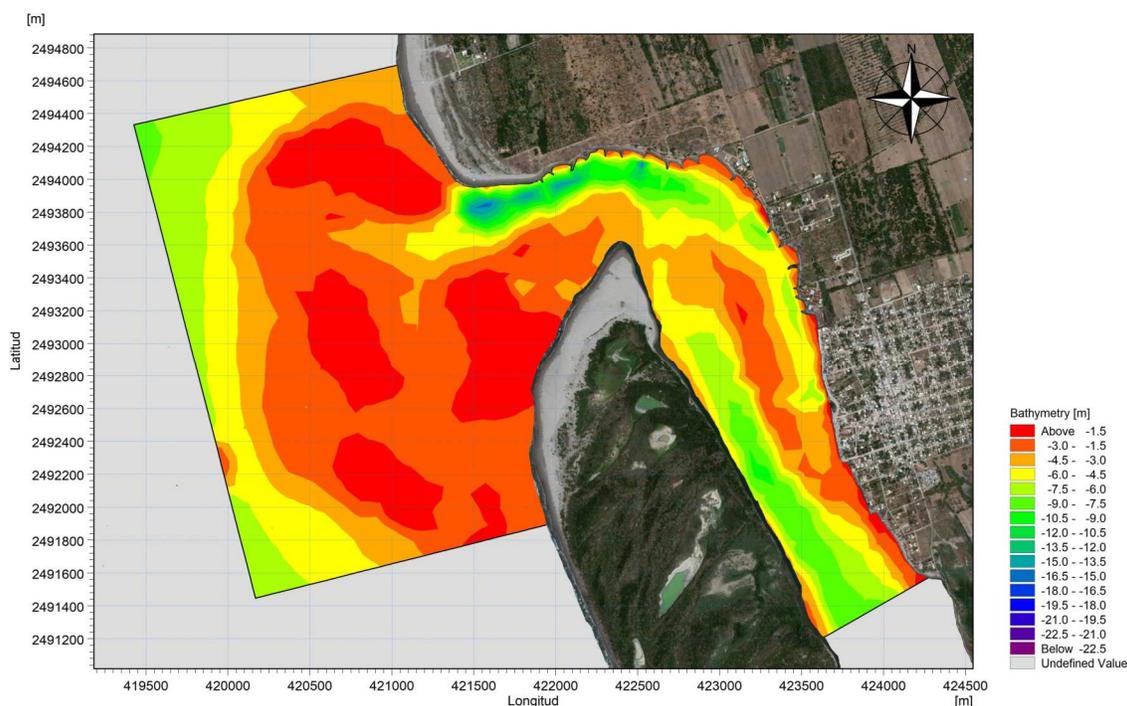


Figura 13.- Batimetría del estero de Teacapán.

3.4.2.- Visita de campo.

Con el propósito de llevar a cabo un reconocimiento visual de la zona e identificar potenciales bancos de sedimento se llevó a cabo un recorrido de la zona durante verano del 2017, a la vez se tomaron muestras de sedimento en cinco sitios denominados B1, B2, B3, B4 y B5 (Figura 14). Para el muestreo se utilizó la norma M·MMP·1·01/03 de la SCT.

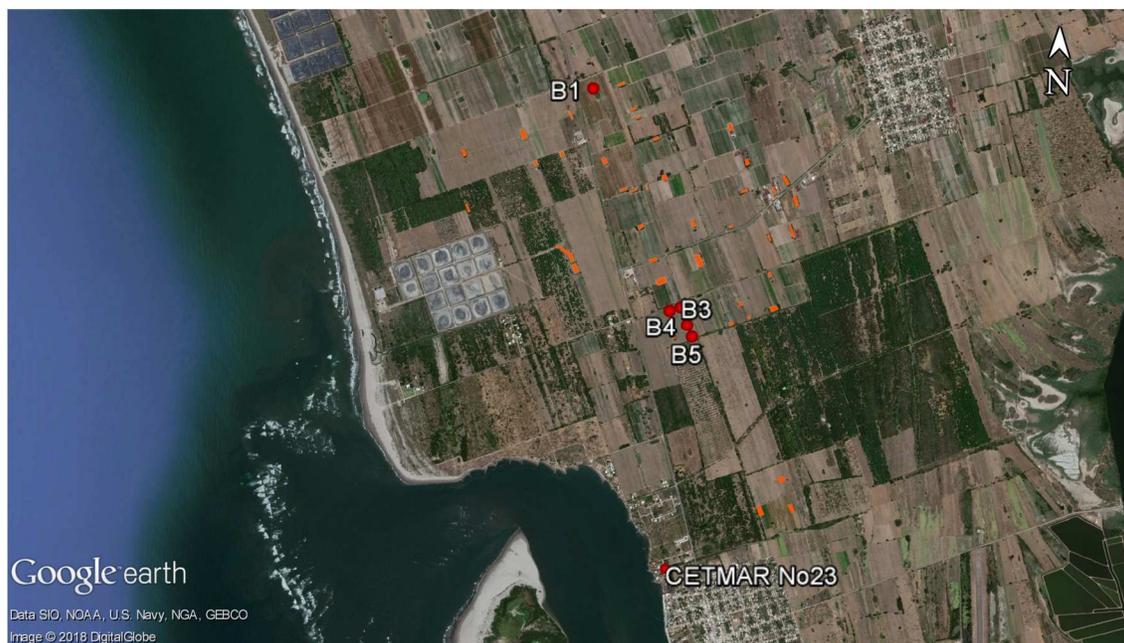


Figura 14.- Ubicación de los sitios de muestreo.

Una vez obtenidas las muestras, estas se almacenaron y se trasladaron al laboratorio en donde se analizaron para estimar su densidad, peso y ángulo de reposo en base a las normas M·MMP·1·05/03, M·MMP·1·09/06 y ASTM C 1444 – 00 respectivamente.

3.4.3.- Evolución del estero. Revisión de la línea de costa.

Con el fin de realizar una revisión de la evolución del estero de Teacapán, se digitalizó la línea de costa utilizando el software ArcMap de la familia de ArcGis Desktop 10.5 con imágenes disponibles en Google Earth de los años 1985, 2003, 2007, 2013, 2016 y 2018. Estas imágenes se georeferenciaron utilizando nueve puntos de control para evitar errores en las rectificaciones que utiliza el mismo software.

La digitalización de las líneas de costa se realizó a escala de detalle 1:3000 utilizando el sistema de coordenadas WGS84 UTM Zone 13N, para ello la línea de costa se determinó por la última marca húmeda de la marea sobre el perfil de la playa, este límite define el límite exterior de la “playa seca” (Ojeda Zújar et al., 2013).

Para cuantificar las tasas de erosión y acreción en el margen derecho del estero se utilizó el módulo Digital Shoreline Analysis System (DSAS) que es una aplicación de software disponible libremente que funciona dentro del software del Sistema de Información Geográfica (Esri) (ArcGIS). DSAS computa estadísticas de tasa de cambio para una serie temporal de datos de vectores costeros (Thieler et al., 2017).

3.4.4.- Hidrología de la zona.

Con el fin de estimar la magnitud de los forzamientos fluviales y oceanográficos que se utilizaron en las simulaciones numéricas, por un lado, se estimó un hidrograma total para forzarlo en la Frontera Rio del modelo, dicho hidrograma total está compuesto por la suma del hidrograma de la Subcuenca El Palote-Higueras con el hidrograma de la Subcuenca R. Las Conchas debido a que ambas aportan agua dulce al estero de Teacapán, estos hidrogramas se construyeron utilizando las coordenadas del hidrograma unitario adimensional (CFE, 1981). Por otro lado se estimó una sobreelevación del mar por marea de tormenta para forzarla por la Frontera Oceánica del modelo y dicha elevación se calculó utilizando la norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 de la SCT.

3.4.4.1.- Hidrograma de la Subcuenca El Palote-Higueras.

Para este fin se revisaron las características fisiográficas de la subcuenca utilizando la plataforma SIATL Versión 3.2 (Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas) del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), el gasto de diseño de la Subcuenca El Palote-Higueras se obtuvo al realizar un análisis de frecuencias (Anexo D) al registro histórico de precipitaciones de la estación climatológica “*La Concha*” (CONAGUA, 2018b) estimándose una altura de precipitación de diseño asociada a un determinado periodo de retorno, este registro se ajustó con el método de Máxima Verosimilitud a la función de Distribución de General de Valores Extremos:

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-y}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (1)$$

Se evaluó tanto cualitativa como cuantitativamente el grado de ajuste de la función de distribución de probabilidad a los datos por medio del grafico cuantil-cuantil y del coeficiente de correlación.

Una vez demostrado el buen ajuste se calculó la altura de precipitación P_d asociada a un periodo de retorno y esta altura se utilizó para calcular la intensidad de lluvia en base a la metodología del Método Racional Modificado de Témez obteniendo así una avenida máxima que para nuestro fines utilizamos como el gasto pico de la Subcuenca El Palote-Higueras.

El aporte de agua de la Subcuenca se calculó utilizando el método racional modificado de Témez en donde el gasto pico o máximo se define con la expresión (López Miñano, 2008):

$$Q = \frac{CIA}{3.6} K \quad (2)$$

Donde Q es el caudal punta correspondiente a un período de retorno dado, en m^3/s ; C es el coeficiente de escorrentía; I máxima intensidad media en el intervalo de duración t_c para el

mismo período de retorno, en mm/h ; A es la superficie de la cuenca, en km^2 ; y K es el coeficiente de uniformidad.

Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó la fórmula propuesta por el método racional modificado de Témez (López Miñano, 2008):

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad (3)$$

Donde t_c es el tiempo de concentración, en h; L longitud del cauce principal, en km ; J pendiente media del cauce principal, en m/m .

En cuanto al tiempo en el que se presenta el gasto pico siguiendo la metodología del hidrograma unitario adimensional se estimó como (CFE, 1981):

$$t_p = 0.5d + 0.6t_c \quad (4)$$

Donde t_p tiempo de pico, en h; d duración efectiva de la tormenta, en h; t_c tiempo de concentración, en h.

La duración efectiva de la tormenta se calculó como sigue (CFE, 1981):

$$d = 2\sqrt{t_c} \quad (5)$$

Donde d duración, en h; t_c tiempo de concentración, en h.

Para el coeficiente de escorrentía o de escurrimiento se utilizó la expresión del método racional modificado de Témez (López Miñano, 2008):

$$C = \frac{[(P_d - P_0)(P_d + 23P_0)]}{[(P_d + 11P_0)^2]} \quad (6)$$

Donde P_d es la precipitación total diaria correspondiente a dicho período de retorno, en mm y P_0 es el umbral de escorrentía que se puede estimar con López Miñano (2008), en mm .

La intensidad de lluvia se calculó con la siguiente expresión del método racional modificado de Témez (López Miñano, 2008):

$$It = \frac{P_d}{24} \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0.1-t^{0.1}}}{28^{0.1}-1}} \quad (7)$$

Donde It Intensidad de la lluvia para t_c , en mm/h ; I_1 la intensidad horaria de precipitación correspondiente a un período de retorno, en mm/h ; I_d la intensidad media diaria de precipitación correspondiente al período de retorno considerado y es igual a $\frac{P_d}{24}$, en mm/h ; t duración del intervalo que se tomará igual al tiempo de concentración t_c , en horas.

En la metodología del método racional modificado de Témez el coeficiente $\left(\frac{I_1}{I_d}\right)$ se obtiene de un mapa de isolíneas regionalizado para el territorio español, en este trabajo para obtener la lluvia de duración de una hora y la I_1 intensidad horaria de precipitación correspondiente a un período de retorno se utilizó el registro de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación “La Concha” utilizando la altura de precipitación para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 24 horas obtenida del análisis de frecuencias multiplicada por un cociente R y aplicando la Formula de F.C. Bell (Campos and Gómez, 1990):

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad (8)$$

Donde R es un cociente de lluvia-duración que para zonas húmedas en México se recomienda de 0.30 a 0.40 Campos y Gómez (1990); P_{24}^2 es la altura de precipitación obtenida del análisis de frecuencias para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 24 horas; y P_1^2 es la altura de precipitación para un periodo de retorno de 2 años y una duración de 1 hora o 60 minutos.

Una vez que se obtuvo P_1^2 con un $R = 0.35$ se sustituyó en la formula como P_{60}^2 (Campos and Gómez, 1990):

$$P_t^T = (0.35 \ln T + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^2 \quad (9)$$

Donde P_t^T es la precipitación de duración t minutos y periodos de retorno T en años, en mm ; y P_{60}^2 es la precipitación de duración 60 minutos y período de retorno 2 años, en mm .

Con el tiempo de concentración se calculó el coeficiente de uniformidad K utilizado para calcular el gasto en la fórmula del método racional modificado de Témez (López Miñano, 2008):

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14} \quad (10)$$

3.4.4.2.- Hidrograma de la Subcuenca R. Las Conchas.

Para obtener el caudal aportado por el Río Las Cañas (cauce principal de la Subcuenca R. Las Conchas) se utilizó el registro histórico de la estación hidrométrica “La Ballona” (CONAGUA, 2018a). Para estimar el gasto del Río Las Cañas asociado a un periodo de retorno se ajustaron los gastos máximos anuales con el método de Máxima Verosimilitud a la función de Distribución de General de Valores Extremos (Anexo E). El tiempo pico de estimó de manera análoga a la Subcuenca El Palote-Higueras utilizando la expresión propuesta en el método racional modificado de Témez para el tiempo de concentración.

Para proponer el periodo de retorno de un evento meteorológico extremo se expresó como:

$$T = \frac{\text{Registro histórico de huracanes}}{\text{Número de huracanes que han impactado}} \quad (11)$$

En cuanto al registro de huracanes (Anexo F) se revisó la base de datos del National Hurricane Center (Landsea et al., 2015) y una vez obtenidos los gastos picos lo siguiente fue obtener la duración de cada hidrograma y ésta se estimó con los tiempos picos calculados con la Ec. 4.

3.4.4.3.- Sobreelevación por marea de tormenta.

Con el fin de utilizar en el modelado una condición de marea extrema se calculó una sobreelevación del nivel del agua por marea de tormenta, es decir, un nivel del agua por arriba de la marea astronómica debido al paso de un huracán por la zona de estudio. Para este cálculo se recurrió a la metodología expuesta en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 de la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (Anexo H).

3.4.5.- Modelación numérica usando MIKE 21. Modelación hidrodinámica y de transporte de sedimentos.

3.4.5.1.- Hipótesis.

Se supone que el fluido es barotrópico (no compresible y de densidad constante). Se supone que la hidrodinámica y el transporte de sedimentos dependen solamente de la marea y del gasto proveniente de las subcuencas que descargan en el estero.

La discretización espacial de las ecuaciones primitivas se realizó utilizando un método de volumen finito centrado en cada elemento o celda de la malla flexible. El dominio espacial está discretizado por la subdivisión de elementos o celdas que no se superponen. En el modelo 2D los elementos pueden ser triángulos o elementos cuadrilaterales.

3.4.5.2.- Dominio espacial.

La zona de modelación se limita de la Boca de Teacapán (Frontera Oceánica) hasta alrededor de 5 *km* hacia el interior del estero (Frontera Río). El área del dominio en el estero se estableció en 8.76 *km*².

Se construyó una malla con 1121 nodos y 1984 elementos triangulares que cubrió al dominio espacial. El elemento de mayor área se estableció del orden de 8,000 *m*² y el de menor área de 2 *m*². Además se definieron dos fronteras abiertas (como se observa en la Figura 15) una frontera Oceánica por donde se forzó la entrada de marea y una Frontera Río forzando la entrada de un caudal.

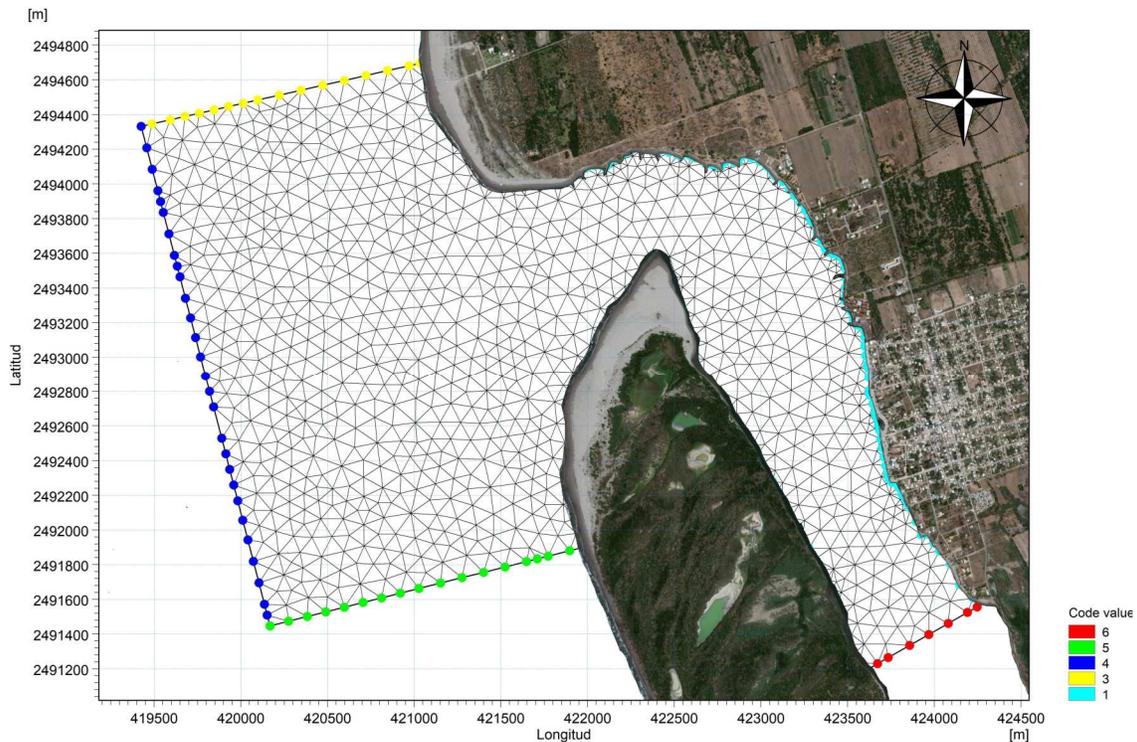


Figura 15.- Fronteras: Frontera Oceánica (código 4) y Frontera Río (código 6).

3.4.5.3.- Calibración.

Para que las simulaciones reproduzcan, en la medida posible, los procesos físicos del estero fue necesario calibrar el modelo numérico, la calibración consistió en realizar varias pruebas hasta obtener un buen ajuste entre los resultados simulados y las mediciones realizadas in situ en el estero de Teacapán.

Se evaluó tanto cualitativa como cuantitativamente el buen ajuste entre datos simulados y observados por medio de gráficos cuantil-cuantil y del EMC (error medio cuadrático). Para la calibración del modelo se empleó un periodo de seis días de las 00:00:00 del 05 de Junio de 2016 a las 23:00:00 del 10 de Junio de 2016 dando al modelo los primeros cuatro días para la estabilización y en los últimos dos días que van de las 00:00:00 del 09 de Junio de 2016 a las 23:00:00 del 10 de Junio de 2016 fue el periodo utilizado para la comparación de datos debido a que en éste se disponía de mediciones reales de marea y velocidad de corrientes en el estero. Cabe señalar que durante la calibración se utilizaron como condiciones de frontera solamente a la marea astronómica y el caudal aportado por las subcuencas de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ (debido a que el río de Las Cañas es de naturaleza intermitente y la mayor parte del año no aporta gasto al sistema).

El modelo numérico se calibró mediante el ajuste de las pérdidas friccionales y de la turbulencia del flujo a través de los coeficientes de rugosidad de Manning y de viscosidad de remolino, respectivamente. Para la calibración se probaron números de Manning de 0.025 a 0.100 (de 40 a $10 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$) recomendados en (Te Chow, 1959) para un curso de agua natural con un ancho superior a 100 ft y para la viscosidad de remolino o Eddy Viscosity en (Bates et al., 1998) se reportó el rango de 0.10 a $2.00 \text{ m}^2 / \text{s}$ para sus simulaciones 2D en ríos.

Para la calibración del modelo se utilizó lo siguiente: Mínimo y máximo time step (paso de tiempo) de 0.01 a 4 segundos, el intervalo de paso de tiempo fue de 4 segundos y el número crítico CFL de 0.8; se indicó que las celdas entran y salen del cálculo; en Density se consideró un fluido barotrópico; en Eddy Viscosity se probaron los valores de 0.10, 0.28 y $1.00 \text{ m}^2 / \text{s}$; en Bed Resistance se probaron números de Manning con valores de 20, 30 y $40 \text{ m}^{(1/3)} / \text{s}$; en Coriolis Forcing se aplicó con fuerza Coriolis; en la Frontera Río no se cargó ningún archivo al considerar el caudal de $0 \text{ m}^3 / \text{s}$ y en la Frontera Oceánica se utilizó la marea medida en la estación de Mazatlán por el Servicio Mareográfico Nacional (Figura 16) para el año 2016 referida al nivel medio del mar (UNAM).

Con el fin de comparar el ajuste obtenido se compararon los niveles de superficie libre del agua en dos puntos (Figura 17) localizados dentro del estero, estos puntos fueron HOB0-4 con coordenadas UTM 424187.81 m Este y 2491609.98 m Norte y HOB0-9 con coordenadas 423614.49 m Este y 2492854.65 m Norte, en estos puntos se dispuso de datos reales medidos in situ (Figura 18) con sensores de presión y además en el punto HOB0-4 se contó con la medición de velocidad de las corrientes en el estero, esta información fue obtenida por solicitud a CONSELVA A.C. (Ver Anexo B).

Como condición inicial (Figura 19) se supuso un nivel constante -0.30 m de superficie libre del agua sobre todo el dominio de cálculo, este nivel se escogió de esta magnitud para evitar que el modelo colapsara debido a que el valor inicial en la marea forzada a las 00:00:00 del 05 de Junio de 2016 fue de -0.3015 m , además se supone que el fluido está en reposo, es decir, como condición inicial las velocidades de flujo y reflujos en el estero son de 0 m/s .

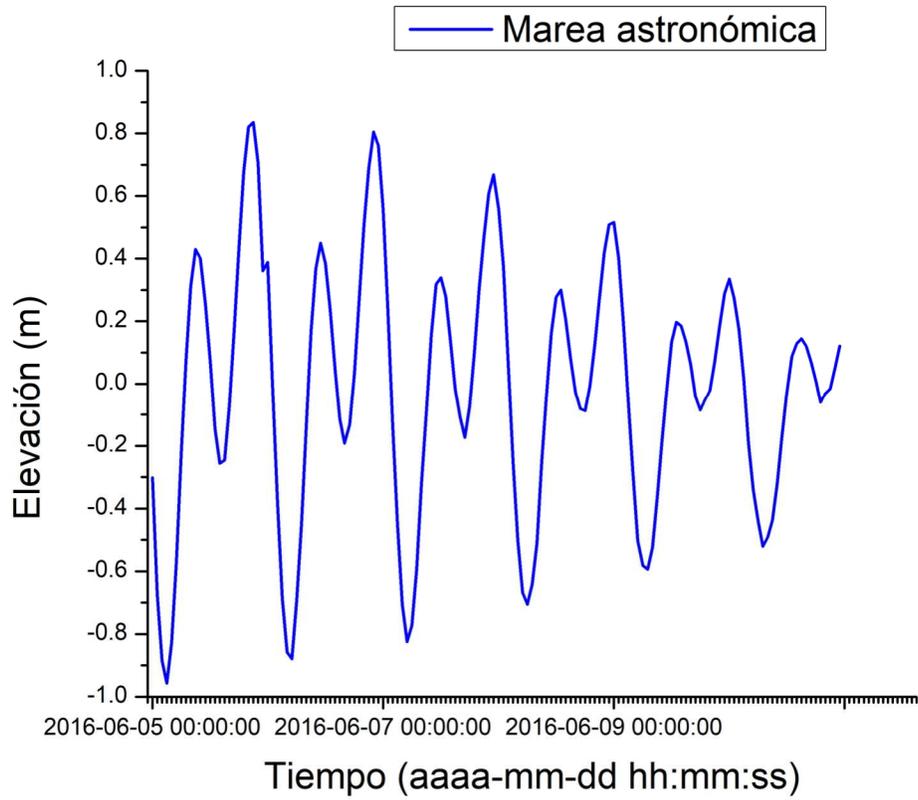


Figura 16.- Marea utilizada para la calibración (UNAM).



Figura 17.- Localización de los puntos al interior del estero donde se midieron los niveles de agua y velocidades.

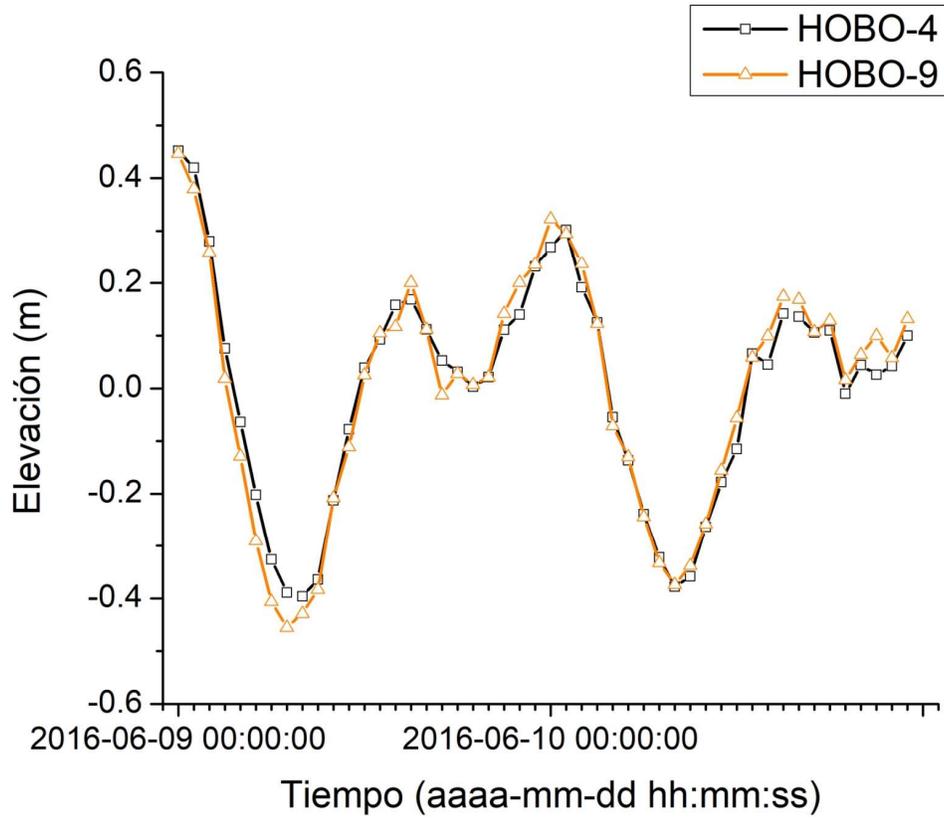


Figura 18.- Niveles de agua medidos en el estero para la calibración del modelo.

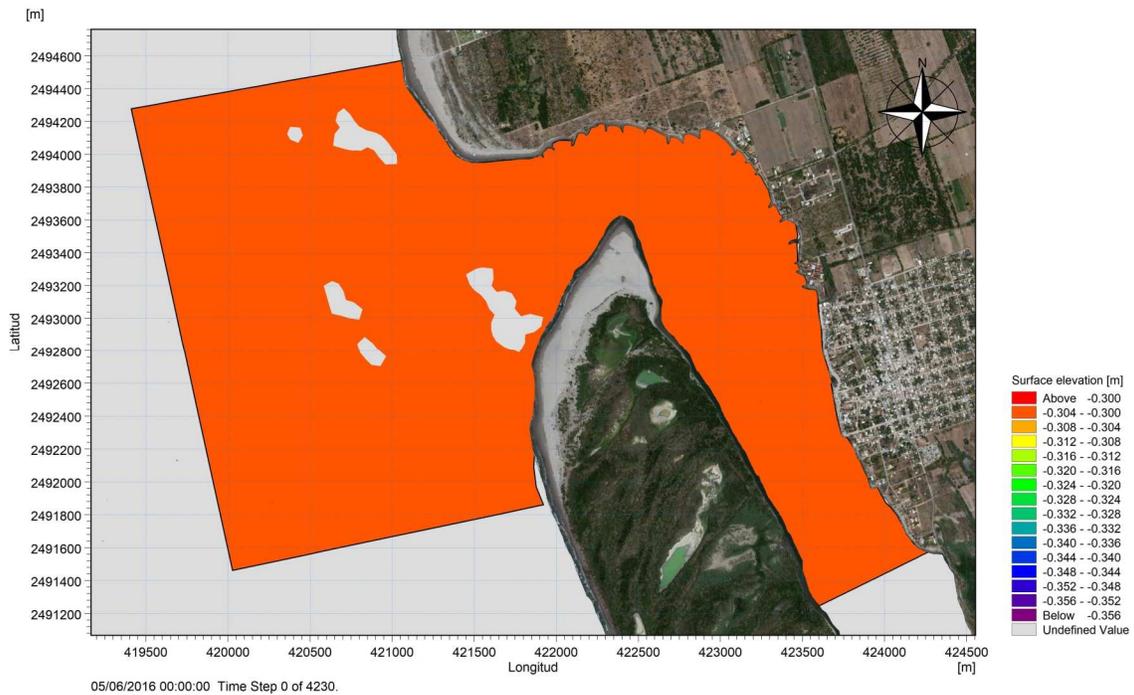


Figura 19.- Condición inicial del nivel del agua dentro del dominio de cálculo.

3.4.5.4.- Simulaciones.

Una vez calibrado el modelo numérico se simularon los siguientes escenarios:

- De condiciones climatológicas extremas: Consiste en observar el comportamiento hidrodinámico del estero ante las condiciones de:
 - Marea de tormenta: Para este escenario se forzó en la Frontera Oceánica una sobreelevación en el nivel del agua por marea de tormenta.
 - Gasto extraordinario: Para este escenario se forzó en la Frontera Río un hidrograma de tormenta aportado por las subcuencas con un gasto máximo.
 - Marea de tormenta y gasto extraordinario simultáneamente: Este escenario es una combinación de los dos anteriores ya que se utilizó como condición de frontera una sobreelevación del nivel medio del mar en la Frontera Oceánica y un hidrograma de tormenta aportado por las subcuencas en la Frontera Río.
- Con propuesta de actuación: Consistió en evaluar el impacto en la hidrodinámica del estero causado por la construcción de un relleno artificial de arena protegido con un muro de retención a base de tablaestacas de acero en una zona erosiva. Otras consideraciones a tomar en cuenta son que la arena que se utilizó en el relleno se obtuvo de jagüeyes locales y los espigones existentes se dejaron sin remover.

Para las simulaciones se empleó un periodo de tiempo de un mes que va de las 00:00:00 del 01 de Septiembre de 2016 a las 23:00:00 del 30 de Septiembre de 2016, periodo en el cual se despreciaron los resultados de los primeros 14 días de las simulaciones ya que el modelo se estabilizó en este tiempo, para mostrar la influencia de las condiciones meteorológicas extraordinarias sobre la hidrodinámica éstas se forzaron en los últimos cuatro días del mes de simulación y en el caso del escenario con propuesta de actuación las condiciones se forzaron en los cuatro días posteriores a la estabilización y se siguieron simulando otros 12 días para observar el comportamiento de las velocidades antes y después de la construcción del relleno en este tiempo.

3.5.- Análisis de resultados y discusión.

En cuanto a la caracterización de los sedimentos (Tabla 2) extraídos durante la visita de campo, se observó que los sedimentos de los bancos y del estero frente al CETMAR N°23 (Centro de Estudios Tecnológicos del Mar) son muy similares, son arena limpia mal graduada (SP), en promedio mostraron una densidad de sólidos de 2.528 y un ángulo de reposo de 33.14 grados.

Tabla 2.- Caracterización de la arena de los bancos y de la arena nativa del lugar frente al CETMAR.

Banco	Muestra	Clasificación SUCS	Densidad de sólidos	Peso volumétrico suelto (kg/m ³)	Peso volumétrico compacto (kg/m ³)	Ángulo de reposo
B1	1.1	SP	2.567	1149	1512	33.2°
	1.2	SP	2.570			
	1.3	SP	2.570			
B2	2.1	SP	2.507	1180	1616	35.4°
	2.2	SP	2.486			
	2.3	SP	2.520			
B3	3.1	SP	2.534	1192	1510	32.1°
	3.2	SP	2.558			
	3.3	SP	2.591			
B4	4.1	SP	2.457	1202	1580	32.7°
	4.2	SP	2.538			
	4.3	SP	2.494			
B5	5.1	SP	2.550	1170	1603	32.3°
	5.2	SP	2.482			
	5.3	SP	2.501			
CETMAR	CETMAR 1	SP	2.620	1309	1680	

De la curva granulométrica de la arena nativa del estero (Figura 20) se observa que la arena para relleno (proveniente B1, B2, B3, B4 y B5 que son montículos de arena producto de la excavación de jagüeyes locales) posee una distribución de granos de arena muy similar ya que los puntos que la representan se mantienen cercanos a la curva nativa.

Cabe señalar que para la construcción de relleno de arena artificial es deseable que la arena utilizada posea características de tamaño de grano similares a las de la playa nativa (muestra CETMAR 1), esto se hace frecuentemente para maximizar la compatibilidad con el sistema de playa existente.

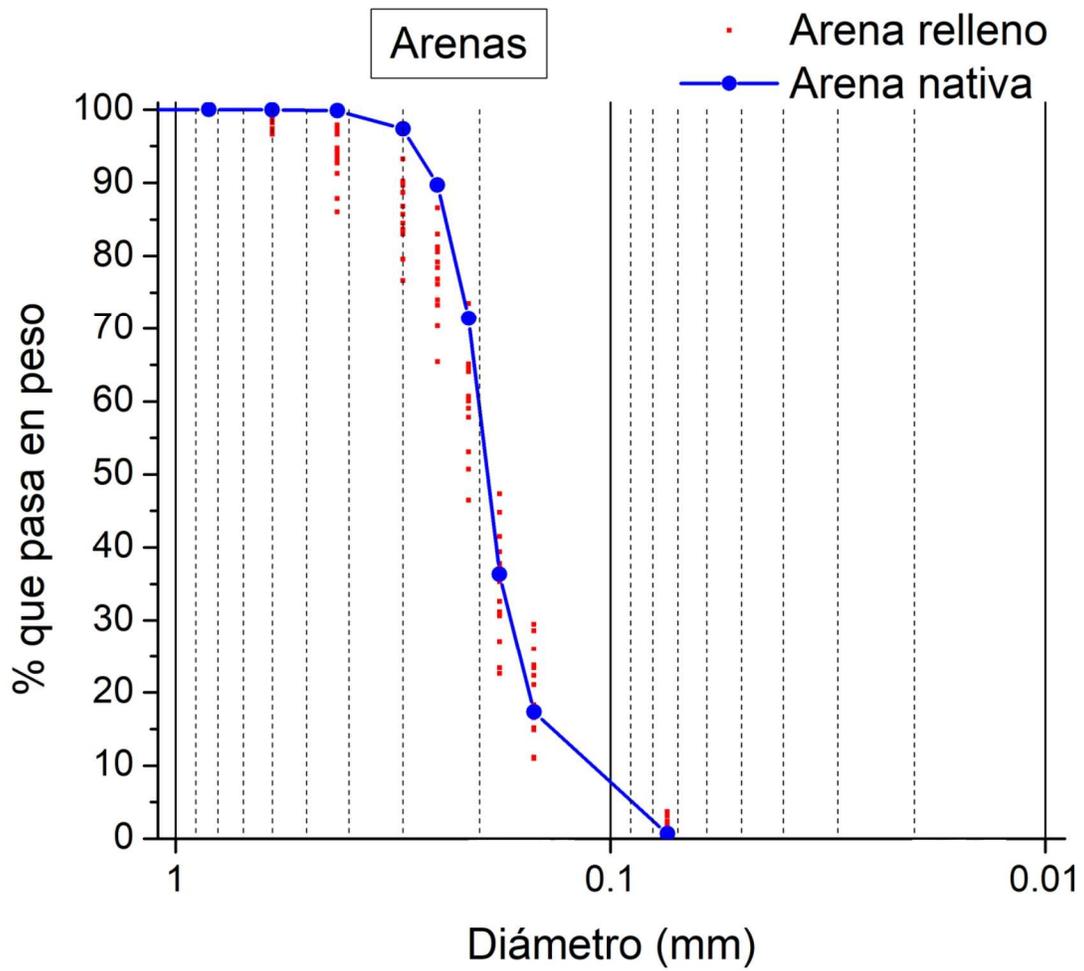


Figura 20.- Curva granulométrica de la arena nativa.

La arena de los bancos poseen un tamaño de grano similar (en promedio el diámetro de las partículas de arena fue de 0.200 mm en todas las muestras) a la arena nativa del estero lo que indica que puede ser utilizada para construir un relleno artificial de arena en las cercanías del CETMAR N°23.

De los resultados obtenidos del análisis de imágenes de satélite en los márgenes del estero se identificaron dos zonas de acreción y siete zonas de erosión importantes, de acuerdo a las líneas de costa digitalizadas en ArcGis (Figura 21).

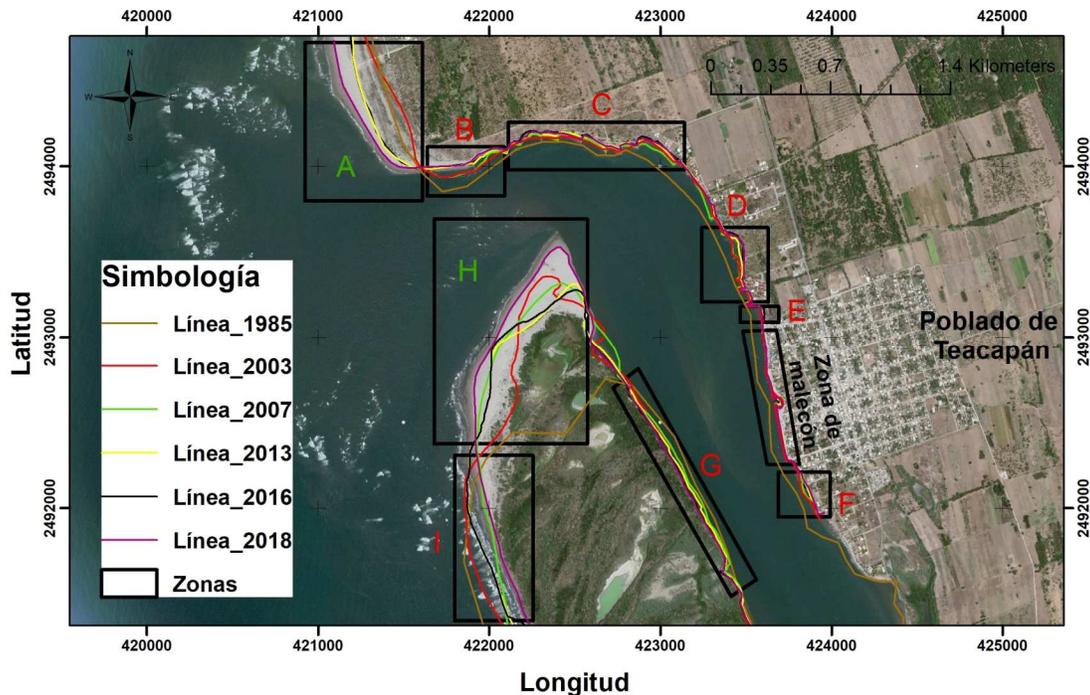


Figura 21.- Identificación de zonas de erosión y acreción en los márgenes del estero.

La Zonas A y H son las únicas que no presentan erosión, las Zonas B y C se localizan en la Playa Las Lupitas con una erosión considerable y además con una gran cantidad de espigones, la Zona D localizada en las proximidades del CETMAR N°23 presenta una alta tasa de erosión, la zona del malecón muestra una erosión mínima, las Zonas E y F que se localizan en los extremos del malecón de Teacapán presentan una erosión intermedia al igual que la Zona G perteneciente al margen de Nayarit y por último se identificó la Zona I la cual presenta una alta tasa de erosión (Ver Anexo I).

En la Figura 22 y la Tabla 3 se observan los resultados de la aplicación Digital Shoreline Analysis System aplicada en los márgenes del estero en donde se aprecia mediante coloración los niveles de erosión que se presentan y, mediante tasas y cambios en la superficie se dieron algunos rangos de valores para dar una idea cuantificable de los problemas en el estero, sin embargo, esta cuantificación de la erosión debe tomarse de manera subjetiva debido a que el criterio de digitalización de línea de costa fue subjetivo.

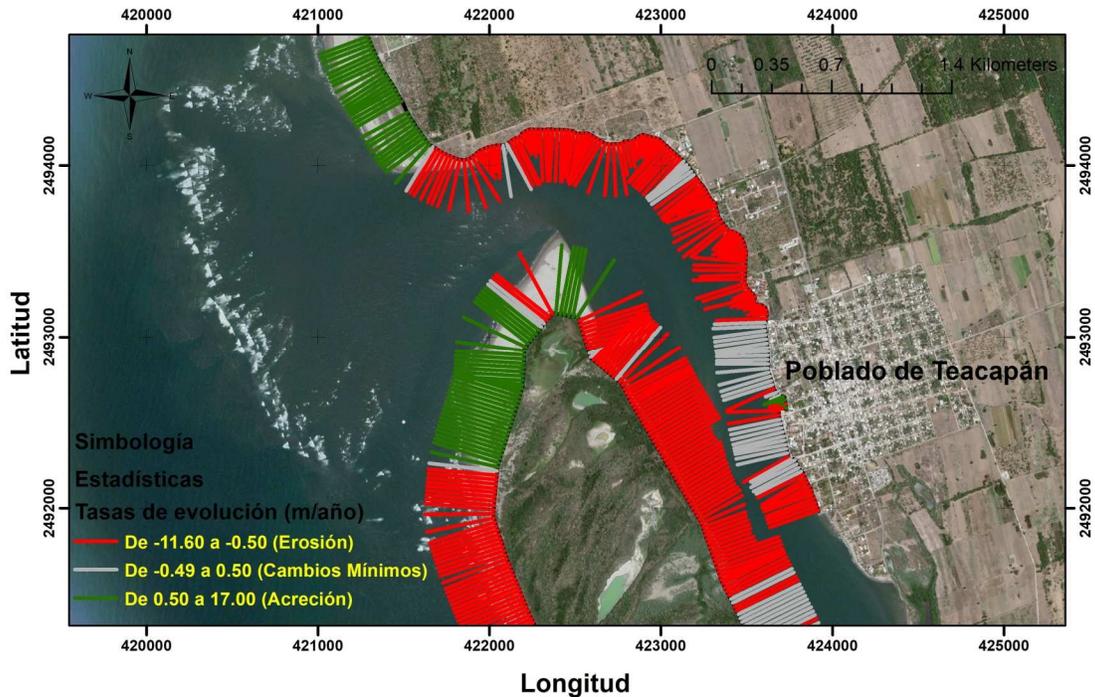


Figura 22.- Resultados del módulo DSAS.

Tabla 3.- Resumen de cuantificación de erosión en las zonas señaladas.

Periodo 2003-2018			
	Tasa de acreción (m/año)	Tasa de erosión (m/año)	Cambios en la superficie (m ²)
Zona A	De +9.34 a +17.00	-----	+ 177,014.79
Zona B	-----	De -1.22 a -5.66	-24,657.88
Zona C	-----	De -0.61 a -2.63	-18,527.11
Zona D	-----	De -0.95 a -5.32	-11,652.86
Zona E	-----	De -0.59 a -0.82	-636.80
Zona F	-----	De -0.44 a -2.96	-6,205.48
Zona G	-----	De -0.34 a -3.09	-31,106.71
Zona H	De 0.00 a +12.04	-----	+193,685.92
Zona I	-----	De -0.88 a -5.09	-52,358.39

De la tabla de arriba se observó que la Zona D es de gran interés debido a que presenta una tasa de evolución de hasta 5.32 metros de erosión al año y se localiza en las cercanías del CETMAR N°23, lo que indica que es ideal para proponer una medida de actuación (como es un relleno artificial de arena) que recupere la línea de costa del año 2003 y que fije la línea de costa reduciendo así la erosión.

Como resultado de estudiar la hidrología de la zona por un lado para condiciones de clima normales se utilizó solamente la marea astronómica de la zona de estudio, por otro lado para las condiciones de clima extremo se estimó en una sobreelevación del nivel del mar de 2.72 metros causada por el paso de un huracán categoría 3, dicha sobreelevación con una duración de 13 horas se le sumó a la marea astronómica durante el mes de Septiembre (Figura 23).

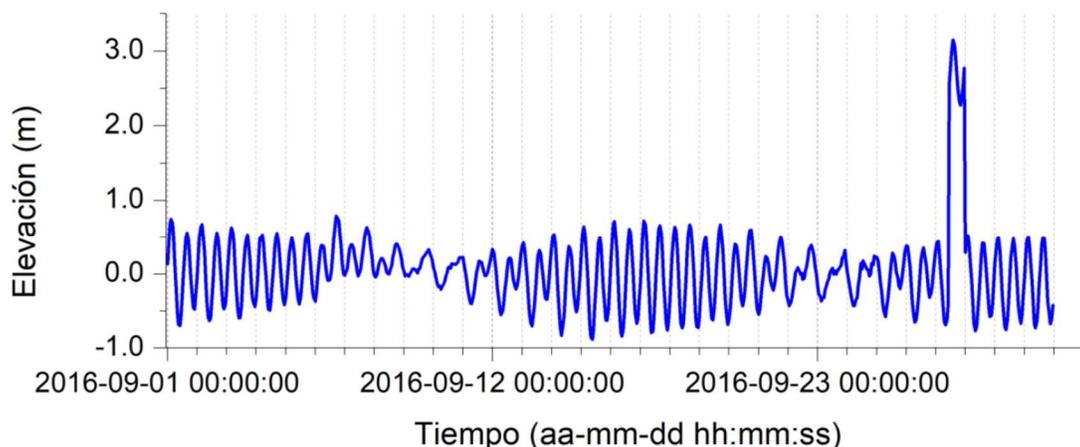


Figura 23.- Marea extrema forzada en la Frontera Oceánica del modelo numérico.

En cuanto a los caudales que descargan al estero, en condiciones de clima normal la entrada de gasto es de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ y en condiciones de clima extremo se utilizó el hidrograma que se observa en la Figura 24 que fue resultado de la suma del hidrograma de la Subcuenca El Palote-Higueras con el hidrograma de la Subcuenca R. Las Conchas (Anexo G), aportando un gasto extraordinario de hasta $1,265.04 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 20 años (Anexo F) además dicho hidrograma total con una duración de aproximadamente 90 horas se sumó al gasto normal de $0 \text{ m}^3/\text{s}$.

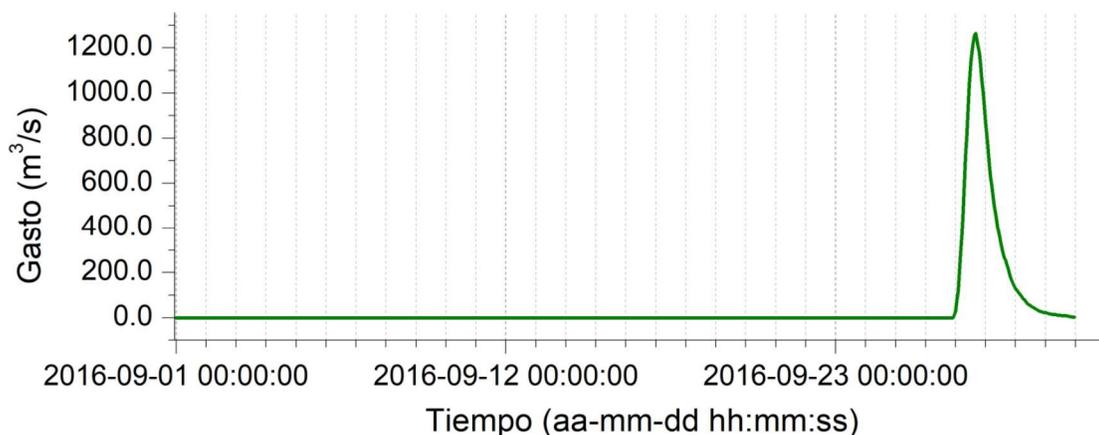
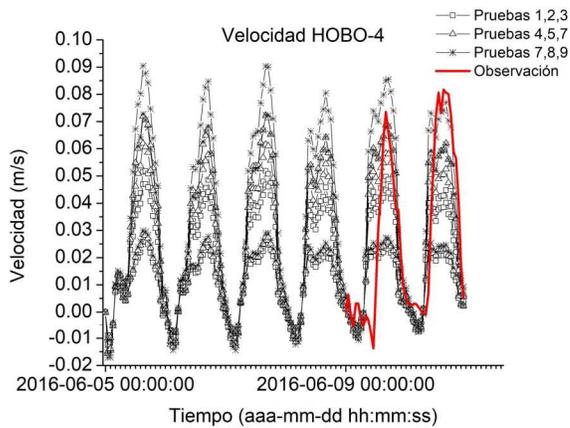


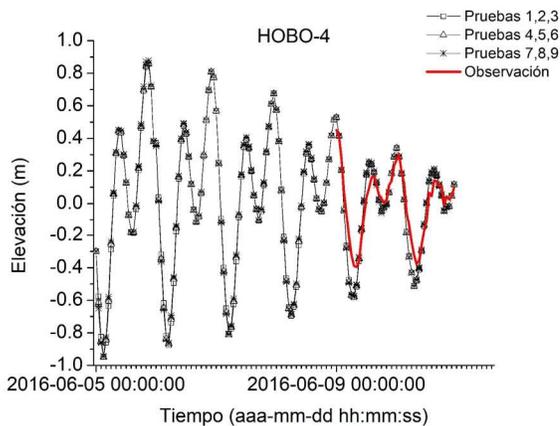
Figura 24.- Hidrograma total forzado en la Frontera Río del modelo numérico.

Como se puede notar en las figuras de arriba tanto la marea de tormenta como el hidrograma (que son las condiciones de clima extremo) se forzaron casi al final del mes de simulación esto con el fin de dar al menos 14 días al modelo para que se estabilice.

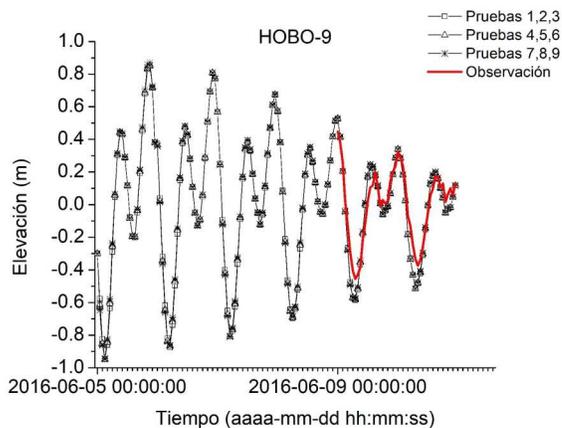
De los resultados de la calibración del modelo numérico el mejor ajuste entre los resultados de las simulaciones y de los datos observados se obtuvo en la Prueba 8 utilizando como parámetros un número de Manning igual a 0.025 ($40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ en el modelo numérico) y una viscosidad de remolino de $0.28 \text{ m}^2 / \text{s}$ (Figura 25). En las Figuras 26, 27 y 28 se muestran los resultados de la Prueba 8 con el mejor ajuste y se observa que las fases de las ondas coinciden y que los niveles de agua se encuentran en buena correlación.



Velocidad HOBO-4			
	Número de Manning ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)	Viscosidad de remolino (m^2/s)	EMC (m/s)
Prueba 1	20	0.10	0.023
Prueba 2		0.28	0.023
Prueba 3		1.00	0.030
Prueba 4	30	0.10	0.023
Prueba 5		0.28	0.022
Prueba 6		1.00	0.029
Prueba 7	40	0.10	0.027
Prueba 8		0.28	0.021
Prueba 9		1.00	0.028



Elevación HOBO-4			
	Número de Manning ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)	Viscosidad de remolino (m^2/s)	EMC (m)
Prueba 1	20	0.10	0.11
Prueba 2		0.28	0.11
Prueba 3		1.00	0.11
Prueba 4	30	0.10	0.11
Prueba 5		0.28	0.11
Prueba 6		1.00	0.11
Prueba 7	40	0.10	0.11
Prueba 8		0.28	0.11
Prueba 9		1.00	0.11



Elevación HOBO-9			
	Número de Manning ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)	Viscosidad de remolino (m^2/s)	EMC (m)
Prueba 1	20	0.10	0.09
Prueba 2		0.28	0.09
Prueba 3		1.00	0.09
Prueba 4	30	0.10	0.09
Prueba 5		0.28	0.09
Prueba 6		1.00	0.09
Prueba 7	40	0.10	0.09
Prueba 8		0.28	0.09
Prueba 9		1.00	0.09

Figura 25.- Pruebas de calibración del modelo.

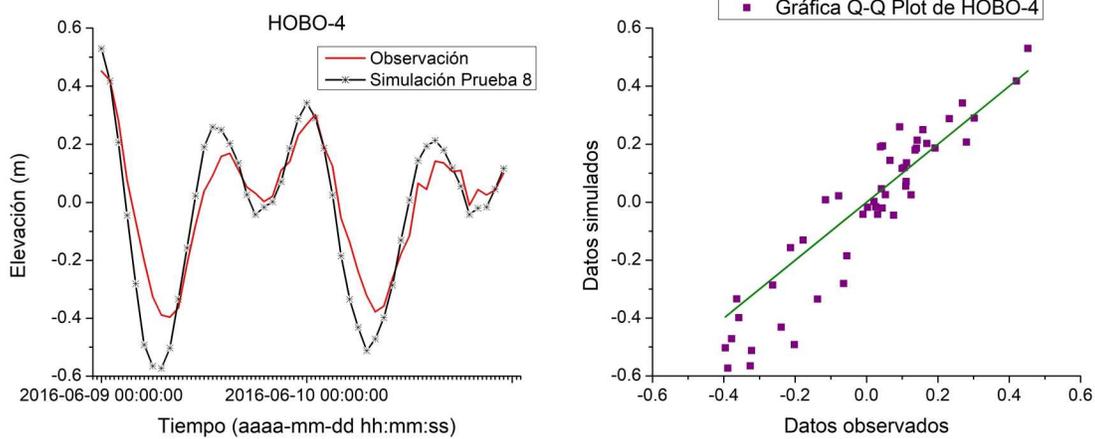


Figura 26.- Comparación de niveles de superficie libre de agua en el punto HOBO-4.

El EMC es de 0.11 m, en la Figura 26 se observa una gráfica Q-Q Plot donde se observa cualitativamente el buen ajuste.

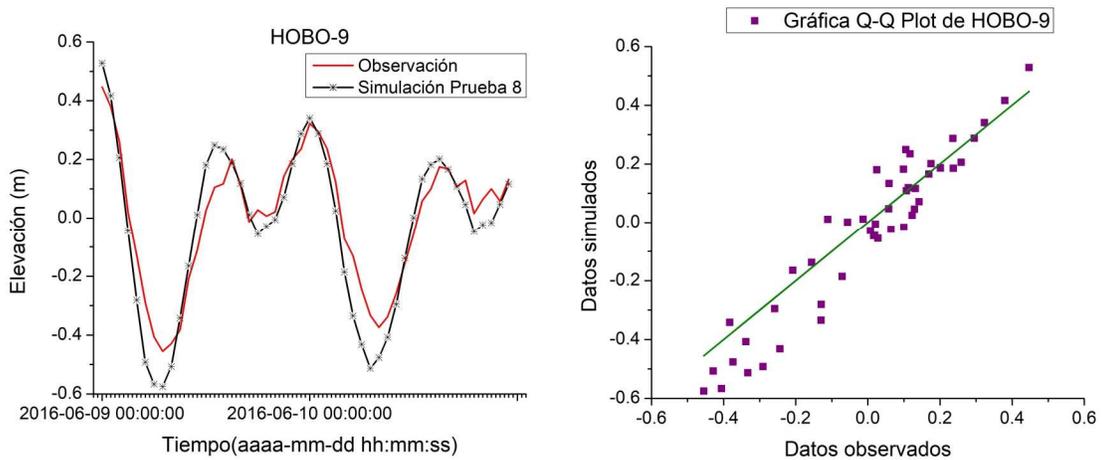


Figura 27.- Comparación de niveles de superficie libre de agua en el punto HOBO-9.

El EMC es de 0.09 m, en la Figura 27 se observa una gráfica Q-Q Plot donde se observa cualitativamente el buen ajuste.

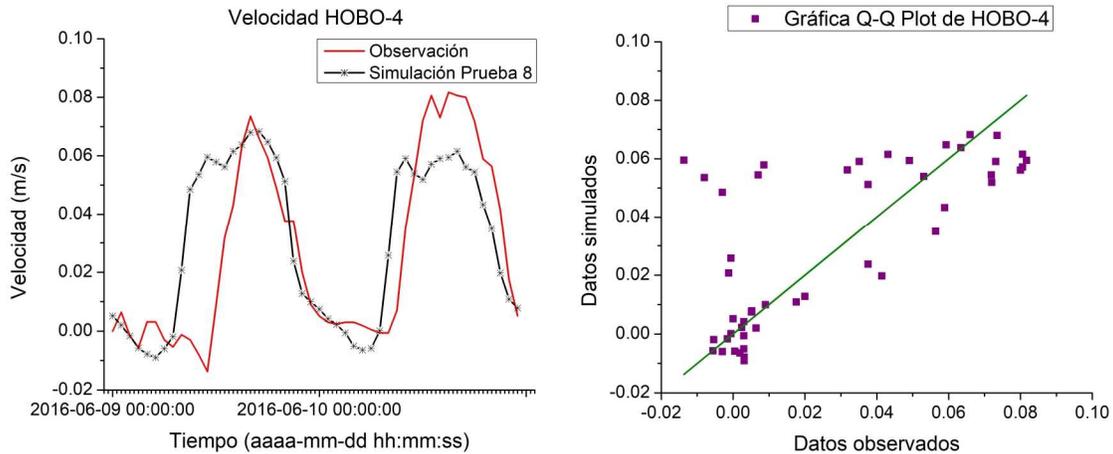


Figura 28.- Comparación velocidades en las corrientes estuarinas en el punto HOBO-4.

El EMC fue de 0.021 m/s , en la Figura 28 se observa una gráfica Q-Q Plot donde se observa cualitativamente el buen ajuste.

Se observó que las velocidades del modelo tienen gran sensibilidad tanto al coeficiente de Manning como a la viscosidad de remolino, sin embargo los niveles de agua no la tienen y probablemente éstos dependan en mayor medida de la velocidad y dirección del viento. Esto indica que la incertidumbre de los resultados del modelo dependerá de la incertidumbre del valor de la rugosidad asignada al dominio y del valor de la turbulencia del flujo.

El EMC final de mejor ajuste en la velocidad del flujo fue de 0.021 m/s , mientras que en la elevación del agua el promedio fue de 0.10 m , equivalente a un error porcentual del 15.40% de la amplitud promedio de la marea (0.65 m). La diferencia entre los datos simulados y los medidos in situ, podría deberse, por un lado, a la escasa disponibilidad de datos y variables medidos in situ utilizados en la simulación, y por otro, al corto periodo de simulación puesto que como condición inicial se supuso que el fluido estaba en reposo.

Sin embargo, en general se observa un buen ajuste entre los datos simulados y los medidos in situ, por lo que el modelo se considera debidamente calibrado y es posible utilizarlo para generar los diversos escenarios de simulación. Lo anterior si se tiene en cuenta que las aproximaciones obtenidas deben ser interpretadas con cautela puesto se requiere un mayor análisis de la estructura del modelo y de su respuesta a las variaciones de sus otros parámetros físicos y numéricos.

En relación al forzamiento de condiciones de clima extremo en el estero, como primer condición se forzó una marea extrema en la Frontera Oceánica y un caudal de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ en la Frontera Río, esto con la finalidad de evaluar los impactos en la hidrodinámica referentes al incremento de las velocidades de las corrientes y además revisar la posible inundación del poblado de Teacapán como consecuencia del forzamiento de dicho escenario.

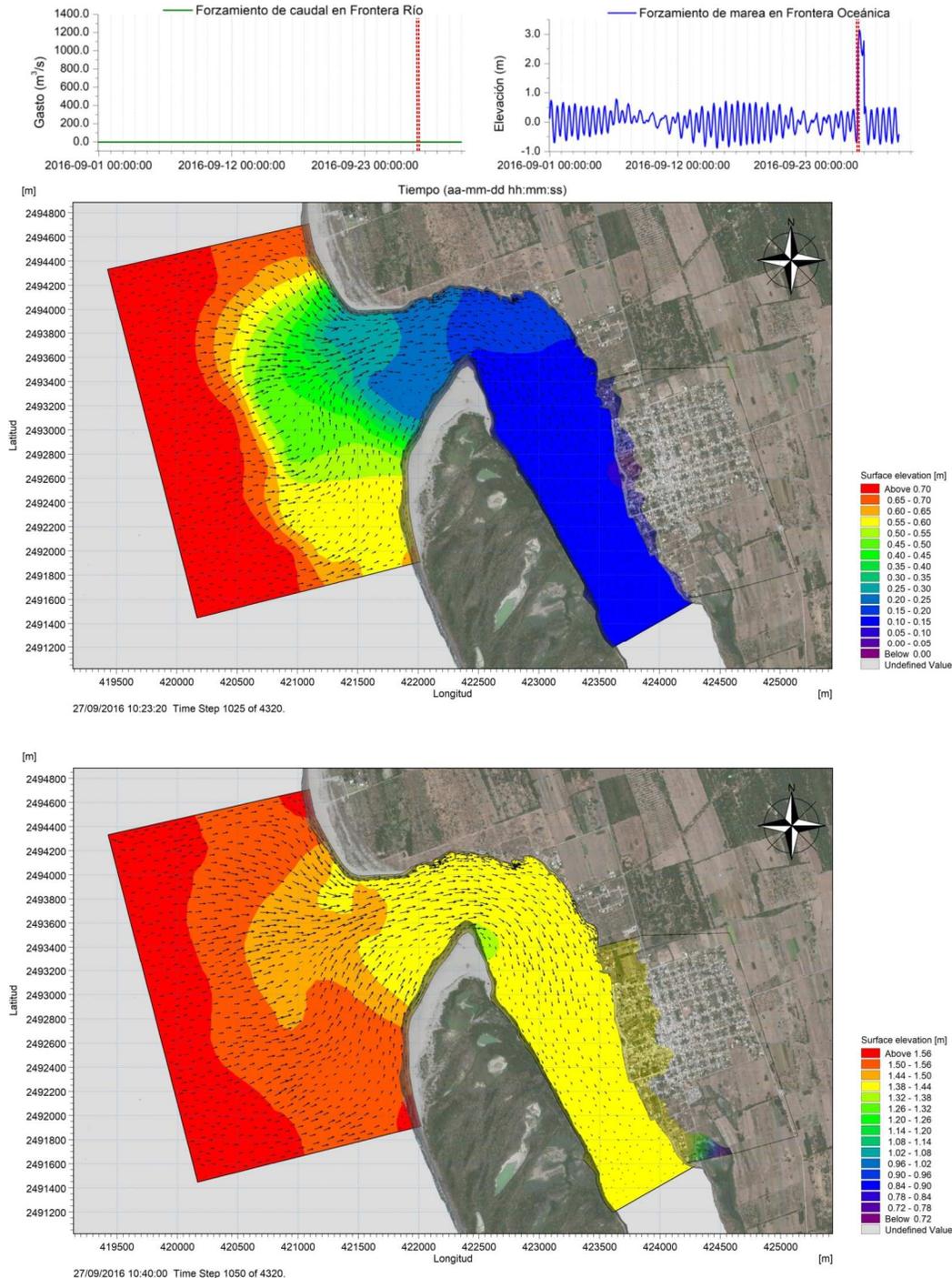


Figura 29.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 10:23:20 a 10:40:00.

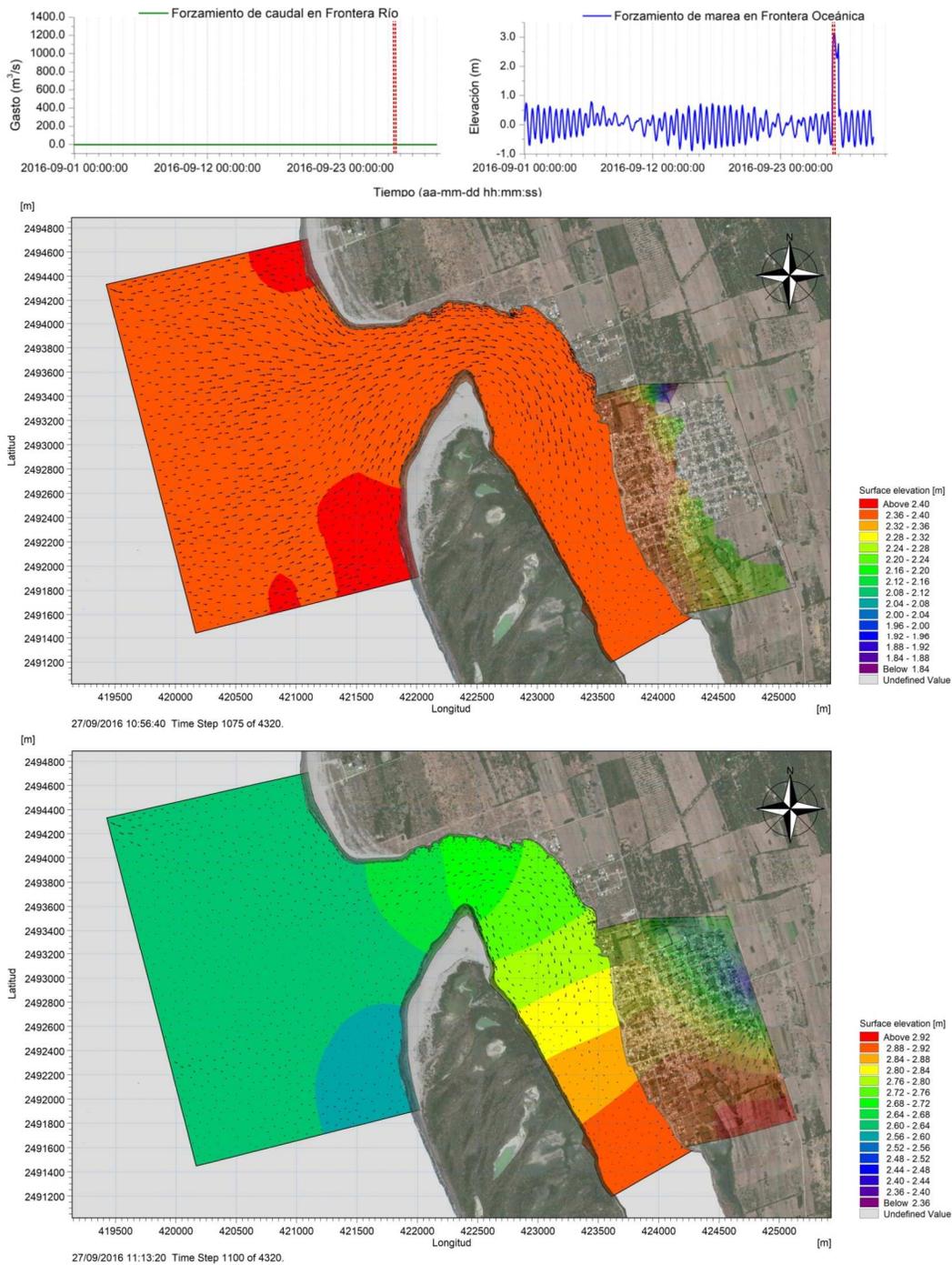


Figura 30.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 10:56:40 a 11:13:20.

En las Figuras 29 y 30 se observan los mapas del nivel del agua al forzar la marea de tormenta, en cuanto a la inundación se observa que al incrementarse el nivel del agua a causa de un huracán categoría 3 y al alcanzar un nivel de 1.38 metros frente al Malecón entonces comienza la inundación en el poblado de Teacapán. Después de que el huracán ha actuado por 50 minutos en la zona se da como resultado que el espejo de agua del estero cubre por completo el área del poblado.

Como segunda condición se forzó marea astronómica en la Frontera Oceánica y un hidrograma con un gasto extraordinario de hasta $1,265.04 \text{ m}^3/\text{s}$ en la Frontera Río, esto con la finalidad de evaluar los impactos en la hidrodinámica referentes al incremento de las velocidades de las corrientes y además revisar la posible inundación del poblado de Teacapán como consecuencia del forzamiento de este escenario.

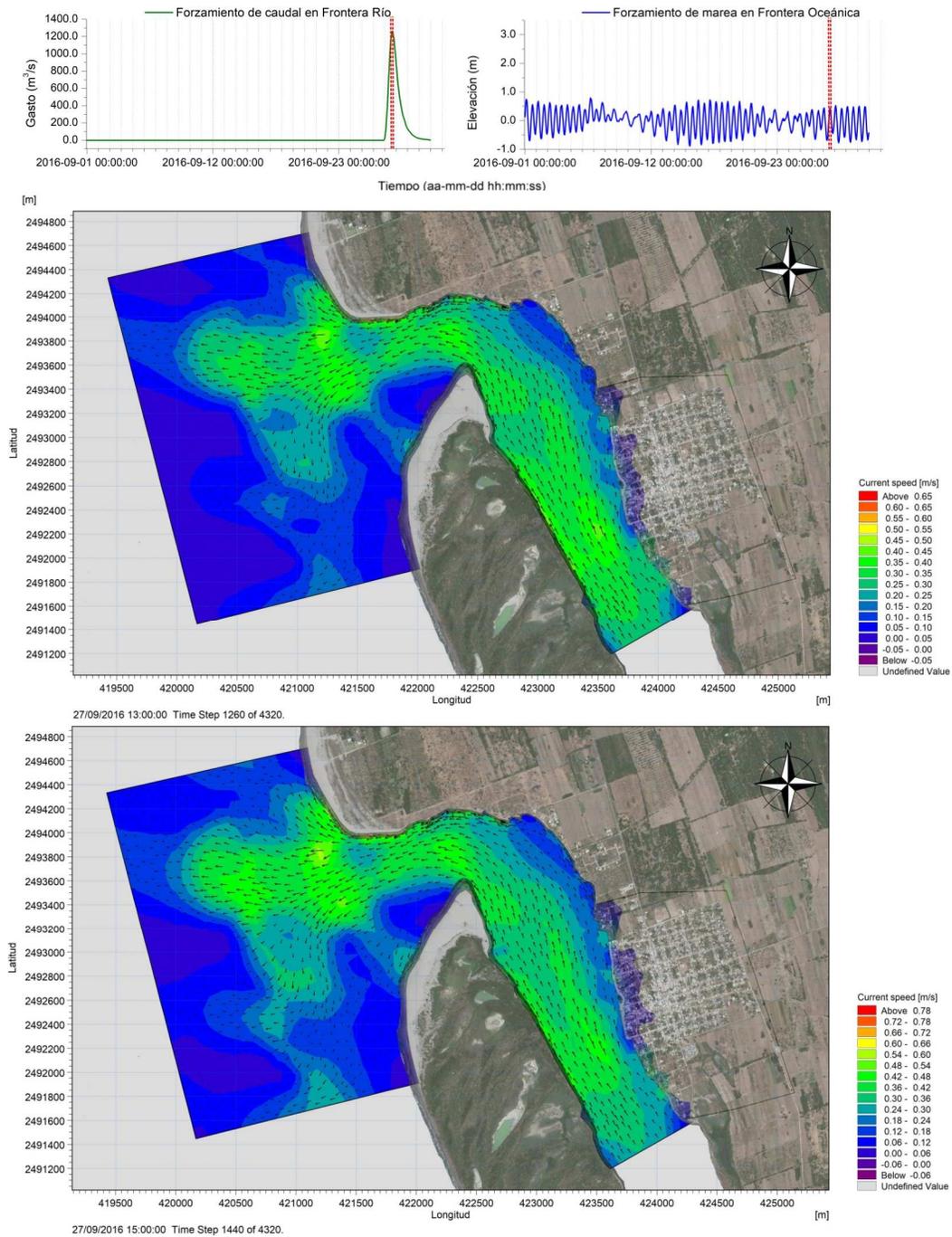


Figura 31.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 13:00:00 a 15:00:00

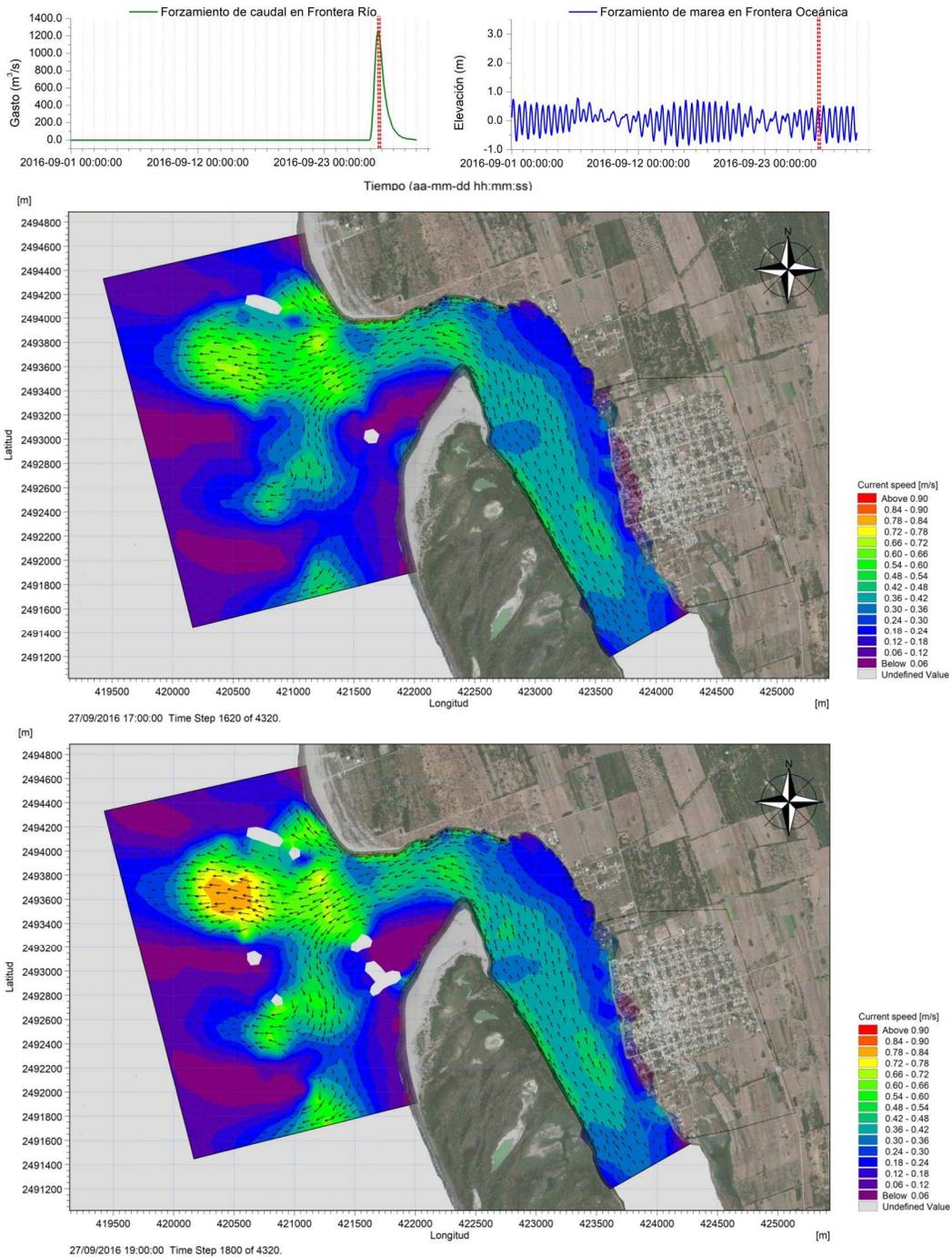


Figura 32.- Evolución del cambio en el nivel del agua de 17:00:00 a 19:00:00.

En las Figuras 31 y 32 se generaron los mapas de nivel del agua en el estero con una diferencia de tiempo de dos horas entre cada uno y se capturaron durante el pico del hidrograma total durante el cual se presentan los gastos máximos. En cuanto a la inundación se observa en los mapas de arriba (tomados cuando el hidrograma presenta su pico) con un gasto máximo de $1,265.04 \text{ m}^3/\text{s}$ que el Poblado de Teacapán no se inunda.

Como tercera condición se utilizaron condiciones de clima extremo simultáneas forzando marea extrema en la Frontera Oceánica y un hidrograma con un gasto extraordinario de hasta $1,265.04 \text{ m}^3/\text{s}$ en la Frontera Río, esto con la finalidad de evaluar los impactos en la hidrodinámica referentes al incremento de las velocidades de las corrientes y además revisar la posible inundación del poblado de Teacapán como consecuencia del forzamiento de este escenario.

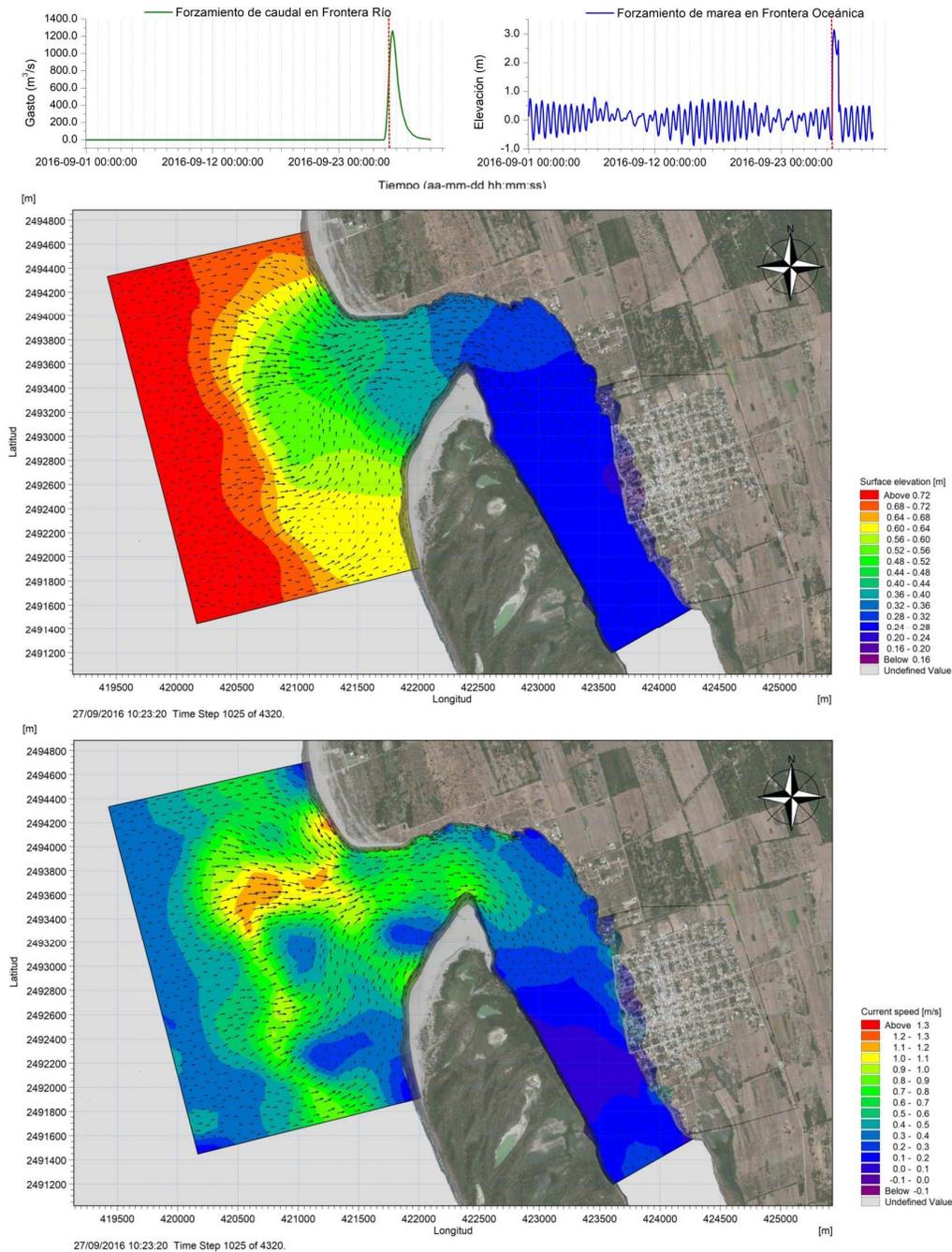


Figura 33.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 10:23:20.

Como resultado podemos observar que en la boca del estero ocurre un pico en las velocidades del orden de los 140 cm/s en la dirección de flujo cuando comienza la sobreelevación de la marea (Figura 33).

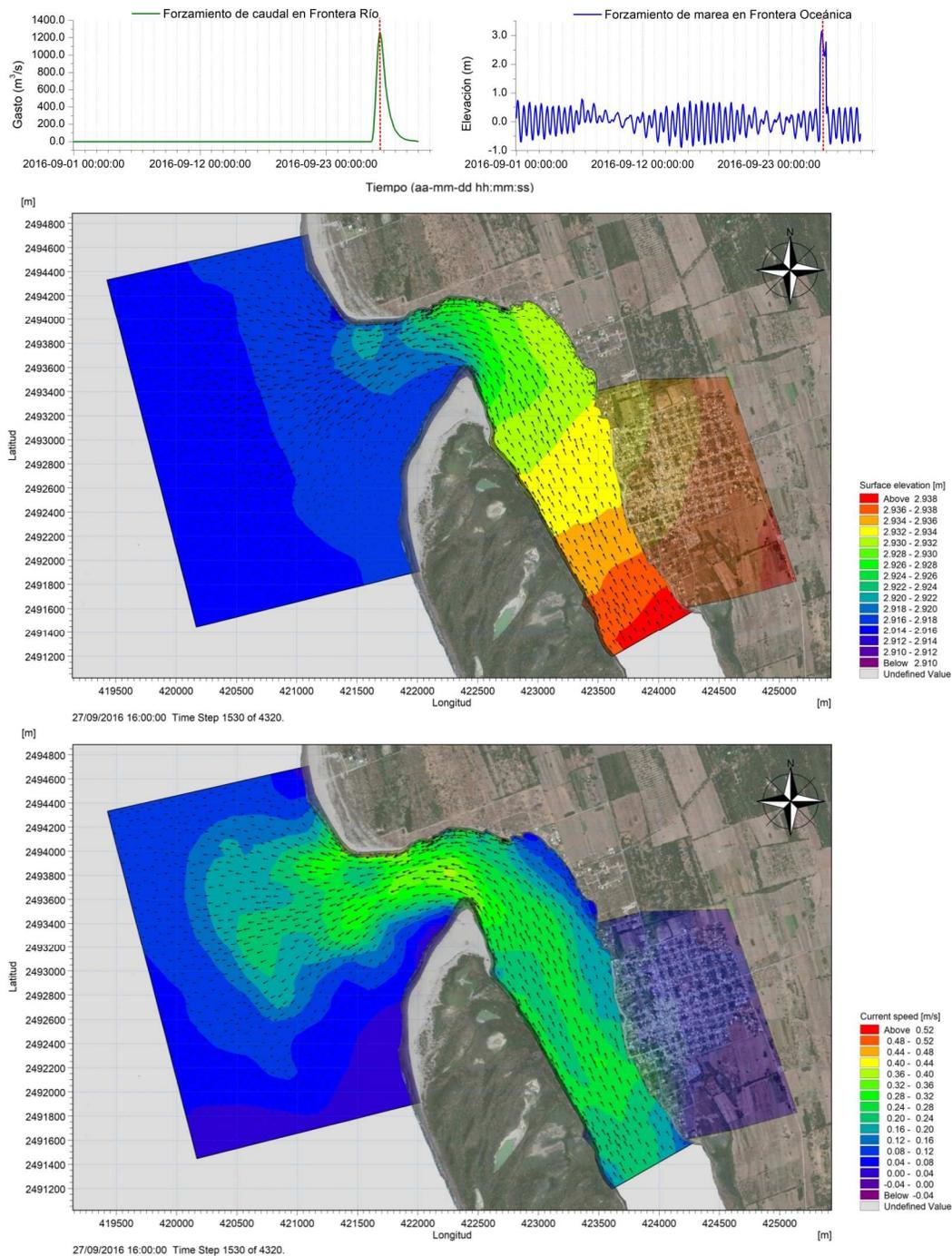


Figura 34.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 16:00:00.

Una vez que la marea alcanza su mayor elevación las velocidades bajan debido a que el nivel de agua permanece constante por las trece horas de duración del huracán sin embargo en este intervalo el caudal extraordinario del hidrograma toma importancia generando velocidades del orden de 52 cm/s (Figura 34).

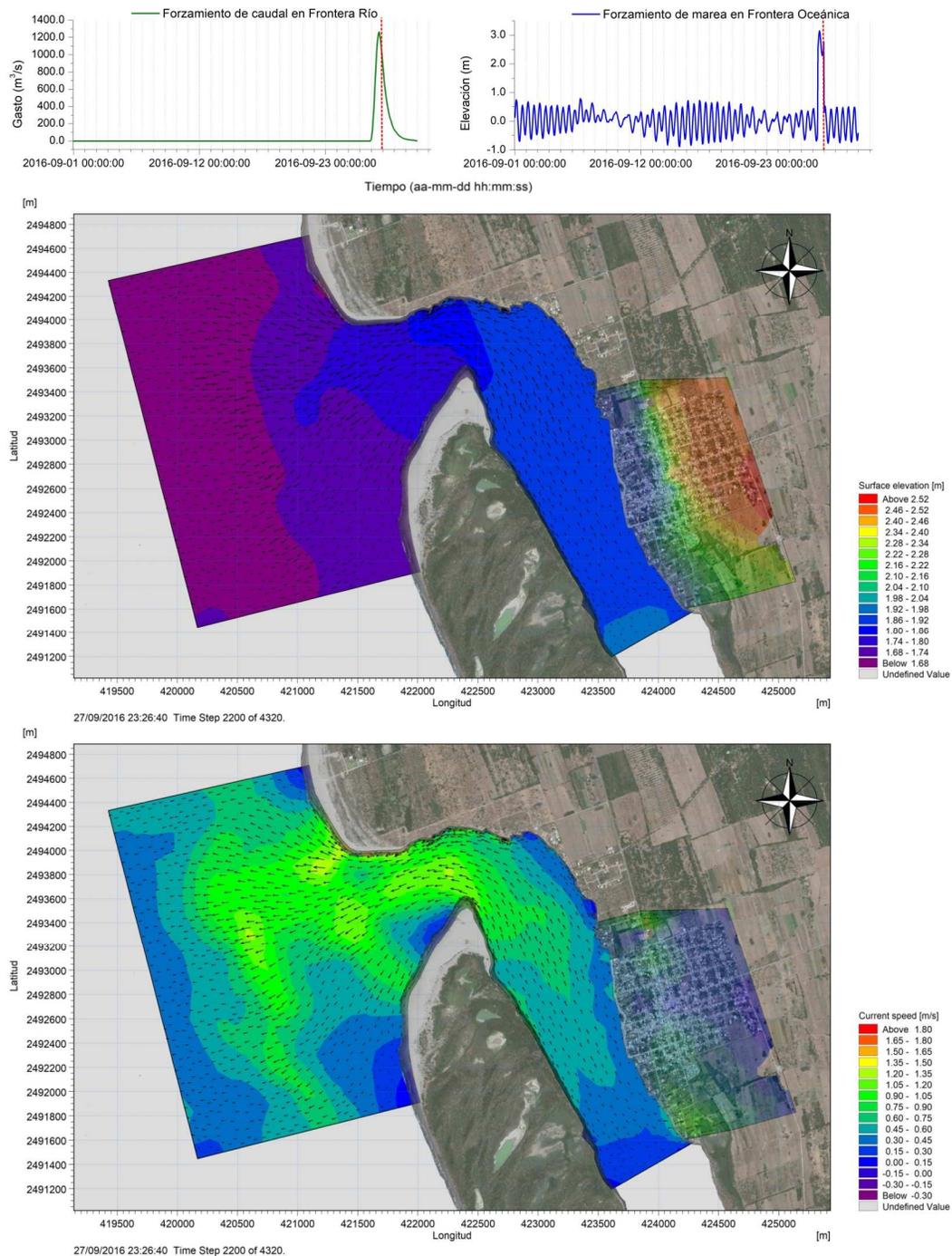


Figura 35.- Aumento del nivel del agua (arriba) y velocidad de las corrientes (debajo) el 2016-09-27 a las 23:26:40.

Al degradarse el huracán la marea vuelve a la normalidad y las velocidades se vuelven a incrementar hasta los 130 *cm/s* debido al gradiente en los niveles del agua pero en este caso las corrientes viajan en la dirección de reflujó (Figura 35).

Cabe señalar que para la generación de los mapas del nivel del agua y campo de velocidades de la condición de clima extremo simultáneo se seleccionaron tres momentos claves: al iniciar la sobre elevación de la marea, durante el pico del hidrograma y al finalizar la sobre elevación.

En la Figura 36 se observa que el transporte de arena se concentra en las zonas someras del estero además el mayor cambio del fondo del cauce se localiza en la boca de Teacapán y en la Frontera Río que es donde se concentran las mayores velocidades de reflujó debido al caudal extraordinario forzado por allí.



Figura 36.- Cambios en el nivel del fondo del cauce (transporte de arena) en el escenario en condiciones de clima extremo.

Con el fin de comparar las velocidades de las corrientes estuarinas desarrolladas durante las condiciones de marea extrema, de caudal extraordinario y con clima extremo simultáneo se extrajeron magnitudes de velocidades en tres puntos estratégicos del estero (Ver Anexo J). Resultando como escenario más adverso el de condiciones climáticas extremas simultáneas debido a que en general genera las mayores velocidades e inundaciones en el estero.

Respecto a los resultados obtenidos de los escenarios de condiciones hidro-meteorológicas extremas (Figura 37), al analizar una sección típica del estero (sección S-1), se observó que la elevación del agua y la velocidad del flujo fue significativamente mayor ante la presencia de marea de tormenta, a excepción del caso del escenario con caudal extraordinario, donde el reflujó de la marea astronómica coincide con la descarga máxima de las subcuencas, lo que produjo que la velocidad del reflujó alcanzara el máximo valor.

Esto indica que la descarga hidrológica de las subcuencas no tiene una influencia significativa en la elevación del agua, pero si en la velocidad de reflujó, es decir, atenúa durante la fase de flujo de la marea y agrava durante la fase de reflujó. Cabe señalar que las magnitudes de las velocidades mostradas en la Figura 44 son promediadas a lo largo de la sección S-1 de 755 metros de longitud por lo que son relativamente bajas, además se aprecia que la marea deja de tener efecto en las velocidades a medida que se muestrean secciones hacia el interior del estero y este es el caso de la sección S-1 que se localiza alejada de la boca, en contraste el efecto del hidrograma en ella es fuerte generando grandes velocidades debido a la cercanía con la Frontera Río.

Estos resultados pueden tener importancia práctica para el diseño de cualquier obra y/o plan de manejo que conlleve a la rehabilitación del estero. No obstante, en este estudio es necesario considerar una serie de limitaciones importantes:

- En primer lugar el dominio espacial se construyó con batimetrías del año 2012 y 2016, por lo que para el diseño de una obra de protección costera se necesita actualizar la batimetría del estero con el fin de que el modelo genere velocidades próximas a las reales.
- En segundo lugar no se aborda la influencia de la salinidad al evaluar los patrones de circulación de las corrientes estuarinas, dicha cuña de sal puede llegar a ser de considerable importancia debido a que el estero se encuentra en interacción constante con el agua de mar del Océano Pacífico.
- En tercer lugar para la calibración del modelo no se tomaron en cuenta factores físicos como la dirección y velocidad del viento, y factores matemáticos como la utilización de diversos pasos de tiempo (en este trabajo fue de 4 segundos); por lo que incluyendo más parámetros al modelo los resultados pueden llegar a ser diferentes a los obtenidos aquí.

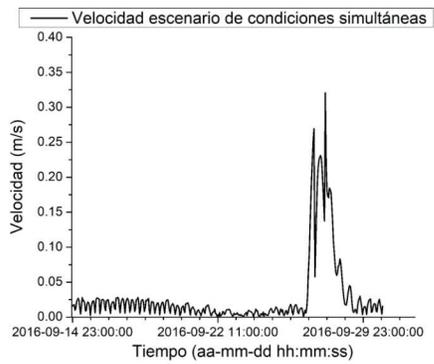
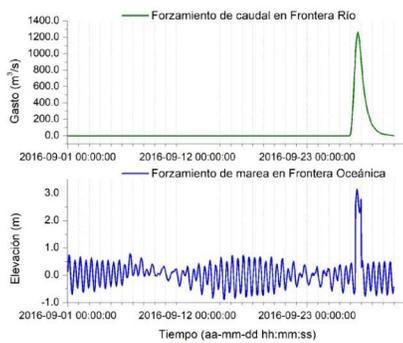
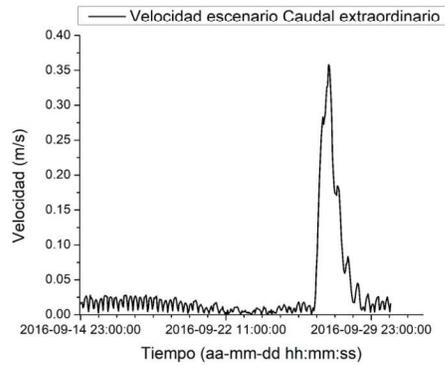
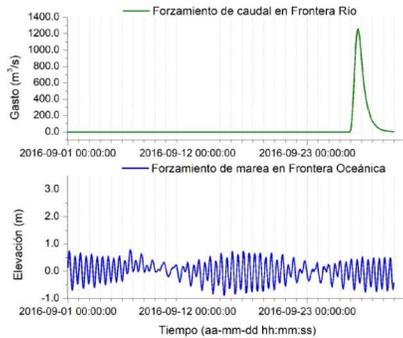
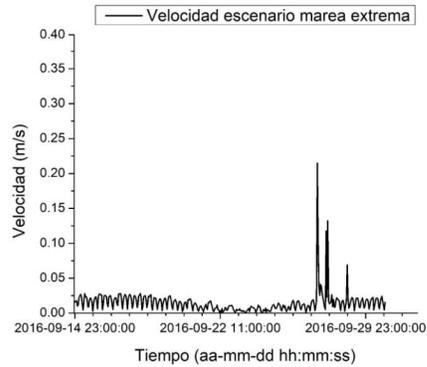
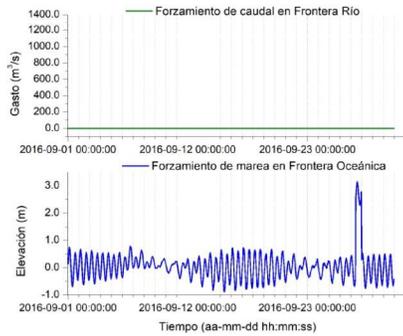
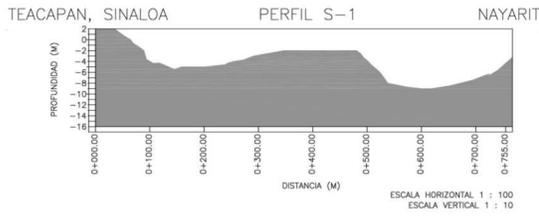


Figura 37.- Series de tiempo de elevación y velocidad en la sección S-1.

Con respecto al diseño de una obra de protección en el estero se propuso construir una medida de actuación en la Zona D (Figura 21) que se encuentra en las cercanías del CETMAR N°23, la cual es una zona con altas tasas de erosión y dicha propuesta constó de construir un relleno artificial de arena más un muro de retención de tablaestacas que recupere la línea de costa del año 2003 y que mitigue la erosión presente.

Para modelar la influencia del relleno de arena sobre la hidrodinámica del estero se utilizaron las condiciones de frontera de clima extremo simultáneo solo que agregando la modificación de la batimetría consecuencia de la construcción de la obra que se propone como medida de actuación en el margen del estero. Los resultados de los primeros 14 días de la simulación se despreciaron ya que el modelo se estabilizó en ese tiempo, enseguida durante cuatro días se forzaron las condiciones de clima extremo y se siguió simulando por otros 12 días para evaluar el comportamiento en las velocidades y niveles del agua. En este escenario se evaluó el impacto en la hidrodinámica por la construcción del relleno artificial de arena entre dos espigones de roca ya existentes y un muro de retención de tablaestacas de 428 metros de longitud, utilizando para ello en total un volumen de arena de $99,000 \text{ m}^3$. En la Figura 38 se muestra el plano en donde se modificó la geometría de la línea de costa y la batimetría, estos cambios se introdujeron al modelo numérico para predecir los impactos que pudieran causar dichas modificaciones en la hidrodinámica del estero.

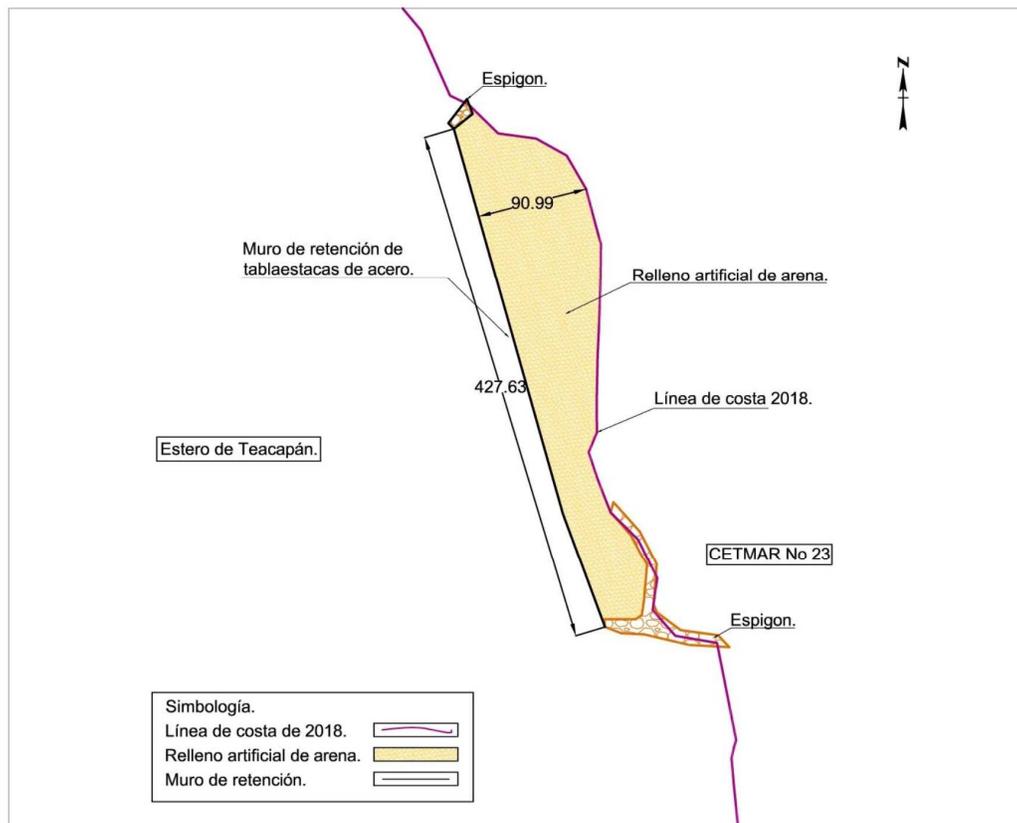


Figura 38.- Construcción del relleno artificial de arena.

En las Figura 39 se observa que las mayores velocidades se concentran a los lados del relleno debido a que los espigones de roca existentes se mantuvieron en vez de removerlos con el fin de que le dieran estabilidad al relleno.

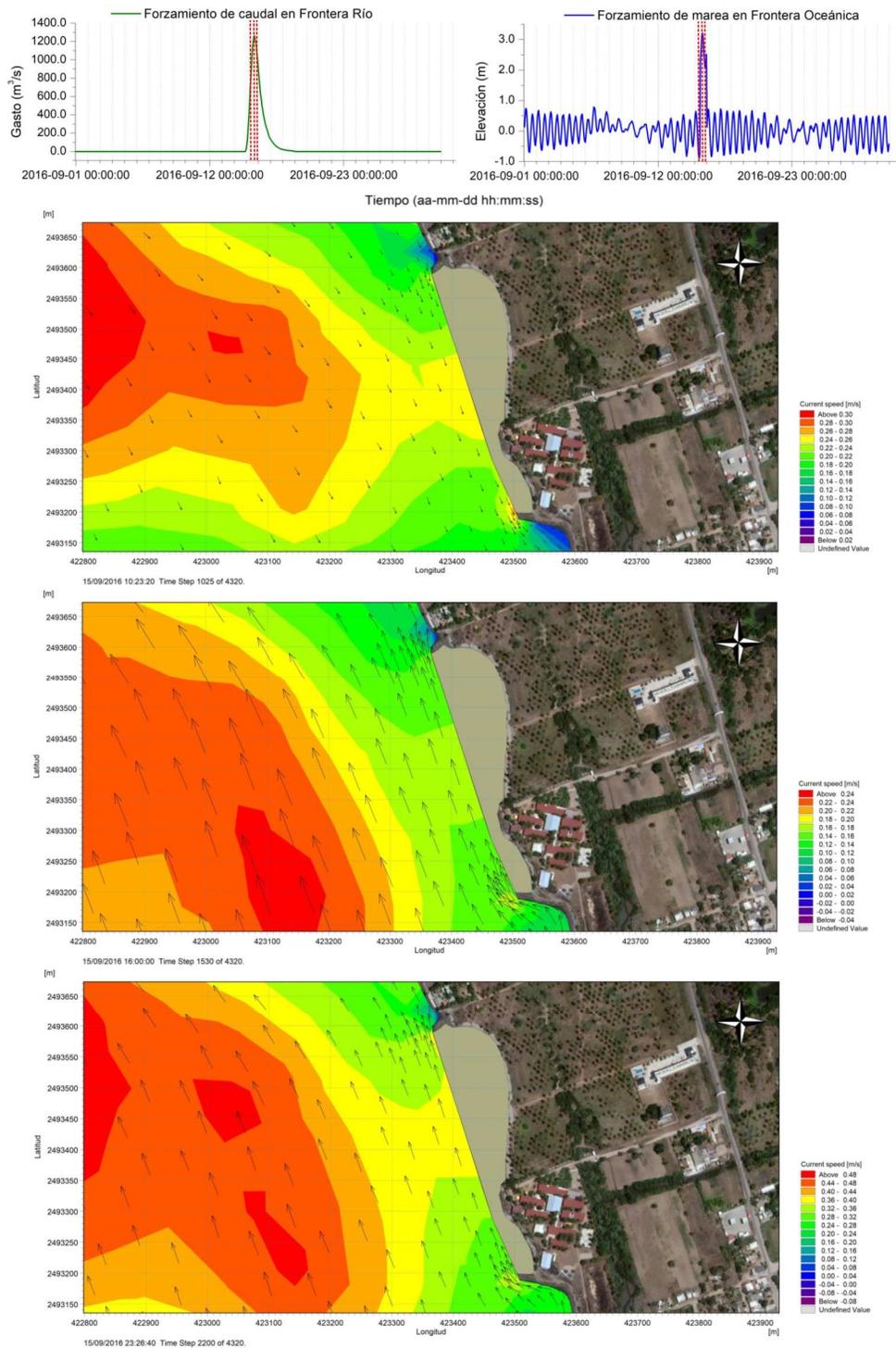


Figura 39.- Campo de velocidades al construir el relleno artificial de arena a las 10:23:20, 16:00:00 y a las 23:26:40.

En cuanto al transporte de arena se observa un cambio en el fondo del cauce es de muy bajo orden (Figura 40).

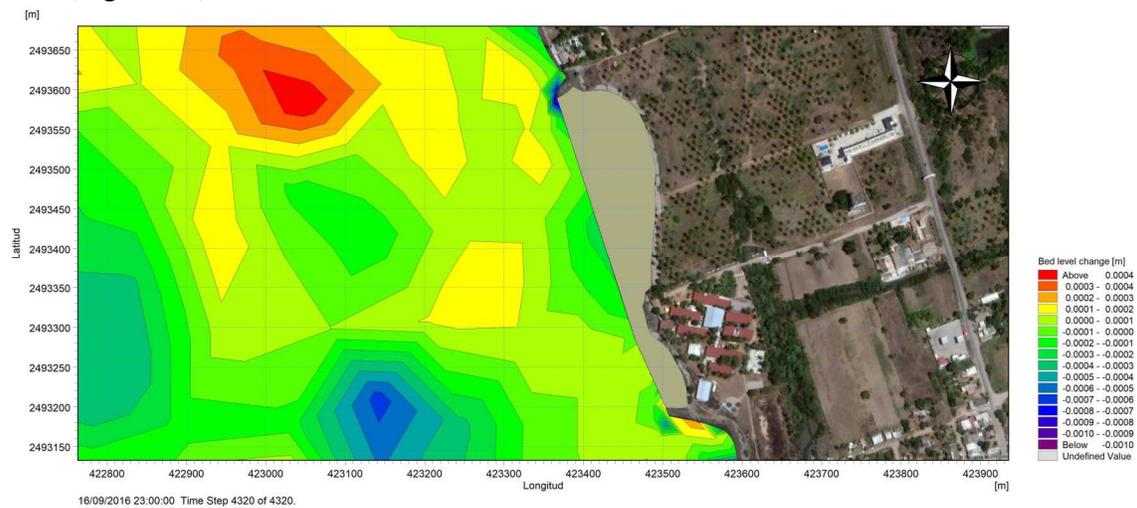


Figura 40.- Cambios en el fondo del estero (transporte de arena) en las proximidades del CETMAR N°23 al construir el relleno artificial de arena.

Con el fin de verificar los impactos en la hidrodinámica por la construcción del relleno se obtuvieron las magnitudes de las velocidades estuarinas presentadas durante condiciones climatológicas extremas y la construcción del relleno artificial de forma simultánea, además también se extrajeron velocidades 12 días después de la construcción de la obra y para ello ubicamos diez punto estratégicos en los alrededores del relleno y extrajimos las velocidades estuarinas (Figura 41).



Figura 41.- Puntos de extracción de velocidades al norte (P1, P2, P3, P4, P5), enfrente (P6, P7) y al sur (P8, P9, P10) del relleno artificial de arena.

Un incremento en las velocidades estuarinas a causa de la construcción de la obra no es deseable debido a que esto podría generar zonas de erosión en el resto del margen. Las curvas de las velocidades extraídas (Ver Anexo K) revelaron que:

- En los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 situados al norte del relleno artificial se observa que las velocidades se mantienen ante la construcción o no de la obra, incluso en los puntos P2 y P3 se nota una disminución en la velocidad de las corrientes.
- En los puntos P6 y P7 situados al frente del relleno artificial de arena las velocidades aumentan, en el punto P6 se incrementan en un 60% llegando a alcanzar velocidades de hasta 40 *cm/s* y en el punto P7 de 32 *cm/s*, por lo que estas velocidades deben de ser consideradas.
- En los puntos P8, P9 y P10 situados al sur del relleno artificial de arena las velocidades se mantienen e incluso disminuyen un poco. No está por demás señalar que estos puntos se localizan en la parte del malecón por lo que el margen está revestido de roca y un aumento de velocidades no supone un gran problema.

Estos resultados soportan la hipótesis de que un relleno artificial de arena con la geometría en planta presentada, no altera las velocidades de las corrientes estuarinas al norte y sur de la obra, con lo cual se está protegiendo la línea de costa y no se está afectando al resto del margen, es decir, solucionamos el problema de erosión en una zona del estero sin causar problemas en el entorno.

IV. Estrategias de implementación.

4.1.- Plan de acción.

4.1.1.- Proyecto de Ingeniería.

4.1.1.1.- Planos y memoria de cálculo.

Para el cálculo de los volúmenes de arena a utilizar en el relleno artificial y obtener el diseño del muro de retención a base tablaestacas se realizó un cadenamiento (Figura 42). Cabe señalar que el diseño de las tablaestacas se realizó en voladizo por lo que la principal causa de falla se debe al empuje del relleno de arena sobre el muro, por lo que fue necesario calcular la altura del relleno por secciones o estaciones como se muestra en la Tabla 5.

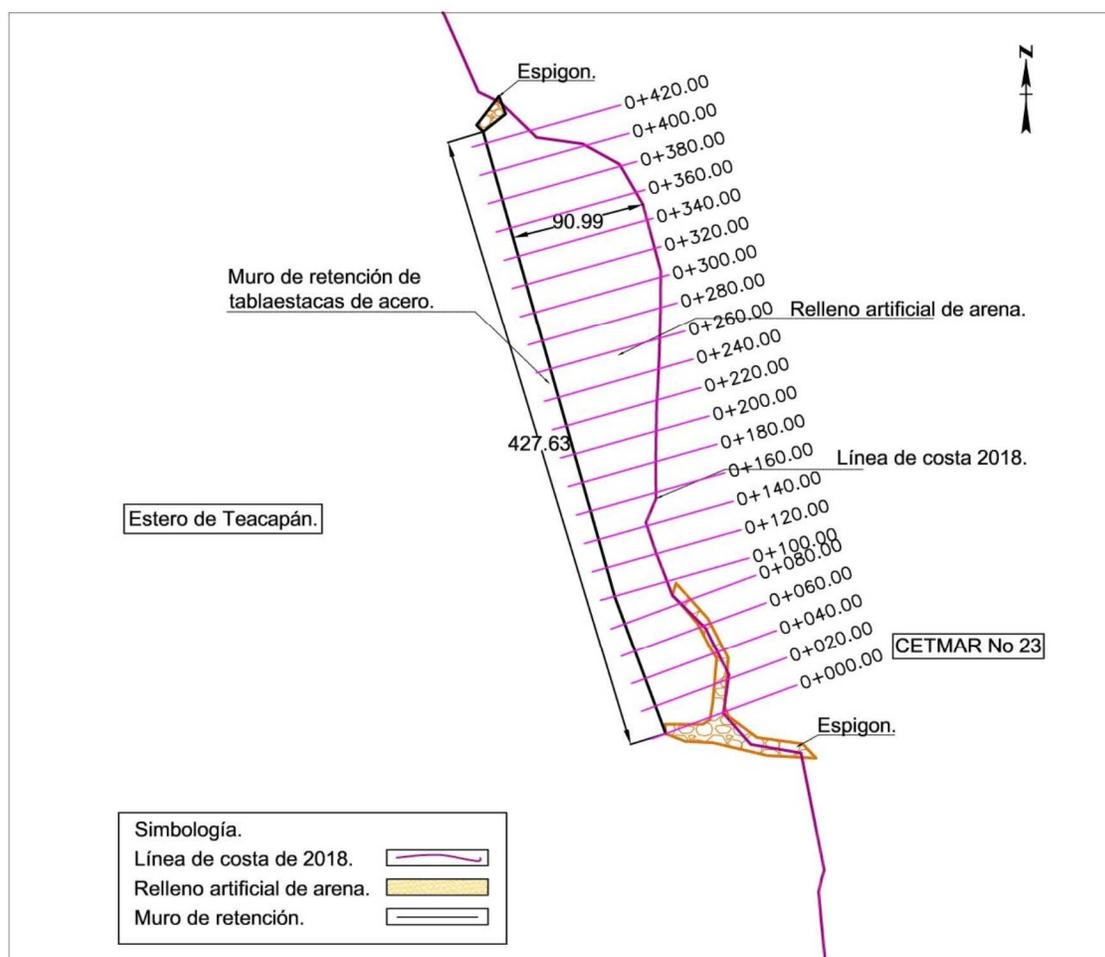


Figura 42.- En el cadenamiento del relleno artificial se realizó una extracción de secciones para el cálculo de los volúmenes de arena.

Del estudio de mecánica de suelos de las muestras B1, B2, B3, B4, B5 y CETMAR1 se rescataron las siguientes propiedades mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4.- Propiedades de las arenas necesarias para realizar el cálculo del empuje sobre el muro de retención.

Propiedades Físicas	Arena para el relleno artificial	Arena del suelo marino
Ángulo de fricción (ϕ)	30°	30°
γ_m , (Ton/m ³).	1.60	1.60
γ_m^E , (Ton/m ³).	0.72	0.72
γ_w , (Ton/m ³).	1.028	1.028

Empuje de la arena sobre el muro de tablaestacas: Para calcular el momento flexionante máximo (Columna (4) de la Tabla 5) sobre las tablaestacas y obtener la longitud de empotramiento se recurrió a la metodología para tablaestacas en voladizo (Ver Anexo L):

Tabla 5.- Cálculo de la estabilidad del muro de tablaestacas por secciones.

Estación	Altura del relleno (m)	Largo de la tablaestaca (m)	Momento flexionante máximo (kN – m/m)	Módulo de sección de la tablaestaca (cm ³ /m de muro)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0+000	5.83	14.17	228.54	550.69
0+020	5.71	13.89	215.75	519.87
0+040	5.97	14.49	244.08	588.14
0+060	8.02	19.23	557.43	1343.20
0+080	8.23	19.72	599.60	1444.82
0+100	7.40	17.80	444.50	1071.07
0+120	6.45	15.60	302.64	729.25
0+140	5.99	14.54	246.35	593.62
0+160	6.26	15.16	278.46	670.99
0+180	7.24	17.43	418.05	1007.34
0+200	7.03	16.94	384.95	927.58
0+220	5.68	13.82	212.62	512.34
0+240	5.07	12.40	155.45	374.57
0+260	4.82	11.82	135.32	326.06
0+280	6.12	14.84	261.49	630.09
0+300	6.34	15.35	288.48	695.13
0+320	6.34	15.35	288.48	695.13
0+340	6.25	15.14	277.23	668.01
0+360	5.84	14.19	229.62	553.31
0+380	5.32	12.98	177.46	427.61
0+400	5.67	13.79	211.59	509.85
0+420	4.20	10.38	92.97	224.02

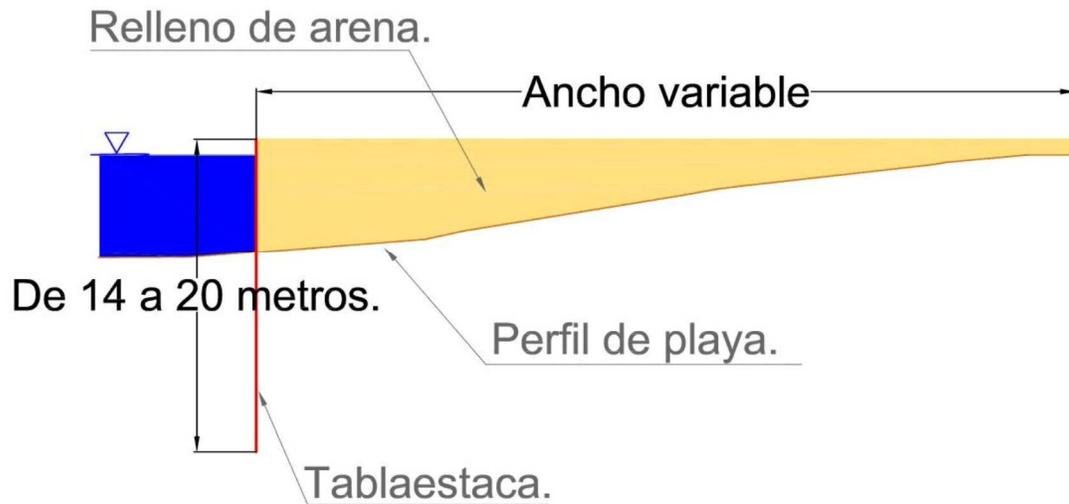


Figura 43.- Sección tipo del relleno artificial.

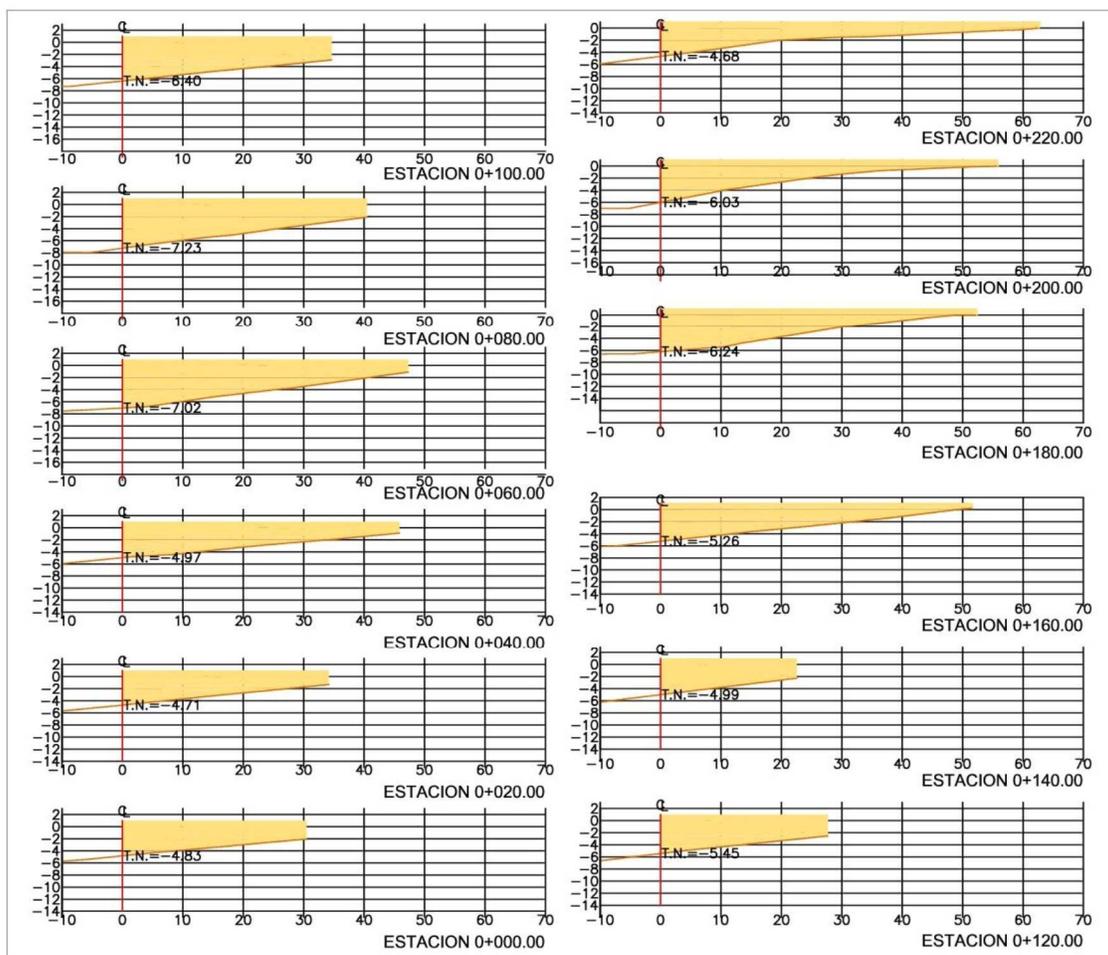


Figura 44.- Secciones de la 0+000 a la 0+220.

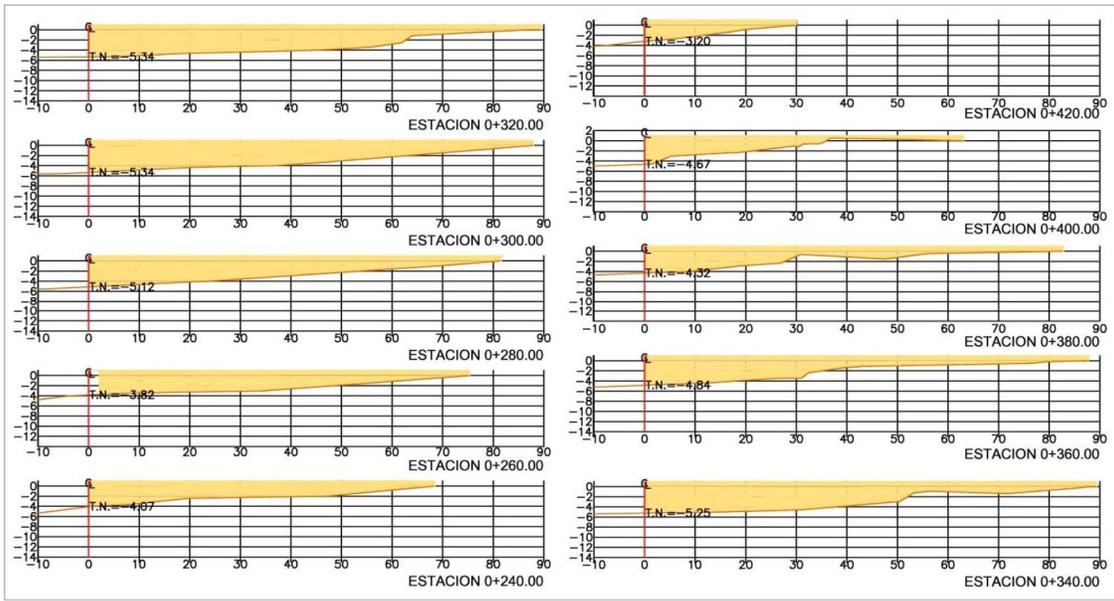


Figura 45.- Secciones de la 0+240 a la 0+420.

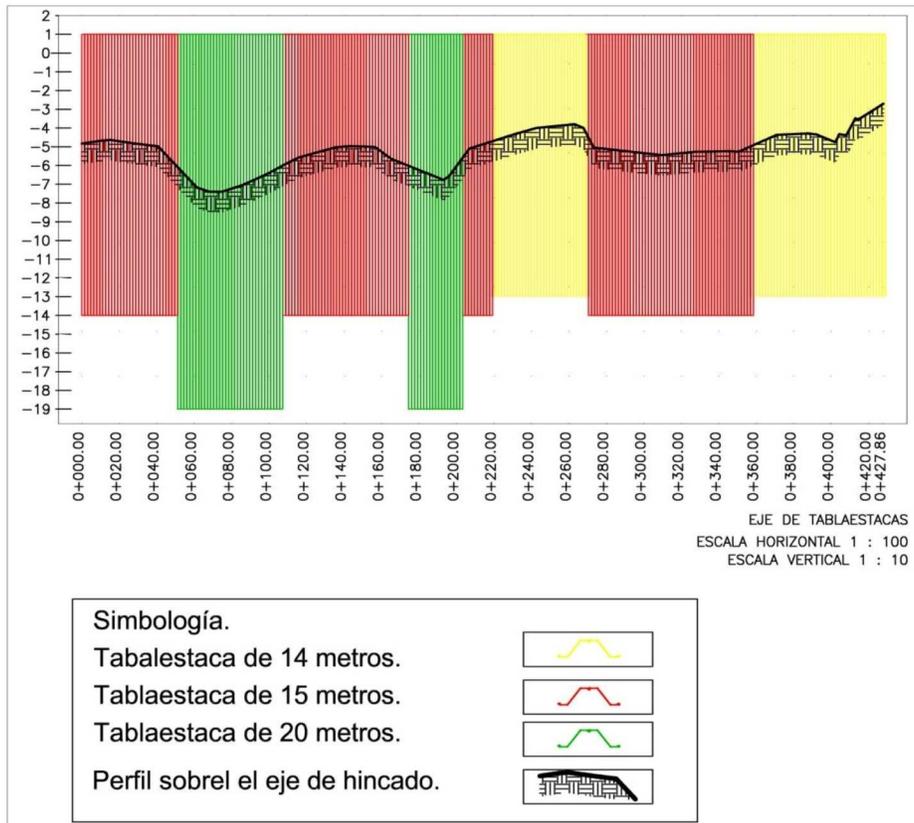


Figura 46.- Vista del hincado de las tablaestacas sobre el eje de proyecto.

De la Tabla 5 se escogió una tablaestaca de acero de SkyLine AZ 18-800 o similar (Figura 46 y 47) con módulo de sección de $1,840 \text{ cm}^3/\text{m}$ de muro el cual es mayor al necesario calculado en la columna (5).

Una vez comprobado que las dimensiones propuestas pasan las pruebas de estabilidad se calcularon los volúmenes de arena a utilizar con Autocad y Civilcad como se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6.- Volúmenes de arena calculados.

Concepto	Volumen Geométrico (m^3).	Volumen con abundamiento(m^3).
Relleno de arena.	89,988.50	98,987.35

Con estas cantidades se elaboró un presupuesto base el cual arroja un costo aproximado, sin embargo se debe considerar que la batimetría debe actualizarse al momento de licitar la obra debido a que ésta tiene una influencia importante en el costo real de la obra.

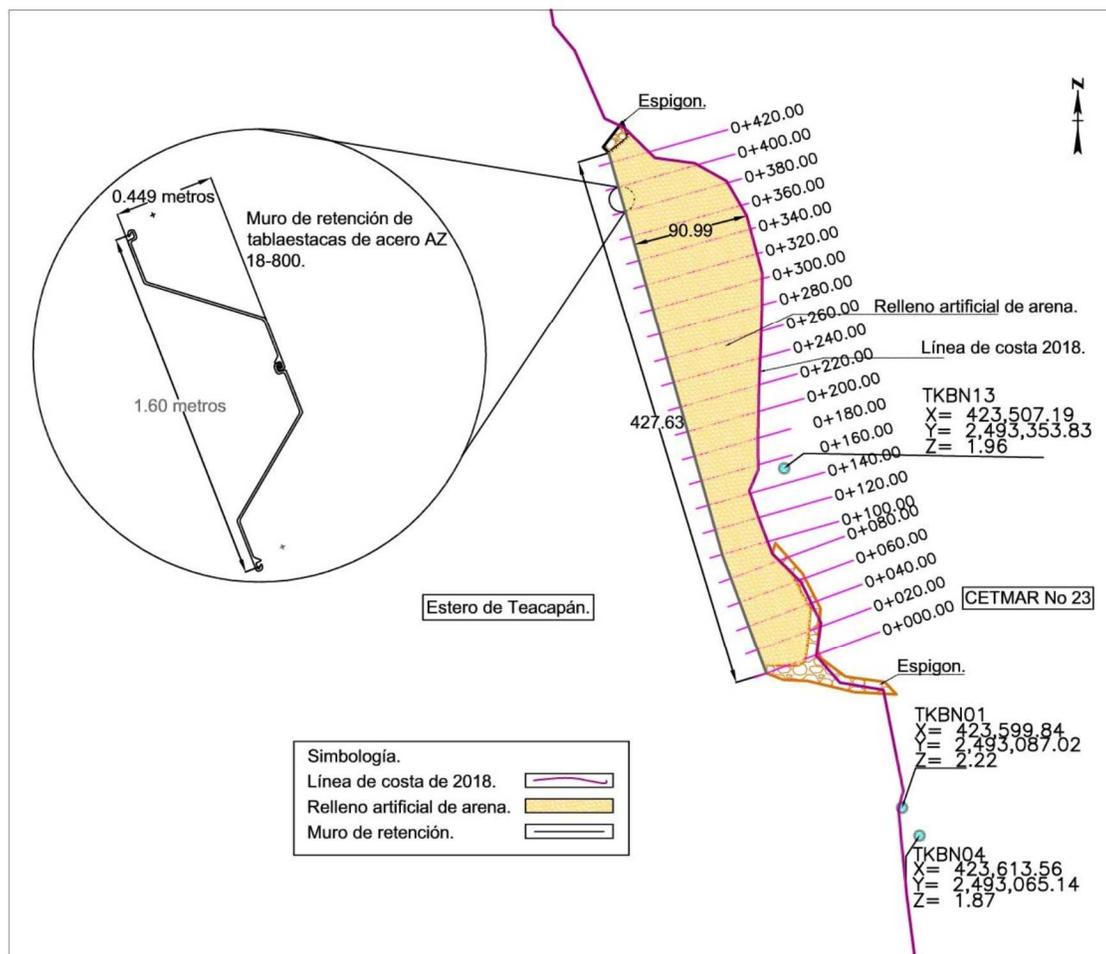


Figura 47.- Detalle del muro de tablaestacas y bancos de nivel en las cercanías de la obra.

En la Figura 48 de abajo se observan los puntos de inicio y terminación de cada tramo de construcción con tablaestacas de distinta longitud, estos puntos que van del 1 al 10 se utilizaron para elaborar el cuadro de construcción del muro mostrado en la Tabla 7.

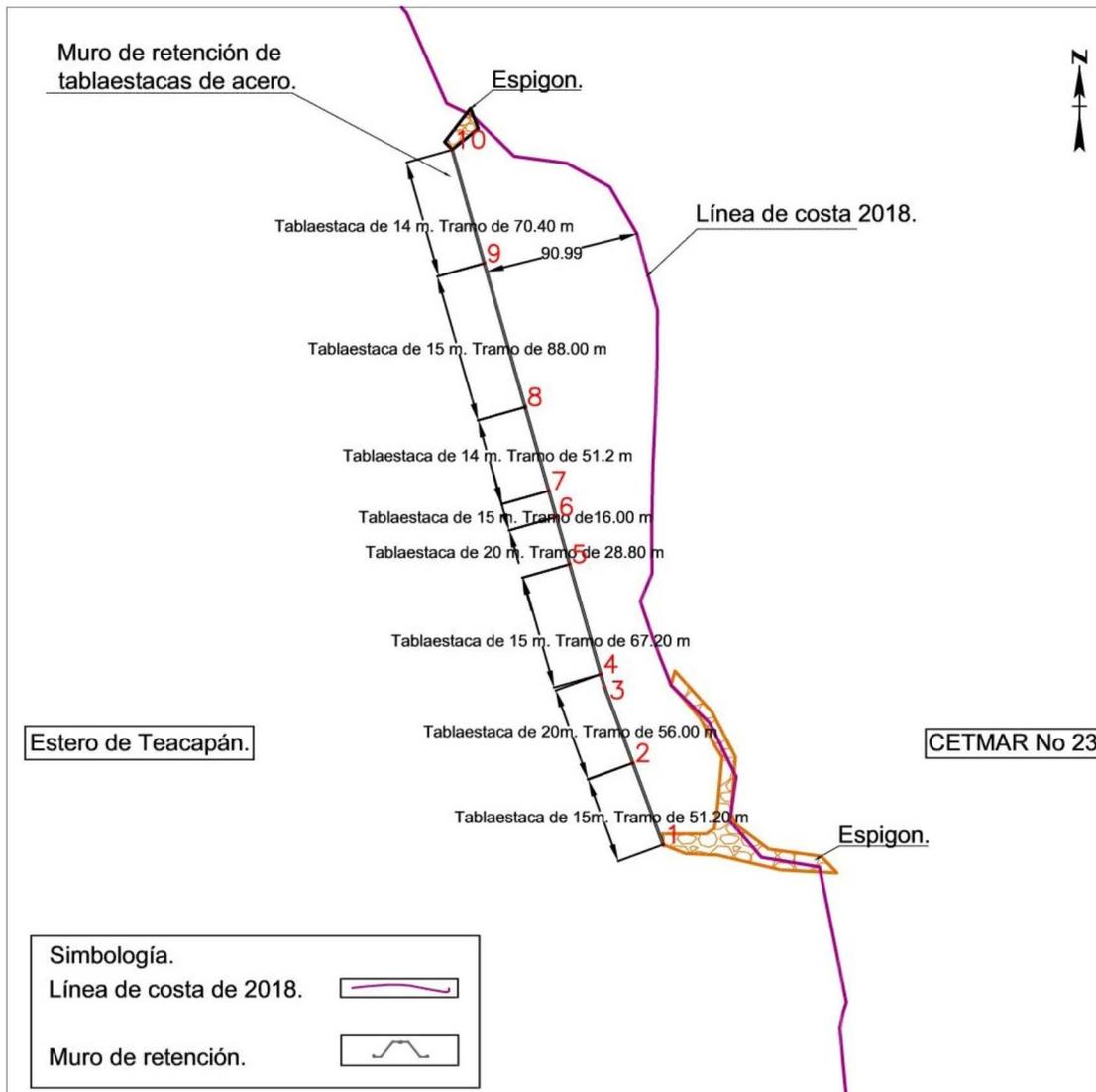


Figura 48.- División del eje de hincado en tramos con tablaestacas de distinta longitud.

Tabla 7.- Cuadro de construcción del eje de proyecto del muro de tablaestacas.

CUADRO DE CONSTRUCCION						
LADO		RUMBO	DISTANCIA	V	C O O R D E N A D A S	
EST	PV				X	Y
				1	423,493.2669	2,493,192.6391
1	2	N 20°19'41.41" W	51.200	2	423,475.4802	2,493,240.6503
2	3	N 20°19'41.41" W	48.074	3	423,458.7796	2,493,285.7297
3	4	N 15°48'01.31" W	7.926	4	423,456.6213	2,493,293.3567
4	5	N 15°48'01.31" W	67.200	5	423,438.3237	2,493,358.0176
5	6	N 15°48'01.31" W	28.800	6	423,430.4818	2,493,385.7295
6	7	N 15°48'01.31" W	16.000	7	423,426.1253	2,493,401.1249
7	8	N 15°48'01.31" W	51.200	8	423,412.1842	2,493,450.3904
8	9	N 15°48'01.31" W	88.000	9	423,388.2230	2,493,535.0654
9	10	N 15°48'01.31" W	69.467	10	423,369.3080	2,493,601.9080
LONGITUD = 427.867 m						

Cabe mencionar que la vida útil de las tablaestacas se estimó en base a la metodología y velocidad de corrosión presentada en el informe de construcción de tablestacas metálicas en medios marinos (Capote, 1976). En la Tabla 8 se muestra la reserva natural del perfil AZ 18-800 con un módulo de sección elástico de $1,840 \text{ cm}^3/\text{m}$ admitiendo que el colapso de la estructura sucederá en las tablaestacas que presenten un momento máximo.

Tabla 8.- Estimación de la reserva natural de las tablaestacas AZ 18-800.

	Tablaestacas con momento máximo de $599.60 \text{ kN} - \text{m}/\text{m}$
Espesor inicial del perfil	8.5 mm
Módulo de sección inicial de cálculo	$1444.82 \text{ cm}^3/\text{m}$.
Espesor necesario para que se produzca un módulo igual al módulo de sección elástico.	6.67 mm
Pérdida admisible de espesor	1.82 mm
Corrosión estimada	0.17 mm/año
Reserva natural	10 años

En el caso de que se necesite prolongar la vida útil de las estructuras será necesario recurrir a alguna de las siguientes alternativas (Capote, 1976):

1. Modificar las características del perfil elegido.
2. Someter al perfil a revestimientos protectores.
3. Realizar una protección catódica.

4.1.1.2.- Especificaciones particulares.

Para la elaboración de las especificaciones se consultaron algunos proyectos publicados en la página oficial de COMPRANET (SFP, 2018).

0101.- Trazo y Nivelación del área de los trabajos, estableciendo puntos y ejes de referencia para la construcción de las obras. Incluye: Batimetría con equipo multi beam, suministro de los materiales, herramienta, lancha, traslados de personal a la zona de los trabajos, equipo topográfico de precisión (estación total y nivel), GPS, estadales, equipo para realizar batimetría en el fondo marino del eje de desplante del hincado, balizas, boyas, prismas, pintura, mano de obra, topógrafos calificados, deberá incluir baliceros, estadaleros, ayudantes generales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos. P.U.O.T (APIVER, 2017).

Definición.

Se entenderá como trazo y nivelación, al conjunto de operaciones que tenga que ejecutar la Contratista en campo, para localizar el trazo de los ejes de la obra y dar los niveles de trabajo, de acuerdo a lo indicado en los planos de proyecto y/o a lo ordenado por el Supervisor de Obra. El concepto incluye el suministro de materiales, herramienta, equipo topográfico de precisión (estación total y nivel), estadales, balizas, prismas, renta de lancha, combustibles, materiales como hilo, pintura, estacas, señalización de la zona de trabajo, mano de obra con topógrafos calificados, baliceros, estadaleros, ayudantes generales y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos (APIVER, 2017).

Requisitos de ejecución.

Previamente al inicio de la construcción de la obra, el Supervisor de Obra verificará y aprobará los trazos y niveles indicados en los planos de proyecto. Una vez verificados y validados los datos del control terrestre, la Contratista procederá bajo la supervisión correspondiente, a efectuar los trabajos requeridos para el buen desarrollo de la obra.

Al inicio de la obra el trazo deberá quedar reflejado en el levantamiento batimétrico inicial, el cual será su base para la determinación de áreas y volúmenes de trabajo reales.

Al finalizar la construcción, la Contratista efectuará un levantamiento topográfico integral que incluya toda la zona de trabajo, y con la información obtenida, elaborará un plano general de la obra en cuestión; lo anterior, con el propósito de verificar que la implementación de la obra haya resultado según lo señalado en líneas y niveles de proyecto y/o a indicaciones giradas y avaladas por el Supervisor de Obra (APIVER, 2017).

Alcances, criterios de medición y base de pago.

Alcances.

Al final de las actividades, la Contratista deberá realizar la limpieza de la zona de trabajo, desmantelando las instalaciones provisionales empleadas durante la construcción y cuidando que no queden residuos producto de su presencia y/o actividades.

Para los trabajos considerados en este concepto se podrán emplear aparatos e instrumentos topográficos de precisión, así como, nivel fijo, estatales, balizas, plomadas, estacas, etc (APIVER, 2017).

Criterios de medición.

Los volúmenes de obra cuantificados deberán ser avalados por el Supervisor de Obra, en el entendido de que las cantidades de obra que ejecute la Contratista carecerán de valor, si previamente a su ejecución, no entregó los planos solicitados al Supervisor de Obra para su aprobación, debiendo acompañarlos de las secciones correspondientes.

La Contratista conviene en que las libretas de campo, planos topográficos, seccionamientos, registros electrónicos y demás documentos generados por este concepto, serán entregados al Supervisor de Obra, en el momento que lo solicite y pasarán a ser propiedad de la Entidad independientemente del grado de avance en que se encuentre la obra.

La Contratista al elaborar su propuesta, deberá considerar las características del medio físico y las condiciones meteorológicas que imperan en la región, mismos cuyo costo deberá incluir en su análisis de precios unitarios, ya que la Entidad no hará ningún pago adicional por este concepto. Asimismo, se señala que la Entidad no reprogramará actividades a causa de retrasos imputables a la Contratista.

En caso de accidentes y/o daños a terceros, imputables a la Contratista, ésta será la única responsable, debiendo hacer las reparaciones necesarias por su cuenta y cargo; tomando en cuenta que cualquier atraso causado por incumplimiento en las actividades, será de su exclusiva responsabilidad (APIVER, 2017).

Base de Pago.

Para este concepto, la Contratista deberá considerar la magnitud de los trabajos topográficos requeridos para efectuar el control altimétrico y batimétrico a lo largo de todo el desarrollo de la obra, ya que la Entidad no hará ningún pago adicional por este concepto. La unidad de pago será el metro cuadrado (m^2) con una aproximación a un décimo (APIVER, 2017).

TABLA01.- Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 14.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: $1840 \text{ cm}^3/\text{m}$, momento de inercia: $41,320 \text{ cm}^4/\text{m}$ con peso de 161.4 kg/m (peso por pieza 2.259 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T.

TABLA02.- Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 15.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: $1840 \text{ cm}^3/\text{m}$, momento de inercia: $41,320 \text{ cm}^4/\text{m}$ con peso de 161.44 kg/m (peso por pieza 2.421 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T.

TABLA04.- Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 20.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: $1840 \text{ cm}^3/\text{m}$, momento de inercia: $41,320 \text{ cm}^4/\text{m}$ con peso de 161.44 kg/m (peso por pieza 3.228 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T (APIVER, 2017).

Definición

Las tablestacas son elementos constructivos aptos para ser hincados en el terreno y al unir varios entre sí permite formar barreras, el acoplamiento entre tablestacas se hace por deslizamiento de una pieza con otra, dado que cuenta con conexiones machihembradas a lo largo de la junta (CONAGUA, 2016). Éste concepto consiste en la adquisición del material tablestaca AZ 18-800 o similares según catálogo de conceptos, así como la movilización de los materiales, y el traslado de los perfiles a la zona de los trabajos y de hincado (APIVER, 2017).

La contratista deberá suministrar los elementos con las dimensiones y las características físicas señaladas en los planos del proyecto y en las presentes especificaciones particulares. La contratista deberá llevar un control y seguimiento de la movilización y traslado de cada una de las piezas, desde su salida de la zona de acopio hasta su recepción en la zona de los trabajos, mismo que deberá reportar a la residencia de obra. Los trabajos incluyen, movilización para su carga, aseguramiento en el traslado, así como depósito en la zona de los trabajos para su colocación e hincado. El transporte y almacenamiento de todos los materiales son responsabilidad exclusiva de la contratista y los realizaran de tal forma que no sufran alteraciones que ocasionen deficiencias en la calidad del material y por ende en la calidad de la obra. La tablestaca ni los candados se deberán descargar de golpe ni deberán ser arrastrados (APIVER, 2017).

Por suministro y habilitado de tablestaca metálica se entenderá al conjunto de acciones para el abastecimiento de éstos elementos, de acuerdo a lo descrito en el proyecto; incluyendo además el manejo, cargas y descargas, traslados, habilitado mediante cortes y uniones soldadas, el izaje, presentación, acople y alineamiento de tablestacas previo al hincado en el terreno, ligando entre si las piezas que formarán una estructura continua.

Requisitos de ejecución:

El contratista deberá emplear los procedimientos y equipos propuestos en el concurso, sin embargo, puede poner a consideración de la dependencia para su aprobación cualquier cambio que justifique un mejor aprovechamiento de su equipo y mejora en los programas de trabajo; pero en caso de ser aceptado no será motivo para que pretenda la revisión del precio unitario establecido en el contrato (CONAGUA, 2016).

El material a suministrar por parte del contratista es tablestaca metálica, machihembrada, tipo “z” fabricada en acero al carbón y rodada en caliente, las tablestacas pre-ensamblada en pares deben cumplir con un módulo de sección elástico no menor a $1,840 \text{ cm}^3/m$ y momento de inercia no menor a $41,320 \text{ cm}^4/m$.

El acoplamiento entre tablestacas se hace por deslizamiento de una pieza con otra, dado que cuenta con conexiones machihembradas a lo largo de la junta.

El equipo de acarreo podrá ser el que se considera propiedad del contratista y/o el de las uniones de transportistas de la localidad en donde se ejecuten las obras. No será motivo de variación del precio unitario para este concepto de trabajo, si el contratista recurre a la utilización de fleteros habiendo cotizado con equipo propio o viceversa y en caso de que se trate de fleteros serán de su exclusiva responsabilidad los problemas de tipo laboral que se generen con motivo de su utilización. El contratista deberá suministrar los elementos con las dimensiones y las características físicas señaladas en los planos del proyecto y las especificaciones particulares (CONAGUA, 2016).

Habilitado:

Se entenderá por habilitado al conjunto de operaciones necesarias para construir o fabricar cada uno de los elementos metálicos acorde a las longitudes necesarias para el correcto desarrollo del proyecto, considerándose parte del habilitado además, las acciones necesarias para el manejo de las tablestacas en el patio de almacenaje (elaboración de ranuras de manipulación). Como parte del habilitado también deberá considerarse que cuando se requiera elementos de longitudes mayores o menores a las suministradas, las juntas o cortes entre tablestacas, serán de las características señaladas en el proyecto, unidas por medio de soldadura y/o cortadas con equipo de corte oxígeno-acetileno. En la soldadura para prolongar la longitud de los elementos se utilizarán electrodos 7018, aplicando en la cara interna un cordón de fondeo, otros de paso caliente, relleno y acabado; en la cara externa después de retirar la escoria con esmeril y cepillar se aplicarán cordones de acabado, en cada soldadura deberá aplicarse la prueba de líquidos penetrantes.

Cuando por haber permanecido a la intemperie el material presente oxidaciones o deterioros, la dependencia efectuará las pruebas que juzgue convenientes para decidir si se aprueba o se desecha. Si es aceptado deberá limpiarlo el contratista por los medios mecánicos que indique la dependencia (abrasivos, chorro de arena o cepillo de alambre, etc.).

Alcances, criterios de medición y base de pago:

Alcances.

El transporte de la tablestaca deberá ser desde el lugar de adquisición hasta el sitio de utilización, el transporte y manejo del tablestacado se deberán efectuar con el mayor cuidado, para evitar cualquier deformación, ranuras, quebraduras y astilladuras. Las piezas deberán ser almacenadas en sitios limpios en todo momento, bien drenados y protegidos de los efectos de agua. Las piezas deberán ser almacenadas usando como separadores trozos de madera u otros elementos adecuados para evitar los deterioros que se puedan presentar por el contacto directo entre ellas.

No se aceptará el suministro y utilización de materiales que no cumplan con lo especificado anteriormente, ni aún en el supuesto de que serán mejorados posteriormente en el lugar de su utilización por el contratista de obra. En caso de que los materiales presenten deficiencias respecto a las características establecidas, se suspenderá inmediatamente el suministro del material, en tanto que el contratista los reemplace por otros adecuados, por su cuenta y costo, los atrasos en el programa de ejecución por concepto, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al contratista (CONAGUA, 2016).

Criterios de medición.

La medición del suministro de la tablestaca nueva será en toneladas (ton), con aproximación a dos decimales (0.01), como base para determinar el tonelaje suministrado se tomara el peso por metro lineal determinado por el fabricante para cada uno de los perfiles a utilizar.

Base de pago.

Primero.- Derivado a que es un material de producción extranjera, se podrán realizar pagos anticipados si el contratista lo requiriese de forma oficial o por medio de bitácora electrónica, siempre y cuando dicha solicitud se ponga bajo análisis de la supervisión externa, analizando las condiciones que rijan la obra debiendo presentar los compromisos y comprobantes de pago anticipado del material, avance de los trabajos, así como todo lo estipulado en los reglamentos y leyes aplicables de tal manera que la supervisión externa emita una opinión a la residencia de obra y sea esta última quien autorice la condición de pago. Bajo ninguna circunstancia el pago anticipado podrá ser mayor al 35% del monto total del valor de los suministros, se liquidará el total del material en el momento de llegada del mismo, se aplicarán sanciones correspondientes en base a lo estipulado en el contrato con esta entidad. La contratista dentro de sus alcances deberá considerar 2 personas para comprobar la existencia del material en la planta de fabricación de los perfiles AZ 18-800 para poder comprobar los pagos y anticipos correspondientes a dicho material (APIVER, 2017).

Segundo.- Una vez colocados (hincados) los perfiles acorde a lo indicado en proyecto, se determinará la longitud y tonelaje de los materiales realmente colocados (descontando los recortes realizados por proceso de hincado y/o habilitado) y se pagará la diferencia entre esta cantidad y la pagada en el primer evento, no se considerarán para pago los segmentos que no se puedan colocar por la resistencia del terreno (CONAGUA, 2016).

TABLA03.- Hincado de tablestaca AZ 18-800 de Skyline o similar de 14.00 a 20.00 m de longitud, en la zona indicada en los planos de proyecto, Incluye: Escantillón, traslados y transporte de la zona de almacenamiento (tierra firme) a la zona de hincado, Izajes necesarios, plomeos, movimientos necesarios, hincado con equipo vibrohincador, materiales, herramientas, equipos, mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos. P.U.O.T

Definición:

El hincado por vibración, consiste en penetrar la tablestaca en el terreno natural sin tener que recurrir a ningún tipo de excavación (CONAGUA, 2016).

Requisitos de ejecución:

El contratista deberá emplear los procedimientos y equipos propuestos en el concurso, sin embargo, puede poner a consideración de la dependencia para su aprobación cualquier cambio que justifique un mejor aprovechamiento de su equipo y mejora en los programas de trabajo; pero en caso de ser aceptado no será motivo para que pretenda la revisión del precio unitario establecido en el contrato (CONAGUA, 2016).

Para la construcción del tablestacado se considerará lo siguiente:

Ubicación, trazo y nivelación.

Los sitios donde serán hincadas las tablestacas se ubicarán de acuerdo con lo establecido en el proyecto o lo aprobado por la dependencia.

En el caso de que por las condiciones del terreno el hincado deba realizarse desde el agua, la contratista deberá considerar en su análisis el uso de equipos de sustentación (chalanos o barcas) (CONAGUA, 2016):

- Carga y amarre.
- Izaje.
- Alineación horizontal.
- Alineación vertical.
- Marco guía.

Carga y amarre.

El contratista será responsable de efectuar las actividades de arrastre, carga y amarre de los elementos o parte de la estructura ligera (tablestacas) totalmente terminada en patio de maniobras y programa de construcción vigente, en condiciones para ser cargado al chalan o por tierra para su transportación al sitio de hincado, por lo que deberá tomar las condiciones y precauciones necesarias para efectuar las maniobras de carga y amarre en forma segura, así como contar con el personal requerido para efectuar eficientemente las mismas, todos los procedimientos y equipos relacionados con la carga y la preparación para el transporte estarán sujetos a la revisión y aprobación del ingeniero (CONAGUA, 2016).

Izaje.

Para el despegue e izamiento y demás maniobras de la tablestaca se habrán preparado varios puntos a lo largo de las mismas, estructuralmente apropiado para estas maniobras, con el objeto de reducir al mínimo el peligro de flexión y deberán evitar usar eslingas alrededor del elemento para su izado con la finalidad de evitar daños a los candados producidos por los esfuerzos del izaje.

Los métodos de manejos de las tablestacas deberán de ser de tal manera que reduzcan a un mínimo la deflexión mientras se manejan deberá evitar mover la pieza formada por pares en forma horizontal, las maniobras se recomiendan sean ejecutadas por medio de bridas o eslingas colocadas por la parte superior de la pieza para realizar el izaje en forma vertical, en caso de ser necesario maniobras horizontales, deberá sujetarse al tercio de la longitud total del elemento con cables de sujetados a las asas previamente colocadas con soldadura de arco eléctrico y formaran un ángulo mínimo de 60° con respecto a eje longitudinal del elemento.

Las grúas de maniobras e izaje deberán de ser de una capacidad de carga 5 veces el peso del perfil estructural y una carrera libre excedente de 5 metros en relación a la longitud de la pieza en maniobra y el equipo de hincado, en el caso de que no exista el espacio y/o las condiciones para el hincado desde el barrote del río, la contratista deberá considerar el uso de equipos de sustentación (chalanos o barcasas), y además considerar como esta situación afectara la longitud requerida para el brazo de la grúa de izaje (CONAGUA, 2016).

Alineación horizontal.

La estructura se alineará siguiendo la línea horizontal señalada en el eje del proyecto para garantizar la alineación horizontal el contratista deberá emplear un marco guía en el cual serán colocado los elementos, este deberá garantizar la estabilidad y orientación de la estructura ya ensamblada, el contratista es el único responsable de la orientación de esta (CONAGUA, 2016).

Alineación vertical.

Para la alineación vertical de los elementos se verificara que la desviación respecto al eje longitudinal teórico de la tablestacas, previamente a su hincado, para lo cual deberá utilizar una guía mecánica que garantice la verticalidad y orientación del elemento de acuerdo al proyecto, en el ensamble previo a la hinca de los elementos la estructura final será formado por pares pre-ensamblados de la margen hacia el cauce, para lo cual el contratista deberá contar durante todo el procedimiento con una brigada topográfica que certifique la alineación vertical antes de proceder con la hinca hasta las cotas de proyecto (CONAGUA, 2016).

Marco guía.

Podrá ser temporal reutilizable de acero con un grado estructural menor al del perfil de la tablestaca, este deberá ser hincado en el sitio de la estructura de tablestacas a construir garantizar la orientación y estabilidad de los elementos aun ya ensamblados antes y durante el proceso de hincado (CONAGUA, 2016).

Alcances, criterios de medición y base de pago:

Alcances.

Bajo este concepto la contratista realizará todas las actividades necesarias utilizando el equipo propuesto y la mano de obra requerida para manejo, habilitado, acarreo, izaje, presentación y alineamiento de tablestacas metálicas de acuerdo a lo indicado en los planos de proyecto. No se pagará a la contratista ninguna cantidad adicional por las actividades que se efectúen en demasía, que se encuentren fuera de las líneas de proyecto y/o que no se encuentren dentro de los procedimientos constructivos propuestos para este contrato, y que sin embargo, sean requeridas para la correcta ejecución del manejo, habilitado, acarreo, izaje, presentación y alineamiento de tablestacas metálicas.

El equipo que se utilice para la construcción de tablestacados, será el adecuado para obtener la calidad especificada en el proyecto, en cantidad suficiente para producir el volumen establecido en el programa de ejecución detallado por concepto y ubicación, conforme al programa de utilización de maquinaria, siendo responsabilidad del contratista de obra su selección. Dicho equipo será mantenido en óptimas condiciones de operación durante el tiempo que dure la obra y será operado por personal capacitado.

Si en la ejecución del trabajo y a juicio de la dependencia, el equipo presenta deficiencias o no produce los resultados esperados, se suspenderá inmediatamente el trabajo, en tanto que el contratista de obra corrija las deficiencias, lo remplace o sustituya al operador. Los atrasos en el programa de ejecución detallado, que por este motivo se ocasionen, serán imputables al contratista de obra (CONAGUA, 2016).

El equipo enunciativo más no limitativo para la ejecución de los trabajos, será el siguiente:

- Grúas.
- Vibro-hincadores.
- Central hidráulica.

Criterios de medición

La medición del hincado por vibración de la tablestaca será en metros (m), con aproximación a dos decimales (0.01), como base para determinar la longitud de hincado se medirá con equipo topográfico los niveles definitivos de las tablestacas.

Base de pago

El concepto de trabajo correspondiente al hincado de tablestaca metálica, machihembrada, tipo “z” se pagará al precio unitario que se establezca en el contrato correspondiente los que incluyen los costos directos e indirectos, así como la utilidad del contratista (CONAGUA, 2016).

0104.- Carga y acarreo en el primer kilómetro, de la arena material de banco correspondiente al relleno de arena entre dos espigones existentes y un muro de retención a base de tablaestacas.

0105.- Sobreacarreo en los kilómetros subsecuentes al primero, del material de banco para relleno correspondiente al relleno de arena.

Definición.

El proyecto consiste en un relleno artificial de arena contenido entre dos espigones existentes y un muro de retención a base de tablaestacas, la finalidad del proyecto es mitigar la erosión en el margen del estero de Teacapán y recuperar la línea de costa del año 2003.

Construcción del relleno artificial de arena.

Consiste en realizar trabajos de alimentación artificial de arena, a base de 98,987.35 m³ de arena, con un ancho de playa variable que va de los 34 a los 91 metros, hasta la cota +1.00 m respecto al Nivel Medio del Mar.

La alimentación de arena se iniciara una vez terminado el muro de retención de tablaestacas, en el supuesto de que la arena sea extraída de los montículos producto de jagüeyes locales, esta actividad se hará con una motoconformadora en el área para conformar montículos de área, y su carga se hará con un cargador frontal a camiones tipo volteo de 14 m³ en donde harán un recorrido máximo de 5 km para su descarga en el lugar de la obra este material se acomodará con motoconformadora en el sitio del relleno, ésta actividad será repetitiva hasta terminar el volumen contratado.

Será necesario tener como referencia los perfiles topobatimétricos de la zona, anteriores y posteriores al vertimiento de arena. Se deberá tomar en cuenta los cambios en la composición granulométrica de la arena, así como su relación con el comportamiento de las condiciones hidro-meteorológicas.

Será la entidad contratante la encargada de definir la zona de préstamo para la alimentación artificial. En la Figura 14 se muestra la zona de extracción definida en el proyecto de Ingeniería, misma que se revisará previamente a los trabajos de extracción, autorizada por la contratista.

Materiales.

Los materiales serán:

- Arena procedente de los jagüeyes locales.

Se consideran los siguientes:

Jagüeyes.- Los montículos de arena producto de la excavación de jagüeyes locales, que serán aprovechados para el relleno de arena.

Los jagüeyes para obtener la arena, deberán ser desmontados y despalmados con cargo al concepto correspondiente, el Contratista deberá considerar además el pago de regalías, cargo e indemnización al propietario del jagüey; la construcción, reparación y/o mantenimiento del

camino de acceso al banco, la reposición de cercas, así como el uso de la maquinaria necesaria para su explotación, todos estos trabajos serán por parte del contratista con cargo al metro cúbico de material colocado amparado por el presente concepto, por lo que no será motivo de pago por separado.

Requisitos de ejecución.

El Contratista deberá emplear los procedimientos y equipo propuestos en el concurso, sin embargo, puede poner a consideración de la Dependencia para su aprobación cualquier cambio que justifique un mejor aprovechamiento de su equipo y mejora en el programa de trabajo.

El equipo de acarreo podrá ser:

- Propiedad de la unión de transportistas, en ese caso el contratista deberá de considerar las tarifas vigentes en la zona.
- Propiedad del contratista, en este caso previamente acordado con la unión de transportistas que sea la empresa quien realice los acarreos el contratista deberá incluir las regalías o cuotas sindicales que tenga que pagar dicha alianza o sindicato.

Para la ejecución de los trabajos, relativos a los acarreos de materiales, el Contratista podrá optar por el uso de unidades propias o el empleo de camiones de la alianza o sindicato de fleteros de la zona.

En el caso de que, el Contratista se decida por el empleo de camiones propiedad de alguna Alianza o Sindicato, será de su absoluta responsabilidad investigar las tarifas vigentes en la zona y de las condiciones como deben aplicarse. Adjuntando a su propuesta la cotización de las tarifas de la Alianza o Sindicato de Transportistas.

Los acarreos se efectuarán entre los sitios indicados en el proyecto o los ordenados por el Ingeniero y se realizarán siempre, siguiendo la ruta transitable más corta y conveniente.

Así mismo no será motivo de modificación de los precios unitarios o cualquier reclamación, el hecho de que el contratista tenga que efectuar los acarreos por rutas que le señale la Dependencia. En los casos en que la ruta que haya elegido el contratista ocasione daños, ya sea a la misma obra o a terceros, estos serán por su cuenta y riesgo.

Alcances, criterios de medición y base de pago.

Alcances.

Para fines de medición y pago, los precios unitarios de los conceptos de trabajo relacionados con este proyecto, incluirán la parte proporcional que corresponda por las diversas actividades que se indican a continuación.

Para los materiales a que se refiere este proyecto:

Acarreo Libre.- Queda incluido en el precio unitario del concepto de trabajo que lo origina, fijándose en las especificaciones la distancia de acarreo libre.

Acarreo.- Exclusivamente lo que corresponde al transporte de los materiales en la distancia que exceda al acarreo libre.

Acarreo en el primer kilómetro.- Comprende la carga del material en las unidades de transporte; transporte hasta un (1) kilómetro, descarga y estiba en su caso, en los sitios y con la disposición que señale el proyecto o que ordene el Ingeniero y la protección del mismo durante su traslado.

Acarreo en los kilómetros subsecuentes al primero.- Se refiere exclusivamente al transporte en cada kilómetro subsecuente al primero y hasta la distancia total indicada en el proyecto o la ordenada por el Ingeniero.

Criterios de medición.

Acarreo libre.- No es objeto de medición para fines de pago.

Para efectos de este proyecto; el acarreo de los materiales se medirá tomando como valor el que resulte de multiplicar el metro cúbico del material acarreado por la distancia en kilómetros de acarreo y el resultado se aproximará a la unidad.

Los materiales acarreados se medirán ya colocados en: metros cúbicos (m^3), con aproximación a la unidad inmediata superior.

Las distancias de acarreo, se medirán tomando como unidad el metro cúbico (m^3) con aproximación a la unidad inmediata superior.

Las distancias de Sobreacarreo, se medirán tomando como unidad el metro cúbico-kilómetro ($m^3 - km$) con aproximación a la unidad inmediata superior.

Para fijar las distancias que se consideran para el pago de acarreo, se seguirán las recomendaciones señaladas a continuación:

- Las distancias se medirán siempre por la ruta transitable más corta y conveniente que ordene el Ingeniero.
- La distancia de acarreo libre será la que en cada caso indique las especificaciones del proyecto para los respectivos conceptos de trabajo.
- La distancia de acarreo se determinará restando a la distancia total la distancia de acarreo libre.

No se medirán los acarreo de los materiales que por causas imputables al Contratista sufran daños o pérdidas y dichos materiales serán repuestos con cargo al mismo.

No se medirán los acarreo que no hayan ordenado la Dependencia o el Ingeniero, ni las mayores distancias que el Contratista recorra para facilitar sus maniobras.

Base de pago.

Los conceptos de trabajo relacionados con este proyecto se pagarán al precio unitario y por unidad de concepto de trabajos terminados que se establece en el Contrato y que incluye los costos directo, indirecto, cargo por financiamiento, la utilidad del Contratista y los cargos adicionales.

0106.- Acomodo del material de banco, incluye: motoconformadora, mano de obra, equipo y herramienta. (No incluye la adquisición de la arena).

Definición.

Para el vertido de la arena el método empleado será la de colocación directa, mismo que consiste en colocar arena directamente en la playa con al menos seis camiones de volteo con capacidad de hasta 14 m³.

Requisitos de ejecución.

Para que la obra de protección a base de tablaestaca sea aceptada por la contratante, con base en el control de calidad que ejecute el contratista de la obra, mismo que podrá ser verificado por el contratante cuando lo juzgue conveniente, se comprobará:

Calidad de los materiales.

Que los materiales para el relleno cumplan con las características establecidas en el proyecto de Ingeniería.

Líneas y niveles.

Que el nivel del relleno de arena cumpla con lo establecido en el proyecto aprobado por la contratista, con una tolerancia, que asegure la correcta terminación del relleno, para lo que se hará el levantamiento de secciones topográficas en las estaciones a cada diez metros.

Alcances, criterios de medición y base de pago.

Alcances.

Condiciones climáticas.

El acomodo de la arena será suspendido en el momento en que se presenten situaciones climáticas adversas, principalmente lluvia, vientos y oleaje extremos, y no se reanudará mientras no sean las adecuadas y la contratante lo autorice.

Criterios de medición.

Los volúmenes de la obra contenidos en el catálogo de conceptos son aproximados. Si por necesidades propias de la obra fuera preciso que de uno o varios conceptos de trabajo, se efectuará un volumen mayor o menor al indicado en el catálogo de conceptos, el contratista realizará el volumen que resulte, no teniendo por este motivo algún derecho al cambio de los precios unitarios originalmente aprobados y únicamente se pagarán los trabajos realmente ejecutados.

Base de pago.

Los conceptos de trabajo relacionados con este proyecto se pagarán al precio unitario y por unidad de concepto de trabajos terminados que se establece en el Contrato y que incluye los costos directo, indirecto, cargo por financiamiento, la utilidad del Contratista y los cargos adicionales.

Medidas para el cumplimiento de las condicionantes en materia de impacto ambiental.

Para cumplir con las indicaciones y dar cumplimiento a las condicionantes, la contratista se ocupará de cuidar los aspectos importantes que pudieran ocasionar alguna contaminación o daño ecológico en cualquiera de las áreas de trabajo que comprenden la obra.

En todas las áreas se delimitará y/o acordonará los límites permitidos para la correcta ejecución de los trabajos y no poner en riesgo la integridad de las personas que visiten el sitio o personas de la localidad, así mismo, se tendrán áreas con recipientes destinados para la recolección de basura y materiales sólidos, indicando cuales corresponden a desechos orgánicos y cuales a inorgánicos.

Todas las áreas de trabajo contarán con baños portátiles de acuerdo a especificaciones en cuanto al número de baños por trabajadores.

4.2 Estrategias usadas para presentar y persuadir a los involucrados en el proyecto.

Como estrategia para presentar esta obra de protección se elaboró una evaluación de impacto ambiental con la cual se demuestra los beneficios ambientales aportados por la construcción del relleno artificial de arena y que los impactos negativos son poco significativos y mitigables.

4.2.1.- Evaluación de impacto ambiental.

Decretos y programas de conservación y manejo de las áreas naturales protegidas.

Sitio RAMSAR.

La Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) es un tratado intergubernamental que ofrece un marco de referencia para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso racional de los humedales. La Convención entró en vigor en 1975 y en marzo de 1999 contaba con 114 Estados miembros (RAMSAR, 2018).

El estero de Teacapán se ubica en Marismas Nacionales (sitio RAMSAR 732) (RAMSAR, 2018) sin embargo el área del proyecto es un área impactada donde la vegetación es inexistente por lo que no aplica al proyecto .

Leyes.

La obra requiere de una Manifestación de Impacto Ambiental de acuerdo con el artículo 28, fracción I y fracción X, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carbo ductos y poliductos; y X.- Las obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales, deberán contar con la autorización en materia de impactos ambiental por parte de la SEMARNAT (SEMARNAT, 2015).

En el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Evaluación del Impacto Ambiental en su Capítulo II de las obras o actividades que requieren autorización en materia de impacto ambiental y de las excepciones, el proyecto se ubica en (SEMARNAT, 2017):

A. Hidráulicas

III. Proyectos de construcción de muelles, canales, escolleras, espigones, bordos, dársenas, represas, rompeolas, malecones, diques, varaderos y muros de contención de aguas nacionales, con excepción de los bordos de represamiento del agua con fines de abrevadero para el ganado, autoconsumo y riego local que no rebase 100 hectáreas;

VII. Depósito o relleno con materiales para ganar terreno al mar o a otros cuerpos de aguas nacionales.

Según el Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar (SEGOB, 2018).

Sección III De los terrenos ganados al mar.- Artículo 39.- Sólo podrán ejecutarse obras para ganar artificialmente terrenos al mar o a cualquier otro depósito de aguas marítimas, con la previa autorización de la Secretaría y con la intervención que corresponda en el ámbito de su competencia a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, las que determinarán la forma y términos para ejecutar dichas obras.

Cuando se trate de obras portuarias o marítimas, la supervisión y vigilancia la ejercerá la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. **Normativa de la SCT para Puertos.**

4.2.1.1.- Identificación, descripción y evaluación de los impactos ambientales.

Identificación de impactos.

Para la identificación de impactos, se diseñó una matriz de interacción basada en la Matriz de Leopold (Leopold, 1971) y adaptada a las condiciones particulares del proyecto, en la cual se correlaciona las actividades que se realizarán durante las diferentes etapas del proyecto, con los atributos ambientales; en la que cada intersección de columna y renglón determina el impacto que tiene posibilidad de ocurrir en las diferentes etapas del proyecto (Canter, 1998). Para el llenado de la matriz de identificación de impactos (Tabla 9), se empleó la siguiente simbología:

A = Adverso significativo, cuando el impacto sobre el factor incide en forma negativa o lo puede modificar durante un lapso de tiempo prolongado.

a = Adverso No significativo, cuando el factor incide en forma negativa, pero la alteración no se manifiesta en gran medida.

B = Benéfico significativo, en el caso en que la actividad prevista forma parte de una acción positiva o sus efectos repercuten sobre una acción positiva.

b = Benéfico No significativo, cuando la actividad dentro de la obra, beneficia de alguna manera al medio.

Las celdas vacías representan las etapas del proyecto que no presentan impacto sobre los recursos.

Tabla 9.- Matriz de Leopold.

Medio	Factor	Componente	Indicador	Etapas del proyecto				Totales					
				Preparación del sitio		Construcción	Mantenimiento	A	a	B	b		
Atmósfera	Aire	Calidad del aire	Emisión de partículas a la atmósfera		A	A		a	2	1			
				a	a	a				3			
Marino	Físico	Calidad del agua	Sólidos suspendidos			a				1			
			Composición química										
		Morfología de las costas	Modificación de línea de costa			B						1	
			Perfil de playa	Pendiente de playa			B						1
		Ancho de playa				B						1	
		Batimetría											
		Corrientes	Dirección de flujo				a				1		
		Transporte litoral	Deriva litoral				a				1		
	Suelo marino	Asentamientos											
	Biótico	Fauna marina	Diversidad										
			Modificación del hábitat			a	a				2		
		Flora marina	Diversidad										
			Modificación del hábitat			a	a				2		
		Fauna terrestre	Diversidad										
Modificación del hábitat													

La tabla continúa en la siguiente página.

		Flora terrestre	Diversidad											
			Modificación del hábitat											
Terrestre	Geología	Suelo	Calidad del suelo	a	B						1	1		
			Pérdida del suelo											
	Agua	Hidrología	Drenaje											
Perceptual	Paisaje		Calidad del paisaje	Fragilidad										
		Calidad visual		a	B	a				2	1			
Socioeconómico	Aspectos sociodemográficos	Economía	Derrama económica		b	b	b						3	
			Plusvalía del suelo					b					1	
		Bienestar social	Recreación											
Total A=					1	1				2				
Total a=				2	2	4	5	1			14			
Total B=						5						5		
Total b=					1	1	1	1					4	

De los 25 impactos estimados como susceptibles de poder manifestarse a causa de las diferentes actuaciones de la obra, nueve de ellos tienen un carácter positivo dado que la morfología costera y el espacio urbano ocupados sufren una alteración positiva. El resto de impactos señalados son de carácter negativo, predominando los clasificados como adversos no significativos.

Ninguno de los impactos analizados y clasificados se ha estimado crítico debido a que el modelo numérico demostró que el impacto en las corrientes no es significativo. No existe ninguna actuación de la obra que suponga una pérdida permanente de la calidad de las condiciones ambientales.

Retomando los resultados de la matriz de Leopold, serán valorados en términos de magnitud e importancia en la relación proyecto-sistema ambiental, que aporte elementos de juicio en la descripción de impactos y las medidas de mitigación de impactos ambientales aplicables en cada caso. Para ello, se determinó la definición y el alcance de los criterios en la calificación de los impactos en los términos señalados (magnitud e importancia). Los impactos se califican en una escala de 1 a +/-10 según su magnitud y de 1 a 10 según su importancia. Como resultado de ello, se identifican los impactos más relevantes que requieren su atención y tratamiento. En la calificación de impactos, se identifica y marca cada acción propuesta y su correspondiente efecto (Canter, 1998).

El procedimiento consiste en recorrer la hilera correspondiente a cada acción, a fin de marcar con una diagonal (de la esquina superior derecha a la esquina inferior izquierda) cada una de las celdas de interacción con los elementos de deterioro del medio que recibirán el impacto de esas acciones. En cada una de las celdas marcadas con diagonal se anotará el valor de la magnitud en la mitad superior izquierda y el valor de la importancia en la mitad inferior derecha, pasando a analizar y discutir cada impacto para ajustar los valores preliminares asignados a las interacciones o para modificar el diseño de las obras propuestas. El peso relativo que se asigna a cada variable y los ajustes que se hacen a los valores, se determinan a nivel de grupo interdisciplinario.

En particular, para la estimación de los valores de **magnitud** de los impactos ambientales de cada una de las acciones consideradas, inicialmente se determinaron las interacciones existentes entre acción programada y factor ambiental; los valores de magnitud se estimaron considerando los siguientes elementos (SEMARNAT, 2017):

- Extensión o cobertura del impacto
- Duración del impacto
- Continuidad
- Intensidad del impacto
- Acumulación y/o sinergia del impacto considerado

Estos elementos fueron evaluados por el consenso de los expertos (cualitativa), en escala de 1 a 10 asignándose valores negativos a los impactos adversos y positivos a los impactos benéficos. El valor 0 no existe y es en ese caso cuando no hay interacción directa entre el factor ambiental y el componente del proyecto.

Para la estimación de la **importancia** se consideraron los elementos siguientes (SEMARNAT, 2017):

- Reversibilidad
- Mitigabilidad
- Residualidad
- Valor económico
- Valor sociocultural

Estos elementos fueron evaluados en escala de +1 a + 10. Identificando con un signo negativo al impacto adverso y con signo positivo a los impactos benéficos.

Cada celda de intersección se divide con una diagonal y se procede del siguiente modo:

a) En la parte superior izquierda se indica la magnitud del impacto, es decir, el grado de extensión o escala del impacto precedido del signo + o - según sea un impacto positivo o negativo. La magnitud se puntúa del 1 al 10.- 1 si la alteración es mínima y 10 si es máxima (el cero no es válido).

b) En la parte inferior derecha se hará constar la importancia, es decir, el grado de intensidad o grado de incidencia de la acción impactante sobre un factor. La importancia se puntúa del 1 al 10 (el cero no es válido).

En la Tabla 10 se muestra el resultado de multiplicar la magnitud y la importancia de cada celda al desaparecer la diagonal que las dividía.

Tabla 10.- Total del puntaje de la evaluación de impacto ambiental.

Medio	Factor	Componente	Indicador	Etapas del proyecto				Totales	
				Preparación del sitio		Construcción	Mantenimiento		
Atmósfera	Aire	Calidad del aire	Emisión de partículas a la atmósfera		-100	-20		-20	-140
				-1	-4	-1			-6
Marino	Físico	Calidad del agua	Sólidos suspendidos			-3			-3
			Composición química						
		Morfología de las costas	Modificación de línea de costa			80			80
		Perfil de playa	Pendiente de playa			8			8

La tabla continúa en la siguiente página.

			Ancho de playa			40			40	
			Batimetría							
			Corrientes	Dirección de flujo				-4		-4
			Transporte litoral	Deriva litoral				-4		-4
			Suelo marino	Asentamientos						
	Biótico	Fauna marina	Diversidad							
			Modificación del hábitat			-1	-1		-2	
		Flora marina	Diversidad							
			Modificación del hábitat			-1	-1		-2	
		Fauna terrestre	Diversidad							
			Modificación del hábitat							
	Flora terrestre	Diversidad								
Modificación del hábitat										
Terrestre	Geología	Suelo	Calidad del suelo		-1	30			29	
			Pérdida del suelo							
	Agua	Hidrología	Drenaje							
Perceptual	Paisaje	Calidad del paisaje	Fragilidad							
			Calidad visual	-1		21	-1		19	
Socioeconómico	Aspectos sociodemográficos	Economía	Derrama económica		6	6	6		18	
			Plusvalía del suelo					9	9	
		Bienestar social	Recreación							
				-2	-99	159	-5	-11	42	

De acuerdo a los resultados obtenidos de la matriz de impacto ambiental, se tiene las siguientes conclusiones:

Se detectaron 25 impactos derivados del relleno artificial de arena de los cuales 9 son benéficos.

Analizando el resumen de la matriz de impacto ambiental, se puede concluir que la carga y acarreo de la arena para el relleno es la actividad más impactante del proyecto, clasificado dentro de la escala de ponderación de la metodología con -99 que la hacen un impacto moderado. En segundo nivel el mantenimiento del sitio con -11 y en tercero la construcción del muro de tablaestacas que se clasificó con -5 puntos por lo que es un impacto negativo con el proyecto y finalmente la etapa de construcción que se clasificó con 9 impactos positivos asumiendo un puntaje positivo de +159 en función de los impactos benéficos en la modificación de la línea de costa y el sector socioeconómico.

Medidas preventivas y de mitigación de los impactos ambientales.

Descripción de la medida o programa de medidas de la mitigación o correctivas por componente ambiental.

Las medidas correctoras que a continuación se detallan son asimilables a las tres fases de la obra, es decir, a la fase de preparación del sitio, de construcción y de operación y mantenimiento (Canteras et al., 1995):

- Los caminos utilizados por los camiones y el resto de maquinaria se regarán en períodos secos prolongados y siempre que por las condiciones de trabajo se considere necesario, al objeto de evitar el levantamiento de polvo.
- Limitación de velocidades en las calles adyacentes a la obra.
- También se restringirá el número de vehículos trabajando para que la posible carga contaminante no presente un valor apreciable.
- Evitar o reducir ruidos específicos, tales como los de los motores sin silenciador. Se aconseja el empleo de silenciadores reactivos.
- Realizar las labores más externas con mareas de altos coeficientes con el fin de reducir el tiempo en contacto con las aguas.
- Evitar el vertido indeseado de productos nocivos.
- Realizar las operaciones de relleno bajo condiciones de clima marítimo suaves, de forma que su clasificación y redistribución por el oleaje se realice de forma gradual y evitar pérdidas excesivas.
- Evitar operar en época de reproducción de las especies bentónicas y nectónicas, esto es, cuando la temperatura del agua es mayor. .

Basados en la metodología de Benítez. (2008) en las Tablas 11, 12, 13 y 14 se muestran las medidas de corrección basado en el medio y sus impactos respectivos (Benítez, 2008).

Tabla 11.- Medidas de corrección basado en los impactos por etapa de proyecto.

Medio	Impacto	Medida de prevención o Mitigación	Descripción
Atmósfera	Desprendimiento de partículas.	El promovente garantizará que durante la realización de las actividades de acarreo de materiales de construcción la caja de los camiones sea cubierta con lonas de plástico.	El desprendimiento de partículas a la atmósfera es un impacto compatible que puede ser reducido mediante colocación de lonas a los camiones.
Marino	Re-suspensión de partículas e incremento de turbidez del agua.	En otras palabras, realizar en forma gradual el relleno para la ampliación de la playa para evitar la formación de plumas de turbidez.	Esta medida prevendrá el efecto acumulativo de la concentración de sólidos en suspensión.
	Modificación de la dirección de flujo de corrientes.	No es posible aplicar medida de preventiva o de mitigación.	Las estructuras de tablaestaca modificará de manera muy localizada el flujo de corrientes.
	Disminución de abundancia y diversidad de fauna y flora.	No es posible aplicar medida de preventiva o de mitigación.	La intensidad del impacto sobre flora y fauna es baja.
Terrestre	Disminución de la abundancia y diversidad de flora y fauna.	No aplica.	Los predios donde se pretende desarrollar el proyecto se encuentran ausentes de vegetación manglar, por lo que los impactos sobre este componente son prácticamente nulos.
	Disminución de la calidad del suelo.	No hay medida de mitigación.	Con la colocación de estructuras permanentes en el predio la calidad del suelo no retornará a su condición original.
Perceptual	Disminución de calidad del paisaje.	No hay medida de mitigación.	La afectación es de corto plazo.
Socioeconómico	Sin impactos negativos.	No hay medida de mitigación.	

Etapa: Preparación del sitio.

Tabla 12.- Medidas de mitigación para la etapa de preparación del sitio.

Actividad	Impacto identificado	Medida de mitigación propuesta
Trazo y nivelación	Paisaje	La presencia de la brigada es de corto plazo, no requiere medidas de mitigación.
Habilitación de patio de maniobras	Atmosfera	Se realizarán riegos con pipa para evitar el levantamiento del polvo por la acción del movimiento de máquinas.
	Flora y fauna terrestre	Dado que prácticamente no existe vegetación en la zona, no se requieren medidas de mitigación. Se procurará ahuyentar a las aves presentes con el fin de que no sean afectadas. Esta misma actividad es considerada como medida de prevención, ya que no se implementarán programas de captura y reubicación, además de que se evitará que por la presencia de trabajadores, estas aves modifiquen sus patrones alimenticios al buscar residuos de comida en la zona.
	suelo	Las acciones sobre el patio de maniobras son a corto plazo y no requieren medidas.
	Paisaje	Las acciones sobre el patio de maniobras son a corto plazo y no requieren medidas.
	Economía local	Por el carácter benéfico de la contratación de personal para estas actividades, no se requiere de medidas de mitigación.

Etapa: Construcción.

Tabla 13.- Medidas de mitigación para la etapa de construcción.

Actividad	Impacto identificado	Medida de mitigación propuesta
Carga y acarreo de arena.	Atmósfera	Para minimizar la generación de emisiones a la atmósfera por los vehículos con motor de combustión interna (camiones de volteo y retroexcavadoras), éstos últimos deberán contar con certificados de baja emisión de contaminantes.
	Suelo	Se aprovechará un residuo de la excavación de jagüeyes con fines agrícolas como el material que se utilizará como relleno de la costa.
	Economía local	Por el carácter benéfico de la contratación de personal para estas actividades, no se requiere de medidas de mitigación.
Acomodo de la arena en el relleno.	Calidad del agua	En caso de existir condiciones ambientales adversas, se deberá interrumpir el trabajo, con el fin de evitar una dispersión excesiva de los sedimentos.
	Suelo	Por el carácter benéfico de la alimentación de la playa, no se requiere de medidas de mitigación.
	Fauna	Dentro de la zona para el vertido de arena, solo algunos cangrejos y moluscos podrán verse afectados por el relleno de playa. Queda estrictamente prohibida la captura de cualquier tipo de organismos.
	Atmósfera	Para minimizar la generación de emisiones a la atmósfera por los vehículos con motor de combustión interna (motoconformadoras), éstos últimos deberán contar con certificados de baja emisión de contaminantes.
	Paisaje	Se realizarán los trabajos sobre el área marina. Adicionalmente se colocarán boyas de señalización en el área marina.
	Economía local	Por el carácter benéfico de la contratación de personal para estas actividades, no se requiere de medidas de mitigación.

Tabla 14.- Medidas de mitigación para la etapa de construcción.

Actividad	Impacto identificado	Medida de mitigación propuesta
Construcción de muro de tablaestacas.	Calidad del agua	Se deberá recolectar todo tipo de aceite expulsado por la maquinaria con el fin de evitar contaminación.
	Suelo marino	No existen medidas de mitigación.
	Flora y fauna marina	La flora marina es sumamente escasa, además de que no se observaron especies consideradas en la NOM 059, por lo que no se requiere de medidas de mitigación. La también escasa fauna marina será ahuyentada o evadirá la zona mientras exista actividad humana.
	Atmósfera	La maquinaria utilizada en el hincado de las tablaestacas deberá contar con certificaciones de bajas emisiones.
	Paisaje	El paisaje en el área de playa se verá afectada por la presencia de equipos. Como medida de compensación, se deberá señalar adecuadamente el área de trabajo, para evitar accidentes.
	Economía local	Por el carácter benéfico de la contratación de personal para estas actividades, no se requiere de medidas de mitigación.

Programa de vigilancia ambiental.

El plan de vigilancia ambiental debe funcionar como un sistema abierto según (Canteras et al., 1995), con capacidad para modificar, cambiar o adaptar el Proyecto a las nuevas situaciones que se planteen. Consistirá en el control de los parámetros prefijados que sirven como indicadores de las alteraciones definidas en el estudio de evaluación. En este sentido, los aspectos a contemplar son (Canteras et al., 1995):

1. Comprobación directa de la realización de las medidas correctoras encaminadas a minimizar los efectos producidos por el relleno. Si fuera necesario, ajustarías o modificarlas para su correcto funcionamiento.
2. Verificar la fidelidad de las obras durante la ejecución del relleno a los parámetros de diseño.
3. Verificar el origen, calidad, cantidad y correcta puesta en obra de los productos y materiales utilizados.
4. Realizar controles periódicos de ruidos, inmisión de gases y polvo en la atmósfera.
5. Realizar un seguimiento estacional de las variaciones topográficas.
6. Estudiar el comportamiento de las aves acuáticas ante los cambios sufridos por el litoral.
7. Durante la realización de las obras se deberá vigilar la incidencia de las obras en el tráfico portuario.

Pronósticos ambientales regionales.

Descripción y análisis del escenario sin proyecto.

Por tratarse de un sistema ambiental ya modificado por el hombre, para el análisis de las condiciones actuales y futuras, se seleccionaron como indicadores el uso del suelo, el paisaje y la playa, por ser estos los componentes ambientales más relevantes actualmente. La flora y la fauna terrestre que suelen ser componentes ambientales importantes en cualquier sistema ambiental, en este caso se encuentran ausentes.

Uso de suelo: Actualmente el área no tiene un uso, sus reducidas dimensiones y características no son aptas para el desarrollo de actividades.

Paisaje: El paisaje del área de influencia del proyecto se encuentra dominado por elementos artificiales que consisten en espigones. El área representa una discontinuidad de este paisaje transformado, ya que no presenta vegetación y la condición de la playa exhibe un grado evidente de erosión.

Playa: Actualmente la playa se encuentra completamente erosionada, el cual está afectando la superficie disponible como área de recreación y para embarcadero. El retroceso de la línea de costa representa una amenaza para las instalaciones ubicadas en la zona litoral (CETMAR No23), particularmente durante condiciones de tormenta.

Descripción y análisis del escenario con proyecto.

Uso de suelo: La ejecución del proyecto permitirá el desarrollo de la aptitud turística del área.

Paisaje: En el área se mejorará la continuidad del entorno y estará en armonía con la naturaleza.

Playa: La restauración de la playa aumentará sus funciones ambientales, actualmente disminuidas, como son la atenuación de los procesos de erosión, protección a las instalaciones ubicadas en la zona litoral y creación de nuevo hábitat para la fauna, especialmente aves y moluscos.

Descripción y análisis del escenario considerando las medidas de mitigación.

Pronóstico ambiental.

El escenario ambiental que se espera con el relleno de la playa promoverá una mejora en la zona de playa. El área donde se pretende la construcción del relleno artificial de arena se encuentra con escasa vegetación. En cuanto a la fauna, no se observa mucha diversidad de especies en el área en donde se pretende desplantar el proyecto, y las especies observadas pueden moverse fácilmente, como lo son algunas aves.

En este sentido y en relación con la construcción del proyecto no se prevén variaciones que demeriten en la calidad de los elementos naturales del sitio, debido a las condiciones actuales que predominan en el área y el tipo de proyectos que se ubican en las colindancias del área donde se pretende la instalación del proyecto sino por el contrario, el proyecto permitirá estabilizar la zona de playa.

Evaluación de alternativas.

El relleno artificial de arena en el estero de Teacapán, Escuinapa, Sinaloa:

- Se ubica en una zona urbana muy modificada en cuanto a sus características y valores naturales.
- El devenir de este espacio ha estado condicionado por las sucesivas adaptaciones del Estero a los procesos productivos de la región.
- El medio natural que acogerá el relleno carece de valores relevantes, en cuanto a fauna, flora, ecosistemas y paisaje.
- Respecto de las condiciones pre- operacionales, la morfología costera se verá afectada de forma positiva, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos.
- Los impactos negativos resultan en que ninguno está calificado de crítico. Se incluye un conjunto de medidas para su minimización.

El área de estudio donde se realizará el relleno artificial de arena dentro del Estero de Teacapán no alterará la vegetación natural presente (marina y/o terrestre) debido al alto grado de perturbación que actualmente se tiene.

Las posibles afectaciones en la fauna (terrestre y marina) son igualmente mínimas y presentan medidas de mitigación adecuadas para asegurar que no existirán daños significativos al ambiente.

Debido a la adecuada planeación y la aplicación de modelado numérico se puede asegurar el buen funcionamiento de las estructuras, así como su escasa afectación al ambiente, cabe mencionar que si la alteración de las corrientes a causa de la obra es significativa se estaría solucionando un problema pero causando otro y la EIA arrojaría valores negativos dando como resultado que la obra no se pueda construir.

El área destinada al relleno es viable, ya que se ajusta a los reglamentos ecológicos vigentes, además de que al ser una zona no incluida en algún ordenamiento, se ajusta a lo estipulado en las leyes ambientales federales vigentes, sin impactos negativos importantes y significativos en los ecosistemas de la zona aledaña al sitio de ejecución propuesto.

V. Administración del proyecto.

5.1.- Cronograma de actividades.

En la siguiente Figura 49 se muestra el programa de obra propuesto a seguir para la construcción de la medida de actuación. Se propuso una duración de 153 días de los cuales el concepto de relleno artificial de arena lleva la mayor parte. En cuanto al muro de tablaestacas el suministro del material puede tardar de 8 a 9 semanas para comenzar con el hincado.

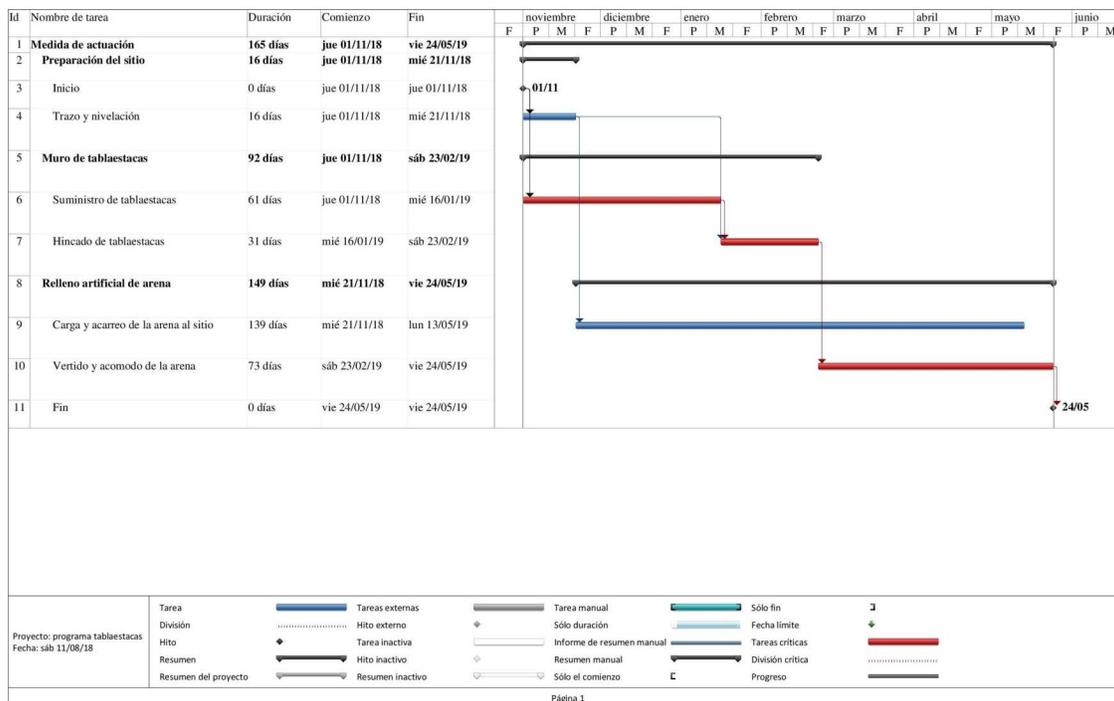


Figura 49.- Programa de obra tentativo del relleno artificial de arena.

5.2.- Recursos.

El presupuesto tentativo de la medida de actuación cuenta con un precio de venta aproximado de \$32, 749,256.54 en la Tabla 15 se muestran los porcentajes de sobre costo.

Tabla 15.- Análisis del costo de la obra.

Presupuesto a costo directo.		\$22,142,554.57
Indirectos de oficina.	6.00 %	Factor de sobre costo de 1.2750 integrado de los porcentajes de la columna anterior.
Indirectos de campo.	7.00 %	
Financiamiento.	2.07 %	
Utilidad.	10.00 %	
Cargos adicionales.	0.50 %	
	Subtotal	\$28,232,117.70
IVA	16.00 %	\$4,517,138.83
	Precio de venta	\$32,749,256.54

Los porcentajes de indirectos se propusieron de acuerdo a las recomendaciones de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) y del Instituto Mexicano de Ingeniería de Costos (IMIC) (CMIC, 2018) además el financiamiento se calculó para un periodo de 6 meses y considerando un interés bancario del 30%. En la Figura 50 se muestra el presupuesto desglosado.

Presupuesto					
Clave	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
MED01	Medida de actuación				\$28,232,729.11
PRE01	Preparación del sitio				\$343,575.97
0101	Trazo y Nivelación del área de los trabajos, estableciendo puntos y ejes de referencia para la construcción de las obras. Incluye: lancha, equipo topográfico de precisión (estación total y nivel), GPS, equipo para realizar batimetría en el fondo marino del eje de desplante del hincado, balizas, boyas, prismas, pintura, mano de obra, topógrafos calificados, deberá incluir baliceros, estadaleros y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos. P.U.O.T.	m2	25,755.32	\$13.34	\$343,575.97
RELL01	Relleno artificial de arena				\$27,889,153.14
RELL02	Relleno de arena				\$7,876,423.44
0104	Carga y acarreo en el primer kilómetro, del material de banco para relleno correspondiente al relleno de arena entre dos espigones existentes.	m3	98,987.35	\$23.54	\$2,330,162.22
0105	Sobreacarreo en los kilómetros subsecuentes al primero, del material de banco para relleno correspondiente al relleno de arena entre dos espigones existentes.	m3-km	494,936.75	\$7.52	\$3,721,924.36
0106	Acomodo del material de banco, incluye: motoconformadora, mano de obra, equipo y herramienta. (No incluye la adquisición de la arena).	m3	98,987.35	\$18.43	\$1,824,336.86
RELL03	Muro de tablaestacas				\$20,012,729.70
TABLA01	Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 14.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: 1840 cm3/m, momento de inercia: 41,320 cm4/m con peso de 161.4 kg/m (peso por pieza 2.259 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T.	ton	171.69	\$28,485.15	\$4,890,615.40
TABLA02	Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 15.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: 1840 cm3/m, momento de inercia: 41,320 cm4/m con peso de 161.4 kg/m (peso por pieza 2.421 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T.	ton	336.52	\$28,485.15	\$9,585,822.68
TABLA04	Suministro de tablestaca rolada en caliente, en pares, AZ 18-800 de Skyline o similar de 20.00 m de longitud a base de acero grado A 572 Gr. 60, con un módulo de sección: 1840 cm3/m, momento de inercia: 41,320 cm4/m con peso de 161.4 kg/m (peso por pieza 3.228 ton), Incluye: Suministro puesto en obra, embarque y trámites necesarios, traslados desde la zona de suministro hasta el patio de almacenamiento, herramienta, equipo mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos P.U.O.T.	ton	171.10	\$29,454.20	\$5,039,613.62
TABLA03	Hincado de tablestaca AZ 18-800 de Skyline o similar de 14.00 a 20.00 m de longitud, en la zona indicada en los planos de proyecto, Incluye: Escantillón, traslados y transporte de la zona de almacenamiento (tierra firme) a la zona de hincado, Izajes necesarios, plomeos, movimientos necesarios, hincado con equipo vibrohincador, materiales, herramientas, equipos, mano de obra y todo lo necesario para la correcta ejecución de los trabajos. P.U.O.T	m	2,600.00	\$191.03	\$496,678.00
Subtotal de Presupuesto					\$28,232,729.11
				Impuesto 16.00 %	\$4,517,236.66
				Total	\$32,749,965.77

Figura 50.- Presupuesto del relleno de arena artificial de arena.

VI.- Conclusiones y recomendaciones.

6.1.- Conclusiones.

El objetivo de este proyecto fue encontrar elementos clave para diseñar una obra de protección costera en el estero de Teacapán, en este sentido se evaluó el comportamiento hidrodinámico del estero ante condiciones hidro-meteorológicas extremas y ante la construcción de un relleno artificial de arena en el margen derecho del estero.

En este estudio se revisó la hidrodinámica y los cambios en la línea de costa del estero de Teacapán utilizando modelación numérica y Sistemas de Información Geográfica. Los elementos clave que se obtuvieron del estudio fueron los siguientes:

- Del análisis de sedimentos, se demostró que la arena de los jagüeyes y la arena nativa del frente estuarino del CETMAR N°23 cuentan con una granulometría similar por lo que puede utilizarse para diseñar una propuesta de actuación en el estero como lo es un relleno artificial de arena.
- El análisis de los cambios de la línea de costa reveló que los márgenes al interior del estero se encuentran en un estado erosivo y, en contraste, los extremos de la boca del estero se presentan un estado de acreción, de aquí que el relleno artificial de arena se propuso en una zona erosiva identificada con este análisis.
- De la hidrología de la zona se construyó un hidrograma total mediante la suma de los hidrogramas de las Subcuencas El Palote-Higueras y R. Las Conchas, resultando que el hidrograma de El Palote-Higueras fue ligeramente mayor al otro posiblemente por ser una cuenca de mayor área, el hidrograma total constó de un tiempo base de aproximadamente 90 horas y un gasto pico de $1,265.04 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 20 años.
- El modelo numérico MIKE21 fue calibrado con datos reales del nivel de superficie libre del agua con dos puntos al interior del estero, si bien se realizó con pocos datos se logró un buen ajuste utilizando una viscosidad de $0.28 \text{ m}^2 / \text{s}$ y un número de Manning de 0.025 ($40 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$).
- Según los resultados obtenidos en las simulaciones las mayores velocidades de las corrientes estuarinas se localizan en la boca de Teacapán y además se encontró que la marea de tormenta es un elemento clave en el diseño de obras de protección al ser más importante que un gasto extraordinario, ya que la sobreelevación del nivel de mar provoca una mayor inundación y genera mayores velocidades estuarinas en la boca de Teacapán.
- Con la modelación se verificó la hipótesis de que el relleno artificial de arena no incrementa las velocidades de las corrientes al norte o sur de la obra por lo que no se está afectando al entorno circundante y por este hecho la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) arrojó valores positivos, además el muro de retención del relleno debe diseñarse para resistir al menos velocidades del orden de los 40 cm/s .

6.2.- Recomendaciones.

Se necesita que se realice un estudio hidrológico de la cuenca El Palote-Higueras que forma parte del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual con el propósito de obtener información precisa y detallada de los caudales de agua dulce que se aportan al estero de Teacapán. Además se sugiere que se instalen estaciones meteorológicas capaces de medir precipitaciones, velocidad y dirección del viento, en las cercanías del poblado de Teacapán con el fin de obtener datos precisos de estas variables y mejorar la calibración del modelo numérico, ya que los datos utilizados en este trabajo se obtuvieron de estaciones climatológicas de poblados cercanos al lugar.

Se recomienda realizar un levantamiento topográfico del poblado de Teacapán debido a que en la simulación de la inundación se propuso que el poblado se encuentra a una cota de 2 metros sobre el nivel del mar lo cual es un promedio, esto es con el propósito de obtener niveles exactos y observar las posibles tendencias que no fueron detectadas en este estudio.

Una alternativa a considerar para evaluar mejor el funcionamiento del estero es extender la malla no estructurada (es decir prolongarla hacia el interior del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava-Majahual) y que tome como parte de su dominio a la Laguna de Agua Grande y al Estero Puerta del Río, asimismo extender la malla en el frente oceánico prolongándola al menos otros diez kilómetros hacia mar adentro. Con este aumento en el dominio espacial se esperaría que las simulaciones arrojen resultados tentativamente diferentes a los conseguidos con este trabajo debido a la limitación del software de prueba.

En cuanto a la medida de actuación propuesta se recomienda diseñar el muro de tablaestacas de acero con anclajes con el fin de reducir la longitud de empotramiento de las mismas y obtener un ahorro significativo en el costo de la obra. Cabe señalar que el presupuesto es un aproximado sujeto a cambios ya que fue elaborado en base a la batimetría del año 2016 y se espera que los volúmenes de arena necesarios para el relleno aumenten con el paso del tiempo debido a la erosión que se presenta en la zona, por lo que al actualizar la batimetría se tiene que actualizar el presupuesto. Sin embargo este presupuesto nos da una idea del costo de la propuesta hecha en este proyecto con lo cual se pueden proponer mejores alternativas de solución y recordemos que la geometría de la propuesta (que se probó con en el modelo numérico) funciona y no impacta significativamente en las corrientes por lo que se puede proponer otro tipo de obra como un relleno artificial de arena protegido con geocostales rellenos de arena con una geometría parecida a la presentada aquí.

Se recomienda que la Evaluación de Impacto Ambiental de la obra propuesta sea elaborada por un equipo interdisciplinario de profesionistas compuesto como mínimo por un ingeniero ambiental, un biólogo, un economista, un sociólogo y un especialista en suelos, con la finalidad de mejorar la evaluación presentada en este estudio.

6.3.- Futuras líneas de trabajo.

En base a los resultados obtenidos se presentan las siguientes ideas para futuras líneas de trabajo:

- Implementar un programa de monitoreo sobre la hidrodinámica del estero principalmente durante condiciones de clima extremo, en este sentido se deben medir los gastos aportados de agua dulce al estero, así como registrar las velocidades de las corrientes y la elevación del agua en diversos puntos del estero (en la boca y hacia el interior).
- Realizar un estudio geotécnico en el subsuelo del estero, se recomienda que éste se realice cerca de los márgenes para conocer propiedades físicas del suelo estuarino como son su resistencia y su estratigrafía, esto con la finalidad de diseñar obras de protección costera con mayor seguridad y descartar obras que no sean adecuadas para el tipo de suelo encontrado.
- Proponer diversas obras de protección costera en el estero para realizar una evaluación Multicriterio entre ellas y encontrar la mejor alternativa, en este sentido los criterios a considerar para evaluar las obras son el técnico, el ambiental y el económico.

Bibliografía.

- ALCANTAR ELIZONDO, R. 2008. *Variabilidad espacio temporal del perfil de playa, en playa Las Glorias, Guasave, Sinaloa.*
- APIVER 2017. "CONSTRUCCION DE TABLAESTACADO DE 300 METROS A BASE DE TUBERIA PARA TERMINAL DE GRANEL MINERAL EN EL NUEVO PUERTO DE VERACRUZ". *COMPRANET.*
- ASTM 2000. ASTM C1444-00. Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders. *ASTM International.*
- BATES, P., STEWART, M., SIGGERS, G., SMITH, C., HERVOUET, J. & SELLIN, R. 1998. Internal and external validation of a two-dimensional finite element code for river flood simulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 130, 127-141.
- BENÍTEZ, M. Ó. 2008. "Recuperación de Playa en la Zona de Playa el Guitarrón, Acapulco, Guerrero" Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Particular. 105.
- CAI, F., SU, X., LIU, J. & LEI, G. 2009. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Prog. Nat. Sci.*, 415-426.
- CAMPOS, D. & GÓMEZ, D. 1990. Procedimiento para obtener curvas IDT a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería hidráulica en México*, 5, 39-52.
- CANTER, L. W. 1998. *Manual de evaluación de impacto ambiental: técnicas para la elaboración de estudios de impacto*, McGraw-Hill.
- CANTERAS, J. C., PÉREZ, L., CANTERA, E., SOLER, M. & CARRALIMOS, C. 1995. Impacto ambiental de regeneración de playas: la playa de poniente (Gijón). *Ingeniería del agua*, 2, 223-243.
- CAPOTE, M. J. B. 1976. Corrosión de las tablestacas metálicas en medios marinos. *Informes de la Construcción*, 29, 75-79.
- CFE 1981. *MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES: HIDROTECNIA. A.1.5. RELACION ENTRE PRECIPITACION Y ESCURRIMIENTO.*, Comisión Federal de Electricidad.
- CIRIA 2007. Design of Marine Structures, the Rock Manual, the Use of Rock in Hydraulic Engineering (Chapter 6). *Second ed. CIRIA, London.*
- CMIC. 2018. *LOS COSTOS INDIRECTOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.* [Online]. Available: http://www.cmic.org.mx/comisiones/Tematicas/costosyp/Conferencias/1er%20Conferencia/Presentacion_Costos_Indirectos.pdf [Accessed 20 de Mayo 2018].
- CONAGUA 2016. "ESTABILIZACIÓN DE LA MARGEN DERECHA DEL RÍO GRIJALVA (TABLESTACA TRAMO 1, TRAMO 2 Y ESPIGONES 1, 2 Y 3) A LA ALTURA DE LA RANCHERÍA LA MANGA, SEGUNDA SECCIÓN, MUNICIPIO DE CENTRO, ESTADO DE TABASCO.". *COMPRANET.*
- CONAGUA. 2018a. *BANDAS* [Online]. Available: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm> [Accessed 27 de Febrero de 2018].
- CONAGUA. 2018b. *Servicio Meteorológico Nacional.* [Online]. Available: <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=sin> [Accessed 27 de Febrero de 2018].

- CONEJO, A. S.-A. & JIMÉNEZ, J. A. 1994. Ingeniería de playas (I): conceptos de morfología costera. *Ingeniería del agua*, 1.
- DAS, B. M. & LEÓN, J. C. 2012. *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, Cengage Learning.
- DAVIES, J. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 8, 127-142.
- DE SCHIPPER, M. A., DE VRIES, S., RUESSINK, G., DE ZEEUW, R. C., RUTTEN, J., VAN GELDER-MAAS, C. & STIVE, M. J. F. 2016. Initial spreading of a mega feeder nourishment: Observations of the Sand Engine pilot project. *Coastal Engineering*, 111, 23-38.
- DE VRIEND, H. J., ZYSERMAN, J., NICHOLSON, J., ROELVINK, J., PECHON, P. & SOUTHGATE, H. 1993. Medium-term 2DH coastal area modelling. *Coastal engineering*, 21, 193-224.
- DEAN, R. G. 2002. Beach Nourishment: Theory and Practice. *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.*, 29-34: 75-87.
- DRONKERS, J. & VAN LEUSSEN, W. 2012. *Physical processes in estuaries*, Springer Science & Business Media.
- ESCALANTE-SANDOVAL, C. & REYES-CHÁVEZ, L. 2005. *Técnicas estadísticas en hidrología*, México.
- GARCÍA AMARO, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.
- GONZÁLES, R. 2013. *ESTUDIO DE OBRAS DE PROTECCIÓN COSTERA. CASO MÉXICO*. Maestro en Ingeniería, UNAM.
- INEGI. 2018. *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas. SIATL Versión 3.2* [Online]. Available: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/# [Accessed 05 de Mayo de 2018].
- JIMÉNEZ-OROCIO, O., ESPEJEL, I. & MARTÍNEZ, M. L. 2015. La investigación científica sobre dunas costeras de México: origen, evolución y retos. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86, 486-507.
- LANDSEA, C., FRANKLIN, J. & BEVEN, J. 2015. The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2). *NOAA/NHC*. [Available online at nhc.noaa.gov].
- LANDSEA, C. W. & FRANKLIN, J. L. 2013. Atlantic Hurricane Database Uncertainty and Presentation of a New Database Format. *NOAA/NHC*. [Available online at nhc.noaa.gov].
- LARA HERNÁNDEZ, A. 2012. *MODELACIÓN DE LA HIDRODINÁMICA DE LA LAGUNA DE CUYUTLÁN, COLIMA*. Maestro en Ingeniería., Universidad Nacional Autónoma de México. .
- LEOPOLD, L. B. 1971. *A procedure for evaluating environmental impact*, US Dept. of the Interior.
- LÓPEZ MIÑANO, M. I. 2008. Análisis de los principales parámetros de un método hidrometeorológico para el cálculo de avenidas y aplicación de una cuenca Mediterránea. 16-28.
- LUO, S., LIU, Y., JIN, R., ZHANG, J. & WEI, W. 2016. A guide to coastal management: Benefits and lessons learned of beach nourishment practices in China over the past two decades. *Ocean and Coastal Management*, 134, 207-215.
- MEDINA, R., LOSADA, I. J., LOSADA, M. Á. & VIDAL, C. 1995. Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. *Ingeniería del agua*, 2.

- OCHOA, C. F. 2014. *ESTUDIO INTEGRAL SOBRE LA EROSIÓN DEL CANAL DE CUAUTLA PARA EL DISEÑO DE UNA PROPUESTA DE SOLUCIÓN*. DOCTORADO, UNAM.
- OJEDA ZÚJAR, J., DÍAZ CUEVAS, M. D. P., PRIETO CAMPOS, A. & ÁLVAREZ FRANCO, J. I. 2013. Línea de costa y sistemas de información geográfica: modelo de datos para la caracterización y cálculo de indicadores en la costa andaluza. *Investigaciones Geográficas (Esp)*.
- PEDROZO ACUÑA, A., MEDELLÍN MAYORAL, G., RODRÍGUEZ RINCÓN, J. P., GARNICA HIDALGO, L. E., SALVADOR OSEGUEDA, A. & AMARO LOZA, A. 2009. MODELACIÓN DE PROCESOS COSTEROS Y OBRAS DE PROTECCIÓN O MITIGACIÓN. *CONAGUA*, 76.
- RAMSAR. 2018. *MARISMAS NACIONALES*. [Online]. Available: <https://www.ramsar.org/es/humedal/mexico> [Accessed 15 de Septiembre 2018].
- REYNAL, J. A. 1982. Parameter estimation efficiency in extreme value distribution type I and II. Report of a special study. *Civil Engineering Department, Colorado State University. USA.*, 237.
- ROSENGAUS MOSHINSKY, M., JIMÉNEZ ESPINOSA, M. & VÁZQUEZ CONDE, M. T. 2002. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*, México. Secretaría de Gobernación; México. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).
- SCT. 2003a. *Densidades Relativas y Absorción*. *M-MMP-1-05/03* [Online]. Available: <http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#06> [Accessed 12 de Enero 2018].
- SCT. 2003b. *Granulometría de Materiales Compactables para Terracerías*. *M-MMP-1-06/03* [Online]. Available: <http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#06> [Accessed 12 de Enero 2018].
- SCT. 2006. *Compactación AASHTO*. *M-MMP-1-09/06*. [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#06> [Accessed 03 de Enero 2018].
- SCT. 2009. *Predicción de la Marea Meteorológica*. *M-PRY-PUE-1-04-005/09* [Online]. Available: <https://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#005> [Accessed 08 de Junio 2018].
- SEGOB. 2018. *Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar*. [Online]. Available: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4739967&fecha=21/08/1991 [Accessed 15 de Marzo 2018].
- SEMARNAT 2015. LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. *Diario Oficial de la Federación*, 128.
- SEMARNAT 2017. Guía para la MIA modalidad particular del Sector Hidráulico. *Guía*, 53.
- SFP. 2018. *COMPRANET. Difusión de procedimientos* [Online]. Available: <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/web/login.html> [Accessed 05 de Agosto 2018].
- SINALOA, G. D. E. D. 2006. Programa Rector de Desarrollo Costero del Estado. *PROGRAMA DE GRAN VISION DEDESARROLLO LITORAL PRODELI*, 146.
- SMC 2000. Documento de referencia Volumen III Obras. *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Ministerio de Medio Ambiente.*, 302.
- TE CHOW, V. 1959. *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill New York.

- THIELER, E. R., HIMMELSTOSS, E. A., ZICHICHI, J. L. & ERGUL, A. 2017. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change.: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- UNAM. *Servicio Mareográfico Nacional*. [Online]. Instituto de Geofísica. Available: www.mareografico.unam.mx [Accessed 20 de Febrero 2018].
- VALVERDE, H. R., TREMBANIS, A. C. & PILKEY, O. H. 1999. Summary of beach nourishment episodes on the U.S. east coast barrier islands. *J. Coast. Res.* 15 (4). 1100-1118.
- WALPOLE, R. E., MYERS, R. H. & MYERS, S. L. 1999. *Probabilidad y estadística para ingenieros*, Pearson Educación.
- ZAYAS ESQUER, M. 2012. *EFFECTOS EN PLAYAS LAS GLORIAS CAUSADOS POR LA CONSTRUCCION DEL ESPIGON AL MODIFICAR EL TRANSPORTE LITORIAL*.

VII.- Anexos.

Anexo A. Ecuaciones de gobierno del modelo MIKE21.

Ecuaciones de aguas someras.

De la integración en la horizontal de las ecuaciones de cantidad de movimiento y la ecuación de continuidad sobre la profundidad $h = \eta + d$ se obtienen las siguientes ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas.

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (12)$$

Donde t es el tiempo x y y son las coordenadas cartesianas; η es la elevación de la superficie del agua; d es la cota del terreno, $h = \eta + d$ es el tirante neto del agua y S es la magnitud del gasto debida a fuentes.

Ecuación de la cantidad de movimiento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s s \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s s \end{aligned} \quad (14)$$

Donde u y v son las componentes de la velocidad en las direcciones x y y ; $f = 2\Omega \sin\phi$ es el parámetro de Coriolis (Ω es la tasa angular de revolución y ϕ la latitud geográfica); g es la gravedad; ρ es la densidad del agua; s_{xx} , s_{xy} , s_{yx} , s_{yy} son los componentes del esfuerzo tensor de radiación; p_a es la presión atmosférica; ρ_0 es la densidad relativa del agua. Como se comentó anteriormente S es la magnitud del gasto debida a fuentes; (u_s, v_s) es la velocidad con la cual el agua se descarga al medio ambiente.

Las variables, (τ_{sx}, τ_{sy}) y (τ_{bx}, τ_{by}) son los componentes en x y y de los esfuerzos del viento sobre la superficie y de fondo, respectivamente.

La barra superior indica un valor promedio de profundidad. Por ejemplo, \bar{u} y \bar{v} son las velocidades promedio de profundidad definidas por:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (15)$$

Las tensiones laterales T_{ij} incluyen fricción viscosa, fricción turbulenta y advección diferencial. Se estiman usando una formulación de viscosidad de remolino (Eddy Viscosity formulation) basada en gradientes de velocidad promedio de profundidad.

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (16)$$

Esfuerzo de fondo.

El esfuerzo de fondo, $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$, está determinado por una ley de fricción cuadrática:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (17)$$

Donde c_f es el coeficiente de fricción, y $\vec{u}_b = (u_b, v_b)$ es la velocidad del flujo sobre el fondo. La velocidad de fricción asociada con el esfuerzo de fondo está dado por:

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |u_b|^2} \quad (18)$$

Para cálculos en dos dimensiones \vec{u}_b es la velocidad promedio en la vertical y el coeficiente de fricción puede ser determinado por el número de Chezy, C , o el número de Manning, M .

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (19)$$

$$c_f = \frac{g}{\left(M h^{\frac{1}{6}} \right)^2} \quad (20)$$

El número de Manning puede ser estimado por la rugosidad de fondo usando la siguiente ecuación:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{\frac{1}{6}}} \quad (21)$$

Esfuerzos por viento.

El esfuerzo por viento está dado por la siguiente relación empírica:

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \vec{u}_w \quad (22)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, c_d es el coeficiente de fricción del aire, y $\vec{u}_w = (u_w, v_w)$ es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del mar. La velocidad de fricción asociada con el esfuerzo sobre la superficie está dada por:

$$U_{\tau s} = \sqrt{\frac{\rho_a c_d |\vec{u}_w|^2}{\rho_0}} \quad (23)$$

El coeficiente de fricción puede ser un valor constante o depender de la velocidad del viento. La fórmula empírica propuesta por Wu (1980,1994) es usada para la parametrización del coeficiente de fricción:

$$c_f = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (24)$$

Donde c_a , c_b , w_a , w_b son factores empíricos y w_{10} es la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del mar. Los valores por default de los factores empíricos son $c_a = 1.255 * 10^{-3}$, $c_b = 2.425 * 10^{-3}$, $w_a = 7 \text{ m/s}$ y $w_b = 25 \text{ m/s}$. Estos valores generalmente arrojan buenos resultados para aplicaciones en mar abierto. Mediciones del coeficiente de arrastre realizadas sobre lagos indican que el coeficiente de arrastre es mayor que en datos obtenidos en mar abierto (Geernaert y Plant, 1990). El coeficiente de fricción se puede utilizar como un parámetro de calibración durante la modelación.

En el módulo de transporte de arena se pueden utilizar cuatro teorías:

- Engelund and Hansen model.
- Van-Rijn model.
- Engelund and Fredsøe model.
- Meyer-Peter and Müller model.

Los siguientes símbolos son aplicados en el transporte de sedimentos:

s_{bl} = Transporte de fondo (m^2/s).

k_b = Factor de calibración del transporte de fondo (-).

s_{sl} = Transporte suspendido (m^2/s).

k_s = Factor de calibración del transporte suspendido (-).

s = Densidad relativa del sedimento (-).

s_{tl} = Transporte total (m^2/s).

c_e = Concentración de la masa de equilibrio (g/m^3).

C = Número de Chezy ($m^{1/2}/s$).

V = Velocity (m/s).

El parámetro θ es definido como:

$$\theta = \frac{\tau}{\rho g (s-1) d_{50}} \quad (25)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante del flujo.

ρ = Densidad del agua, aproximadamente 1000 kg/m³.

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

$s = \rho/\rho_s$ Densidad relativa del sedimento.

ρ_s = Densidad de arena de cuarzo de 2650 kg/m³.

El esfuerzo cortante del flujo es dividido en (form drag τ'') y (skin friction τ'). El esfuerzo total de corte $\tau = \tau' + \tau''$ es estimado por la velocidad del flujo local y el número de Chezy local C :

$$\tau = \rho g \frac{V^2}{C^2} \quad (26)$$

Para calcular el skin friction se aplica la siguiente formula de fricción aproximada de (Engelund y Hansen, 1967) a menos que se calcule de otra manera (por ejemplo en el modelo de Van Rijn y el modelo de Engelund y Fredsoe, donde se usan modelos más sofisticados para describir los procesos físicos).

$$\theta' = 0.06 + 0.4 * \theta^2 \quad (27)$$

La velocidad de transporte de sedimento adimensional está definida como:

$$\Phi = \frac{S}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (28)$$

Donde:

S = Transporte de sedimento (de fondo, total o suspendido).

d = Diámetro característico del grano de arena.

Φ = Transporte de sedimentos adimensional.

Engelund y Hansen.

Este modelo es un modelo de transporte total que necesita información específica para dividir al transporte de sedimento en transporte de fondo y transporte suspendido. Las velocidades de transporte son obtenidas de las siguientes relaciones:

$$s_{bl} = k_b * s_{tl} \quad (29)$$

$$s_{sl} = k_s * s_{tl} \quad (30)$$

Donde el transporte total de sedimento es obtenido por:

$$s_{tl} = 0.05 \frac{c^2}{g} \theta^{\frac{5}{2}} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (31)$$

La concentración de equilibrio es simplemente especificada como el transporte suspendido dividido por el gasto de agua y convertida de una concentración volumétrica a una concentración de masa:

$$c_e = \frac{s_{sl}}{v*h} * s * 10^6 \quad (32)$$

Anexo B.- Solicitud de información.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN

M.C. SANDRA GUIDO SÁNCHEZ
DIRECTORA EJECUTIVA DE CONSELVA
P R E S E N T E .-

Asunto: Solicitud de información.

Por medio de la presente me permito saludarla y a la vez de la manera más atenta solicitarle las mediciones in situ realizados por Comunidades Costeras Sustentables de marea y velocidad de las corrientes de los puntos BOCA, HOB0-4, HOB0-9, así como los registros obtenidos con la estación meteorológica Vantage Pro 2 Plus (V2P) y la batimetría del estero; que se presentaron en el Estudio oceanográfico básico de la región de Teacapán, Sinaloa durante el verano de 2016.

Lo anterior con el fin de calibrar el modelo numérico de simulación que estamos utilizando en mi proyecto de tesis de Maestría en Ingeniería de la Construcción.

No está por demás mencionar que la información que nos proporcione será debidamente citada y se utilizará únicamente con fines académicos y de investigación y nos comprometemos a no utilizarlo para otros fines sin su autorización.

Sin otro particular, en espera de una respuesta favorable, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

Culiacán, Sinaloa a 18 de mayo de 2018


DR. CUAHTÉMOC FRANCO OCHOA.
Director de tesis.


ING. BRANDO I. VAZQUEZ HEREDIA
Maestrante.

Calzada de las Américas y Blvd. Universitarios s/n, Ciudad Universitaria, Culiacán Rosales, Sinaloa, México,
C.P. 80040. Telefax: 01 (667) 713 40 43 y 53, E-mail: fic_direccion@uas.edu.mx.

Figura 51.- Carta de solicitud de información a CONSELVA A.C.

Anexo C.- Carta Náutica

Los puntos de agua en la parte oceánica se obtuvieron de la SEMAR (Secretaría de Marina) con la carta náutica S.M.412.1 BOCA TEACAPAN, SIN. Escala 1:10,000 en formato ráster digital (Figura 52). La carta náutica fue georeferenciada utilizando el software ArcMap, en este mismo software se creó un shapefile de puntos siguiendo las profundidades marcadas en la carta, una vez que se obtuvieron los puntos se procedió a convertir el shapefile a un archivo CAD que puede ser leído por Autocad y Civilcad; los puntos de esta batimetría (coordenadas xyz) se guardaron en un archivo .txt y se cambió la extensión del archivo a .xyz (extensión que el software MIKE 21 puede leer), y se crearon los datos (Scatter data) necesarios para crear la batimetría.



Figura 52.- Carta náutica de la SEMAR S.M.412.1 BOCA TEACAPÁN, SIN.

Anexo D.- Caudal aportado al sistema por la Subcuenca El Palote-Higueras.



Figura 53.- Imagen satelital donde se observan los aportes de caudal hacia la frontera Sur.

Se recopilaron datos de la Subcuenca El Palote-Higueras (RH11Bf) mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 16.- Datos obtenidos de la aplicación geoespacial del INEGI SIATL (INEGI, 2018).

Datos conocidos de la Subcuenca RH11Bf.		
Elevación máxima de la subcuenca	1,120.00	metros
Elevación mínima de la subcuenca	0.00	metros
Pendiente media de la subcuenca	6.42	%
Elevación máxima de la corriente principal	198.00	metros
Elevación mínima de la corriente principal	2.00	metros
Longitud de la corriente principal	63.04	kilómetros
Pendiente de la corriente principal	0.131	%
Área drenada	702.05	Km^2

Para caracterizar un evento de tormenta se recopilaron datos de precipitación de la estación La Concha, los datos de alturas de precipitación del registro del 01/01/1961 a 31/05/2016 fueron acotados al seleccionar solo las alturas de precipitación máximas anuales que indican lluvias de tormenta muy fuertes (Tabla 17). En el análisis de frecuencias del registro histórico de las precipitaciones máximas anuales en la estación La Concha (Figura 54) se realizó un ajuste con la Distribución de General de Valores Extremos por máxima verosimilitud para obtener las alturas de precipitación de diseño para un periodo de retorno de determinado.

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (33)$$

Para la estimación de la bondad de ajuste se determinó el coeficiente de correlación r entre la curva empírica y la curva ajustada con la distribución.

Para el análisis extremal de las precipitaciones se utilizó la metodología descrita en el libro Técnicas estadísticas en hidrología (Escalante-Sandoval and Reyes-Chávez, 2005).

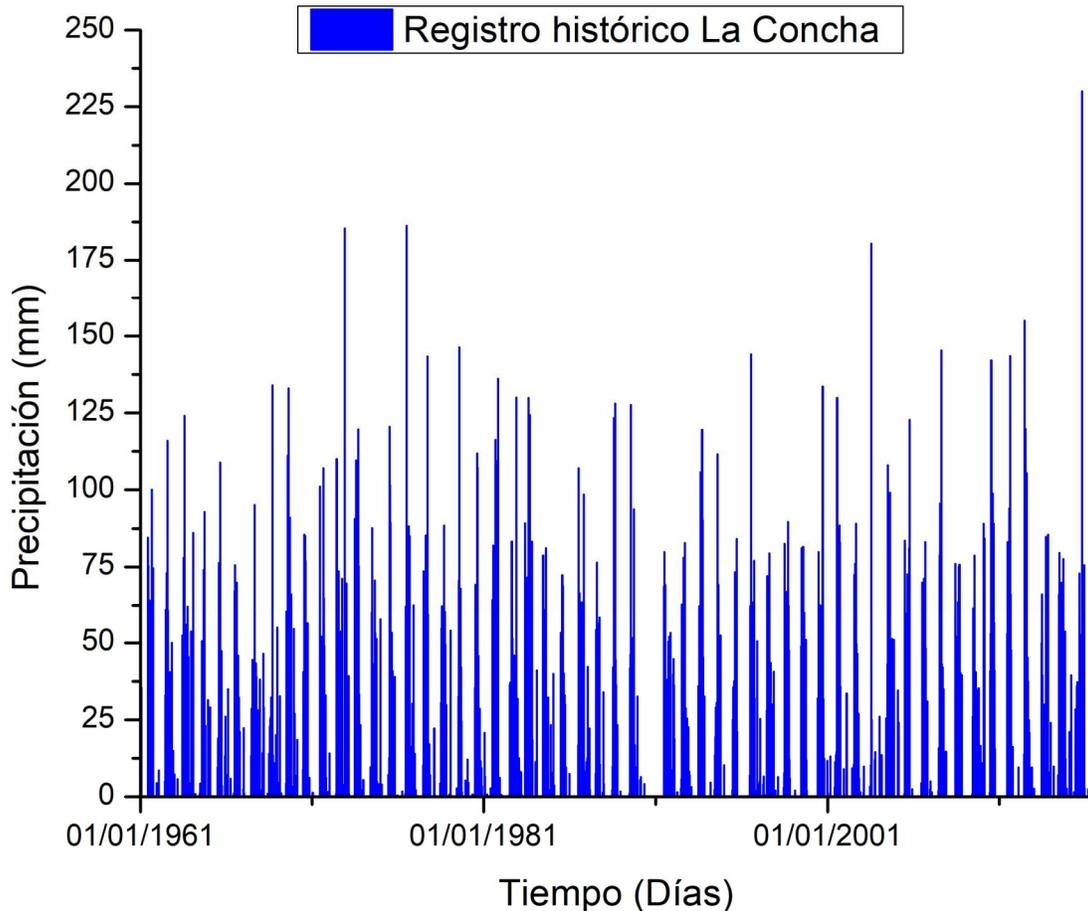


Figura 54.- Registro histórico de alturas de precipitación de la estación La Concha.

Tabla 17.- Registro de precipitaciones máximas anuales de la estación La Concha.

Fecha	Altura de precipitación máxima anual (mm).	Fecha	Altura de precipitación máxima anual (mm).
31/08/1961	100.00	20/08/1988	128.00
02/08/1962	116.00	24/07/1989	127.60
24/07/1963	124.00	30/06/1991	79.80
29/09/1964	92.80	15/09/1992	82.70
28/08/1965	108.90	12/09/1993	119.50
09/07/1966	75.50	04/08/1994	111.60
27/08/1967	95.10	20/09/1995	84.00
12/09/1968	134.00	24/07/1996	144.00
15/08/1969	133.00	14/08/1997	79.30
16/07/1970	85.50	14/09/1998	89.50
01/09/1971	107.00	01/08/1999	81.50
23/11/1972	185.30	21/09/2000	133.50
11/09/1973	119.70	23/07/2001	129.80
04/07/1974	87.60	31/08/2002	89.00
11/07/1975	120.50	18/07/2003	180.40
06/07/1976	186.20	06/07/2004	108.00
19/09/1977	143.30	09/10/2005	122.80
11/09/1978	88.50	15/09/2006	83.00
28/07/1979	146.30	17/08/2007	145.30
12/08/1980	111.80	10/06/2008	76.00
29/10/1981	136.10	21/07/2009	78.70
25/11/1982	130.00	15/07/2010	142.00
12/08/1983	129.80	23/08/2011	143.50
07/08/1984	81.00	21/06/2012	155.00
23/07/1985	72.30	03/11/2013	85.50
07/07/1986	107.00	01/07/2014	79.50
25/07/1987	76.40	29/10/2015	230.00

Prueba de homogeneidad

Prueba estadística t de **Student**

Tamaño de la muestra total $n = 54$

Media de la muestra total $\bar{x} = 114.87 \text{ mm}$

La muestra se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 + n_2 = \frac{n}{2}$, entonces:

Tamaño de la submuestra (1)	$n_1 = 27$
Media de la submuestra (1)	$\bar{x}_1 = 114.58 \text{ mm}$
Desviación estándar de la submuestra (1)	$S_1 = 29.83 \text{ mm}$
Tamaño de la submuestra (2)	$n_2 = 27$
Media de la submuestra (2)	$\bar{x}_2 = 115.17 \text{ mm}$
Desviación estándar de la submuestra (2)	$S_2 = 37.41 \text{ mm}$

El estadístico de prueba se define como:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} = 0.2728 \quad (34)$$

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de distribución t de Student de dos colas, con $v = n_1 + n_2 - 2 = 52$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$.

$$t_{v,1-\alpha/2} = 2.00 \quad (35)$$

La serie se considera homogénea si $|t_d| < t_{v,1-\alpha/2}$

$|0.2728| < 2.00 \therefore$ La serie es homogénea.

Los datos se ordenaron de mayor a menor (Tabla 18) y se les asigno una probabilidad de no excedencia con la distribución empírica de Weibull utilizando un número de orden (m) como sigue:

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots, n. \quad (36)$$

Donde

n Tamaño de la muestra analizada en años.

m Número de orden del registro.

$P(X \leq x)$ Probabilidad de no excedencia.

Tabla 18.- Muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor de la estación La Concha.

Orden	Altura de precipitación máxima anual (mm).	Probabilidad de no excedencia.	Orden	Altura de precipitación máxima anual (mm).	Probabilidad de no excedencia.
1	230.00	0.9818	28	111.60	0.4909
2	186.20	0.9636	29	108.90	0.4727
3	185.30	0.9455	30	108.00	0.4545
4	180.40	0.9273	31	107.00	0.4364
5	155.00	0.9091	32	107.00	0.4182
6	146.30	0.8909	33	100.00	0.4000
7	145.30	0.8727	34	95.10	0.3818
8	144.00	0.8545	35	92.80	0.3636
9	143.50	0.8364	36	89.50	0.3455
10	143.30	0.8182	37	89.00	0.3273
11	142.00	0.8000	38	88.50	0.3091
12	136.10	0.7818	39	87.60	0.2909
13	134.00	0.7636	40	85.50	0.2727
14	133.50	0.7455	41	85.50	0.2545
15	133.00	0.7273	42	84.00	0.2364
16	130.00	0.7091	43	83.00	0.2182
17	129.80	0.6909	44	82.70	0.2000
18	129.80	0.6727	45	81.50	0.1818
19	128.00	0.6545	46	81.00	0.1636
20	127.60	0.6364	47	79.80	0.1455
21	124.00	0.6182	48	79.50	0.1273
22	122.80	0.6000	49	79.30	0.1091
23	120.50	0.5818	50	78.70	0.0909
24	119.70	0.5636	51	76.40	0.0727
25	119.50	0.5455	52	76.00	0.0545
26	116.00	0.5273	53	75.50	0.0364
27	111.80	0.5091	54	72.30	0.0182

Se aplicó la Distribución General de Valores Extremos (GVE) por máxima verosimilitud para ajustar la serie de datos.

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (37)$$

Si $\beta = 0$ $-\infty < x < \infty$ la distribución es tipo I (Gumbel).

Si $\beta < 0$ $v + \frac{\alpha}{\beta} < x < \infty$ la distribución es tipo II (Fréchet).

Si $\beta > 0$ $-\infty < x < v + \frac{\alpha}{\beta}$ la distribución es tipo III (Weibull).

α Parámetro de escala $\alpha > 0$.

β Parámetro de forma.

v Parámetro de ubicación.

Dado que se requieren parámetros iniciales α, β y v para el proceso iterativo de máxima verosimilitud, se empleó la técnica de sextiles:

Estimadores por sextiles:

$$\alpha = 21.484$$

$$\beta = -0.214$$

$$v = 96.828$$

Estimadores por máxima verosimilitud:

La variable reducida (Tabla 19) de la Distribución General de Valores Extremos (GVE) utilizada para las iteraciones fue:

$$y = -\frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \left(\frac{x-v}{\alpha} \right)^\beta \right) \quad (38)$$

La variable reducida en la primera iteración será:

$$y_i = -\frac{1}{-0.214} \ln \left(1 - \left(\frac{x_i - 96.828}{21.484} \right)^{-0.214} \right) \quad (39)$$

Tabla 19.- Variable reducida de GVE para la primera etapa de iteración por máxima verosimilitud.

Orden	Precipitación (x_i)	y_i	e^{-y_i}	$e^{(\beta-1)y_i}$	$e^{\beta y_i}$	$y_i e^{-y_i}$
1	230.00	4.095	0.017	0.009	0.531	0.068
2	186.20	3.002	0.050	0.031	0.629	0.149
3	185.30	2.978	0.051	0.032	0.632	0.152
4	180.40	2.842	0.058	0.038	0.645	0.166
5	155.00	2.093	0.123	0.089	0.724	0.258
6	146.30	1.815	0.163	0.123	0.756	0.296
7	145.30	1.782	0.168	0.128	0.760	0.300
8	144.00	1.739	0.176	0.134	0.765	0.305

La tabla continúa en la siguiente página.

9	143.50	1.723	0.179	0.137	0.767	0.308
10	143.30	1.716	0.180	0.138	0.767	0.308
11	142.00	1.673	0.188	0.145	0.772	0.314
12	136.10	1.473	0.229	0.183	0.797	0.338
13	134.00	1.400	0.247	0.199	0.806	0.345
14	133.50	1.383	0.251	0.203	0.808	0.347
15	133.00	1.365	0.255	0.207	0.810	0.349
16	130.00	1.259	0.284	0.234	0.823	0.357
17	129.80	1.252	0.286	0.236	0.824	0.358
18	129.80	1.252	0.286	0.236	0.824	0.358
19	128.00	1.188	0.305	0.254	0.832	0.362
20	127.60	1.173	0.309	0.258	0.834	0.363
21	124.00	1.042	0.353	0.300	0.851	0.368
22	122.80	0.998	0.369	0.316	0.857	0.368
23	120.50	0.912	0.402	0.349	0.869	0.366
24	119.70	0.882	0.414	0.361	0.873	0.365
25	119.50	0.875	0.417	0.364	0.874	0.365
26	116.00	0.741	0.477	0.425	0.892	0.353
27	111.80	0.577	0.562	0.514	0.915	0.324
28	111.60	0.569	0.566	0.518	0.916	0.322
29	108.90	0.461	0.630	0.587	0.931	0.291
30	108.00	0.425	0.654	0.612	0.936	0.278
31	107.00	0.384	0.681	0.642	0.942	0.262
32	107.00	0.384	0.681	0.642	0.942	0.262
33	100.00	0.093	0.911	0.898	0.986	0.085
34	95.10	-0.119	1.127	1.148	1.019	-0.134
35	92.80	-0.221	1.248	1.291	1.035	-0.276
36	89.50	-0.371	1.449	1.534	1.059	-0.537
37	89.00	-0.394	1.482	1.575	1.063	-0.583
38	88.50	-0.417	1.517	1.617	1.066	-0.632
39	87.60	-0.458	1.581	1.697	1.073	-0.724
40	85.50	-0.556	1.744	1.901	1.090	-0.970
41	85.50	-0.556	1.744	1.901	1.090	-0.970
42	84.00	-0.627	1.873	2.063	1.102	-1.175
43	83.00	-0.675	1.964	2.180	1.110	-1.326
44	82.70	-0.690	1.993	2.217	1.112	-1.374
45	81.50	-0.747	2.112	2.370	1.122	-1.578

La tabla continúa en la siguiente página.

46	81.00	-0.772	2.164	2.437	1.127	-1.670
47	79.80	-0.830	2.294	2.608	1.137	-1.905
48	79.50	-0.845	2.328	2.653	1.139	-1.968
49	79.30	-0.855	2.352	2.683	1.141	-2.011
50	78.70	-0.885	2.422	2.777	1.146	-2.143
51	76.40	-1.000	2.717	3.171	1.167	-2.717
52	76.00	-1.020	2.773	3.246	1.170	-2.828
53	75.50	-1.045	2.844	3.342	1.175	-2.973
54	72.30	-1.210	3.353	4.041	1.205	-4.056

El proceso iterativo se basa en:

$$\begin{aligned}\delta_{\alpha_i} &= -\frac{\alpha_i}{n} \left\{ hQ_i + \frac{a(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{gs}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\} \\ \delta_{\beta_i} &= -\frac{1}{n} \left\{ fQ_i + \frac{gs(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{c}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\} \\ \delta_{v_i} &= -\frac{\alpha_i}{n} \left\{ bQ_i + \frac{h(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{f}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\}\end{aligned}\quad (40)$$

$\delta_{v_i}, \delta_{\alpha_i}, \delta_{\beta_i}$ Son las diferencias entre los valores verdaderos y los de la i -ésima iteración.
 P_i, Q_i, R_i Se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$P_i = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (41)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^n e^{(\beta-1)y_i} - (1-\beta) \sum_{i=1}^n e^{\beta y_i} \quad (42)$$

$$R_i = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad (43)$$

a, b, c, f, gs y h Son los elementos de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros de la distribución GVE para $-1.5 < \beta < 1.0$ se puede utilizar (Reynal, 1982):

$$\begin{aligned}a &= 0.661437 - 0.562798\beta + 0.985803\beta^2 - 0.059011\beta^3 \\ b &= 1.235356 - 0.162161\beta - 0.115137\beta^2 + 0.009577\beta^3 \\ c &= 0.4711 - 0.77627\beta + 0.295825\beta^2 - 0.009645\beta^3 \\ f &= 0.244435 - 0.10287\beta - 0.19583\beta^2 - 0.016837\beta^3 \\ gs &= 0.15373 - 0.411923\beta - 0.479209\beta^2 - 0.075004\beta^3 \\ h &= 0.338937 - 1.209555\beta - 0.109822\beta^2 - 0.019801\beta^3\end{aligned}\quad (44)$$

Los valores de la siguiente iteración fueron:

$$\begin{aligned}\alpha_{i+1} &= \alpha_i + \delta_{\alpha_i} \\ \beta_{i+1} &= \beta_i + \delta_{\beta_i} \\ \nu_{i+1} &= \nu_i + \delta_{\nu_i}\end{aligned}\tag{45}$$

Y el proceso iterativo terminó cuando las siguientes derivadas parciales se aproximaron a cero:

$$\begin{aligned}-\frac{\partial LL}{\partial \alpha} &= \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{P_i + Q_i}{\beta_i} \right) \approx 0 \\ -\frac{\partial LL}{\partial \beta} &= \frac{1}{\beta_i} \left(R_i - \frac{P_i + Q_i}{\beta_i} \right) \approx 0 \\ -\frac{\partial LL}{\partial \nu} &= \left(\frac{Q_i}{\alpha_i} \right) \approx 0\end{aligned}\tag{46}$$

Tabla 20.- Proceso de búsqueda de parámetros.

α_i	β_i	ν_i	P_i	Q_i	R_i	$-\frac{\partial LL}{\partial \alpha}$	$-\frac{\partial LL}{\partial \beta}$	$-\frac{\partial LL}{\partial \nu}$	δ_{α_i}	δ_{β_i}	δ_{ν_i}	α_{i+1}	β_{i+1}	ν_{i+1}
21.484	-0.214	96.828	-0.687	1.624	-4.167	-0.204	-1.007	0.076	1.148	0.022	0.320	22.63	-0.19	97.15
22.632	-0.192	97.148	0.412	-0.353	-0.168	-0.014	-0.747	-0.016	0.256	0.012	0.341	22.89	-0.18	97.49
22.888	-0.180	97.489	0.070	-0.060	0.064	-0.003	-0.681	-0.003	0.095	0.008	0.120	22.98	-0.17	97.61
22.983	-0.172	97.608	0.045	-0.046	0.090	0.000	-0.485	-0.002	0.052	0.006	0.076	23.04	-0.17	97.68
23.035	-0.166	97.685	0.027	-0.028	0.063	0.000	-0.336	-0.001	0.034	0.004	0.050	23.07	-0.16	97.73
23.069	-0.162	97.735	0.017	-0.018	0.042	0.000	-0.230	-0.001	0.023	0.003	0.034	23.09	-0.16	97.77
23.093	-0.160	97.769	0.011	-0.011	0.027	0.000	-0.157	0.000	0.016	0.002	0.023	23.11	-0.16	97.79
23.108	-0.158	97.792	0.008	-0.008	0.018	0.000	-0.106	0.000	0.011	0.001	0.016	23.12	-0.16	97.81
23.119	-0.157	97.807	0.005	-0.005	0.012	0.000	-0.072	0.000	0.007	0.001	0.011	23.13	-0.16	97.82
23.127	-0.156	97.818	0.003	-0.003	0.008	0.000	-0.049	0.000	0.005	0.001	0.007	23.13	-0.16	97.82
23.132	-0.155	97.825	0.002	-0.003	0.005	0.000	-0.033	0.000	0.004	0.000	0.005	23.14	-0.15	97.83
23.135	-0.155	97.830	0.001	-0.001	0.004	0.000	-0.023	0.000	0.002	0.000	0.003	23.14	-0.15	97.83
23.137	-0.155	97.833	0.001	-0.001	0.002	0.000	-0.015	0.000	0.002	0.000	0.002	23.14	-0.15	97.84
23.139	-0.154	97.835	0.001	-0.001	0.002	0.000	-0.010	0.000	0.001	0.000	0.002	23.14	-0.15	97.84

En la Tabla 20 se observa que los valores de las columnas de convergencia (derivadas parciales) después de 13 iteraciones se aproximan a cero por lo que se da por terminado el proceso.

Finalmente:

$$\alpha = 23.1388$$

$$\beta = -0.1544$$

$$v = 97.8351$$

Por lo tanto las precipitaciones estimadas con la distribución GVE se obtuvieron con la siguiente expresión:

$$X_T = \frac{23.1388}{-0.1544} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-0.1544} \right] + 97.8351 \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \dots n. \quad (47)$$

Siendo T el periodo de retorno y $\left(1 - \frac{1}{T}\right)$ la probabilidad de no excedencia.

En la Tabla 21 la columna de X_i^j Son los eventos ordenados de mayor a menor con un periodo de retorno asignado $T = \frac{n_j+1}{m}$ y una probabilidad de no excedencia $P = 1 - \frac{1}{T}$ y la columna de X_T^j son los eventos estimados por la distribución de probabilidad general de valores extremos para cada periodo de retorno T asignado a la muestra ordenada X_i^j .

Tabla 21.- Comparativa de alturas de precipitación observadas con las alturas de precipitación calculadas con la función de distribución.

(i)	$T(\text{años})$	$P(1-1/T)$	$X_i^j(\text{mm})$	$X_T^j(\text{mm})$
1	55.00	0.9818	230.00	225.80
2	27.50	0.9636	186.20	197.25
3	18.33	0.9455	185.30	181.78
4	13.75	0.9273	180.40	171.29
5	11.00	0.9091	155.00	163.40
6	9.17	0.8909	146.30	157.10
7	7.86	0.8727	145.30	151.87
8	6.88	0.8545	144.00	147.39
9	6.11	0.8364	143.50	143.48
10	5.50	0.8182	143.30	140.01
11	5.00	0.8000	142.00	136.89
12	4.58	0.7818	136.10	134.05
13	4.23	0.7636	134.00	131.45
14	3.93	0.7455	133.50	129.04
15	3.67	0.7273	133.00	126.79
16	3.44	0.7091	130.00	124.69
17	3.24	0.6909	129.80	122.72
18	3.06	0.6727	129.80	120.85
19	2.89	0.6545	128.00	119.08

La tabla continúa en la siguiente página.

20	2.75	0.6364	127.60	117.38
21	2.62	0.6182	124.00	115.77
22	2.50	0.6000	122.80	114.21
23	2.39	0.5818	120.50	112.72

24	2.29	0.5636	119.70	111.28
25	2.20	0.5455	119.50	109.88
26	2.12	0.5273	116.00	108.52
27	2.04	0.5091	111.80	107.21
28	1.96	0.4909	111.60	105.92
29	1.90	0.4727	108.90	104.67
30	1.83	0.4545	108.00	103.44
31	1.77	0.4364	107.00	102.23
32	1.72	0.4182	107.00	101.04
33	1.67	0.4000	100.00	99.87
34	1.62	0.3818	95.10	98.71
35	1.57	0.3636	92.80	97.57
36	1.53	0.3455	89.50	96.43
37	1.49	0.3273	89.00	95.30
38	1.45	0.3091	88.50	94.17
39	1.41	0.2909	87.60	93.03
40	1.38	0.2727	85.50	91.90
41	1.34	0.2545	85.50	90.75
42	1.31	0.2364	84.00	89.59
43	1.28	0.2182	83.00	88.42
44	1.25	0.2000	82.70	87.22
45	1.22	0.1818	81.50	85.99
46	1.20	0.1636	81.00	84.71
47	1.17	0.1455	79.80	83.39
48	1.15	0.1273	79.50	82.00
49	1.12	0.1091	79.30	80.51
50	1.10	0.0909	78.70	78.90
51	1.08	0.0727	76.40	77.12
52	1.06	0.0545	76.00	75.06
53	1.04	0.0364	75.50	72.52
54	1.02	0.0182	72.30	68.92

Con el fin de corroborar cualitativamente el ajuste con la distribución general de valores extremos por máxima verosimilitud se graficaron (Figura 55) las columnas $X_i^j(mm)$ y $X_7^j(mm)$ de la Tabla 21 de arriba.

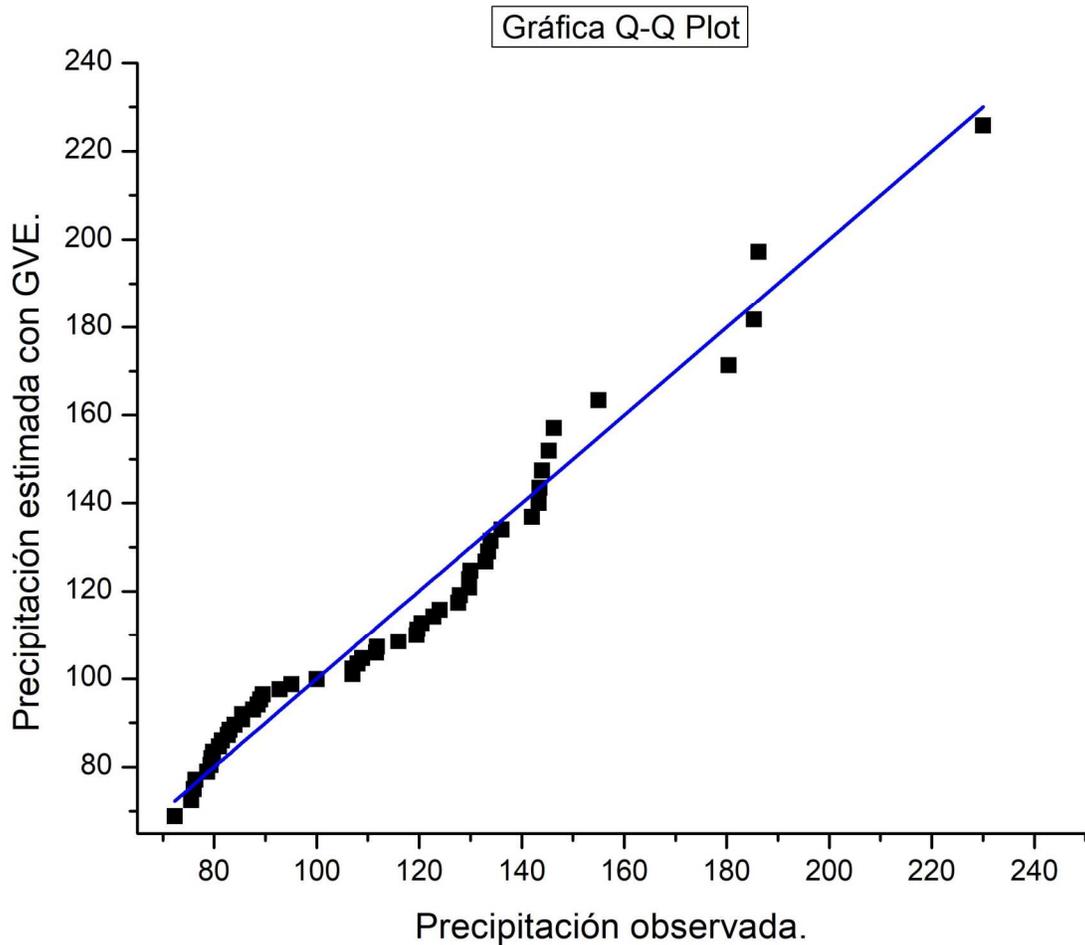


Figura 55.- Grafica Q-Q Plot de los valores observados contra los valores teóricos.

Se observa que los puntos (parejas de valores observados y teóricos para una misma probabilidad de no excedencia) tienden a una línea recta, lo que indica un buen ajuste.

Este ajuste se puede corroborar de forma cuantitativa mediante el coeficiente de correlación lineal simple definido como (Walpole et al., 1999):

$$r = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sqrt{s_x^2} \sqrt{s_y^2}} = \frac{s_{xy}}{(n-1)s_x s_y} \quad (48)$$

$$-1 < r < 1$$

Considerando los valores de la Tabla 21 de arriba, se tomó a los $X_i^j (m^3/s)$ como las x 's y a $X_T^j (m^3/s)$ como las y 's para aplicar la correlación entre estas dos columnas.

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) = 56,859.9682 \quad (49)$$

$$S_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} = 33.5156 \quad (50)$$

$$S_y = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} = 32.5182 \quad (51)$$

$$r = \frac{Cov(x,y)}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}} = \frac{S_{xy}}{(n-1)S_x S_y} = \frac{56,589.9682}{53 * 33.5156 * 32.5182} = 0.9844 \quad (52)$$

Una vez obtenido el coeficiente de correlación se comprobó su significación mediante la siguiente expresión: A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida (Walpole et al., 1999):

$$t = \frac{r_{xy} - 0}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{N - 2}}} \quad (53)$$

$$t = \frac{0.9844}{\sqrt{\frac{1 - 0.9844^2}{54 - 2}}} = 40.35 \quad (54)$$

Y se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación α y $N-2$ grados de libertad $-t_{\alpha, N-2}$, que como se sabe, marca el límite (baja probabilidad de ocurrencia, según la Hipótesis nula) de pertenencia de un cierto coeficiente r_{xy} a la distribución muestra de correlaciones procedentes de una población con $\rho = 0$. De esta forma si:

$t > t_{\alpha, N-2}$ Se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $\rho_{xy} = 0$. Por tanto las variables están relacionadas.

$t \leq t_{\alpha, N-2}$ Se acepta la Hipótesis nula. La correlación obtenida procede de una población cuyo valor $\rho_{xy} = 0$. Por tanto ambas variables no están relacionadas.

De la tabla de t Student para dos colas, $\alpha = 0.05$ y $54 - 2 = 52$ grados de libertad:

$$t_{0.05, 48} = 2.00$$

Se comparó el valor de t obtenido con el de las tablas:

$$40.35 > 2.00$$

Por lo tanto rechazamos la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0.05 y concluimos que ambas variables están relacionadas.

En la Figura 56 se muestra el ajuste logrado con la distribución general de valores extremos, la curva empírica es la dada por acomodar los datos observados de mayor a menor.

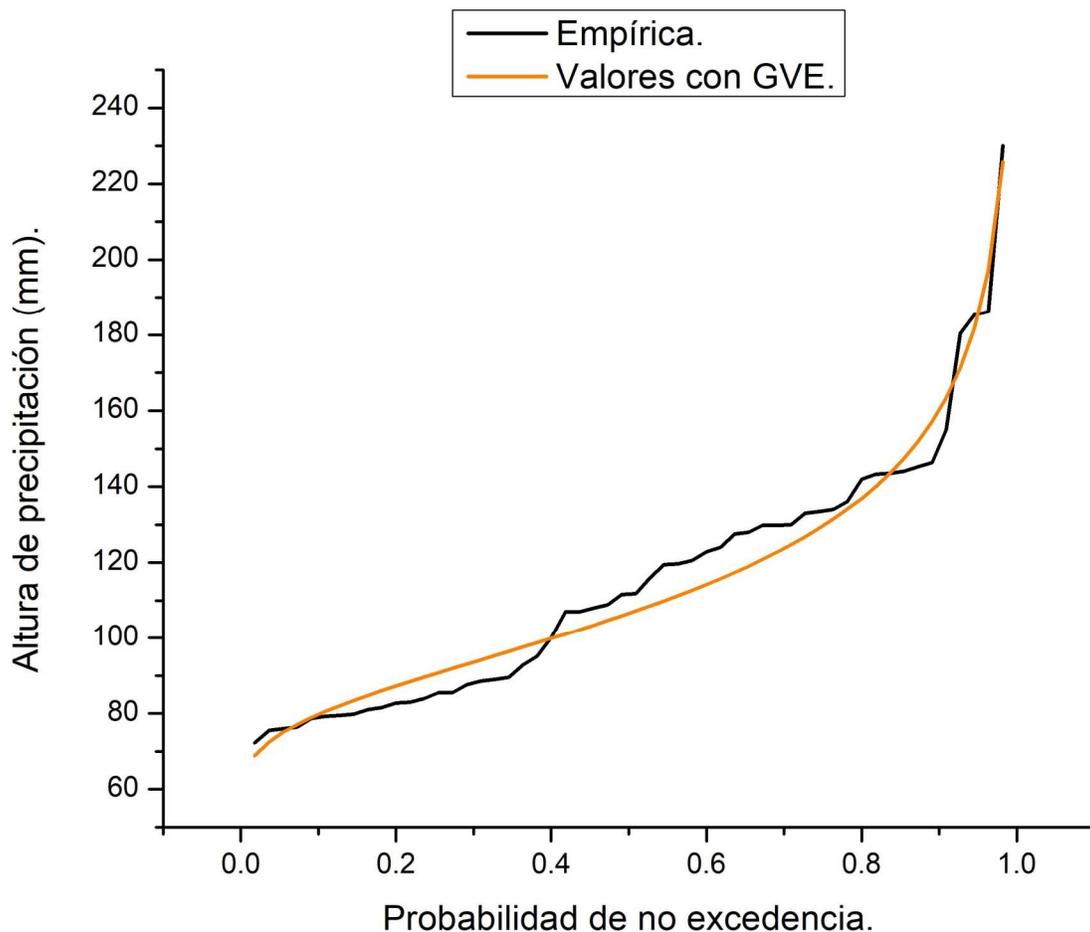


Figura 56.- Ajuste entre valores empíricos y teóricos.

Una vez demostrado el buen ajuste con la distribución GVE se calcularon alturas de precipitación para diversos periodos de retorno como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22.- Caudales de diseño para distintos periodos de retorno.

Periodo de retorno (años).	Probabilidad de ocurrencia.	Precipitación (mm).
2	0.5000	106.56
5	0.2000	136.89
10	0.1000	160.09
20	0.0500	185.03
30	0.0333	200.68
50	0.0200	221.70
100	0.0100	252.86

El aporte de agua de la Subcuenca se calculó utilizando el método racional modificado de Témez en donde el gasto pico o máximo se define con la expresión (López Miñano, 2008):

$$Q = \frac{CIA}{3.6} K \quad (55)$$

Donde Q es el caudal punta correspondiente a un período de retorno dado, en m^3/s ; C es el coeficiente de escorrentía; I máxima intensidad media en el intervalo de duración t_c para el mismo período de retorno, en mm/h ; A es la superficie de la cuenca, en km^2 ; y K es el coeficiente de uniformidad.

Tiempo de concentración.

Sustituyendo los datos de la Tabla 16 el tiempo de concentración propuesto por el método:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} = 0.3 \left(\frac{63.04}{\left(\frac{196}{63040} \right)^{1/4}} \right)^{0.76} = 20.95 \text{ horas.} \quad (56)$$

La duración efectiva de la tormenta se calculó como sigue:

$$d = 2\sqrt{t_c} = 2\sqrt{20.95 \text{ horas}} = 9.15 \text{ horas.} \quad (57)$$

El tiempo pico se estimó como:

$$t_p = 0.5d + 0.6t_c = 0.5 * 9.15 + 0.6 * 20.95 = 17.15 \text{ horas.} \quad (58)$$

Máxima precipitación diaria.

La estimación de la Máxima Precipitación Diaria (P_d), para el periodo de retorno de 20 años, en mm, se tomó de la Tabla 22 obteniendo una precipitación de $P_d = 185.03 \text{ mm}$. Una vez obtenido el valor de la precipitación, le aplicaremos el Factor Reductor de la Lluvia Diaria:

$$K_a = 1 - \frac{\log A}{15} = 1 - \frac{\log(702.05)}{15} = 0.81 \quad (59)$$

Por tanto, la Precipitación Máxima Diaria final, se reduce hasta obtener el valor de:

$$P'_d = P_d * K_a = (185.03 \text{ mm}) * 0.81 = 149.87 \text{ mm} \quad (60)$$

Intensidad media diaria.

$$I_d = \frac{P'_d}{24} = \frac{149.87 \text{ mm}}{24 \text{ h}} = 6.25 \text{ mm/h} \quad (61)$$

Intensidad media.

Se calculo la lluvia para una duración de 1 hora y un periodo de retorno de 2 años con el cociente de lluvia-duración:

$$R = \frac{P_1^2}{P_{24}^2} \quad (62)$$

De la Tabla 22 se tiene que $P_{24}^2 = 106.56 \text{ mm}$ y se recomienda utilizar un cociente $R = 0.35$ para regiones húmedas en México, por lo que sustituyendo en la ecuación anterior:

$$P_1^2 = P_{60}^2 = 0.35 * 106.56 \text{ mm} = 37.30 \text{ mm} \quad (63)$$

Con esta precipitación se calcularon las intensidades de lluvia para distintas duraciones y periodos de retorno en la estación *La Concha* utilizando la fórmula de F.C. Bell:

Tabla 23.- Cálculo de intensidades para el registro de la estación *La Concha*.

Periodo de retorno (años).	Intensidades máximas en mm/h para duraciones en minutos				
	10 min	30 min	60 min	90 min	120 min
2	103.28	57.13	37.51	29.00	24.07
5	136.31	75.40	49.50	38.28	31.77
10	161.30	89.22	58.58	45.30	37.59
20	186.29	103.05	67.65	52.31	43.42
30	200.91	111.13	72.96	56.42	46.82
50	219.33	121.32	79.65	61.59	51.12
100	244.32	135.14	88.73	68.61	56.94

De la Tabla 23 de arriba se obtuvo la intensidad de lluvia para 1 hora o 60 min y un periodo de retorno de 20 años:

$$I_1 = 67.65 \text{ mm/h}$$

La intensidad media se obtuvo sustituyendo los valores de I_d , I_1 y t_c :

$$I_t = 6.245 \left(\frac{67.65}{6.245} \right)^{\frac{28^{0.1} - (20.95)^{0.1}}{28^{0.1} - 1}} = 7.9 \text{ mm/h} \quad (64)$$

Coefficiente de escorrentía.

El Umbral de Escorrentía corresponde con el valor mínimo a partir del cual la precipitación produce escorrentía. Esto es, se debe cumplir que la lluvia caída P_d sea mayor que el valor del umbral de escorrentía ($P_d > P_0$), el valor de P_0 se estimo con el cuadro propuesto en el metodo racional modificado de Témez entrando con un suelo de la cuenca del grupo A que es un suelo arenoso, una pendiente menor al 3% y se determinaron distintas areas de la subcuenca con distinta vegetación por medio del SIATL del INEGI:

Tabla 24.- Valores del umbral de escorrentía o escurrimiento.

Uso del suelo	Área (km^2)	P_0 (mm)
Agrícola-pecuaria-forestal	278.46	40
Selva subcaducifolia	155.25	60
Vegetación hidrofolia	142.68	40
Selva caducifolia	90.87	60
Pastizal	34.78	58

Para obtener el P_0 final se aplicó la siguiente suma ponderada:

$$P_0 = \frac{(421.14 \text{ km}^2) * 40 \text{ mm} + (246.12 \text{ km}^2) * 60 \text{ mm} + (34.78 \text{ km}^2) * 58 \text{ mm}}{702.05 \text{ km}^2} = 47.90 \text{ mm} \quad (65)$$

Sustituyendo los datos de P_d y de P_0 se calculó el coeficiente de escorrentía o de escurrimiento:

$$C = \frac{[(149.87 - 47.90)(149.87 + 23 * (47.90))]}{[(149.87 + 11 * (47.90))^2]} = 0.2786 \quad (66)$$

Coficiente de uniformidad.

Finalmente, debemos corregir el valor del Tiempo de Concentración. Aplicamos para ello, el Coeficiente de Uniformidad:

$$K = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14} = 1 + \frac{20.95^{1.25}}{20.95^{1.25} + 14} = 1.762 \quad (67)$$

Caudal de referencia.

El Caudal de Referencia lo obtenemos sustituyendo los valores previamente calculados.

$$Q = \frac{CIA}{3.6} K = \frac{0.2786 * 7.90 \text{ mm/h} * 702.05 \text{ km}^2}{3.6} (1.762) = 756.27 \text{ m}^3/\text{s} \quad (68)$$

Utilizando las coordenadas del hidrograma unitario adimensional propuesto por el Soil Conservation Service (CFE, 1981) se le dio la forma al hidrograma de la subcuenca, que aplicando el método racional modificado de Témez se obtuvo el gasto pico de $756.27 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 20 años y con un tiempo pico de 17.15 horas se construyó el siguiente Hidrograma:

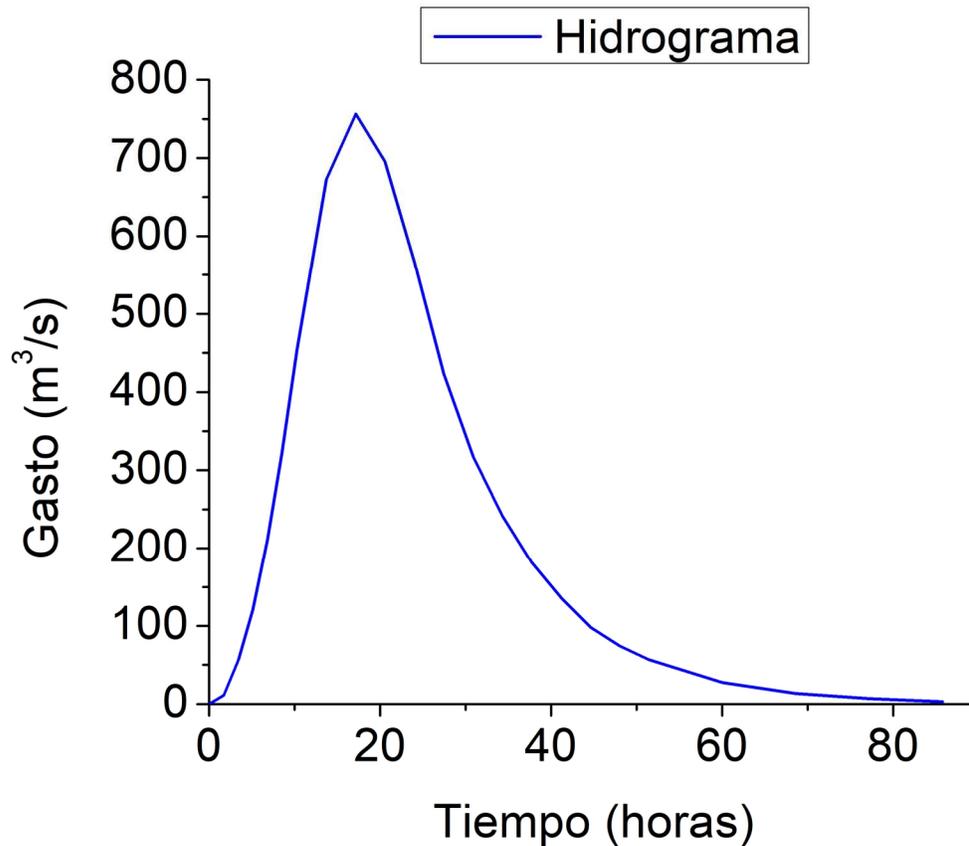


Figura 57.- Hidrograma de las Subcuenca El Palote-Higueras.

Anexo E.- Caudal aportado al sistema por la Subcuenca R. Las Conchas.

Se revisaron las características fisiográficas (Tabla 25) de la Subcuenca R. Las Conchas (RH11Be) cuyo cauce principal es el Río de Las Cañas utilizando la plataforma SIATL del INEGI y los registros medido con registros de la estación hidrométrica La Ballona localizada en las coordenadas geográficas Latitud 22°32'00" N y Longitud 105°27'00" O. La estación está ubicada sobre el Río de Las Cañas, en el cruce con la carretera México-Guadalajara-Nogales, a la altura del kilómetro 1052.6 sobre el límite de los municipios de Acaponeta, Nayarit y Escuinapa, Sinaloa, cerca del poblado de La Concha, Sinaloa.

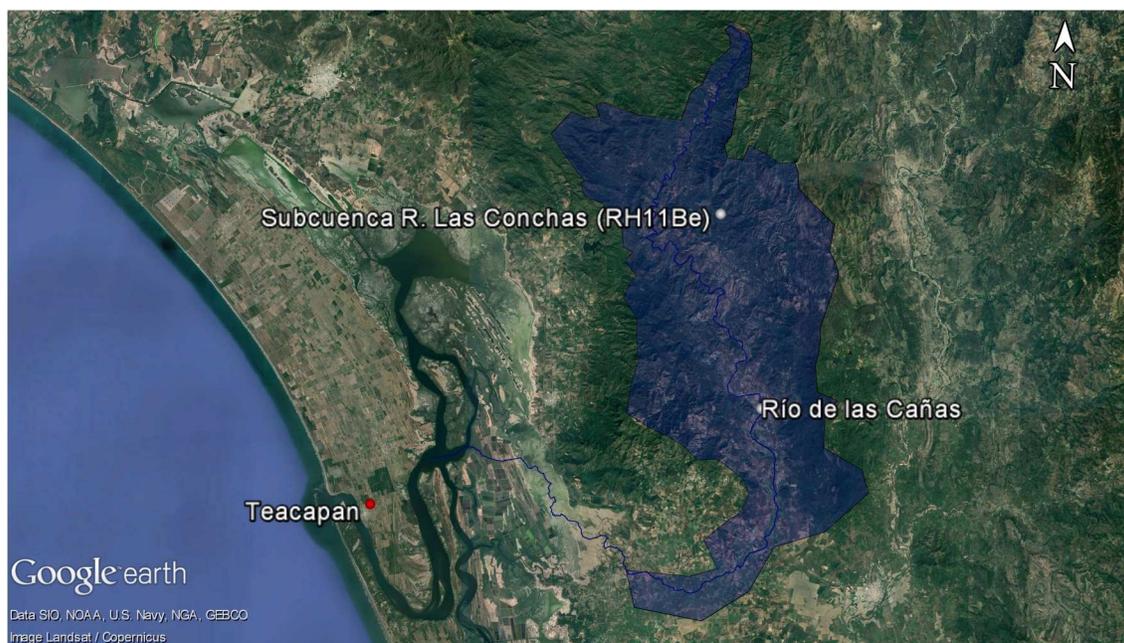


Figura 58.- Subcuenca R. Las Conchas.

Tabla 25.- Datos de la Subcuenca obtenidos de la aplicación geoespacial SIATL (INEGI, 2018).

Elevación máxima de la subcuenca	880.00	metros
Elevación mínima de la subcuenca	20.00	metros
Pendiente media de la subcuenca	23.42	%
Elevación máxima en corriente principal	854.00	metros
Elevación mínima en corriente principal	0.00	metros
Longitud de la corriente principal	97.00	kilómetros
Pendiente del cauce principal	0.88	%
Área drenada	490.81	Km^2

En el análisis de frecuencias del registro histórico (Figura 59) de los gastos máximos anuales en la estación hidrométrica La Ballona ubicada en el Río de las Cañas se realizó un ajuste con la Distribución de General de Valores Extremos por máxima verosimilitud para obtener los caudales de diseño para un periodo de retorno de determinado.

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-y}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (69)$$

Para la estimación de la bondad de ajuste se determinó el coeficiente de correlación r entre la curva empírica y la curva ajustada con la distribución.

Para el análisis extremal de los caudales del Río de Las Cañas se utilizó la metodología descrita en el libro Técnicas estadísticas en hidrología (Escalante-Sandoval and Reyes-Chávez, 2005) y se seleccionaron los gastos máximos anuales del registro histórico (Tabla 26).

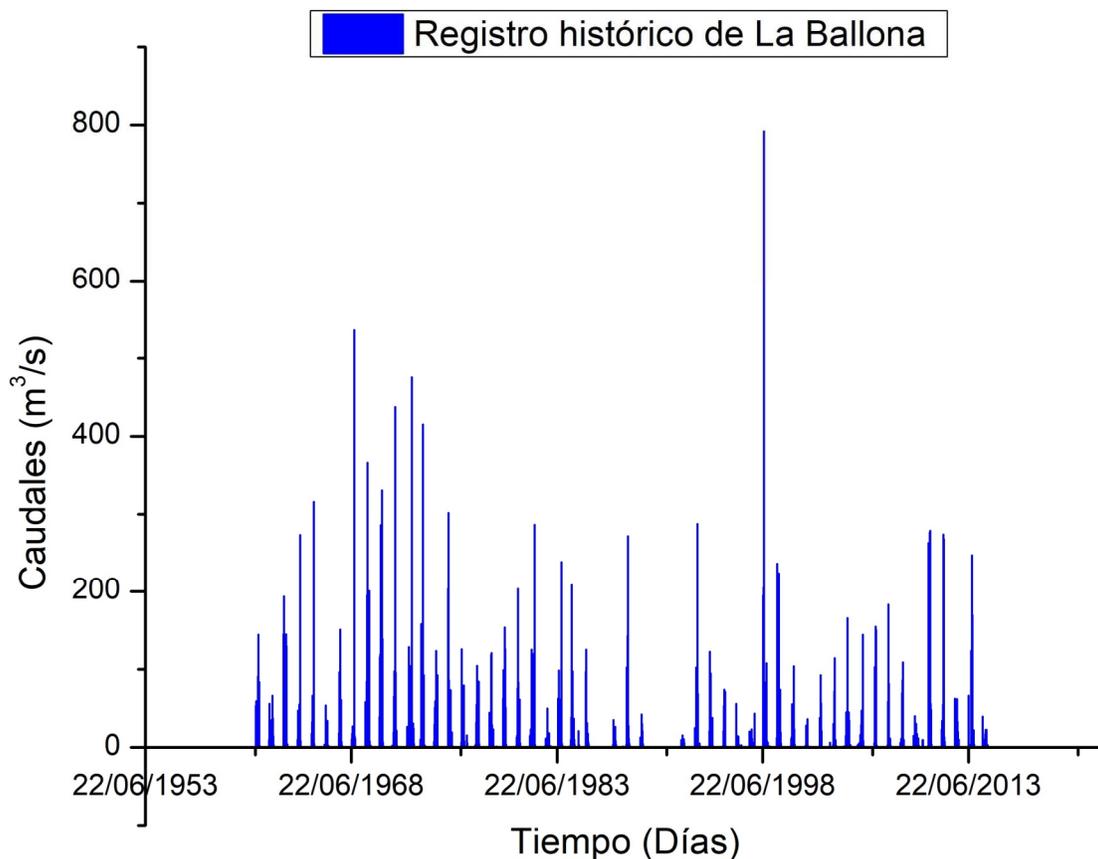


Figura 59.- Registro histórico de caudales en la estación La Ballona del Río de Las Cañas.

Tabla 26.- Registro de gastos máximos anuales de la estación La Ballona.

Orden	Fecha	Gastos máximos anuales (m ³ /s)	Orden	Fecha	Gastos máximos anuales (m ³ /s)
1	14/09/1961	144.20	26	01/08/1987	35.04
2	27/09/1962	66.17	27	21/08/1988	271.29
3	25/07/1963	193.26	28	22/08/1989	41.96
4	01/10/1964	272.82	29	19/08/1992	15.16
5	26/09/1965	315.63	30	13/09/1993	287.28
6	15/08/1966	53.44	31	16/08/1994	122.19
7	05/09/1967	150.77	32	01/09/1995	73.96
8	13/09/1968	536.14	33	17/07/1996	55.85
9	30/08/1969	365.88	34	13/11/1997	42.99
10	13/09/1970	330.33	35	18/07/1998	791.72
11	02/09/1971	437.67	36	05/07/1999	235.70
12	24/11/1972	475.50	37	22/09/2000	104.00
13	12/09/1973	414.87	38	20/09/2001	36.20
14	31/08/1974	123.28	39	05/09/2002	92.31
15	28/07/1975	301.37	40	21/09/2003	114.38
16	07/07/1976	125.58	41	28/08/2004	165.67
17	23/08/1977	104.29	42	10/10/2005	144.41
18	12/09/1978	120.63	43	17/09/2006	154.77
19	28/08/1979	153.36	44	18/08/2007	182.88
20	13/08/1980	203.26	45	08/09/2008	108.72
21	30/10/1981	286.10	46	28/07/2009	40.14
22	08/10/1982	49.80	47	09/09/2010	278.53
23	19/10/1983	238.16	48	24/08/2011	273.42
24	14/07/1984	208.17	49	28/06/2012	62.36
25	04/08/1985	124.93	50	18/09/2013	247.06
			51	03/07/2014	39.13

Prueba de homogeneidad. Prueba estadística t de **Student**

Tamaño de la muestra total $n = 50$

Media de la muestra total $\bar{x} = 195.47 \text{ m}^3/\text{s}$

La muestra se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 + n_2 = \frac{n}{2}$, entonces:

Tamaño de la submuestra (1) $n_1 = 25$

Media de la submuestra (1) $\bar{x}_1 = 231.82 \text{ m}^3/\text{s}$

Desviación estándar de la submuestra (1) $S_1 = 137.06 \text{ m}^3/\text{s}$

Tamaño de la submuestra (2) $n_2 = 25$

Media de la submuestra (2) $\bar{x}_2 = 159.12 \text{ m}^3/\text{s}$

Desviación estándar de la submuestra (2) $S_2 = 158.67 \text{ m}^3/\text{s}$

El estadístico de prueba se define como:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} = 1.6987 \quad (70)$$

El valor absoluto de t_d se compara con el valor de distribución t de Student de dos colas, con $v = n_1 + n_2 - 2 = 48$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$.

$$t_{v, 1-\alpha/2} = 2.00 \quad (71)$$

La serie se considera homogénea si $|t_d| < t_{v, 1-\alpha/2}$

$|1.6987| < 2.00 \therefore$ La serie es homogénea.

Los datos se ordenaron de mayor a menor (Tabla 27) y se les asignó una probabilidad de no excedencia con la distribución empírica de Weibull utilizando un número de orden (m) como sigue:

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots, n. \quad (72)$$

Donde

n Tamaño de la muestra analizada en años.

m Número de orden del registro.

$P(X \leq x)$ Probabilidad de no excedencia.

Tabla 27.- Muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor de la estación La Ballona.

Orden	Gastos máximos anuales (m^3/s)	Probabilidad de no excedencia.	Orden	Gastos máximos anuales (m^3/s)	Probabilidad de no excedencia.
1	791.72	0.9808	26	150.77	0.5000
2	536.14	0.9615	27	144.41	0.4808
3	475.50	0.9423	28	144.20	0.4615
4	437.67	0.9231	29	125.58	0.4423
5	414.87	0.9038	30	124.93	0.4231
6	365.88	0.8846	31	123.28	0.4038
7	330.33	0.8654	32	122.19	0.3846
8	315.63	0.8462	33	120.63	0.3654
9	301.37	0.8269	34	114.38	0.3462
10	287.28	0.8077	35	108.72	0.3269
11	286.10	0.7885	36	104.29	0.3077
12	278.53	0.7692	37	104.00	0.2885
13	273.42	0.7500	38	92.31	0.2692
14	272.82	0.7308	39	73.96	0.2500
15	271.29	0.7115	40	66.17	0.2308
16	247.06	0.6923	41	62.36	0.2115
17	238.16	0.6731	42	55.85	0.1923
18	235.70	0.6538	43	53.44	0.1731
19	208.17	0.6346	44	49.80	0.1538
20	203.26	0.6154	45	42.99	0.1346
21	193.26	0.5962	46	41.96	0.1154
22	182.88	0.5769	47	40.14	0.0962
23	165.67	0.5577	48	39.13	0.0769
24	154.77	0.5385	49	36.20	0.0577
25	153.36	0.5192	50	35.04	0.0385
			51	15.16	0.0192

Se aplicó la Distribución General de Valores Extremos (GVE) por máxima verosimilitud para ajustar la serie de datos.

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-y}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (73)$$

Si $\beta = 0$ $-\infty < x < \infty$ la distribución es tipo I (Gumbel).

Si $\beta < 0$ $v + \frac{\alpha}{\beta} < x < \infty$ la distribución es tipo II (Fréchet).

Si $\beta > 0$ $-\infty < x < v + \frac{\alpha}{\beta}$ la distribución es tipo III (Weibull).

α Parámetro de escala $\alpha > 0$.

β Parámetro de forma.

v Parámetro de ubicación.

Dado que se requieren parámetros iniciales α, β y v para el proceso iterativo de máxima verosimilitud, se empleó la técnica de sextiles:

Estimadores por sextiles:

$$\alpha = 98.8693$$

$$\beta = -0.1901$$

$$v = 113.0353$$

Estimadores por máxima verosimilitud:

La variable reducida (Tabla 28) de la Distribución General de Valores Extremos (GVE) utilizada para las iteraciones fue:

$$y = -\frac{1}{\beta} \ln \left(1 - \left(\frac{x-v}{\alpha} \right)^\beta \right) \quad (74)$$

La variable reducida en la primera iteración será:

$$y_i = -\frac{1}{-0.1901} \ln \left(1 - \left(\frac{x_i - 113.0353}{98.8693} \right)^{-0.1901} \right) \quad (75)$$

Tabla 28.- Variable reducida de GVE para la primera etapa de iteración.

Orden	Gasto (x_i)	y_i	e^{-y_i}	$e^{(\beta-1)y_i}$	$e^{\beta y_i}$	$y_i e^{-y_i}$
1	791.72	4.393	0.012	0.005	0.434	0.054
2	536.14	3.131	0.044	0.024	0.551	0.137
3	475.50	2.782	0.062	0.036	0.589	0.172
4	437.67	2.551	0.078	0.048	0.616	0.199
5	414.87	2.407	0.090	0.057	0.633	0.217
6	365.88	2.084	0.124	0.084	0.673	0.259
7	330.33	1.836	0.159	0.112	0.705	0.293
8	315.63	1.731	0.177	0.128	0.720	0.307
9	301.37	1.626	0.197	0.144	0.734	0.320

La tabla continúa en la siguiente página.

10	287.28	1.520	0.219	0.164	0.749	0.332
11	286.10	1.511	0.221	0.166	0.750	0.333
12	278.53	1.453	0.234	0.177	0.759	0.340
13	273.42	1.414	0.243	0.186	0.764	0.344
14	272.82	1.409	0.244	0.187	0.765	0.344
15	271.29	1.397	0.247	0.190	0.767	0.345
16	247.06	1.206	0.299	0.238	0.795	0.361
17	238.16	1.134	0.322	0.259	0.806	0.365
18	235.70	1.114	0.328	0.266	0.809	0.366
19	208.17	0.884	0.413	0.349	0.845	0.365
20	203.26	0.841	0.431	0.367	0.852	0.363
21	193.26	0.755	0.470	0.407	0.866	0.355
22	182.88	0.663	0.515	0.454	0.882	0.342
23	165.67	0.507	0.602	0.547	0.908	0.305
24	154.77	0.406	0.666	0.617	0.926	0.271
25	153.36	0.393	0.675	0.627	0.928	0.265
26	150.77	0.368	0.692	0.645	0.932	0.255
27	144.41	0.308	0.735	0.693	0.943	0.226
28	144.20	0.306	0.736	0.695	0.943	0.225
29	125.58	0.125	0.882	0.861	0.976	0.111
30	124.93	0.119	0.888	0.868	0.978	0.106
31	123.28	0.103	0.902	0.885	0.981	0.093
32	122.19	0.092	0.912	0.896	0.983	0.084
33	120.63	0.076	0.927	0.913	0.986	0.071
34	114.38	0.014	0.987	0.984	0.997	0.013
35	108.72	-0.044	1.045	1.054	1.008	-0.046
36	104.29	-0.089	1.093	1.112	1.017	-0.098
37	104.00	-0.092	1.097	1.116	1.018	-0.101
38	92.31	-0.214	1.238	1.290	1.041	-0.265
39	73.96	-0.411	1.508	1.631	1.081	-0.620
40	66.17	-0.497	1.643	1.806	1.099	-0.816
41	62.36	-0.539	1.715	1.900	1.108	-0.925
42	55.85	-0.613	1.845	2.073	1.124	-1.131
43	53.44	-0.640	1.897	2.142	1.129	-1.214
44	49.80	-0.682	1.978	2.252	1.138	-1.349
45	42.99	-0.761	2.140	2.473	1.156	-1.629
46	41.96	-0.773	2.166	2.509	1.158	-1.674
47	40.14	-0.794	2.213	2.574	1.163	-1.758
48	39.13	-0.806	2.240	2.611	1.166	-1.806
49	36.20	-0.841	2.319	2.720	1.173	-1.950
50	35.04	-0.855	2.351	2.765	1.176	-2.009
51	15.16	-1.097	2.995	3.689	1.232	-3.284
		30.912	46.218	48.997	46.535	-12.136

El proceso iterativo se basa en:

$$\begin{aligned}\delta_{\alpha_i} &= -\frac{\alpha_i}{n} \left\{ hQ_i + \frac{a(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{gs}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\} \\ \delta_{\beta_i} &= -\frac{1}{n} \left\{ fQ_i + \frac{gs(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{c}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\} \\ \delta_{v_i} &= -\frac{\alpha_i}{n} \left\{ bQ_i + \frac{h(P_i+Q_i)}{\beta_i} + \frac{f}{\beta_i} \left[R_i - \frac{(P_i+Q_i)}{\beta_i} \right] \right\}\end{aligned}\quad (76)$$

$\delta_{v_i}, \delta_{\alpha_i}, \delta_{\beta_i}$ Son las diferencias entre los valores verdaderos y los de la i -ésima iteración.
 P_i, Q_i, R_i Se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$P_i = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad (77)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^n e^{(\beta-1)y_i} - (1 - \beta) \sum_{i=1}^n e^{\beta y_i} \quad (78)$$

$$R_i = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad (79)$$

a, b, c, f, gs y h Son los elementos de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros de la distribución GVE para $-1.5 < \beta < 1.0$ se puede utilizar (Reynal, 1982):

$$\begin{aligned}a &= 0.661437 - 0.562798\beta + 0.985803\beta^2 - 0.059011\beta^3 \\ b &= 1.235356 - 0.162161\beta - 0.115137\beta^2 + 0.009577\beta^3 \\ c &= 0.4711 - 0.77627\beta + 0.295825\beta^2 - 0.009645\beta^3 \\ f &= 0.244435 - 0.10287\beta - 0.19583\beta^2 - 0.016837\beta^3 \\ gs &= 0.15373 - 0.411923\beta - 0.479209\beta^2 - 0.075004\beta^3 \\ h &= 0.338937 - 1.209555\beta - 0.109822\beta^2 - 0.019801\beta^3\end{aligned}\quad (80)$$

Los valores de la siguiente iteración fueron:

$$\begin{aligned}\alpha_{i+1} &= \alpha_i + \delta_{\alpha_i} \\ \beta_{i+1} &= \beta_i + \delta_{\beta_i} \\ v_{i+1} &= v_i + \delta_{v_i}\end{aligned}\quad (81)$$

Y el proceso iterativo terminó cuando las siguientes derivadas parciales se aproximaron a cero:

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial LL}{\partial \alpha} &= \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{P_i + Q_i}{\beta_i} \right) \approx 0 \\
-\frac{\partial LL}{\partial \beta} &= \frac{1}{\beta_i} \left(R_i - \frac{P_i + Q_i}{\beta_i} \right) \approx 0 \\
-\frac{\partial LL}{\partial v} &= \left(\frac{Q_i}{\alpha_i} \right) \approx 0
\end{aligned} \tag{82}$$

Tabla 29.- Proceso de búsqueda de parámetros de la distribución general de valores extremos por máxima verosimilitud.

α_i	β_i	v_i	P_i	Q_i	R_i	$-\frac{\partial LL}{\partial \alpha}$	$-\frac{\partial LL}{\partial \beta}$	$-\frac{\partial LL}{\partial v}$	δ_{α_i}	δ_{β_i}	δ_{v_i}	α_{i+1}	β_{i+1}	v_{i+1}
98.869	-0.190	113.035	4.782	-6.384	7.951	0.085	2.482	-0.065	-7.179	-0.034	5.154	91.69	-0.22	118.19
91.690	-0.224	118.189	-0.058	-0.394	1.645	0.022	1.659	-0.004	-3.274	-0.028	-2.065	88.42	-0.25	116.12
88.417	-0.252	116.124	-0.237	0.216	-0.120	0.001	0.808	0.002	-0.685	-0.012	-0.930	87.73	-0.26	115.19
87.732	-0.265	115.194	-0.084	0.106	-0.195	-0.001	0.430	0.001	-0.165	-0.006	-0.330	87.57	-0.27	114.86
87.567	-0.271	114.864	-0.038	0.057	-0.129	-0.001	0.224	0.001	-0.050	-0.003	-0.147	87.52	-0.27	114.72
87.517	-0.274	114.718	-0.020	0.031	-0.072	0.000	0.115	0.000	-0.019	-0.002	-0.072	87.50	-0.28	114.65
87.497	-0.275	114.645	-0.010	0.016	-0.038	0.000	0.059	0.000	-0.009	-0.001	-0.037	87.49	-0.28	114.61
87.488	-0.276	114.608	-0.005	0.008	-0.020	0.000	0.031	0.000	-0.004	0.000	-0.018	87.48	-0.28	114.59
87.484	-0.277	114.590	-0.003	0.004	-0.010	0.000	0.016	0.000	-0.002	0.000	-0.010	87.48	-0.28	114.58
87.482	-0.277	114.581	-0.001	0.001	-0.006	0.000	0.010	0.000	-0.001	0.000	-0.004	87.48	-0.28	114.58
87.481	-0.277	114.577	-0.002	0.002	-0.003	0.000	0.003	0.000	-0.001	0.000	-0.004	87.48	-0.28	114.57

En la Tabla 29 se observa que los valores de las columnas de convergencia (derivadas parciales) después de 11 iteraciones se aproximan a cero por lo que se da por terminado el proceso.

Finalmente:

$$\alpha = 87.4802$$

$$\beta = -0.2770$$

$$v = 114.5727$$

Por lo tanto los gastos estimados con la distribución GVE se obtuvieron con la siguiente expresión:

$$Q_T = \frac{87.4802}{-0.2770} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-0.2770} \right] + 114.5727 \quad \text{para } i = 1, 2, 3 \dots n. \tag{83}$$

Siendo T el periodo de retorno y $\left(1 - \frac{1}{T} \right)$ la probabilidad de no excedencia.

En la Tabla 30 la columna de Q_i^j Son los eventos ordenados de mayor a menor con un periodo de retorno asignado $T = \frac{n_j+1}{m}$ y una probabilidad de no excedencia $P = 1 - \frac{1}{T}$ y la columna de Q_T^j son los eventos estimados por la distribución de probabilidad general de valores extremos para cada periodo de retorno T asignado a la muestra ordenada Q_i^j .

Tabla 30.- Comparativa entre gastos observados y gastos calculados.

(i)	$T(\text{años})$	$P(1-1/T)$	$Q_i^j(m^3/s)$	$Q_T^j(m^3/s)$
1	52.00	0.9808	791.72	739.73
2	26.00	0.9615	536.14	573.25
3	17.33	0.9423	475.50	489.05
4	13.00	0.9231	437.67	434.39
5	10.40	0.9038	414.87	394.58
6	8.67	0.8846	365.88	363.58
7	7.43	0.8654	330.33	338.37
8	6.50	0.8462	315.63	317.20
9	5.78	0.8269	301.37	299.01
10	5.20	0.8077	287.28	283.09
11	4.73	0.7885	286.10	268.96
12	4.33	0.7692	278.53	256.26
13	4.00	0.7500	273.42	244.74
14	3.71	0.7308	272.82	234.19
15	3.47	0.7115	271.29	224.45
16	3.25	0.6923	247.06	215.42
17	3.06	0.6731	238.16	206.99
18	2.89	0.6538	235.70	199.08
19	2.74	0.6346	208.17	191.62
20	2.60	0.6154	203.26	184.56
21	2.48	0.5962	193.26	177.85
22	2.36	0.5769	182.88	171.45
23	2.26	0.5577	165.67	165.32
24	2.17	0.5385	154.77	159.45
25	2.08	0.5192	153.36	153.79
26	2.00	0.5000	150.77	148.32
27	1.93	0.4808	144.41	143.03
28	1.86	0.4615	144.20	137.90
29	1.79	0.4423	125.58	132.90
30	1.73	0.4231	124.93	128.03
31	1.68	0.4038	123.28	123.26

La tabla continúa en la siguiente página.

32	1.63	0.3846	122.19	118.58
33	1.58	0.3654	120.63	113.98
34	1.53	0.3462	114.38	109.45
35	1.49	0.3269	108.72	104.97
36	1.44	0.3077	104.29	100.52
37	1.41	0.2885	104.00	96.10
38	1.37	0.2692	92.31	91.68
39	1.33	0.2500	73.96	87.26
40	1.30	0.2308	66.17	82.81
41	1.27	0.2115	62.36	78.31
42	1.24	0.1923	55.85	73.73
43	1.21	0.1731	53.44	69.05
44	1.18	0.1538	49.80	64.23
45	1.16	0.1346	42.99	59.21
46	1.13	0.1154	41.96	53.92
47	1.11	0.0962	40.14	48.26
48	1.08	0.0769	39.13	42.05
49	1.06	0.0577	36.20	34.99
50	1.04	0.0385	35.04	26.45
51	1.02	0.0192	15.16	14.60

Con el fin de corroborar cualitativamente el ajuste con la distribución general de valores extremos por máxima verosimilitud se graficaron (Figura 60) las columnas $Q_i^j(m^3/s)$ y $Q_T^j(m^3/s)$ de la Tabla 30 de arriba.

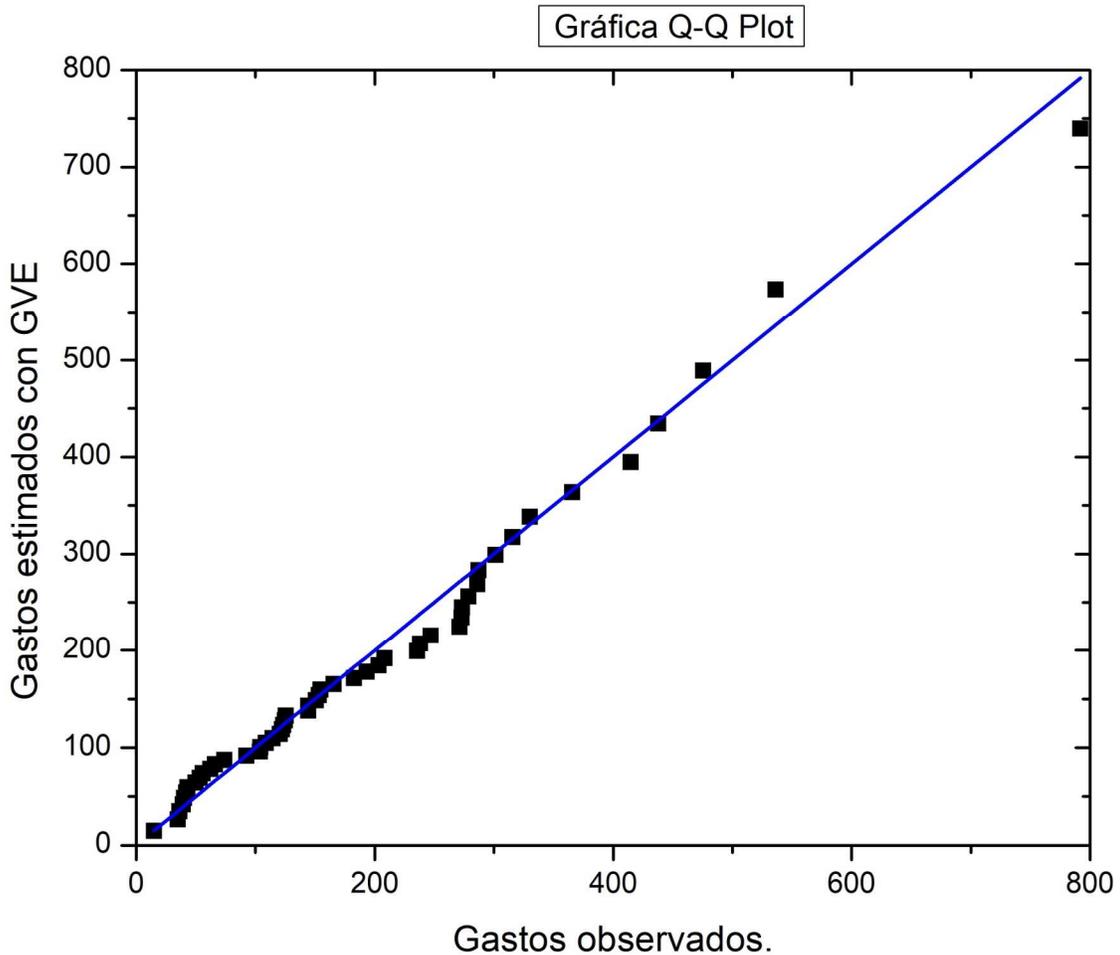


Figura 60.- Grafica Q-Q Plot de los valores observados contra los valores teóricos.

Se observa que los puntos (parejas de valores observados y teóricos para una misma probabilidad de no excedencia) tienden a una línea recta, lo que indica un buen ajuste.

Este ajuste se puede corroborar de forma cuantitativa mediante el coeficiente de correlación lineal simple definido como (Walpole et al., 1999):

$$r = \frac{Cov(x,y)}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}} = \frac{S_{xy}}{(n-1)S_x S_y} \quad (84)$$

$$-1 < r < 1$$

Considerando los valores de la Tabla 30 de arriba, se tomó a los $Q_i^j (m^3/s)$ como las x 's y a $Q_T^j (m^3/s)$ como las y 's para aplicar la correlación entre estas dos columnas.

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y}) = 1,092,600.5528 \quad (85)$$

$$S_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} = 151.3357 \quad (86)$$

$$S_y = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2} = 145.3044 \quad (87)$$

$$r = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}} = \frac{S_{xy}}{(n-1)S_x S_y} = \frac{1,092,600.5528}{50 * 151.3357 * 145.3044} = 0.9937 \quad (88)$$

Una vez obtenido el coeficiente de correlación se comprobó su significación mediante la siguiente expresión: A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida (Walpole et al., 1999):

$$t = \frac{r_{xy} - 0}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{N-2}}} \quad (89)$$

$$t = \frac{0.9937}{\sqrt{\frac{1 - 0.9937^2}{51-2}}} = 62.06 \quad (90)$$

Y se compara el valor obtenido con el existente en las tablas para un cierto nivel de significación α y $N-2$ grados de libertad $-t_{\alpha, N-2}$, que como se sabe, marca el límite (baja probabilidad de ocurrencia, según la Hipótesis nula) de pertenencia de un cierto coeficiente r_{xy} a la distribución muestra de correlaciones procedentes de una población con $\rho = 0$. De esta forma si:

$t > t_{\alpha, N-2}$ Se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor $\rho_{xy} = 0$. Por tanto las variables están relacionadas.

$t \leq t_{\alpha, N-2}$ Se acepta la Hipótesis nula. La correlación obtenida procede de una población cuyo valor $\rho_{xy} = 0$. Por tanto ambas variables no están relacionadas.

De la tabla de t Student para dos colas, $\alpha = 0.05$ y $51 - 2 = 48$ grados de libertad:

$$t_{0.05, 48} = 2.00$$

Se comparó el valor de t obtenido con el de las tablas:

$$62.06 > 2.00$$

Por lo tanto rechazamos la Hipótesis nula con un riesgo (máximo) de equivocarnos de 0.05 y concluimos que ambas variables están relacionadas.

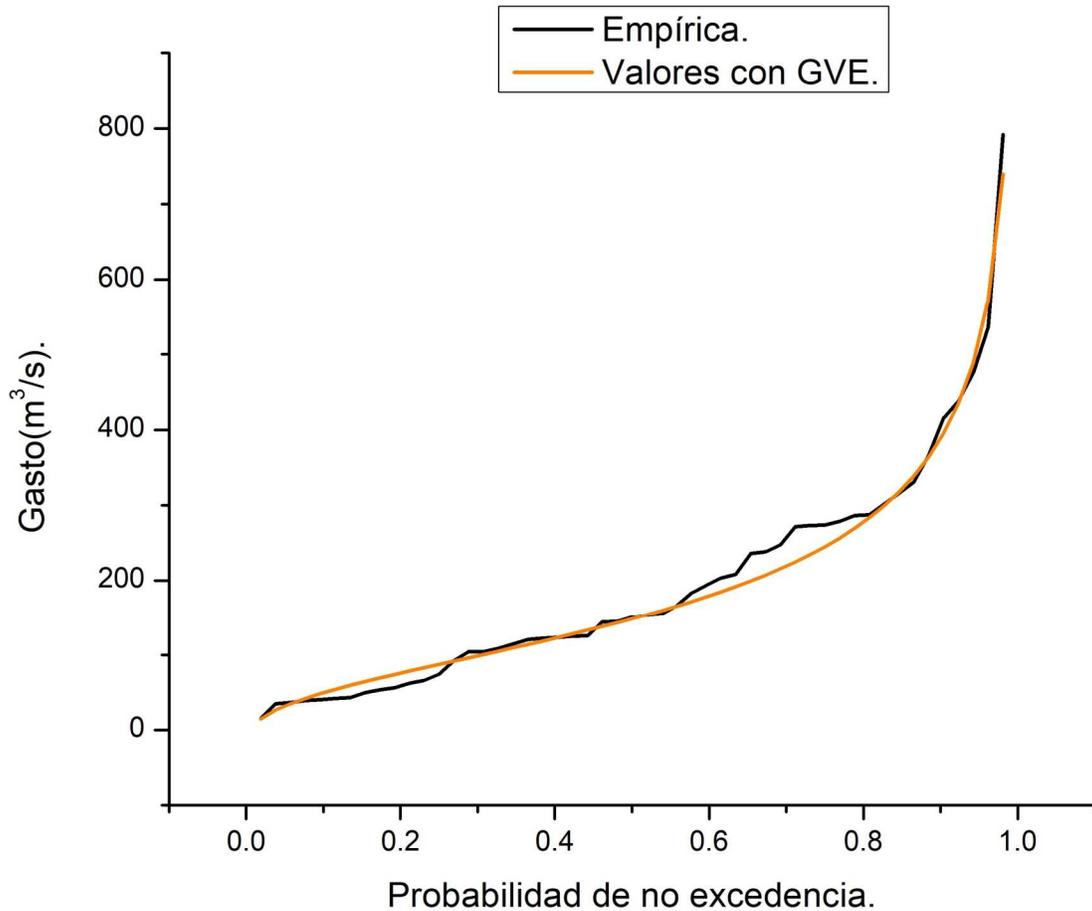


Figura 61.- Se muestra el ajuste logrado con la distribución general de valores extremos.

Una vez demostrado el buen ajuste (Figura 61) con la distribución GVE se calcularon los gastos para diversos periodos de retorno como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31.- Caudales de diseño para distintos periodos de retorno utilizando la distribución general de valores extremos.

Periodo de retorno (años).	Probabilidad de ocurrencia.	Gasto (m^3/s).
2	0.5000	148.32
5	0.2000	277.25
10	0.1000	387.80
20	0.0500	517.77
30	0.0333	605.15
50	0.0200	729.47
100	0.0100	928.03

Para construir el hidrograma se necesita calcular el gasto y tiempo pico; para estimar el tiempo de concentración se utilizó la fórmula de propuesta por el método racional modificado:

$$t_c = 0.3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} = 0.3 \left(\frac{97.00 \text{ km}}{\left(\frac{854 \text{ m}}{97000 \text{ m}} \right)^{1/4}} \right)^{0.76} = 23.50 \text{ horas.} \quad (91)$$

Donde t_c Tiempo de concentración en h, L Longitud del cauce principal en km, J pendiente media del cauce principal en m/m .

La duración efectiva de la tormenta se calculó como sigue:

$$d = 2\sqrt{t_c} = 2\sqrt{23.50 \text{ horas}} = 9.70 \text{ horas.} \quad (92)$$

El tiempo pico se estimó como:

$$t_p = 0.5d + 0.6t_c = 0.5 * 9.70 + 0.6 * 23.50 = 18.95 \text{ horas.} \quad (93)$$

Utilizando las coordenadas del hidrograma unitario adimensional propuesto por el Soil Conservation Service (CFE, 1981), el gasto de diseño de $517.77 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondiente a un periodo de retorno de 20 años y un tiempo pico de 18.95 horas se construyó el siguiente Hidrograma:

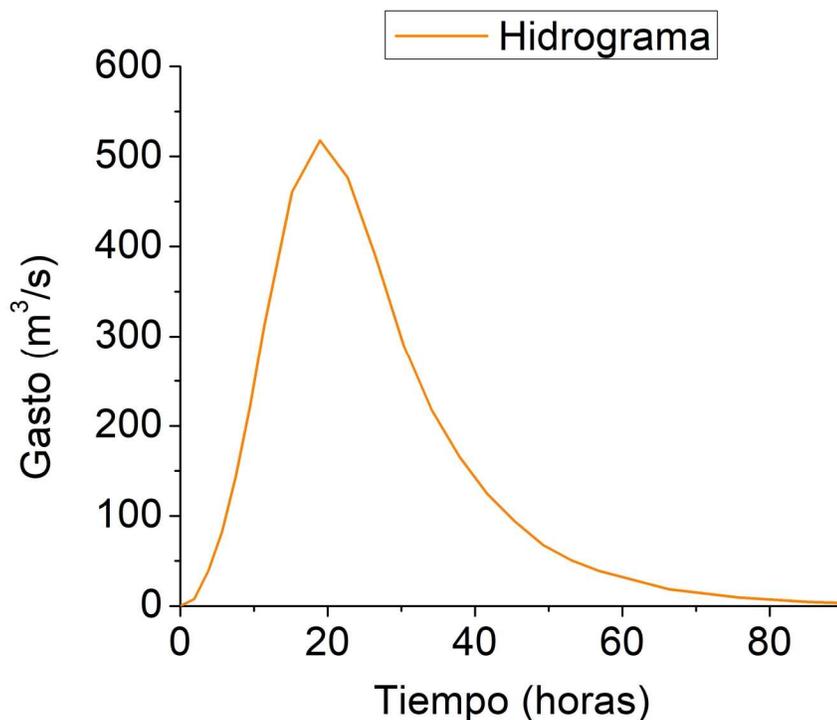


Figura 62.- Hidrograma de las Subcuenca R. Las Conchas.

Anexo F.- Propuesta de periodo de retorno.

Con el fin de seleccionar un periodo de retorno se revisó el registro de huracanes que han tenido un impacto significativo sobre el estero de Teacapán.

En las últimas cuatro décadas se han presentado cuatro huracanes que han impactado directamente en el poblado de Teacapán cuyas trayectorias se muestran en las Figuras 63, 64, 65 y 66; el huracán "Olivia" formado del 22 al 25 Octubre de 1975, el huracán "Tico" que tocó Teacapán del 11 al 19 de Octubre de 1983, el huracán "Rosa" de categoría II que el 13 de octubre de 1994 impactó en Teacapán con vientos máximos de 165 km/h afectando seriamente el territorio municipal y el huracán "Willa" que tocó Teacapán del 20 al 24 de Octubre de 2018.

Con estos datos se estimó el periodo de retorno a tomar en cuenta con la siguiente expresión:

$$T = \frac{\text{Periodo de 1950 a 2018}}{\text{Impacto de 4 huracanes}} \approx 20 \text{ años} \quad (94)$$

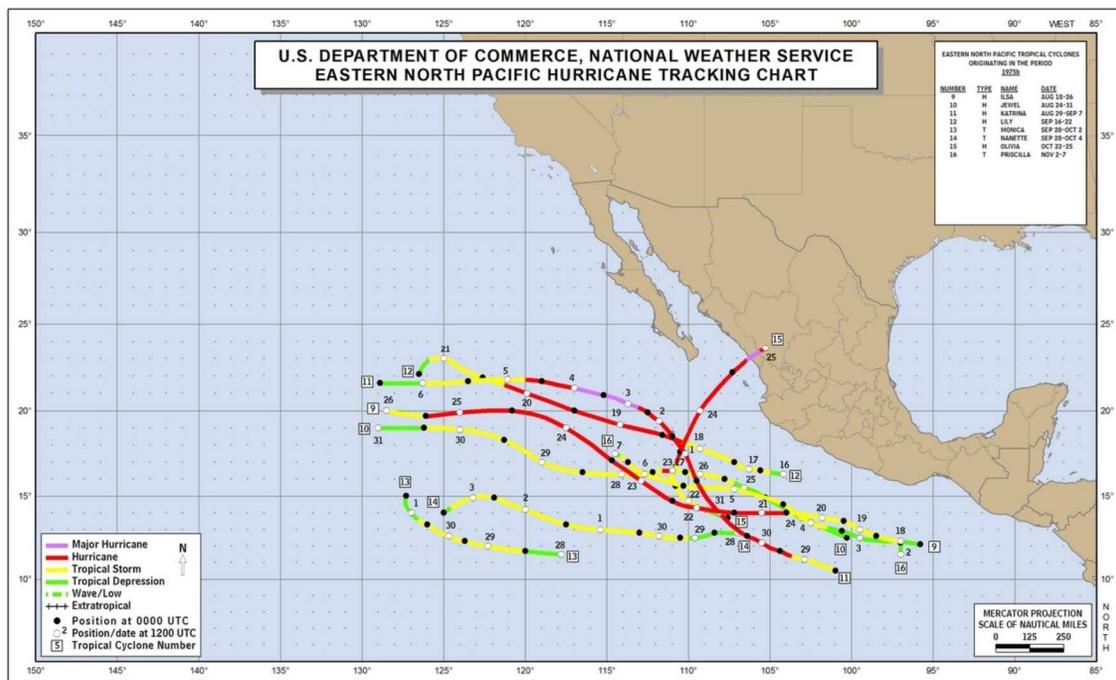


Figura 63.- Trayectoria del huracán Olivia (Landsea and Franklin, 2013).

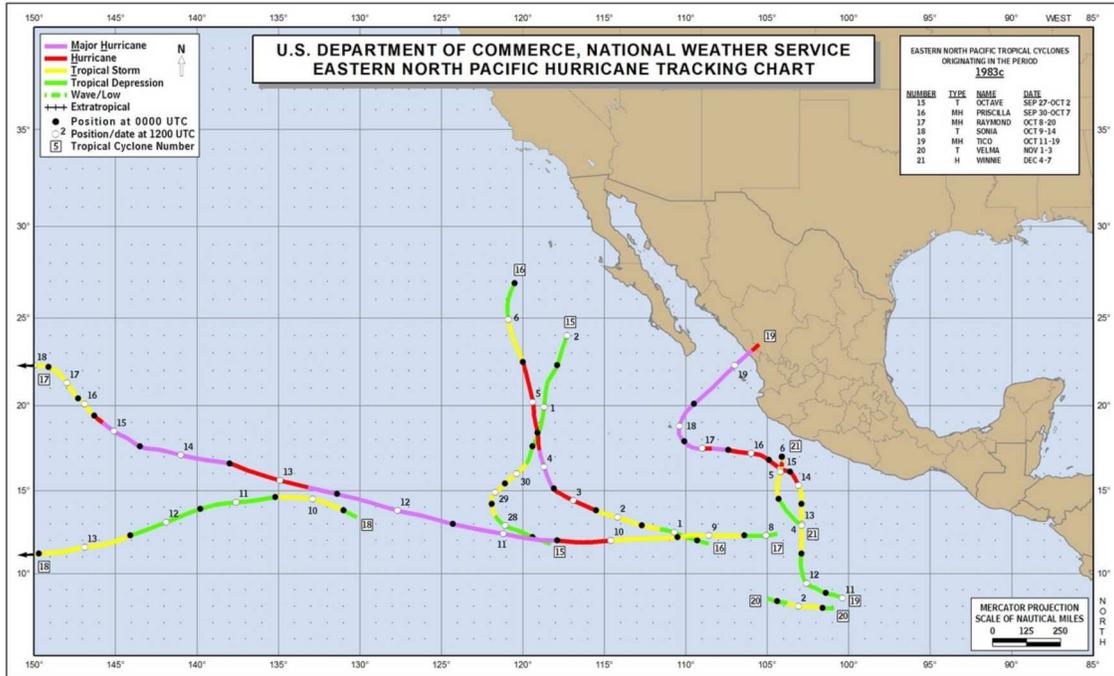


Figura 64.- Trayectoria del huracán Tico (Landsea and Franklin, 2013).

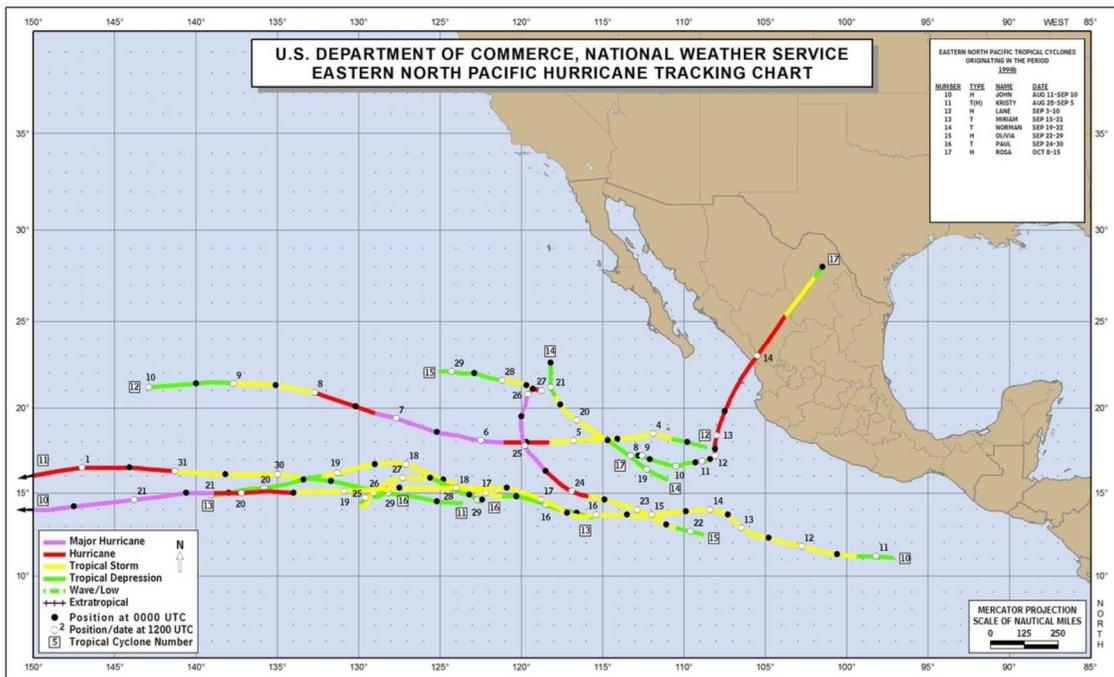


Figura 65.- Trayectoria del huracán Rosa (Landsea and Franklin, 2013).



Figura 66.- Trayectoria del huracán Willa (Landsea and Franklin, 2013).

Anexo G.- Construcción de Hidrograma total.

El forzamiento de gasto variable en el tiempo en el modelo numérico se logró construyendo un hidrograma en base a las coordenadas del hidrograma unitario propuesto por el Soil Conservation Service que permitió definir con mayor detalle su forma (CFE, 1981), para obtener el hidrograma total que se observa en la Figura 67 se realizó la suma del hidrograma de la Subcuenca El Palote-Higueras con el hidrograma de la Subcuenca R. Las Conchas.

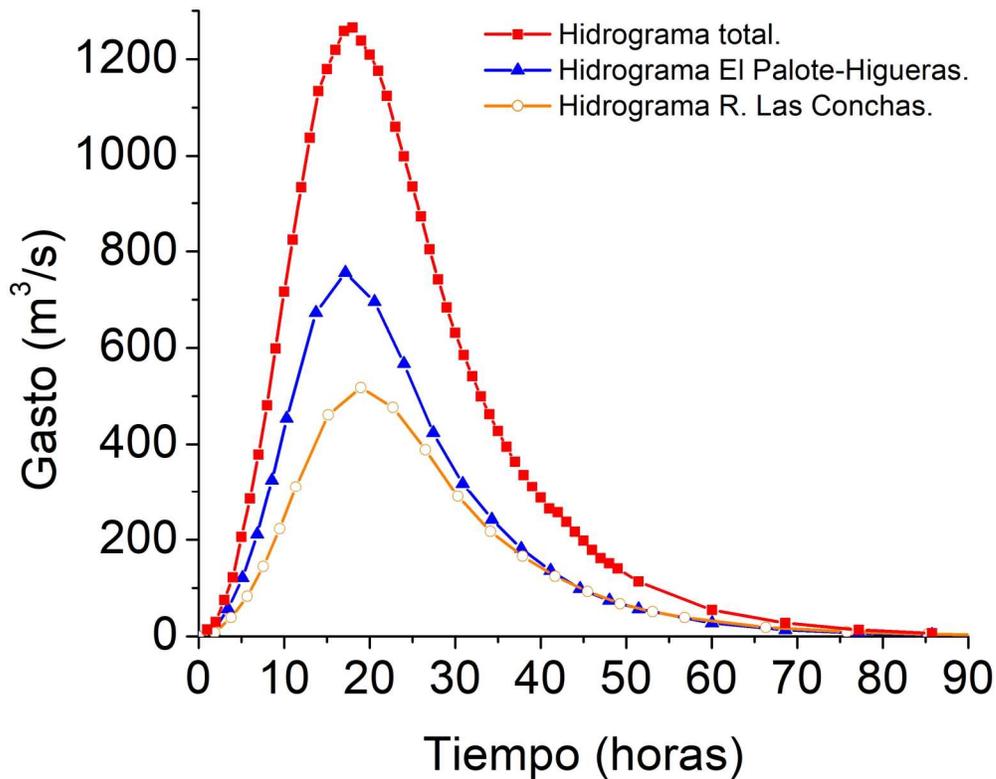


Figura 67.- Hidrograma total utilizado para forzar el modelo numérico en el escenario de condiciones extremas.

Anexo H.- Sobreelevación por marea de tormenta.

Para este cálculo se recurrió a la metodología expuesta en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

- Latitud del área de estudio: $\phi = 22.54 \text{ grados}$
- Cálculo del índice de presión:

$$P_0 = 1028.14 - 1.695\phi = 989.93 \text{ mbar} \quad (95)$$

Donde ϕ es la latitud del sitio de estudio.

- Diferencia de presiones Δ_p :
 $\Delta_p = 1013.25 - P_0 = 23.31 \text{ mbar}$ (96)
- Radio máximo de viento R:

$$R = 0.0006574e^{0.01155P_0} = 60.74 \text{ km} \quad (97)$$

- Radio asociado al FETCH,
 $r = (1.4134 - 0.01R)R = 48.96 \text{ km}$ (98)
- Índice de energía asociado al huracán E:

$$E = 151.2(1014.24 - P_0)^{1.1667}R^{0.6667}(\text{sen}\phi)^{-0.3333} = 133,065.66 \quad (99)$$

- Longitud del Fetch:
 $F = 0.3391E^{0.553} = 231.17 \text{ km}$ (100)

- Altura de ola significativa asociada a un evento:

$$H_{1/3} = 0.024E^{0.452} = 4.97 \text{ metros} \quad (101)$$

- Periodo de ola significativa:
 $T_{1/3} = 0.644E^{0.222} = 8.84 \text{ segundos}$ (102)
- Tiempo de duración del huracán

$$t_D = 0.087E^{0.429} = 13.73 \text{ horas} \quad (103)$$

- Velocidad del viento formativo:

$$U_{10} = 7.26(H_{1/3})^{0.4} = 13.79 \text{ m/s} = 30.85 \text{ mph} \quad (104)$$

- Índice de ascenso por oleaje S_I

Con $R=60.74 \text{ km}$ y un $D_p = 23.31 \text{ mbar}$ utilizando la figura de bajo se obtuvo un $S_I = 1.47$

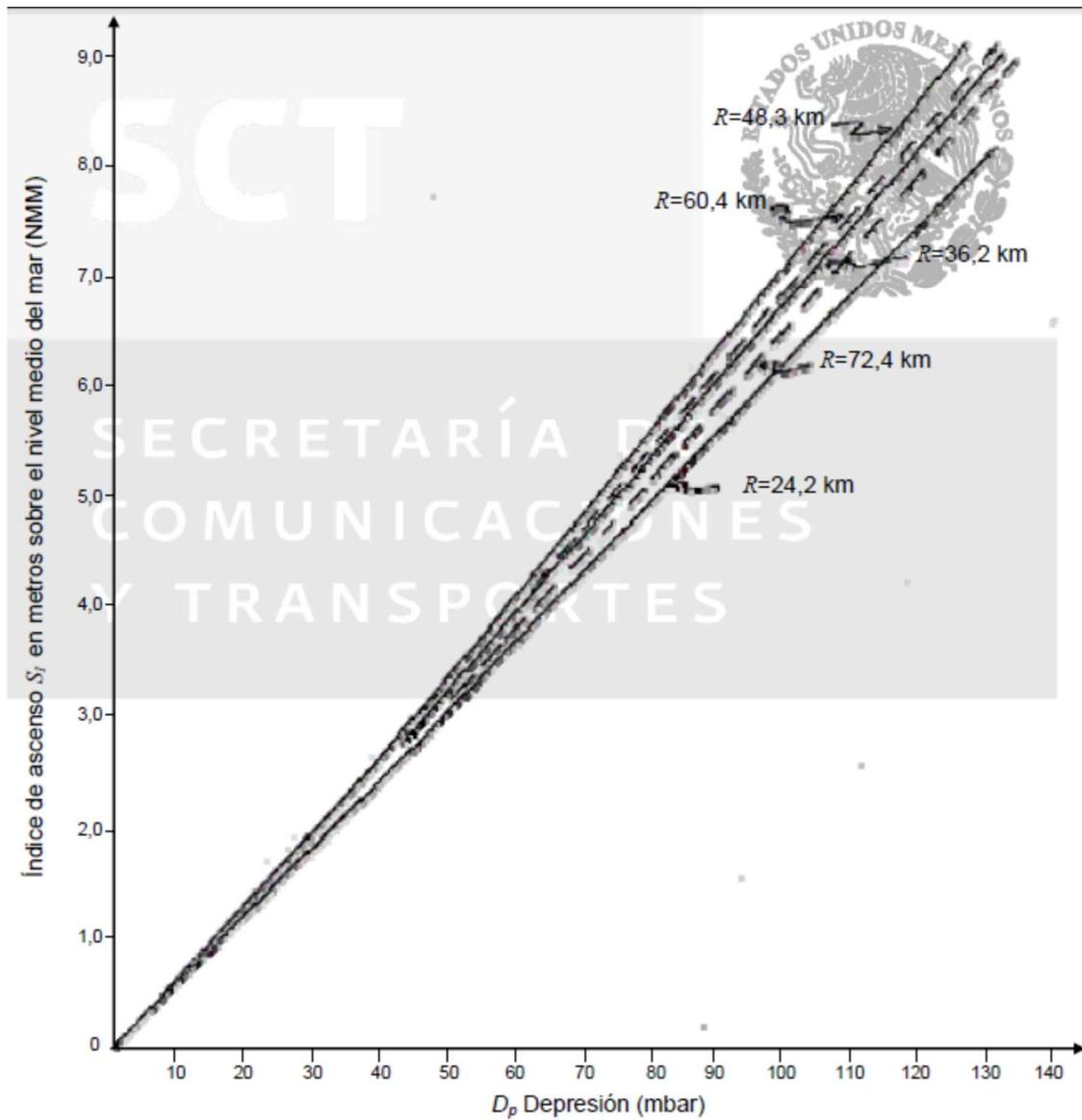


Figura 68.- Gráfica dada en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 para calcular el Índice de ascenso.

- Determinación del factor de corrección F_M

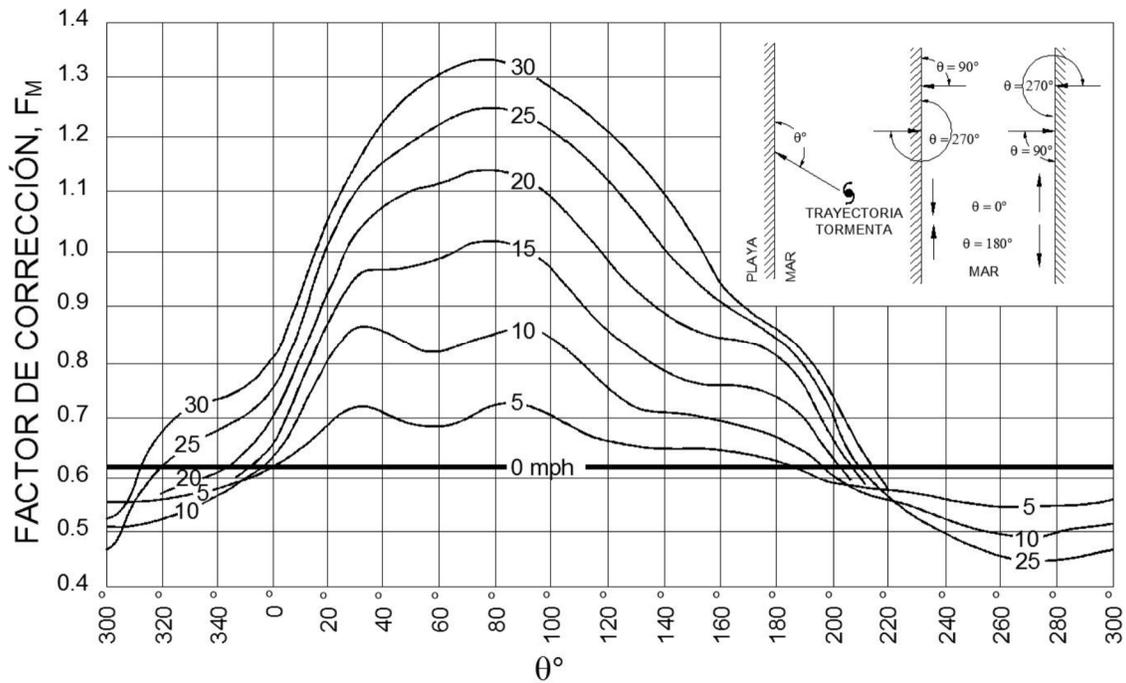


Figura 69.- Gráfica dada en la Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 para calcular el factor de corrección.

- Cálculo de la altura de ola en rompiente H_B

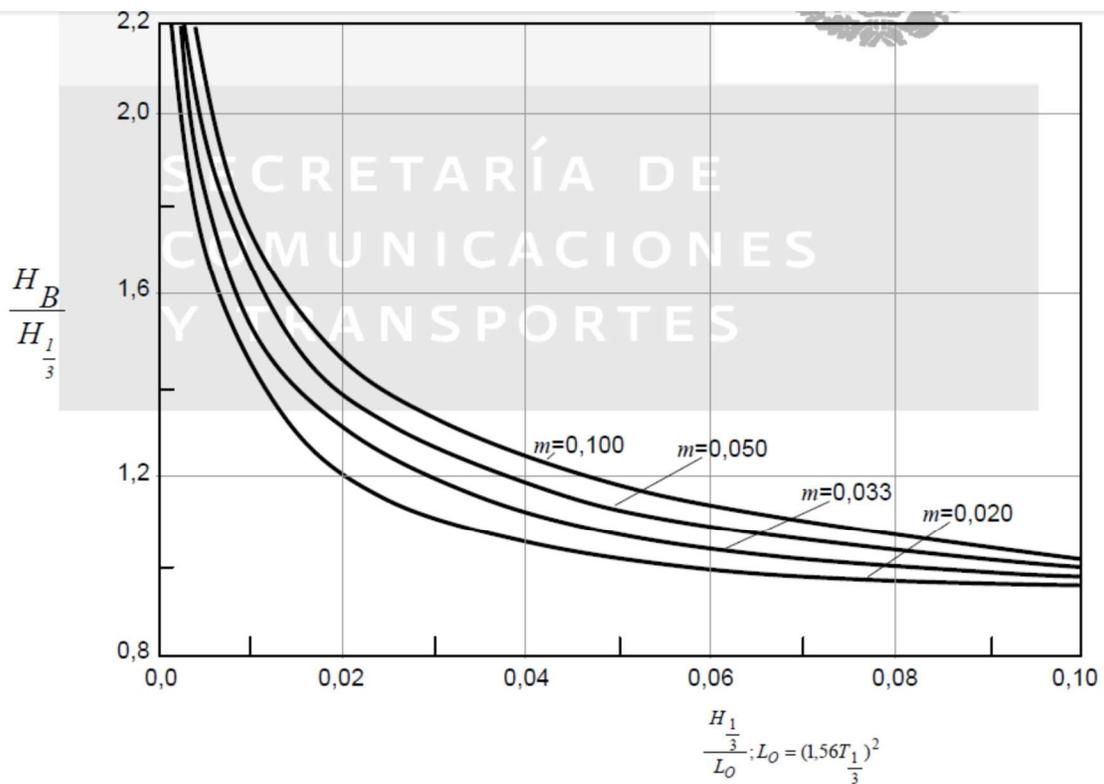


Figura 70.- Gráfica Norma M-PRY-PUE-1-04-005/09 calcula altura de ola de rompiente.

Tabla 32.- Utilizando la Figura 74 de arriba se calculó la altura de ola de rompiente.

Altura de ola (m).	Periodo de ola (seg).	L ₀ (m)	H _B (m)
4.97	8.84	190.15	5.66

- Calculo del ascenso producido por el viento S_P y $S_{P\text{MÁX}}$

$$S_P = S_I * F_M \quad (105)$$

$$S_{P\text{MÁX}} = S_I * F_{M\text{MÁX}} \quad (106)$$

- Calculo del ascenso del nivel del mar por oleaje S_W

$$S_W = 0.19 \left[1 - \left(\frac{H_B}{g(T_{1/3})^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] H_B = 0.98 \text{ metros} \quad (107)$$

- Calculo de la altura de marea astronómica Z_{MA}

= Diferencia entre el nivel de pleamar media y el nivel de bajamar media inferior.

- Calculo del ascenso del nivel del mar

$$\text{Si } S_P + S_W > S_{P\text{MÁX}} \text{ entonces } \Delta Z_T = Z_{MA} + (S_P + S_W) \quad (108)$$

$$\text{Si } S_{P\text{MÁX}} > S_P + S_W \text{ entonces } \Delta Z_T = Z_{MA} + S_{P\text{MÁX}} \quad (109)$$

Tabla 33.- La sobre elevación final se obtuvo al sumar la sobre elevación por viento, por oleaje y por la marea astronómica.

Trayectoria del huracán (°)	S _I (m).	F _M	S _P (m)	F _M MAX	S _P MAX	S _W	ΔZ ₁ = S _P + S _W	Z _{MA}	ΔZ _T
30	1.47	1.08	1.59	1.31	1.93	0.98	2.57	1.07	3.64
60	1.47	1.26	1.85	1.31	1.93	0.98	2.83	1.07	3.91
90	1.47	1.30	1.91	1.31	1.93	0.98	2.89	1.07	3.96
120	1.47	1.22	1.79	1.31	1.93	0.98	2.77	1.07	3.85
150	1.47	1.04	1.53	1.31	1.93	0.98	2.51	1.07	3.58
							2.72		3.79

Esta sobre elevación de 2.72 metros corresponde a un huracán categoría 3 debido a que según la Escala de daño Saffir-Simpson se sugiere que un huracán de esta categoría es capaz de producir una marea de tormenta de 2.5 a 4.0 metros (Rosengaus Moshinsky et al., 2002).

Anexo I.- Tasas de erosión-acreción.

En la Figura 21 se identificaron cinco zonas de erosión con importante extensión en el margen derecho del estero correspondiente al estado de Sinaloa.

Tabla 34.- Tasas de evolución en la Zona A.

Zona A		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
1	11.36	189.35
2	11.81	193.19
3	12.20	197.48
4	12.70	204.21
5	13.31	210.89
6	13.82	216.67
7	14.26	221.53
8	14.70	226.40
9	15.16	229.76
10	15.47	229.53
11	15.80	231.11
12	15.94	232.34
13	16.21	233.39
14	16.34	233.88
15	16.45	234.17
16	16.54	234.17
17	16.69	234.01
18	16.88	233.78
19	17.01	233.73
20	17.02	231.55
21	16.90	226.63
22	16.67	223.51
23	16.40	219.99
24	15.89	213.11
25	15.16	205.11
26	13.99	191.64
27	12.62	174.90
28	11.22	158.94
29	9.34	133.26

Tabla 35.- Tasas de evolución en la Zona B.

Zona B		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
32	-1.22	-19.04
33	-2.47	-35.20
34	-3.92	-52.61
35	-5.09	-64.74
36	-5.66	-69.95
37	-5.63	-67.37
38	-4.84	-55.99
39	-3.92	-46.68
40	-4.08	-55.50
41	-4.11	-58.88
42	-3.94	-59.61
43	-4.03	-60.93
44	-3.29	-57.18
45	-2.87	-52.29
46	-2.52	-47.40
47	-2.19	-42.56
48	-1.43	-29.89

Tabla 36.- Tasas de evolución en la Zona C.

Zona C		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
52	-1.50	-16.95
53	-0.61	-2.07
54	-1.16	-13.68
55	-1.64	-20.60
56	-2.18	-29.10
57	-2.61	-39.12
58	-2.32	-36.59
59	-1.83	-31.32
60	-2.03	-26.24
61	-2.63	-33.63
62	-2.63	-31.34
63	-2.43	-25.52
64	-1.36	-20.15
65	-1.31	-16.97

La tabla continúa en la siguiente página.

66	-1.02	-12.79
67	-0.78	-9.18
68	-0.63	-7.36
69	-0.71	-5.87
70	-2.09	-29.81
71	-2.01	-27.84
72	-1.77	-25.57
73	-1.71	-25.53
74	-1.72	-25.39
75	-1.70	-23.96
76	-0.94	-14.60
77	-0.96	-15.82
78	-1.08	-15.01
79	-2.29	-35.92
80	-2.25	-32.81
81	-1.43	-16.85
82	-0.66	-5.57
83	-1.60	-19.28
84	-2.20	-20.48
85	-1.78	-12.15
86	-1.51	-6.51
87	-1.68	-10.45
88	-2.17	-14.94
89	-2.26	-18.30
90	-2.06	-18.93
91	-2.01	-21.63
92	-2.07	-22.47

Tabla 37.- Tasas de evolución en la Zona D.

Zona D		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
115	-1.55	-15.21
116	-0.95	-10.53
117	-1.58	-14.65
118	-3.02	-35.82
119	-3.93	-51.06

La tabla continúa en la siguiente página.

120	-4.58	-60.54
121	-5.10	-67.66
122	-5.32	-73.05
123	-3.92	-55.90
124	-2.65	-38.65
125	-1.93	-29.00
126	-1.80	-25.72
127	-1.58	-21.27
128	-1.57	-20.82
129	-2.39	-36.60

Tabla 38.- Tasas de evolución en la Zona E.

Zona E		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
137	-0.82	-10.39
138	-0.59	-5.62
139	-0.78	-5.01
140	-0.80	-6.72

Tabla 39.- Tasas de evolución en la Zona F.

Zona F		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
183	-0.44	-5.13
184	-1.24	-20.84
185	-1.45	-27.00
186	-1.89	-34.08
187	-2.76	-44.04
188	-2.96	-45.67
189	-2.33	-37.27
190	-1.45	-26.98
191	-0.64	-13.62
192	-0.51	-10.89

Tabla 40.- Tasas de evolución en la Zona G.

Zona G		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
110	-0.64	28.41
111	-0.79	23.36
112	-0.93	17.71
113	-1.05	12.03
114	-1.12	6.58
115	-1.13	0.55
116	-0.82	-5.25
117	-0.34	-12.16
118	-0.80	-18.36
119	-1.13	-22.19
120	-1.30	-20.80
121	-1.75	-27.34
122	-1.36	-28.48
123	-1.32	-26.91
124	-1.15	-21.47
125	-1.20	-21.31
126	-1.49	-21.90
127	-1.67	-21.73
128	-1.76	-21.54
129	-1.83	-21.46
130	-1.84	-20.64
131	-1.83	-20.56
132	-1.71	-20.45
133	-1.72	-22.21
134	-2.10	-28.35
135	-2.72	-33.24
136	-3.01	-37.58
137	-3.09	-39.37
138	-3.03	-39.39
139	-2.89	-38.20
140	-2.73	-37.52
141	-2.70	-37.33
142	-2.64	-35.91
143	-2.41	-32.56
144	-2.18	-28.75

La tabla continúa en la siguiente página.

145	-2.01	-25.58
146	-1.90	-26.48
147	-2.30	-29.40
148	-2.60	-34.98
149	-2.73	-36.79
150	-2.68	-34.93
151	-2.60	-34.13
152	-2.91	-40.33
153	-3.08	-40.34
154	-2.82	-37.36
155	-2.37	-31.66
156	-1.69	-21.18
157	-1.41	-17.69
158	-1.44	-19.16
159	-1.64	-20.33
160	-1.78	-21.17
161	-1.78	-22.08
162	-1.58	-20.29
163	-1.38	-16.99
164	-1.22	-13.93

Tabla 41.- Tasas de evolución en la Zona H.

Zona H		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
54	1.20	-20.00
55	2.46	9.74
56	3.31	32.81
57	3.89	53.85
58	4.66	76.36
59	5.25	98.76
60	5.69	116.84
61	6.32	134.94
62	7.18	153.05
63	7.69	168.00
64	8.21	181.42
65	8.83	194.54
66	9.40	208.15

La tabla continúa en la siguiente página.

67	9.99	222.40
68	10.64	236.40
69	11.05	246.98
70	11.63	256.95
71	11.87	258.16
72	12.04	257.04
73	11.68	247.65
74	11.25	239.21
75	10.57	224.55
76	9.91	207.36
77	9.45	193.86
78	9.38	188.22
79	9.21	178.55
80	9.23	172.36
81	9.21	164.30
82	8.57	149.36
83	6.87	129.37
84	5.37	114.85
85	4.37	102.38
86	3.43	90.41
87	2.25	77.08
88	0.77	62.97
89	0.33	63.20
90	-0.25	57.85
91	-0.79	52.32
92	-1.47	45.27
93	-2.51	36.26
94	3.71	183.93
95	7.39	206.17
96	7.46	176.83
97	7.10	145.90
98	6.59	118.70
99	1.19	24.13

Tabla 42.- Tasas de evolución en la Zona I.

Zona I		
# Transecto	Tasas de evolución (metros/año).	Cambio en el ancho de playa (metros).
39	-5.09	-166.18
40	-4.72	-162.39
41	-4.29	-157.76
42	-3.72	-148.96
43	-3.38	-143.04
44	-3.30	-140.42
45	-3.04	-132.54
46	-2.82	-124.85
47	-2.65	-118.70
48	-2.48	-112.74
49	-2.16	-105.19
50	-1.74	-96.63
51	-1.45	-84.79
52	-0.88	-67.73

Anexo J.- Comparación de velocidad de corrientes (condiciones extremas).



Figura 71.- Puntos de extracción de velocidades en tres puntos estratégicos en el estero.

Tabla 43.- Localización de los cuatro puntos de extracción.

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
V1	420551.28	2493548.92
V2	421754.83	2493866.71
V3	423554.51	2492624.09

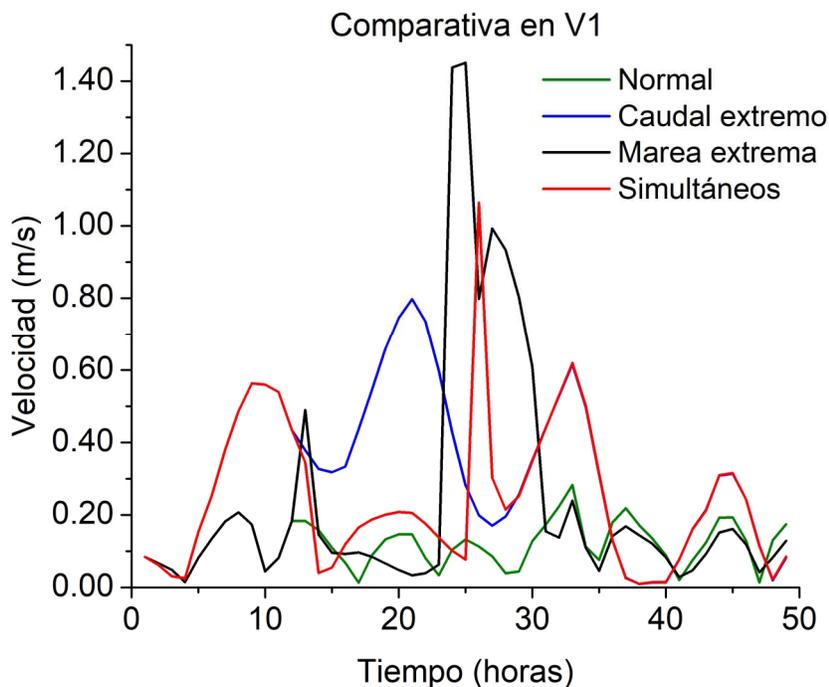


Figura 72.- Comparativa con condiciones de clima normales y extremas en el punto V1.

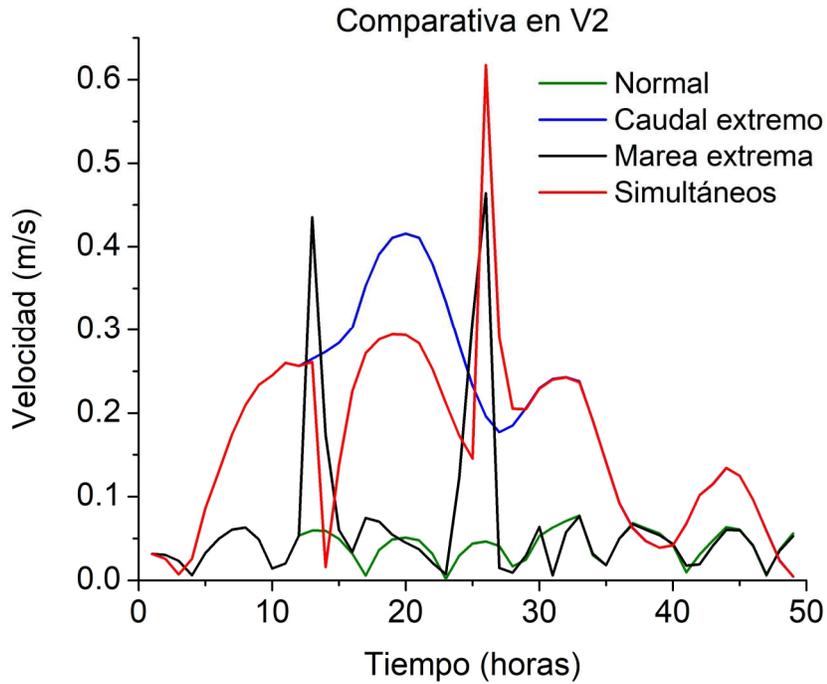


Figura 73.- Comparativa de velocidades con condiciones de clima normales y extremas en el punto V2.

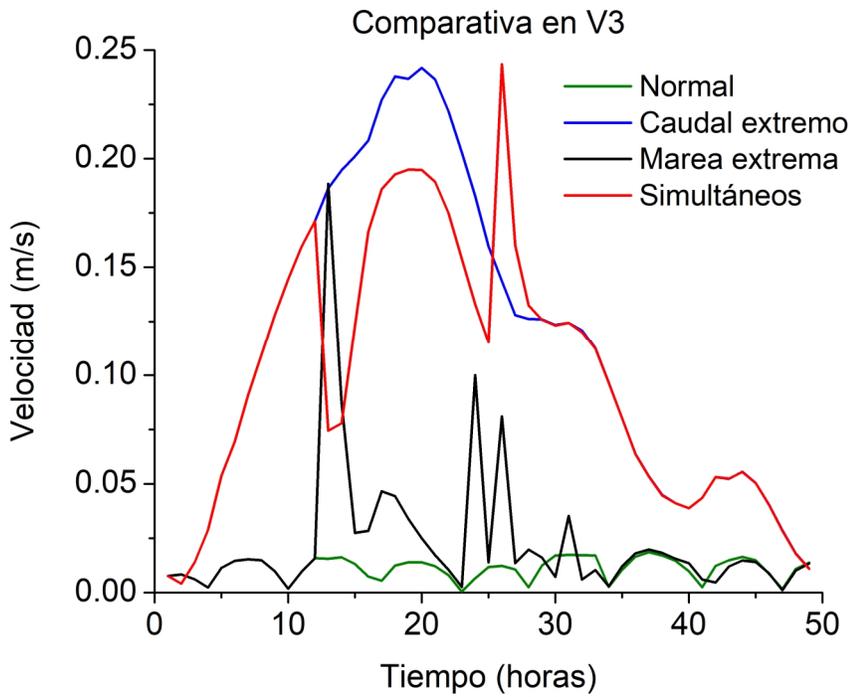


Figura 74.- Comparativa de velocidades con condiciones de clima normales y extremas en el punto V3.

Anexo K.- Cambios de velocidad después de la construcción del relleno.

Se extrajeron velocidad de las corrientes en la escala espacial de los 10 puntos mostrados en la Tabla 44 y en la escala temporal (Figura 75) durante las condiciones de clima extremo simultáneo y 12 días después para observar el comportamiento.

Tabla 44.- Localización de los 10 puntos de extracción.

Punto	Coordenada X	Coordenada Y
P1	422984.36	2494090.09
P2	423124.25	2493986.87
P3	423184.84	2493919.03
P4	423254.00	2493813.00
P5	423339.62	2493645.35
P6	423396.71	2493443.47
P7	423471.39	2493228.05
P8	423568.81	2493047.30
P9	423587.60	2492836.56
P10	423628.33	2492606.45

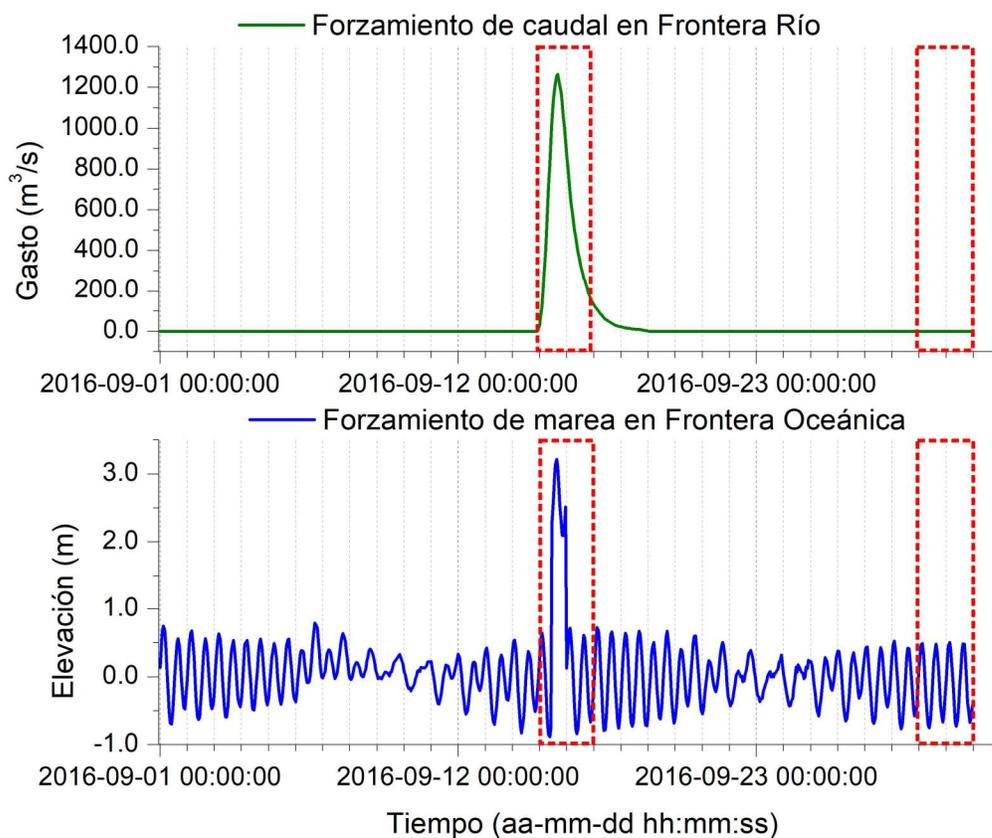


Figura 75.- Intervalos de tiempo para extracción de velocidades.

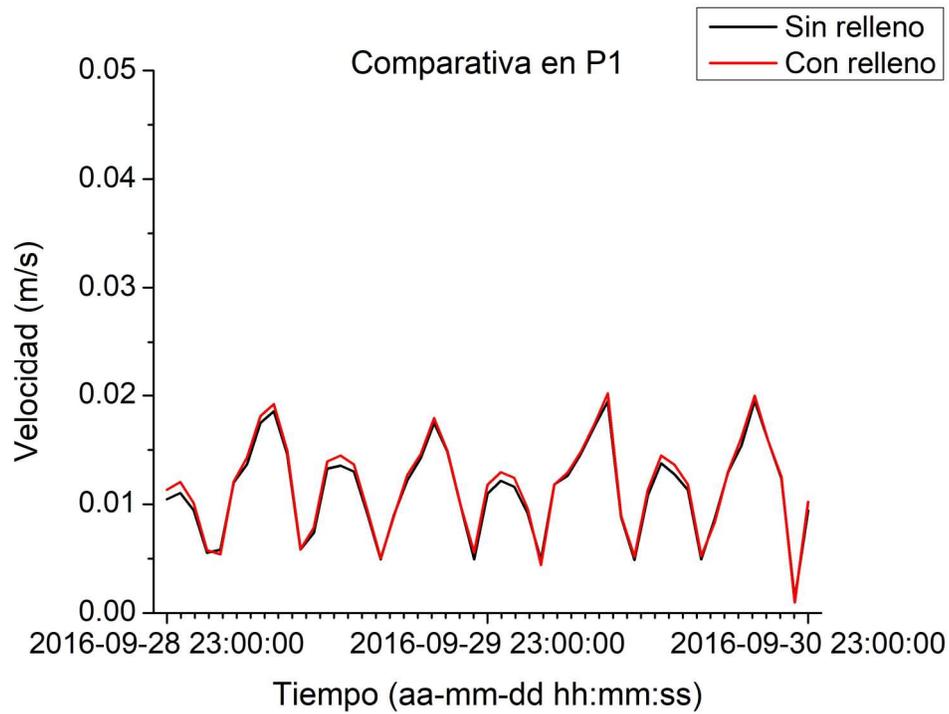
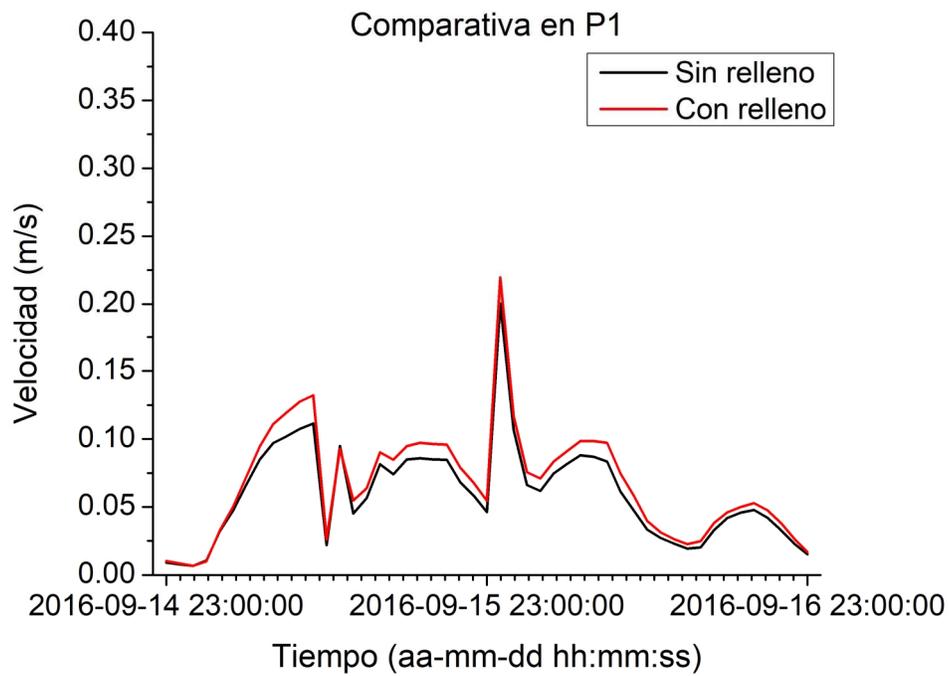


Figura 76.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P1.

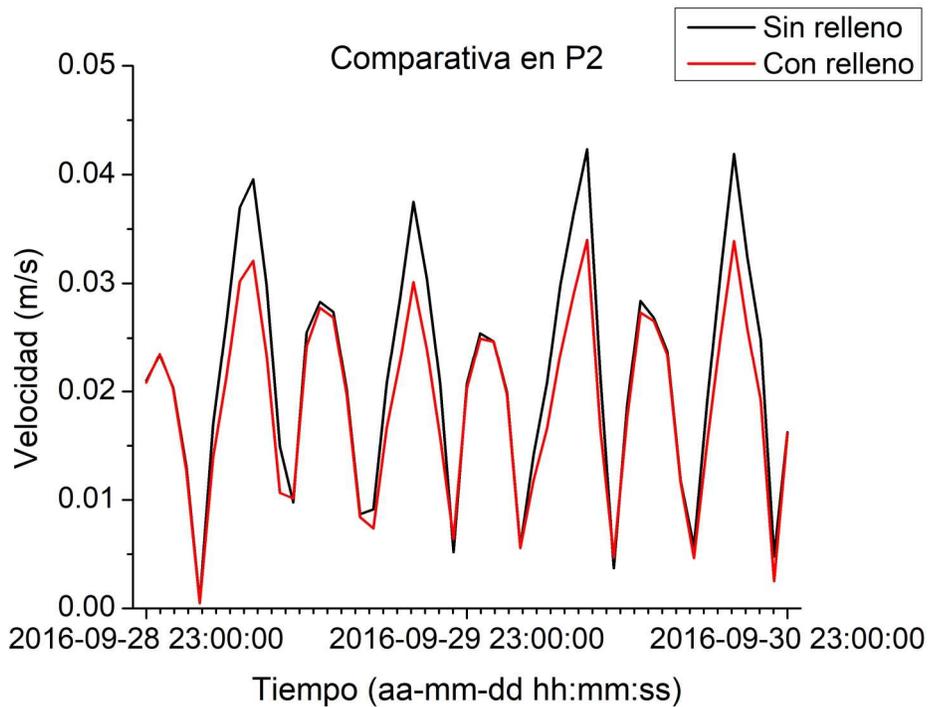
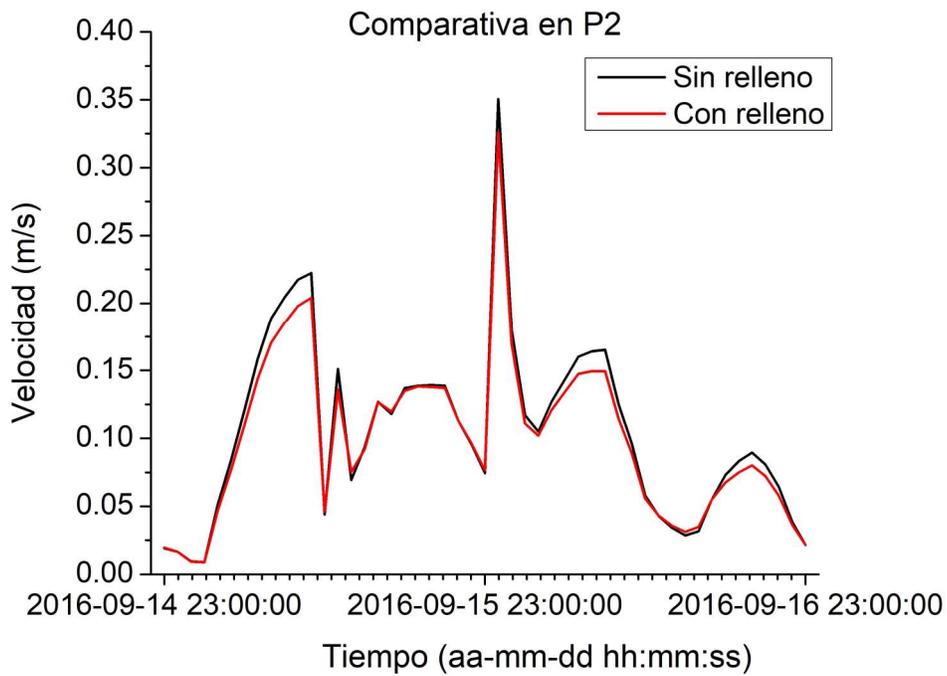


Figura 77.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P2.

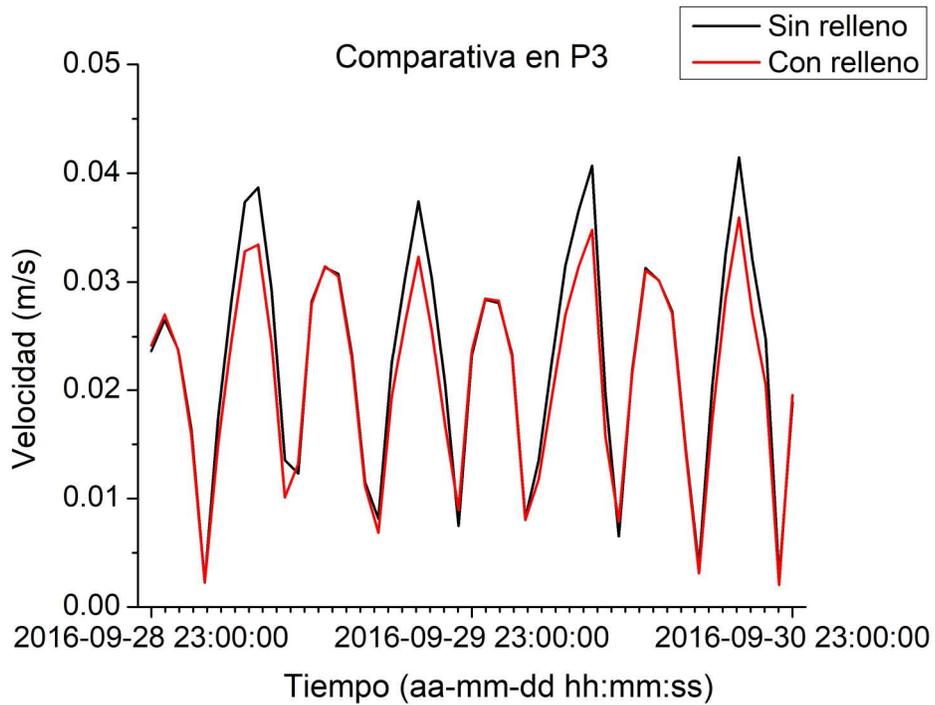
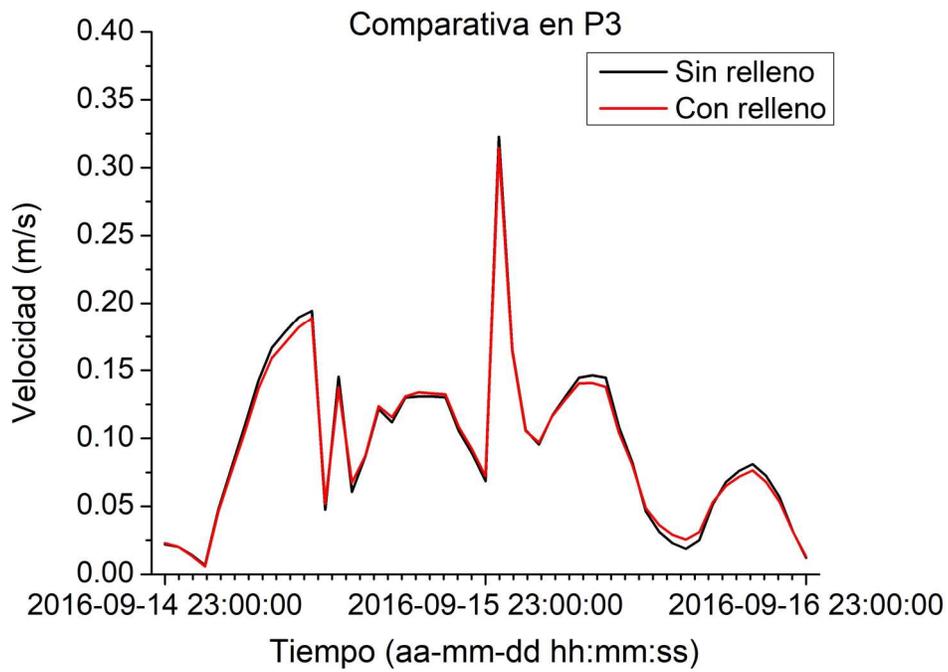


Figura 78.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P3.

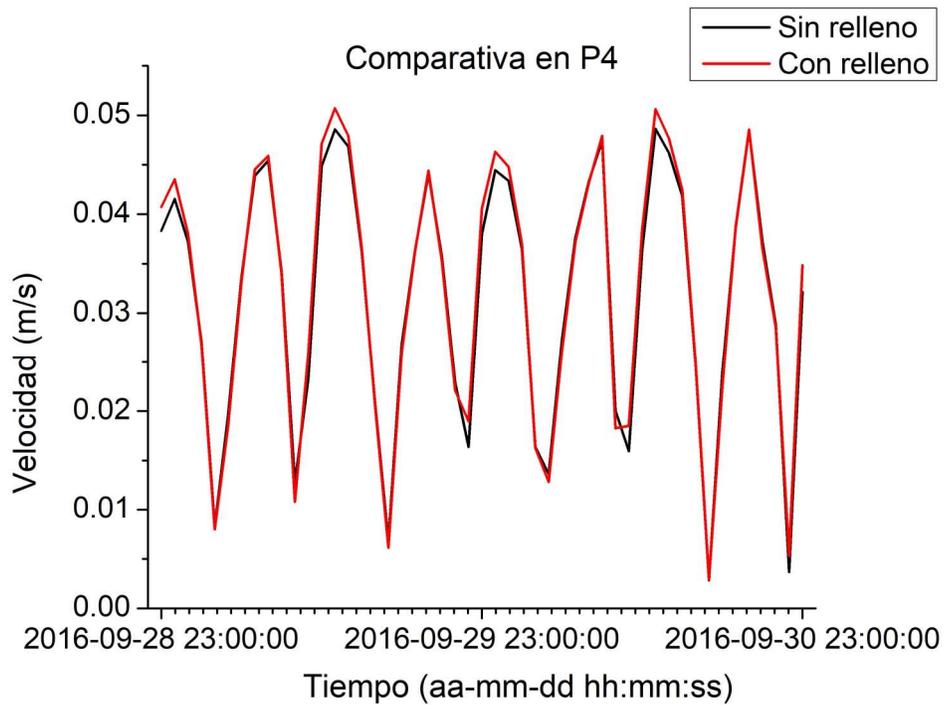
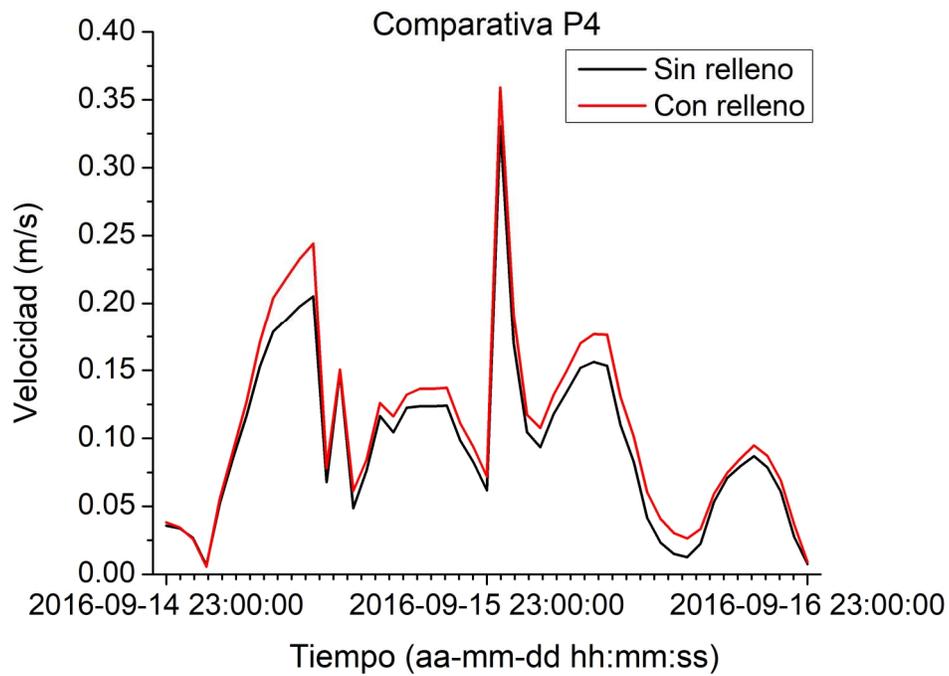


Figura 79.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P4.

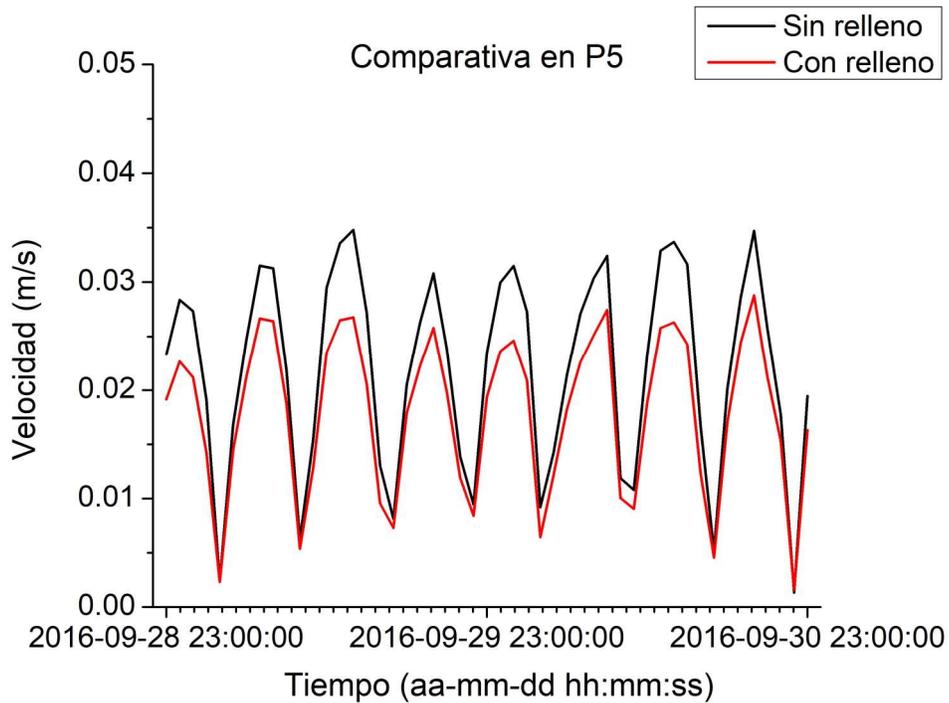
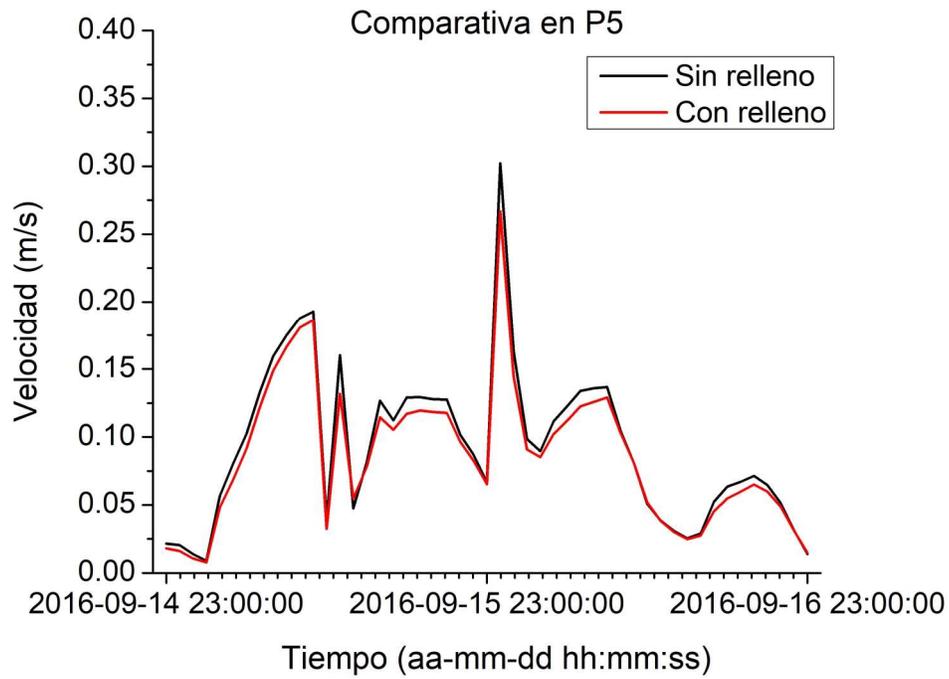


Figura 80.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P5.

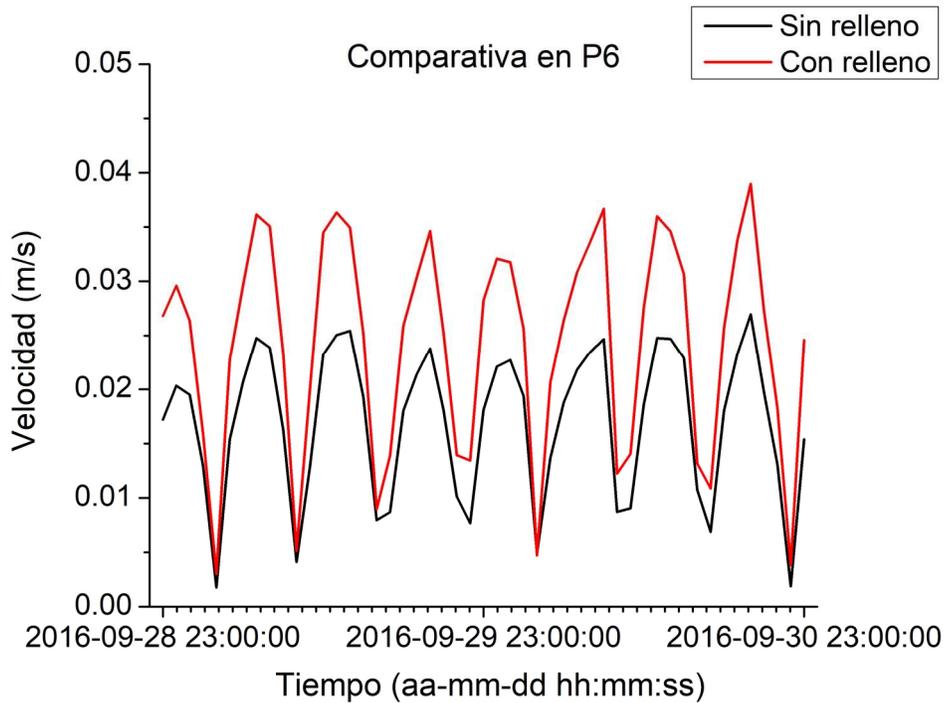
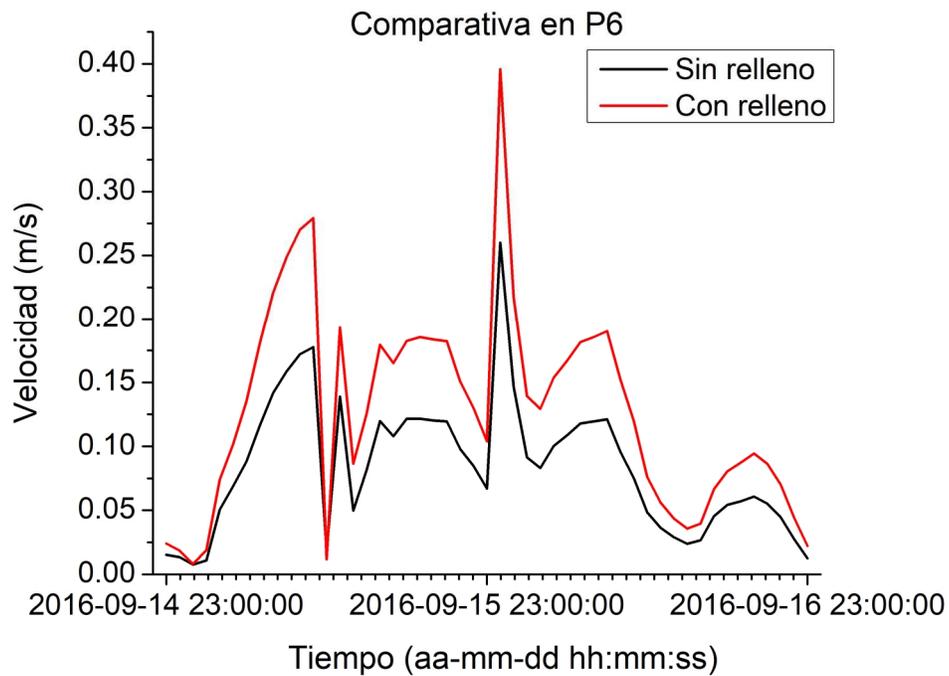


Figura 81.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P6.

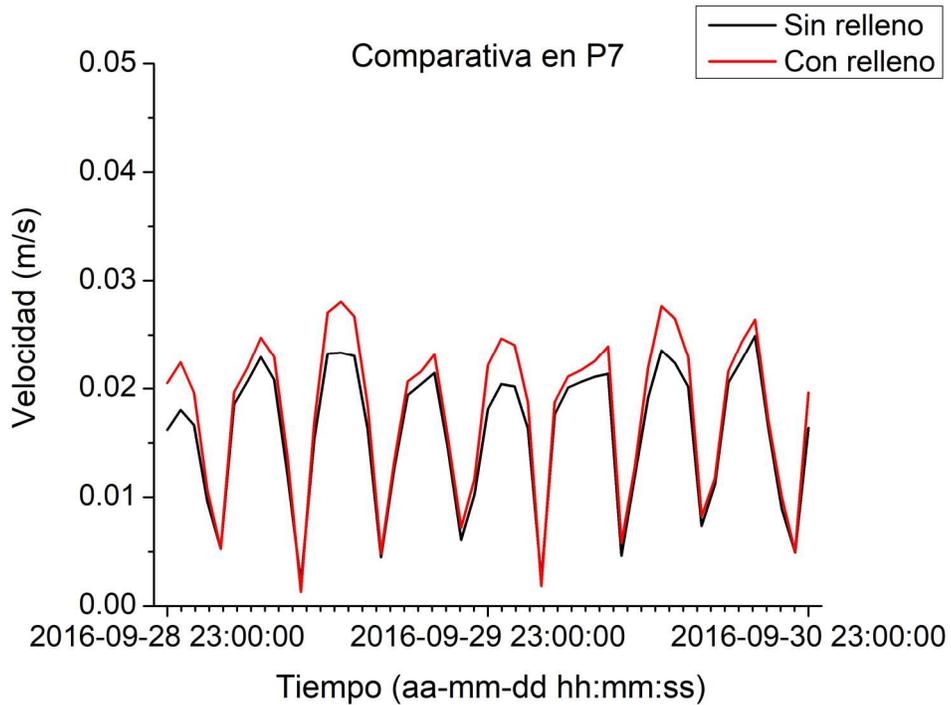
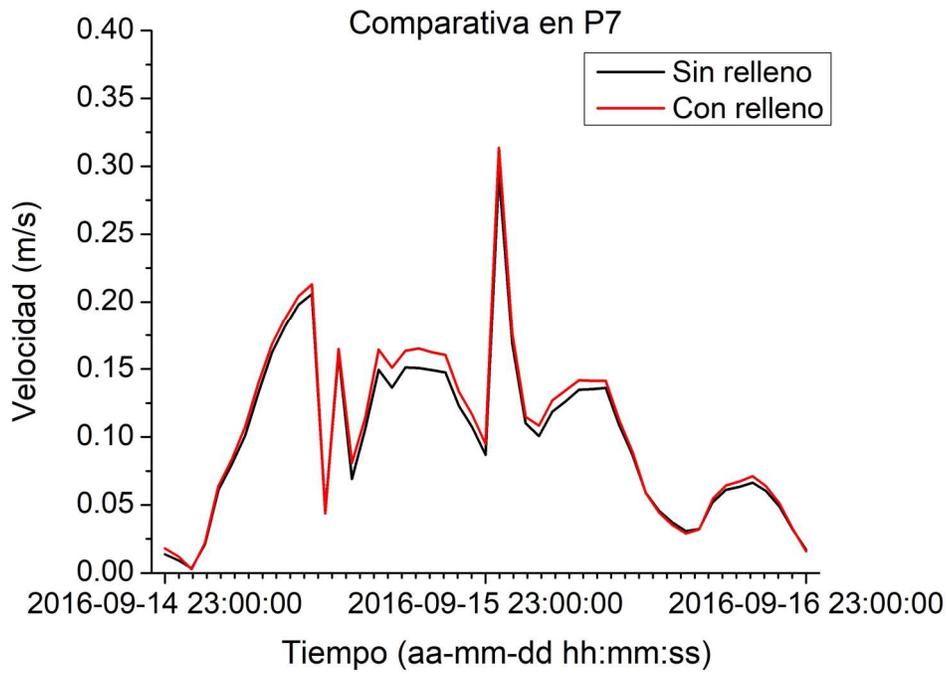


Figura 82.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P7.

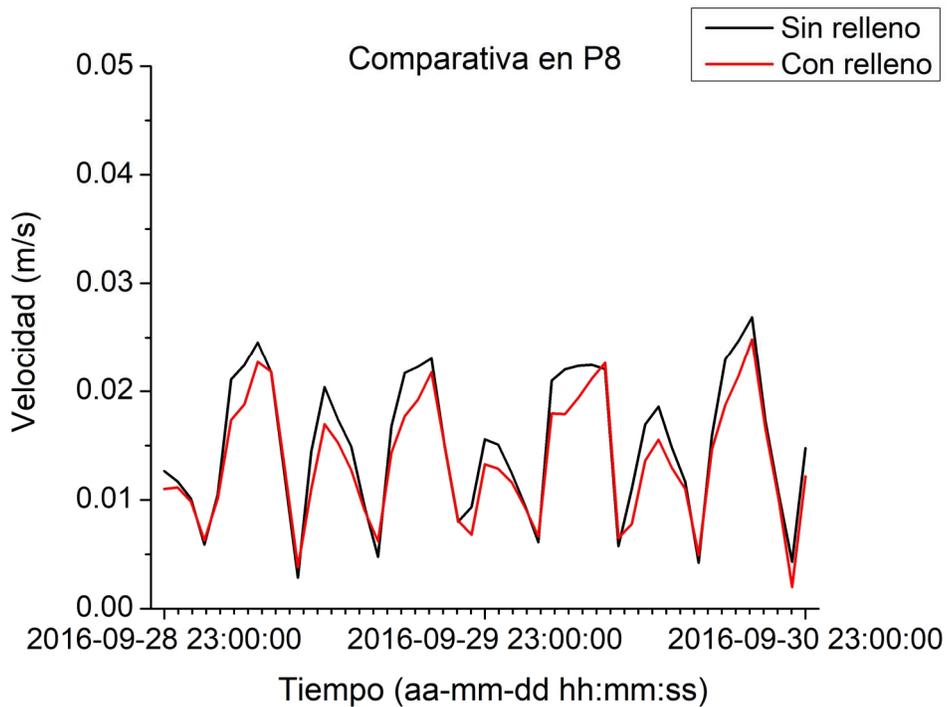
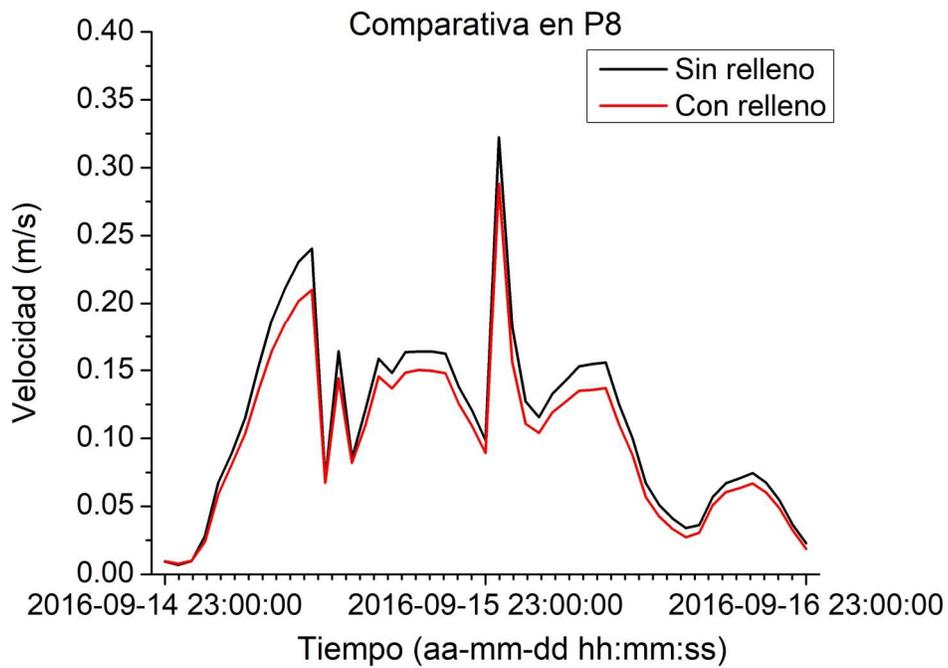


Figura 83.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P8.

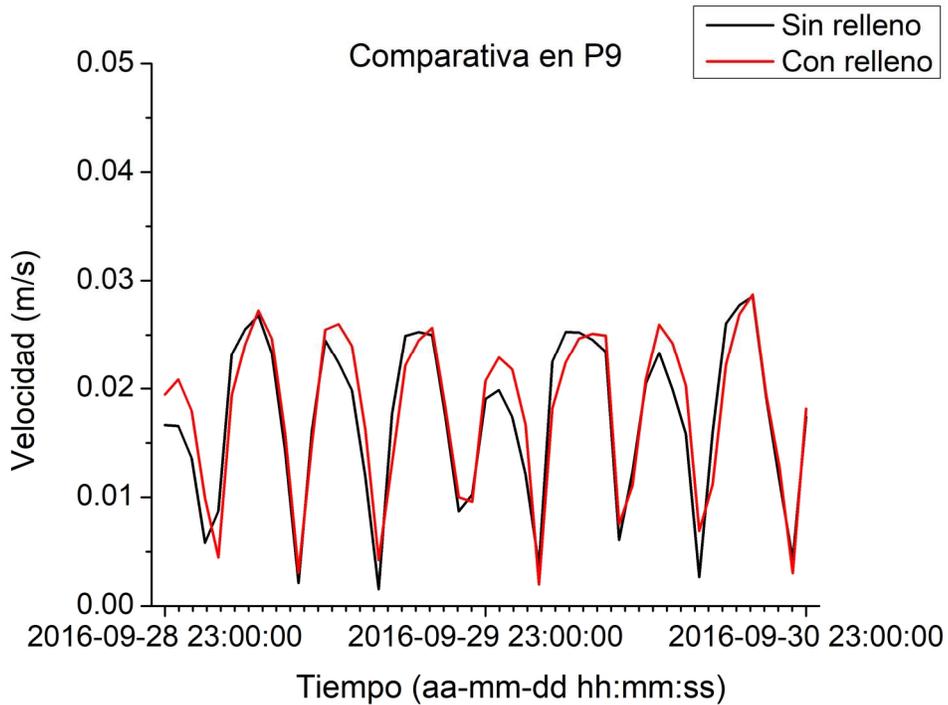
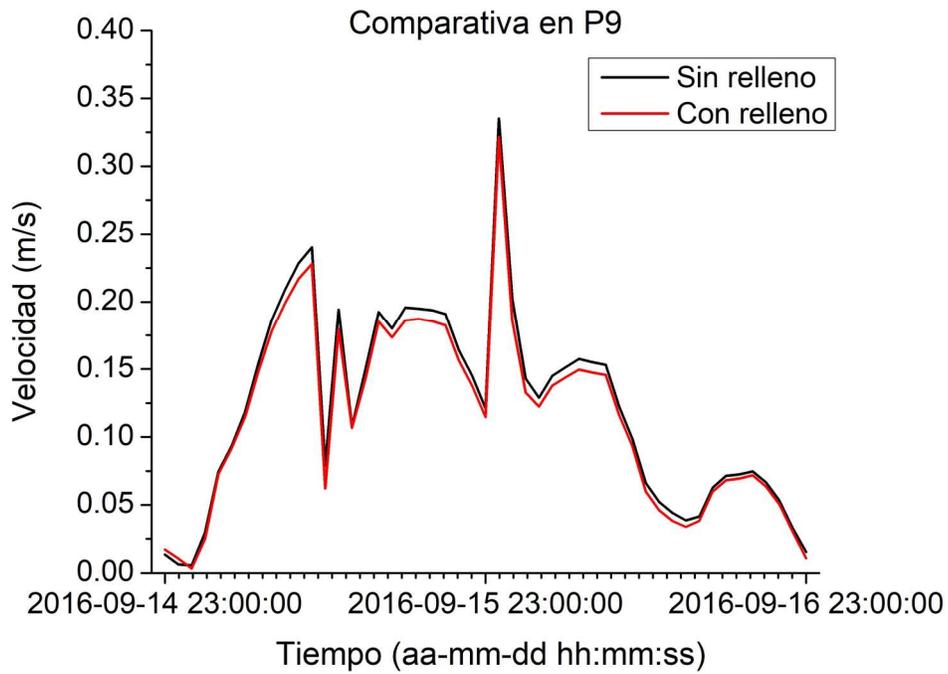


Figura 84.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P9.

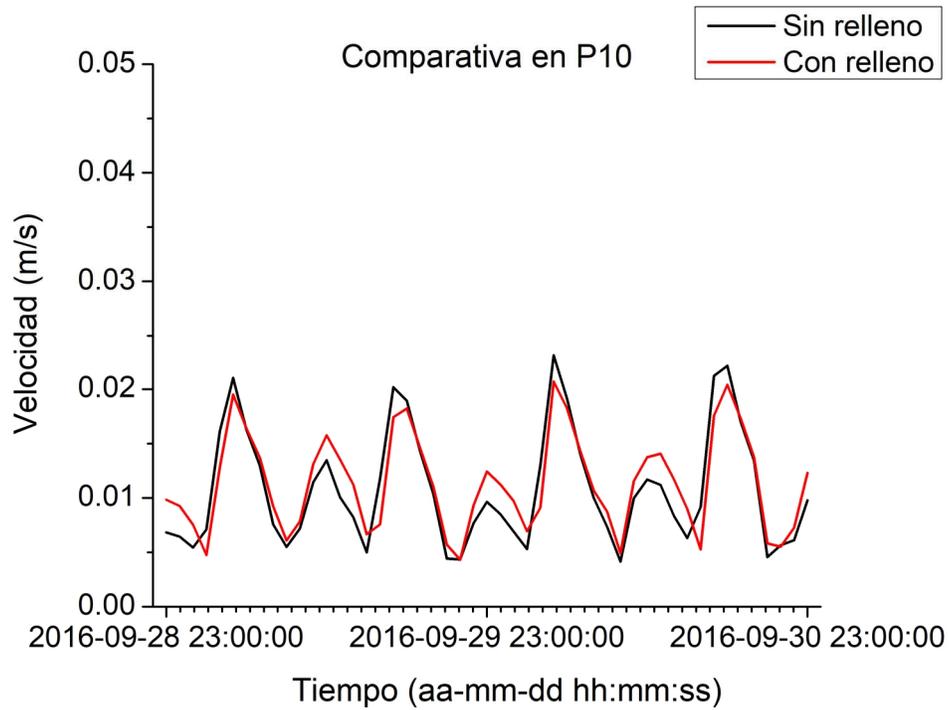
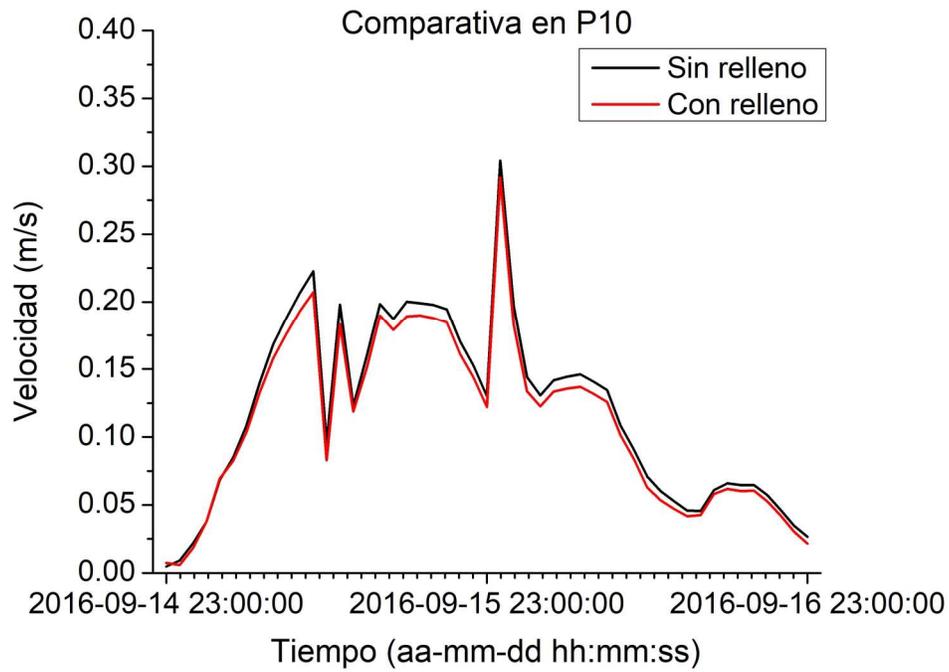


Figura 85.- Comparativa de velocidades antes y después del relleno en el punto P10.

Anexo L.- Diseño de tablaestacas.

Se utilizó la metodología del libro fundamentos de cimentaciones de Braja Das (Das and León, 2012).

Con base en la teoría anterior, un procedimiento paso a paso para obtener el diagrama de presión para un muro de tablaestacas en voladizo que penetra un suelo granular es el siguiente:

Paso 1. Se calcula K_a y K_p .

$$K_a = \tan\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (110)$$

$$K_p = \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (111)$$

Paso 2. Se calcula σ_1 y σ_2

$$\sigma_1 = \gamma L_1 K_a \quad (112)$$

$$\sigma_2 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_a \quad (113)$$

Paso 3. Se calcula L_3

$$L_3 = \frac{\sigma_2}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad (114)$$

Paso 4. Se calcula P.

$$P = \frac{1}{2} \sigma_1 L_1 + \sigma_1 L_2 + \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) L_2 + \frac{1}{2} \sigma_2 L_3 \quad (115)$$

Paso 5. Se calcula \bar{z} (es decir, el centro de presión para el área ACDE) tomando el momento respecto a E.

$$\bar{z} = \frac{\sum M_E}{P} \quad (116)$$

Paso 6. Se calcula σ_5

$$\sigma_5 = (\gamma L_1 + \gamma' L_2) K_p + \gamma' L_3 (K_p - K_a) \quad (117)$$

Paso 7. Se calculan A_1 , A_2 , A_3 y A_4 .

$$A_1 = \frac{\sigma_5}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad (118)$$

$$A_2 = \frac{8P}{\gamma'(K_p - K_a)} \quad (119)$$

$$A_3 = \frac{6P[2\bar{z} \dot{\gamma}(K_p - K_a) + \sigma_5]}{\dot{\gamma}^2(K_p - K_a)^2} \quad (120)$$

$$A_4 = \frac{P[6\bar{z} \sigma_5 + 4P]}{\dot{\gamma}^2(K_p - K_a)^2} \quad (121)$$

Paso 8. Se resuelve L_4 .

$$L_4^4 + A_1 L_4^3 - A_2 L_4^2 - A_3 L_4 - A_4 = 0 \quad (122)$$

Paso 9. Se obtiene la profundidad teórica de penetración como $L_3 + L_4$. La profundidad de penetración real se incrementa en aproximadamente 20 a 30%.

Paso 10.- Se calcula la cantidad de acero requerida.

$$\dot{z} = \sqrt{\frac{2P}{\dot{\gamma}(K_p - K_a)}} \quad (123)$$

$$M_{m\acute{a}x} = P(\bar{z} + \dot{z}) - \left[\frac{1}{2} \dot{\gamma} \dot{z}^2 (K_p - K_a) \right] \frac{\dot{z}}{3} \quad (124)$$

Paso 11.- Se calcula el m3dulo de secci3n requerido de la tablaestaca.

$$S = \frac{M_{m\acute{a}x}}{\sigma_{permisible}} \quad (125)$$

Anexo M.- Fotografía.



Figura 86.- Se muestra la Zona D en la Playa de Teacapán ubicada en las cercanías del CETMAR N°23.