



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA LAGUNA DE ALVARADO Y SU RELACIÓN CON
EL MAR

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LUIS OMAR GARCÍA HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón
Secretario: Dr. Gracia Sánchez Jesús
Vocal: Dr. Fuentes Mariles Óscar Arturo
1^{er}. Suplente: M. I. Franco Víctor
2^{d o}. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

Posgrado de Ingeniería, UNAM
Ciudad Universitaria, Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES

FIRMA

“También eso lo he aprendido del río: ¡todo vuelve!”

Hermann Hesse, *Siddartha*

Para que *yo*, esté en este instante agradeciendo su presencia a todas aquellas personas que han caminado, por mucho -o poco- tiempo a mi lado, han debido ocurrir demasiados sucesos que han interactuado entre sí para que la vida me diera esta oportunidad. Por tanto, quiero agradecer a la vida misma, pues gracias a su naturaleza <<interdependiente>>, me ha permitido disfrutar tanto del “triunfo”, como del “fracaso”; en retrospectiva, ambas, en partes iguales, y, sobre todo, en la medida necesaria.

Mi agradecimiento eterno a la **Universidad Nacional**. ¿Qué sería de mí sin ella? Desde el instante en que soñé pisar sus aulas me dio el motivo que marcó gran parte de mi infancia, citando a Nietzsche: «**Quien tiene algo por qué vivir, es capaz de soportar cualquier cómo**»; de tal manera que el formar parte de la Universidad constituyó mi “por qué”, a veces tan necesario. Me dio las más grandes amistades y los mejores días de mi vida, aún hasta hoy.

Al **Instituto de Ingeniería**, por recibirme, por enseñarme tanto, por tantos momentos vividos gracias a él.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (CONACyT)**, por el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado.

Posiblemente el hombre no sea otra cosa, que las decisiones que toma, todas ellas, influenciadas de alguna manera por su contexto, que a su vez está formado en alguna medida por las personas que interactúan en la vida de cada quien; por tanto, quiero expresar mi agradecimiento a todos y cada uno de ustedes.

A mi tutor, el **Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles**, por compartirme un poco de sus conocimientos, inteligencia y experiencia, no sólo en este proyecto que se concluye, gracias por sus observaciones y tomarse el tiempo de atenderme siempre.

A mis grandes pilares: Mi mamá y mi abuelita; sin ustedes, nada de esto habría sido posible. A Juan, compañero de mi madre.

A mis hermanos, Dannia y Aarón, mis sobrinos Deny, Iktán y Alexis, mis cuñados, por supuesto; gracias por hacer mi vida mejor con su presencia.

A mis tíos y primos, qué gran fortuna pertenecer a mi familia.

A mis amigos, Didier, Paris, Maycu, Arturo, Capi... gracias por las risas, gracias por todos los momentos.

Por supuesto Normita y su familia, Mari, Raquel, Omar, su papá y su mami; gracias por todo, gracias por los ánimos, no tengo palabras para agradecer su presencia en mi vida.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería, Darío, Faustino, Juan, Adrián, Angel, Gaby, Jack, gracias por todas sus enseñanzas, pero sobre todo, gracias por su amistad.

A mi maestro, Martín Jiménez, gracias por compartir su tiempo y amistad conmigo, por los consejos, gracias por confiar en mí, sin siquiera conocerme.

A mis amigos del Frontón Cerrado, es bueno conocer los límites propios, pero es aún mejor saber que con un poco de dedicación y esfuerzo se pueden superar.

A todos, gracias por llenar mi vida, gracias por todas las risas, gracias por el soporte cuando los momentos no han sido los mejores.

¡Gracias por todo!

“No temas, pues, porque la impermanencia es absolutamente necesaria para transformar las cosas. Debes aprender a ver las cosas tal como son. Consideremos, por ejemplo, el caso de un río. Un río carece de identidad permanente. Le llamaremos Misisipi, Rin o Sena y creemos que es una entidad singular y permanente. Pero todo el mundo sabe que no puede bañarse dos veces en el mismo río. Un río se halla en continuo proceso de transformación. Y lo mismo ocurre también con nosotros. Nosotros estamos compuestos de elementos llamados forma, sentimientos, percepciones, formaciones mentales y conciencia. Todas estas cosas son manifestaciones, de modo que debemos observar profundamente su naturaleza. Y es que, aunque los sentimientos y las percepciones sean cosas muy reales, jamás podremos descubrir en ellas nada permanente. Jamás podrás encontrar nada que posea una presencia permanente y tampoco podrás encontrar un yo o un alma que perdure.”

Thich Nhat Hanh

Índice

INTRODUCCIÓN	1
1. LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA BAJA DEL RIO PAPALOAPAN	3
1.1. Descripción de la zona de estudio	8
2. - REGISTROS HISTÓRICOS Y PRONÓSTICOS	10
2.1 Hidrogramas de escurrimiento y lluvias por cuenca propia.....	10
2.2 Instrumentación y medición de Caudales.....	11
2.2.1 Descripción de los instrumentos de medición de presión y caudal.....	12
a) Sensores de nivel.....	12
b) Mediciones de Caudal.....	15
2.3 Análisis de datos registrados por los sensores	21
2.4.- Pronóstico de marea astronómica	23
Mareas	23
Caudales	34
3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	35
Calibración y validación.....	36
3.1 Condiciones de frontera de los registros históricos.....	36
3.2 Validación de los modelos: Iber.....	38
4. MODELACIÓN DE PRONÓSTICOS.....	53
4.1 Resultados Marea Viva	53
4.2 Resultados Marea Muerta.....	54
4.3 Resultados Marea de Tormenta.....	55
4.4 Análisis de resultados.....	56
5. CONCLUSIONES.....	62
Bibliografía	65
Anexos	66
Anexo A1	66
Anexo A 2 Tabla de registros de niveles	81

Índice de Figuras

Figura i-1 Sistema lagunar de Alvarado	1
Figura i-2 Funcionamiento conceptual del sistema lagunar de Alvarado.....	1
Figura 1-1 Principales ciclones en México de 1970 – 2013	3
Figura 1-2 Precipitación media anual en México de 1970 – 2013.....	4
Figura 1-3 Tlacotalpan, Veracruz. Inundación de 1944.....	6
Figura 1-4 Veracruz Puerto. Comodoro Azueta y Blvd. Ávila Camacho	6
Figura 1-5 La Antigua. Río La Antigua	7
Figura 1-6 La Antigua. Río La Antigua	7
Figura 1-7 Inundación en Cosamaloapan Septiembre 2010	7
Figura 1-8 Croquis de localización de la Laguna de Alvarado	8
Figura 1-9 Tipo de suelo	9
Figura 0-1 Elevación de la superficie libre del agua, agosto – septiembre 2010	10
Figura 0-2 Precipitación acumulada, agosto -septiembre 2010	11
Figura 0-3 Batimetría de la Laguna de Alvarado	11
Figura 0-4 Modelo Digital de Elevaciones de la Laguna de Alvarado	12
Figura 0-5 Sensor de presión	12
Figura 0-6 Ubicación de los sensores de presión	13
Figura 0-7 Entorno del software HOBOWare	13
Figura 0-8 Cota de la superficie libre del agua del 13/10/2013 al 18/02/2014.....	14
Figura 0-9 Cota de la superficie libre del agua del 18/02/2014 al 22/05/2014	14
Figura 0-10 ADCP.....	15
Figura 0-11 Entorno de WinRiver.....	16
Figura 0-12 Aforos 17 y 18 de febrero 2014.....	16
Figura 0-13 Aforos 20 y 21 de mayo de 2014.....	17
Figura 0-14 Aforos 1 y 2 de Julio 2014.....	17
Figura 0-15 Aforos Septiembre 2015.....	18
Figura 0-16 Gasto-nivel mayo 2015.....	19
Figura 0-17 Archivo de salida. Velocidades.....	19
Figura 0-18 Niveles registrados “Punta de Perro” 18 al 22 de mayo	22
Figura 0-19 Señal filtrada “Punta de Perro” 18 al 22 de mayo	22
Figura 0-20 Gráfica Marea Viva	24
Figura 0-21 Gráfica Marea Muerta	24
Figura 0-22 Trayectoria del huracán “Karl”	26
Figura 0-23 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Atlántico norte 1851-2000	27
Figura 0-24 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Pacífico nororiental 1949-2000.....	28
Figura 0-25 Radios mayor y menor del huracán “Karl”, 17 de septiembre.....	29
Figura 0-26 Radio de Influencia de la marea de tormenta 17 de septiembre de 2010.....	31
Figura 0-27 Gráfica Marea de Tormenta calculada	33
Figura 3-1 Condiciones de Frontera Calibración	37
Figura 3-2 Gráficas de hidrograma calculado vs caudales medidos, obtenidos con iber	38

Figura 3-3 Gráficas de hidrograma calculado vs caudales medidos, obtenidos con Flubidi	39
Figura 3-4 Sección 1 Tirante	40
Figura 3-5 Comparación de tirantes, sección 1, 7200 segundos.....	40
Figura 3-6 Comparación de tirantes, sección 1, 10800 segundos.....	41
Figura 3-7 Comparación de tirantes, sección 1, 21600 segundos.....	41
Figura 3-8 Sección 2 Tirante	42
Figura 3-9 Comparación de tirantes Sección 2, 7200 segundos	42
Figura 3-10 Comparación de tirantes Sección 2, 10800 segundos	43
Figura 3-11 Comparación de tirantes Sección 2, 21600 segundos	43
Figura 3-12 Sección donde se determinó velocidad	44
Figura 3-13 Comparación de velocidades, 10800 segundos	44
Figura 3-14 Comparación de velocidades, 21600 segundos	45
Figura 3-15 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad superficial	46
Figura 3-16 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad máxima.....	46
Figura 3-17 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad de fondo.....	47
Figura 3-18 Gráficas velocidad calculadas con el modelo iber vs medida, para la velocidad superficial	47
Figura 3-19 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Iber vs medida, para la velocidad máxima	48
Figura 3-20 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Iber vs medida, para la velocidad de fondo	48
Figura 3-21 Gráfica Comparación de hidrogramas	49
Figura 3-22 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Muelle”	50
Figura 3-23 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Río de los Remedios”	50
Figura 3-24 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Costa de San Juan”.....	51
Figura 3-25 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Arbolillo”	51
Figura 3-26 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Playas”	52
Figura 4-1 Resultados Marea viva Qent=1158 m³/s.....	53
Figura 4-2 Resultados Marea viva Qent=13900 m³/s.....	53
Figura 4-3 Resultados Marea muerta Qent=1158 m³/s	54
Figura 4-4 Resultados Marea muerta Qent=13900 m³/s	54
Figura 4-5 Resultados Marea de tormenta Qent=1158 m³/s	55
Figura 4-6 Resultados Marea de tormenta Qent=13900 m³/s	55
Figura 4-7 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea viva	56
Figura 4-8 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea muerta.....	57
Figura 4-9 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea de tormenta	58
Figura 4-10 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea viva.....	59
Figura 4-11 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea muerta	60
Figura 4-12 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea de tormenta	61
Figura 5-1 Canal Propuesto en “El Conejo”	63
Figura 5-2 Comparación de descarga, Marea Viva	63
Figura 5-3 Comparación de descarga, Marea Muerta	64

Índice de Tablas

Tabla 1-1 Valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial, medios anuales	4
Tabla 1-2 Frecuencia de ocurrencia de grandes inundaciones en la cuenca del Papaloapan de 1840 a 1950	5
Tabla 1-3 Principales inundaciones en la cuenca baja del río Papaloapan	5
Tabla 0-1 Módulo de velocidad registrado	20
Tabla 0-2 Cálculo Marea de Tormenta	29
Tabla 0-3 Avance y características del ciclón “Karl”	30
Tabla 0-4 Altura de la marea de tormenta y radio de influencia	31
Tabla 0-5 Altura de la marea de tormenta	32
Tabla 0-6 Marea de tormenta	32
Tabla 0-7 Gastos de simulación	34
Tabla 3-1 Coeficientes de rugosidad de Manning (Chow, 1994)	36
Tabla 3-2 Error de la raíz media cuadrática, modelo Iber	38
Tabla 3-3 Error porcentual promedio, modelo Iber	38
Tabla 3-4 Error de la raíz media cuadrática, modelo Flubidi	39
Tabla 3-5 Error porcentual promedio, modelo Flubidi	39
Tabla 5-1 Gastos comparativos en la descarga	63

"El no-saber es el fundamento de todo, crea todo mediante un acto que repite a cada instante, engendra este mundo y cualquier otro pues no cesa de tomar por real aquello que no lo es. El no-saber es la gran equivocación que sirve de base a todas nuestras verdades; el no-saber es más antiguo y poderoso que todos los dioses reunidos."

E. M. Cioran, *Del inconveniente de haber nacido*

"Pues «Ningún objeto sin sujeto» es el principio que hace para siempre imposible todo materialismo. Soles y planetas sin un ojo que los vea y un entendimiento que los conozca se pueden, ciertamente, expresar con palabras: pero esas palabras son para la representación un sideroxylon. Mas, por otra parte, la ley de la causalidad y el análisis e investigación de la naturaleza que la siguen nos llevan necesariamente a suponer con seguridad que en el tiempo cada estado más organizado de la materia ha seguido a uno más simple: que, en efecto, los animales han existido antes que los hombres, los peces antes que los animales terrestres, las plantas antes que todos estos y lo inorgánico antes que lo orgánico; que, por consiguiente, la masa originaria ha tenido que atravesar una larga serie de cambios antes de que se pudiera abrir el primer ojo. Y, no obstante, de ese primer ojo que se abrió, aunque fuera de un insecto, sigue siempre dependiendo la existencia de todo aquel mundo; porque él es el mediador necesario del conocimiento, solo para él y en él existe el mundo y sin él no se podría ni siquiera pensar: pues el mundo es propiamente representación y en cuanto tal precisa del sujeto cognoscente como soporte de su existencia: incluso aquella larga serie temporal llena de innumerables cambios y a través de la cual la materia se elevó de forma en forma hasta que finalmente nació el primer animal cognoscente, todo ese tiempo mismo solo es pensable en la identidad de una conciencia: él es su secuencia de representaciones y su forma de conocimiento, y fuera de ella pierde todo significado y no es nada."

Arthur Schopenhauer, *El mundo como voluntad y representación*

"¿Y si al final no se puede sondear la naturaleza?"

Goethe

"Comprendo que aun cuando pueda, a través de la ciencia, captar los fenómenos y enumerarlos, no por ello puedo aprehender el mundo. Aunque hubiera seguido con el dedo todo su relieve, no sabría más que ahora. Y vosotros me dais a elegir entre una descripción que es cierta, aunque no me enseña nada, y unas hipótesis que pretenden enseñarme, pero que no son ciertas."

Albert Camus, *El mito de Sísifo*

Objetivo

El objetivo de la presente investigación es conocer el comportamiento hidrodinámico de una laguna ligada al mar. En particular se estudia la laguna de Alvarado, teniendo especial interés en analizar la capacidad de descarga que tiene la laguna al mar, considerando los ríos que a ella descargan (Papaloapan, Limón y Acula). Para este fin, se instalaron en la laguna varios sensores de nivel (proporcionan información de la cota de la superficie libre del agua cada 10 minutos) y se realizaron varias campañas para medir el caudal en determinadas secciones transversales de la laguna y los ríos.

Se usaron dos modelos matemáticos para simular el funcionamiento hidráulico de la laguna para diferentes condiciones de gastos y mareas. Conocer la capacidad máxima de descarga contribuye a mejorar los análisis de riesgos por inundación de la zona cercana a la laguna y a su vez, proponer acciones para disminuir las inundaciones en la parte baja de la cuenca del río Papaloapan.

INTRODUCCIÓN

En la figura i.1 se muestran las elevaciones de las zonas más importantes consideradas en el presente trabajo, las poblaciones de Alvarado y Tlacotalpan; y sobre el curso del río entre estas dos la zona de El Conejo. Cuyas elevaciones rondan 11 y 5 m.s.n.m. para las dos primeras y la última zona en la margen derecha del río alcanza 40 m.s.n.m. y 6 en la margen izquierda.

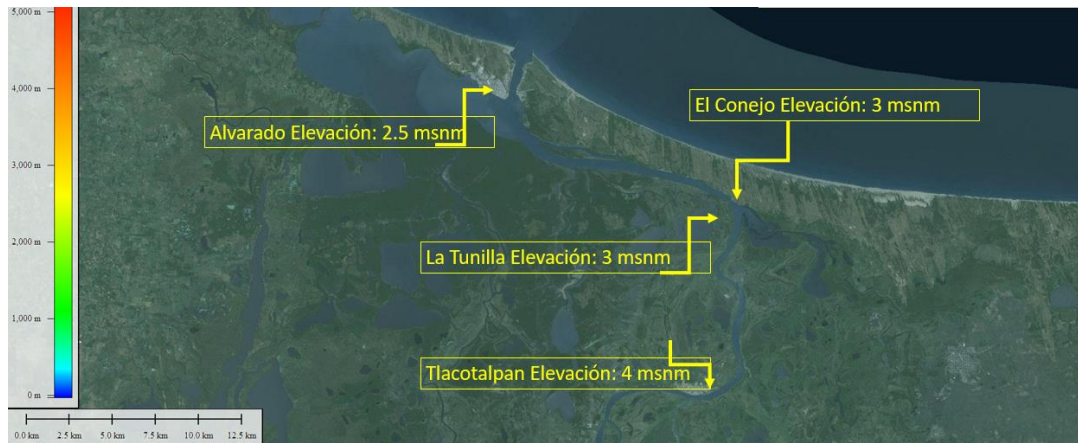


Figura 0-1 Sistema lagunar de Alvarado

En la figura i.2 se muestran con línea punteada las áreas que representan los humedales y los cuerpos lagunares intermitentes de la zona. Ellas se inundan cuando las lluvias en la zona son intensas o cuando se desborda el río Papaloapan.

Las flechas gruesas se refieren a trabajos realizados por el Instituto de Ingeniería, UNAM para mitigar los efectos de las inundaciones aguas arriba de la laguna de Alvarado, principalmente en los municipios de Tlacotalpan y Cosamaloapan; las flechas angostas representan a los escurrimientos de los ríos principales.

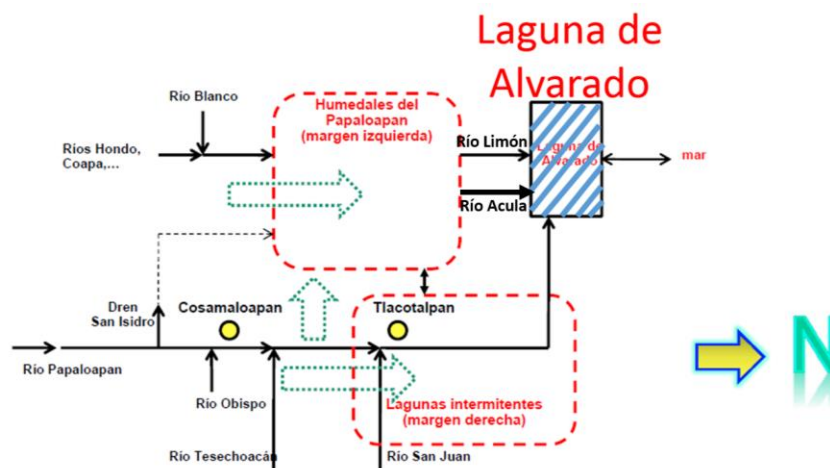


Figura 0-2 Funcionamiento conceptual del sistema lagunar de Alvarado



Algunas propuestas de mitigación de inundaciones se desvían el agua en el tramo que se encuentra entre los ríos Tesechoacán y San Juan, hacia la zona de humedales del río Papaloapan, para reducir el tirante antes de que desborde en la zona de Tlacotalpan, posteriormente una vez pasados los eventos, estos humedales se podrían descargar parte del volumen de agua que recibieron, a la laguna de Alvarado.

El análisis de la propuesta y su viabilidad dependen de la capacidad de descarga que presenta la laguna de Alvarado hacia el mar cuando el río Papaloapan aporta volúmenes de agua importantes.

En el presente trabajo se hacen las hipótesis descritas a continuación:

- La descarga del río Papaloapan hacia el mar depende de la capacidad de desalojo del canal que comunica a la Laguna de Alvarado con el mar.
- El terreno cercano al río Papaloapan cerca de las ciudades Cosamaloapan y Tlacotalpan es plano, de tal manera que cuando los niveles de la superficie libre del agua del río aumentan y se alcanza a desbordar, las inundaciones ocurren en una extensa zona por varios días.
- La relación encontrada entre las descargas del río Papaloapan, Acula y Limón es constante durante el periodo de análisis.
- La capacidad máxima de descarga de laguna se asociará a una elevación de la superficie libre del agua en la laguna máxima de 1.5 m.s.n.m., puesto que a elevaciones mayores ya se habrá desbordado el río aguas arriba de la misma, afectando a las comunidades de Tlacotalpan y Cosamaloapan, según reportes de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el año 2010, la cota de la superficie libre máxima en el municipio de Tlacotalpan fue de 3.8 m.s.n.m.
- Los modelos a utilizar son: el modelo Iber, desarrollado en colaboración por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE), y el modelo Flubidi, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Este último, en fechas recientes se ha cambiado de lenguaje computacional, el hecho de utilizarlo en parte del presente trabajo es debido a la necesidad de utilizar ejemplos para comprobar el correcto funcionamiento del programa.

1. LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA BAJA DEL RIO PAPALOAPAN

A la Laguna de Alvarado, desembocan los ríos Papaloapan, el Limón, Blanco, Acula; entre otros. El más importante de ellos por el caudal que transporta es el río Papaloapan, que tiene un gasto medio anual de 44,662 hm³ y una longitud de 354 km. Pertenece a la cuenca del río Papaloapan, ubicada en los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz; tiene un área de 46,517 km² y un escurrimiento medio anual de 44,476 hm³.

La cuenca del río Papaloapan se ubica dentro de la región hidrológica X (Golfo-Centro), dentro de la cual se ubican cerca de 200 municipios de los estados de Puebla, Oaxaca y Veracruz.

Se encuentra en uno de los estados de la República más susceptibles de ser afectados por eventos meteorológicos extremos, de acuerdo con información de CONAGUA, en el país del año 1970 a 2011 se han presentado 194 ciclones tropicales, específicamente en la costa del océano Atlántico se han presentado 75 eventos extremos.

El estado de Veracruz se ha visto afectado por 24 ciclones tropicales en el periodo comprendido del año 1970 a 2012.

En la figura siguiente se muestran los huracanes que han impactado a la República Mexicana de 1970 a 2013. Sólo se muestran los ciclones de la categoría 1 a 5 en escala Saffir/Simpson.



Figura 1-1 Principales ciclones en México de 1970 – 2013 (Fuente: Atlas de Agua en México, CONAGUA 2014)

El estado de Veracruz, tiene una precipitación media anual de aproximadamente 1,500 mm anuales. Como se muestra en la figura siguiente:

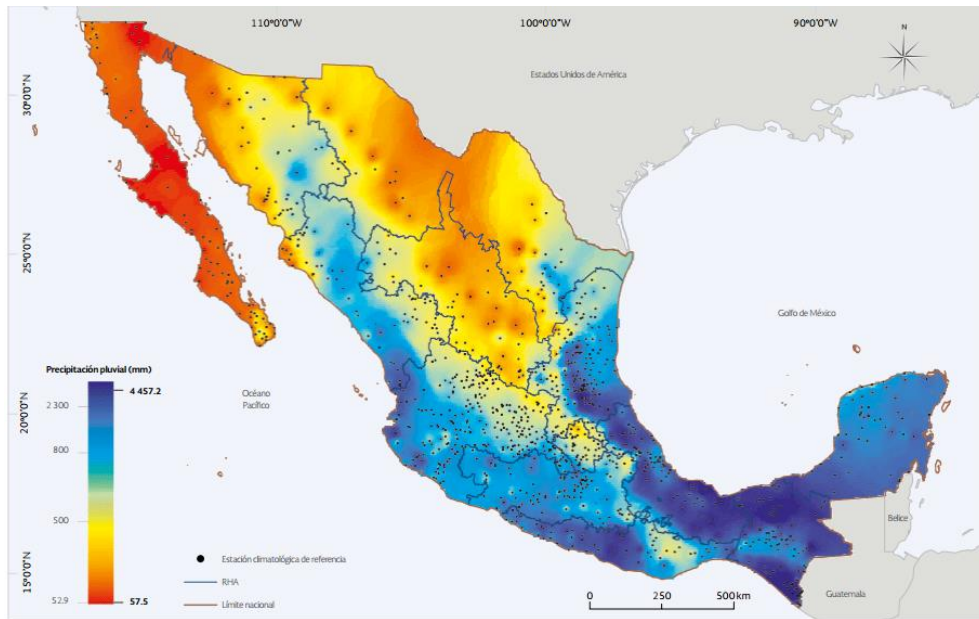


Figura 1-2 Precipitación media anual en México de 1970 – 2013 (Fuente: Atlas de Agua en México, CONAGUA 2014)

Los escurrimientos generados por las precipitaciones ocurridas en la parte alta de la cuenca, cuyo valor medio anual se estima alrededor de los 2,500 mm/año; son controlados por dos presas; sin embargo, existe carencia de control en algunos ríos de la parte baja de la cuenca, cuyos escurrimientos se incrementan por las precipitaciones generadas por cuencas aguas debajo de las presas, lo que provoca graves inundaciones en la zona.

Consejo de cuenca	Subregión	Precipitación media anual (mm/año)	Temperatura media anual (°C)	Evaporación potencial media anual (mm/año)
Tuxpanal Jamapa	Norte	1,542	21	893
	Centro	1,451	22	768
Papaloapan	La Cañada	634	18	494
	Medio Papaloapan	2,553	22	599
	Bajo Papaloapan	1,703	24	1109
Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	2,320	24	851
Regional		1,823	22	853

Tabla 1-1 Valores de precipitación, temperatura y evaporación potencial, medios anuales. (Fuente Programa hidráulico regional 2002-2006. Región X Golfo Centro)

Las inundaciones originadas por eventos extremos, que, hasta el año de 1921, eran poco frecuentes y con periodos de duración relativamente cortos; con el paso del tiempo han ido incrementando su frecuencia y los daños generados, llegando incluso a la pérdida de vidas humanas. En la tabla 1.2 siguiente se muestra la periodicidad de los eventos de 1840 a 1950



AÑO	PERIODO ENTRE INUNDACIONES INTENSAS
1840	
1860	20 años
1867	7 años
1875	8 años
1888	13 años
1901	13 años
1903	2 años
1904	1 año
1906	2 años
1912	6 años
1921	9 años
1925	4 años
1926	1 año
1927	1 año
1929	2 años
1931	2 años
1935	4 años
1941	6 años
1944	3 años
1945	1 año
1947	2 años
1950	3 años

Tabla 1-2 Frecuencia de ocurrencia de grandes inundaciones en la cuenca del Papaloapan de 1840 a 1950 (Fuente: Memorias de la Comisión del Papaloapan)

Dicha situación es originada principalmente por la deforestación en las zonas altas de la cuenca, aumentando el tiempo en que las comunidades afectadas permanecían inundadas, llegando a tener duraciones de meses, lo que origina grandes pérdidas tanto económicas como humanas. En la tabla 1.3 se muestran las principales inundaciones en la cuenca baja del río Papaloapan de 1944 a 1981.

AÑO	GASTO (m ³ /s)			SUPERFICIE INUNDADA (ha)
	PAPALOAPAN	TESECHOACÁN	SAN JUAN	
1944	11,000	SIN DATOS	SIN DATOS	470,000
1958	6,825	975	925	195,000
1969	6,850	1,404	4,165	340,000
1975	4,630	1,952	1,907	162,000
1980	3,512	1,805	1,523	205,000
1981	5,275	1,738	1,264	210,000

Tabla 1-3 Principales inundaciones en la cuenca baja del río Papaloapan (Fuente: Memorias de la Comisión del Papaloapan)

Entre las mayores inundaciones registradas se encuentran las ocurridas en el año de 1944, y en el año 2010, esta última a consecuencia de las precipitaciones causadas por el huracán “Karl”, y la Tormenta tropical “Matthew”. La inundación de 1944 cubrió aproximadamente 470,000 hectáreas.



Figura 1-3 Tlacotalpan, Veracruz. Inundación de 1944 (Fuente: Memorias de la comisión del Papaloapan)

Mientras que el evento del año 2010, fue consecuencia de los escurrimientos provocados por los ciclones antes mencionados. El huracán “Karl”, tocó tierra el 17 de septiembre de 2010 con vientos de 180 km/h



Figura 1-4 Veracruz Puerto. Comodoro Azueta y Blvd. Ávila Camacho



Figura 1-5 La Antigua. Río La Antigua

Las precipitaciones ocasionadas por la tormenta tropical “Matthew”, se presentaron del 26 al 28 de septiembre del 2010, las localidades más afectadas en la zona baja de la cuenca del río Papaloapan, fueron Tlacotalpan y Cosamaloapan.



Figura 1-6 La Antigua. Río La Antigua



Figura 1-7 Inundación en Cosamaloapan Septiembre 2010



Con la creación de la Comisión del Papaloapan en 1947, se realizaron esfuerzos para el aprovechamiento del agua pero también para el control de inundaciones. Entre las obras realizadas en los comienzos de la comisión se encuentran: la rectificación del río en Cosamaloapan, la presa Michapan, la presa Miguel Alemán en el río Tonto, cuyas funciones son el control de avenidas, la generación eléctrica y la piscicultura, se construyeron varios tramos carreteros y se dragó la Laguna de Alvarado. En 1972 se inició la construcción de la presa Miguel de la Madrid en el río Santo Domingo, que junto con la presa Miguel Alemán constituyen gran parte de los esfuerzos realizados para el control de avenidas del río Papaloapan, en la parte alta (10 m.s.n.m.); sin embargo, en la parte baja existen cauces sin control como el río Tesechoacán, Obispo y San Juan Evangelista; cuyos gastos de drenado hacia la parte baja de la cuenca han superado en repetidas ocasiones su capacidad de drenaje.

Se han realizado estudios para la localización de las zonas más vulnerables a las inundaciones y proponer de obras que conduzcan a mitigar los daños ocasionados por las mismas, en 1993 y 2001 por parte del Instituto Mexicano de la Tecnología del Agua (IMTA).

En 2006, 2010 y 2013 por parte del Instituto de Ingeniería, UNAM; realizó los estudios “Estudio de Aprovechamiento Hidráulico Integral y de Control de Inundaciones de la cuenca del río Papaloapan”, “Actualización del estudio y de las propuestas de acción para el control de inundaciones en la cuenca del río Papaloapan” y “Proyecto Hidrológico para la cuenca del río Papaloapan en los Estados de Veracruz, Puebla y Oaxaca.” respectivamente.

El alcance de los estudios antes mencionados, salvo en el último, no incluía el estudio específico de la Laguna de Alvarado.

1.1. Descripción de la zona de estudio

La laguna de Alvarado pertenece al sistema lagunar de Alvarado que tiene descarga al Golfo de México a través de la laguna.



Figura 1-8 Croquis de localización de la Laguna de Alvarado

Tipo de suelo

El tipo de suelo de la zona se clasifica como gleysol (Portilla-Ochoa et al., 1999), este tipo de suelo se caracteriza por ser pantanosos, la vegetación que se puede desarrollar en ellos son los pastizales y manglares. Su textura es mayormente arcillosa, por lo que tienen mal drenaje y son proclives a las inundaciones en tiempos de lluvias.

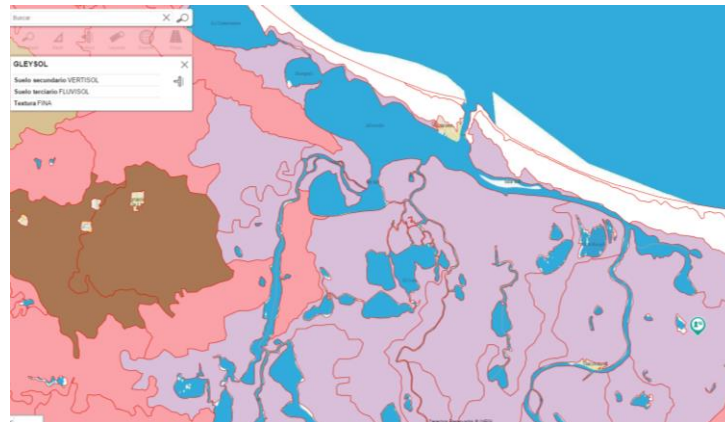


Figura 1-9 Tipo de suelo (Fuente: Mapa Digital de México, INEGI)

Vegetación

La vegetación existente en el sistema lagunar, consiste de Mangle, vegetación de Selva Baja, Encinar y la vegetación de zonas inundables.

Fauna

Según la CONABIO la fauna de la zona está constituida por al menos 150 especies de anfibios, reptiles, mamíferos y 300 especies de aves.

2. REGISTROS HISTÓRICOS Y PRONÓSTICOS

Se describen varios aspectos de los datos medidos de nivel en estaciones hidrométricas y climatológicas, así como en los pronósticos de marea astronómica.

2.1 Hidrogramas de escurrimiento y lluvias por cuenca propia.

Los Estados localizados en el sureste de la República Mexicana, son proclives a padecer los efectos de los eventos ciclónicos generados tanto en el Golfo de México como en el océano Pacífico. De tal manera que entre los meses de agosto a septiembre del año 2010, en el Estado de Veracruz se registraron efectos provenientes de 4 eventos ciclónicos; Frank, Hermine, “Karl” y “Matthew”; el primero se generó en el Océano Pacífico, los tres restantes en el Golfo de México.

En la gráfica siguiente se muestra la elevación de la superficie libre en dicho periodo en las estaciones hidrométricas localizadas en la parte baja de la cuenca del río Papaloapan.

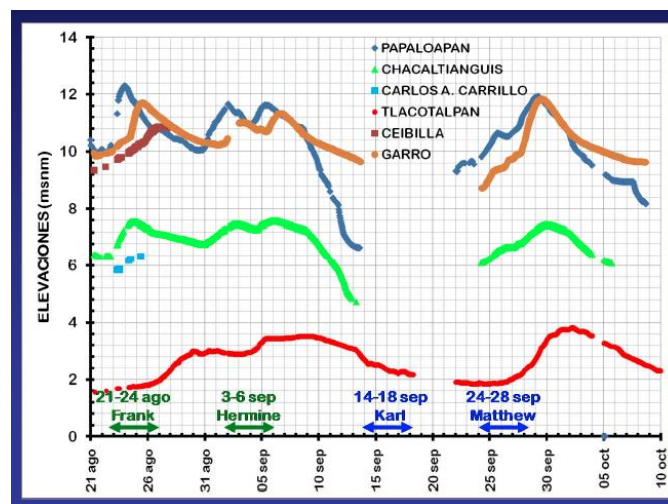


Figura 2-1 Elevación de la superficie libre del agua, agosto – septiembre 2010

La estación climatológica localizada en el municipio de Alvarado reportó precipitaciones acumuladas en 24 horas para dicho periodo entre 254 y 345 mm.

En la gráfica siguiente se muestran los registros de precipitación acumulada para 42 días, correspondientes a la presencia de los eventos ciclónicos en el país.

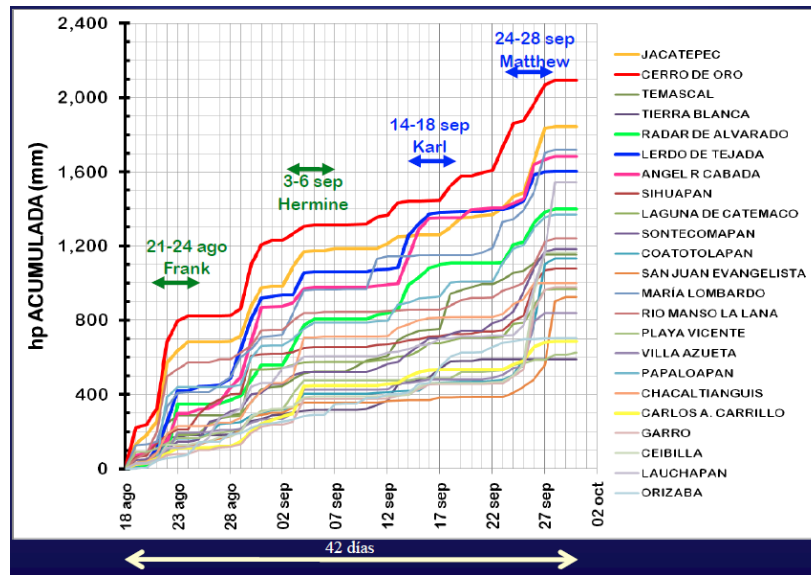


Figura 2-2 Precipitación acumulada, agosto -septiembre 2010

2.2 Instrumentación y medición de Caudales.

Para conocer los niveles de la superficie libre del agua que se presentan en la laguna, se realizó un levantamiento batimétrico, una vez ubicados los puntos en donde se colocarían los sensores de nivel, y referidos con ayuda de la batimetría del sitio, sería posible determinar la cota de la superficie libre del agua.

En las figuras siguientes se muestran la batimetría de la laguna, y el modelo digital de elevaciones de la misma, generado a partir de la batimetría. En las mismas podemos observar, que es somera, pues el lecho en promedio se encuentra en la cota -2 m.s.n.m., con excepción del canal de comunicación con el mar, que debido a la entrada de barcos se ha dragado, alcanzando la cota -15 m.s.n.m. en la parte más profunda.

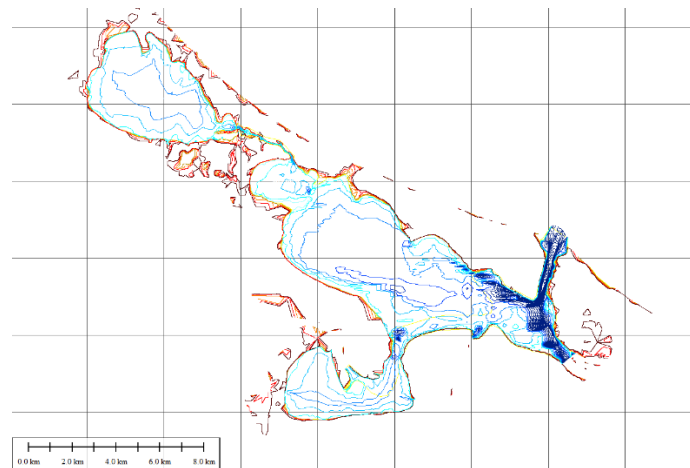


Figura 2-3 Batimetría de la Laguna de Alvarado

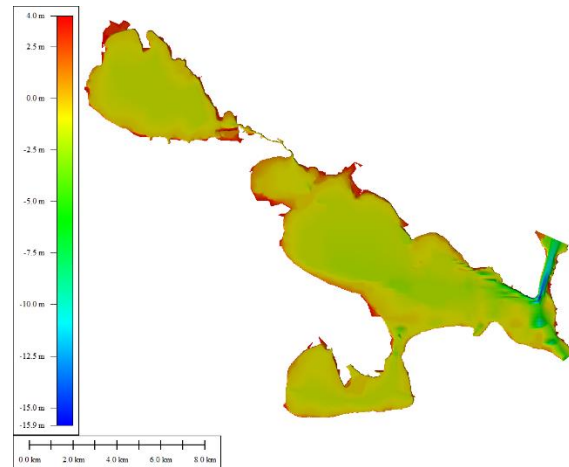


Figura 2-4 Modelo Digital de Elevaciones de la Laguna de Alvarado

2.2.1 Descripción de los instrumentos de medición de presión y caudal

a) Sensores de nivel

Para medir el nivel del agua se utilizaron equipos de medición de presión, cuyas especificaciones son las siguientes: Marca HOBO, tienen un rango operativo de 0 a 207 kPa, aproximadamente unos 9 metros de profundidad de agua a nivel del mar o de 0 a 12 m a 3000 m de altitud. En la figura siguiente se muestra uno de los equipos de medición de presión



Figura 2-5 Sensor de presión

Los sensores fueron instalados en 8 sitios al interior de la laguna de Alvarado, los sitios fueron: Laguna Potrerillo, Arbolillo, Playas, Río de los Remedios, Costa de San Juan, Punta Puquita, Bahía Chucumite, Muelle y Punta de Perro. En la figura siguiente se muestra la localización de los sensores de presión:



Figura 2-6 Ubicación de los sensores de presión

Los datos obtenidos se extraen en un software propio de los equipos, llamado HOBOWare, en el que es posible obtener la presión relativa en el punto en que está localizado el sensor, es decir, se obtiene la presión sin la componente de la presión atmosférica; sólo la presión que ejerce sobre el sensor la columna de agua, en la figura siguiente se muestra el entorno del software. Los datos obtenidos referidos a un bando de nivel de todos los sensores de la laguna, se presentan en el anexo A-1. En la figura siguiente se muestra el entorno del software HOBOWare.

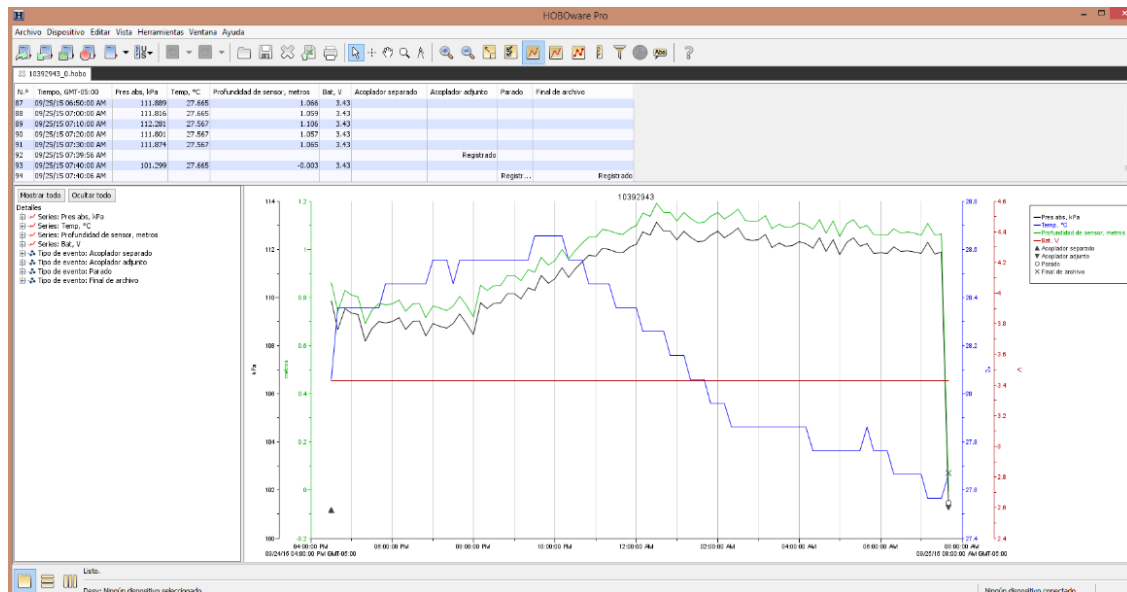


Figura 2-7 Entorno del software HOBOWare

Los datos de los registros obtenidos con los sensores de nivel, se muestran en el anexo A.2, en este apartado solo se mostrará la gráfica correspondiente a los mismos Figuras 2.3.4, 2.3.5.

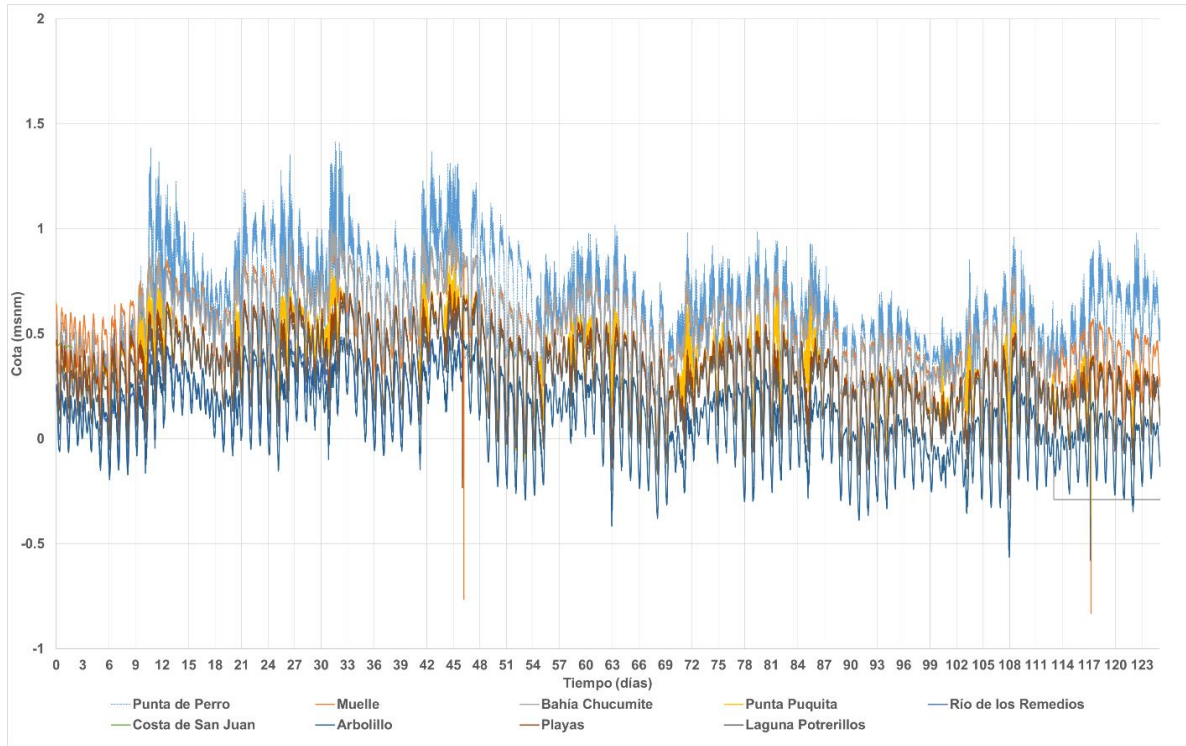


Figura 2-8 Cota de la superficie libre del agua del 13/10/2013 al 18/02/2014

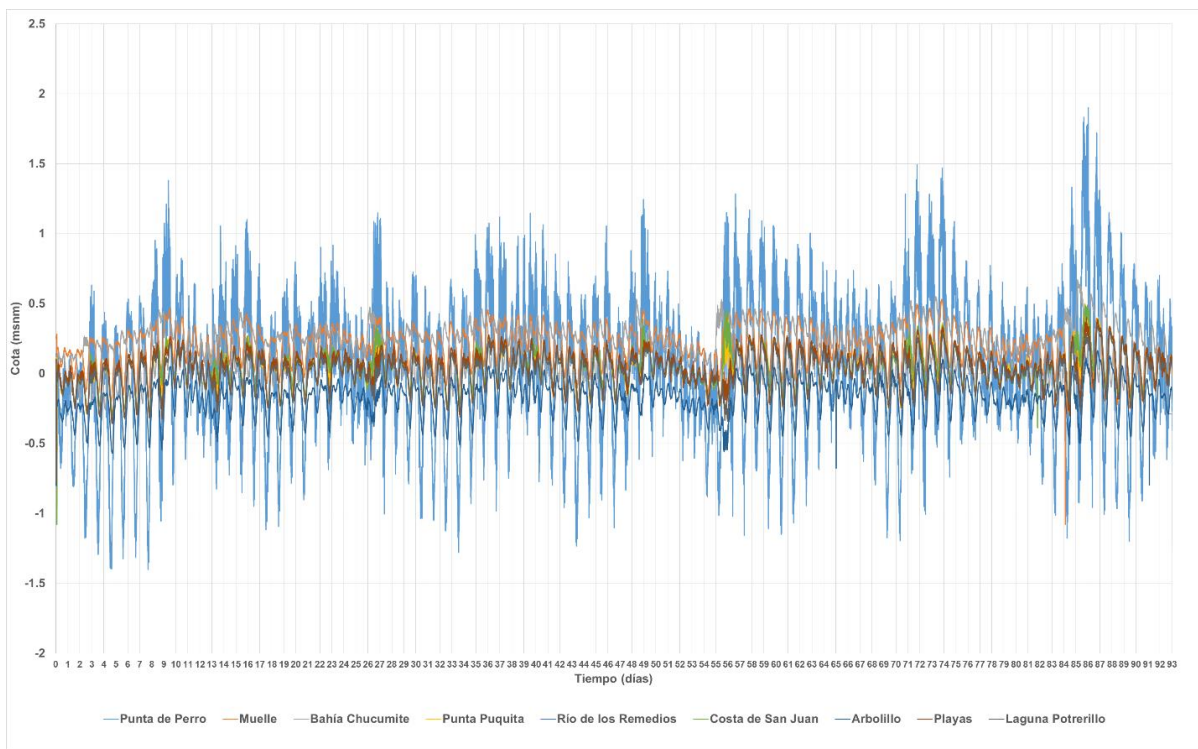


Figura 2-9 Cota de la superficie libre del agua del 18/02/2014 al 22/05/2014

La diferencia de niveles promedio es de 50 centímetros, generalmente los sensores entre los que se registra la mayor diferencia son los ubicados en “Arbolillo” y el que está ubicado en el muelle, y en algunos instantes el que se encuentra en “Punta de Perro”. Con respecto a este último cabría hacer un comentario; al ser el sensor que se encuentra en la salida de la laguna, se ve más expuesto a factores que pueden influir en los registros; como se puede observar en las gráficas, el comportamiento de ese sensor es más errático que en los demás. Por lo que los datos utilizados en las modelaciones se ajustaron a curvas de noveno grado con el fin de “limpiar” un poco la señal registrada y que los datos a modelar sean aquellos que describan mejor el comportamiento de la laguna.

b) Mediciones de Caudal

Las mediciones de caudal se realizaron con un perfilador de corriente acústico doopler (ADCP), por sus siglas en inglés, que mide la magnitud y dirección de las corrientes, mediante la iluminación de la columna de agua. Utiliza el efecto doopler que a través de la transmisión de ondas de sonido con características conocidas, recibe el cambio de la frecuencia debido a la penetración de esta onda de sonido por las diferentes capas de agua.

Existen ADCP's que emiten ondas de sonido a diferentes frecuencias dependiendo principalmente, de la profundidad y resolución que se quiera obtener en el sitio de interés.

En oceanografía, las mediciones de las corrientes a través del ADCP pueden ser realizadas en tiempo real o como auto-contenido. La medición de ADCP en tiempo real, se realiza a través de un sistema de acoplado o remolcado a la lancha, obteniendo datos desde la superficie al fondo a medida que se desplaza sobre el transecto de interés. En cambio, el modo de auto-contenido del ADCP, se utiliza por medio de un anclaje vertical en la columna de agua, que junto a otros instrumentos, registran la variabilidad mensual, estacional o anual de las corrientes, según se requiera.

Las mediciones realizadas fueron en tiempo real, es decir se llevó el equipo arrastrando sobre una lancha, a través de una sección transversal, en la salida de la laguna, el canal de comunicación con el mar.



Figura 2-10 ADCP

La recolección de datos de gasto y velocidades que realiza el equipo se hace mediante un software, llamado WinRiver, mismo que al final del transecto, proporciona el gasto registrado en la totalidad de la sección, así como la magnitud de las velocidades en cada capa del agua por la que pasó el haz de luz, así como el sentido del flujo.

En la figura siguiente se muestra el entorno de WinRiver.

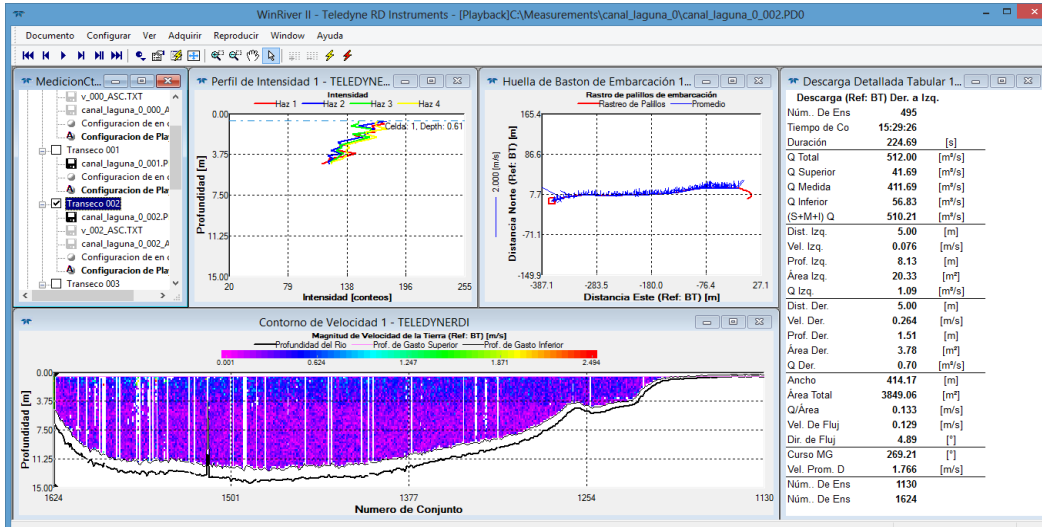


Figura 2-11 Entorno de WinRiver

Los aforos del sitio se realizaron en 4 campañas, hechas en los meses de febrero, mayo y julio de 2014 y en el mes de septiembre de 2015. Es posible observar que en algunos instantes de medición de caudal, se reportan gastos negativos, el sentido físico de tales caudales es que el flujo en ese instante es al interior de la laguna, esto depende del nivel en que se encuentre la marea, esto ocurre si el nivel alcanzado por ésta es mayor al nivel del agua en el interior de la laguna.

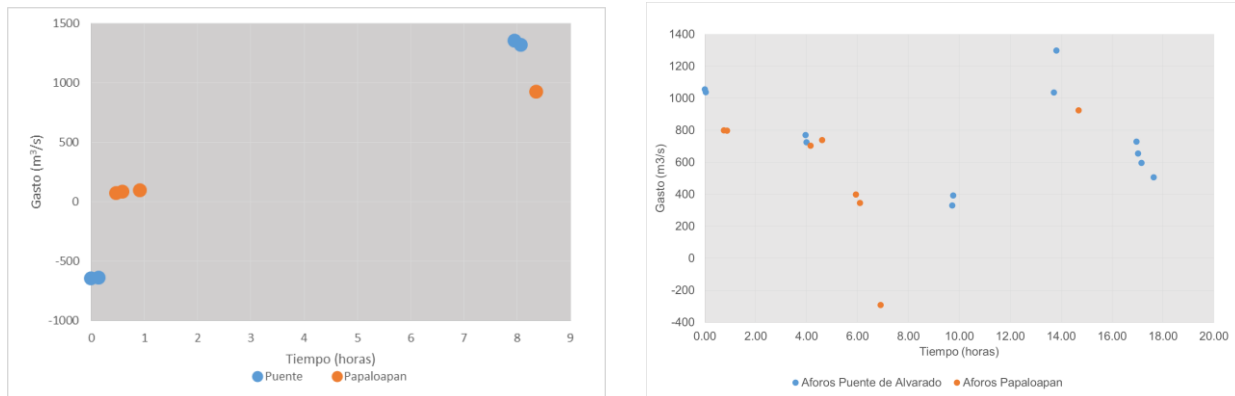


Figura 2-12 Aforos 17 y 18 de febrero 2014

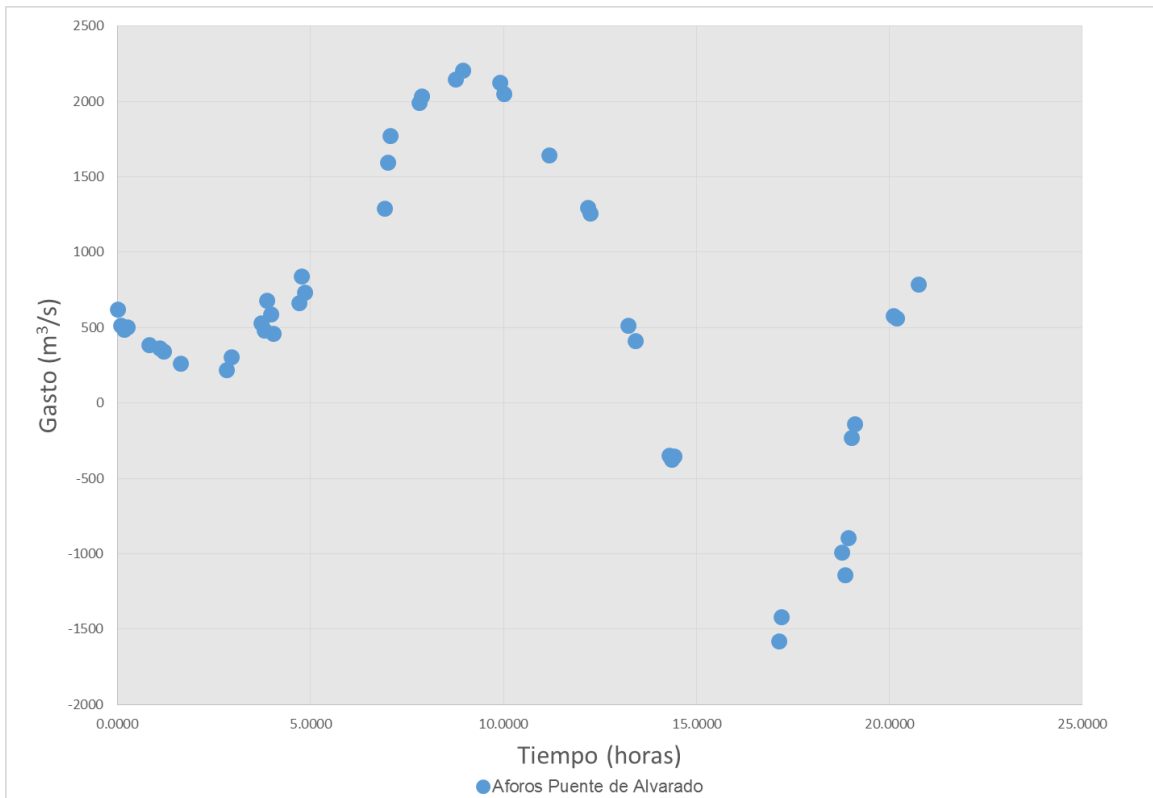


Figura 2-13 Aforos 20 y 21 de mayo de 2014

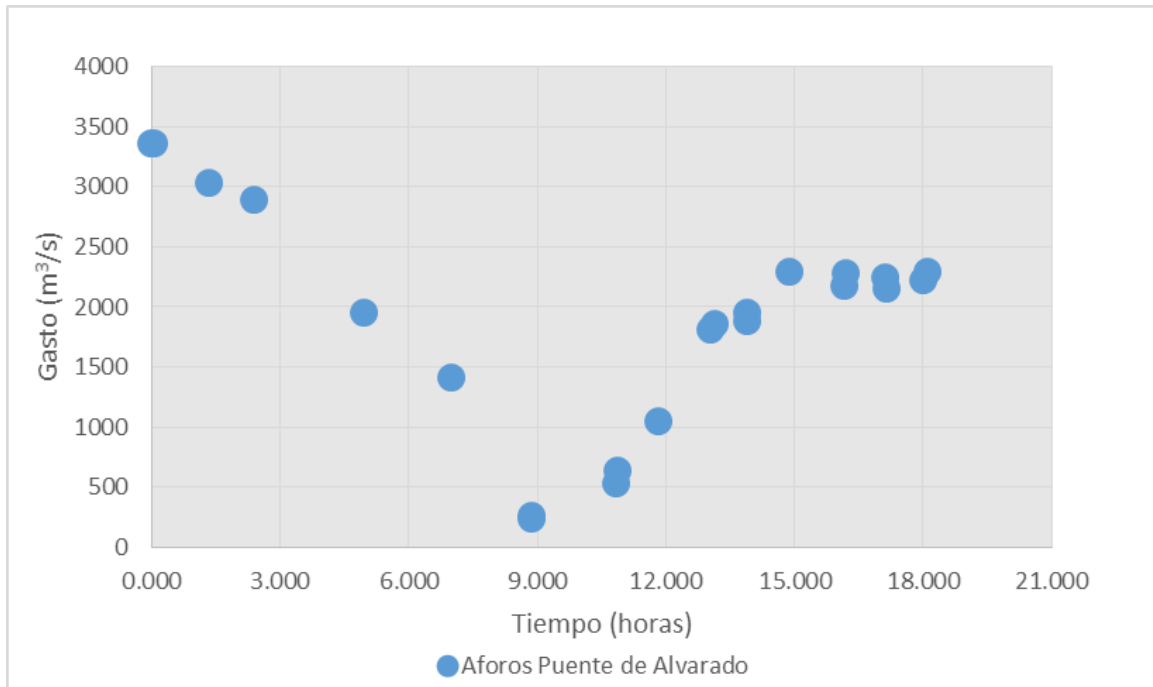


Figura 2-14 Aforos 1 y 2 de Julio 2014

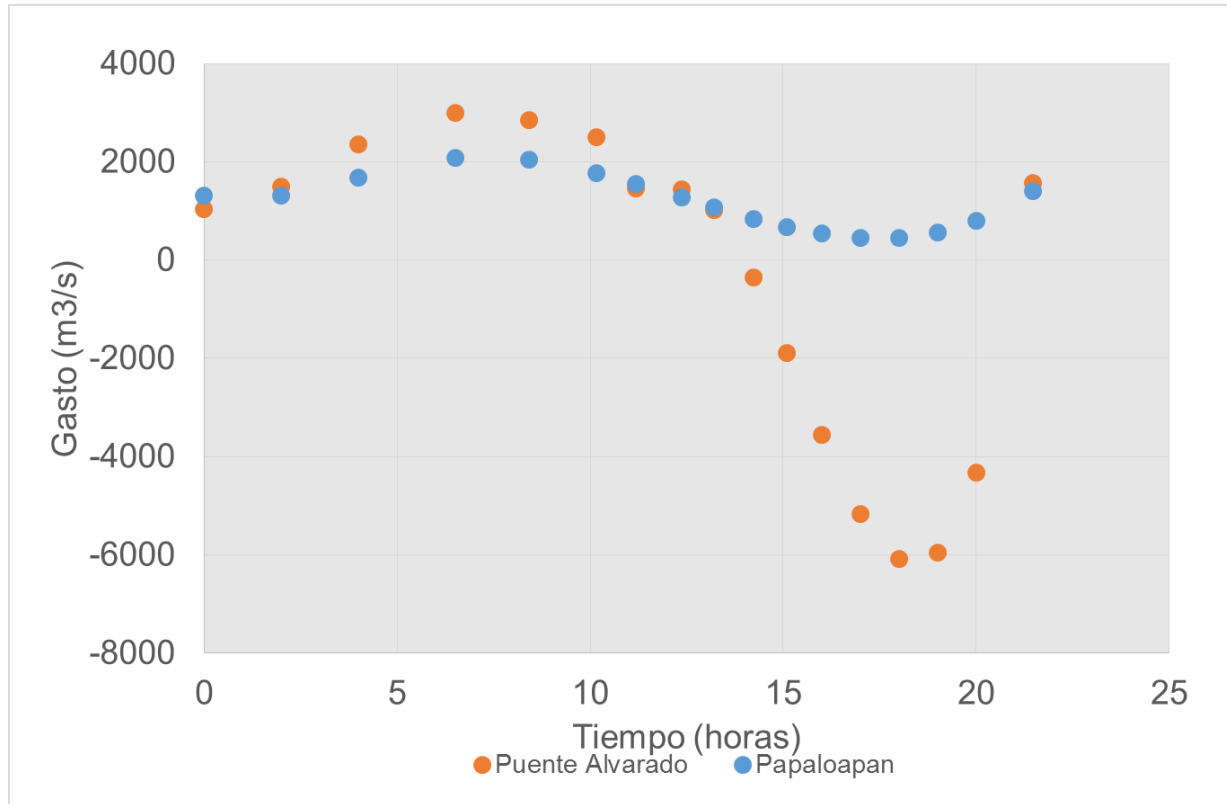


Figura 2-15 Aforos Septiembre 2015

Al analizar el comportamiento del gasto de la laguna, llevando a una gráfica el gasto registrado en el mes de mayo de 2014, con sus niveles correspondientes, se tiene:



Figura 2-16 Gasto-nivel mayo 2015

Como se puede observar, el máximo gasto de “salida” de la laguna, ocurrió el momento en que los niveles registrados en el sensor de “Punta de Perro” eran los mínimos; mientras, que los gastos mayores de “entrada” a la laguna ocurrieron cuando el sensor registro los niveles más altos.

En el caso de las velocidades registradas por el equipo, se pueden obtener archivos ASCII de cada medición, en cada celda se reporta la velocidad del flujo registrada por el haz de luz:



Figura 2-17 Archivo de salida. Velocidades



De esta manera, se obtuvo el módulo de la velocidad para cada celda del registro los datos obtenidos se muestran en la tabla siguiente:

Fecha	Hora	V sup	V max	V Fondo
20/05/2014	04:23:00 p. m.	0.56	0.70	0.08
20/05/2014	04:29:00 p. m.	0.24	0.81	0.16
20/05/2014	04:34:00 p. m.	0.44	0.81	0.23
20/05/2014	04:39:00 p. m.	0.39	0.81	0.09
20/05/2014	05:12:00 p. m.	0.14	0.93	0.12
20/05/2014	05:29:00 p. m.	0.66	1.06	0.26
20/05/2014	05:35:00 p. m.	0.17	1.01	0.08
20/05/2014	06:01:00 p. m.	0.68	1.04	0.05
20/05/2014	07:21:00 p. m.	0.27	2.13	0.46
20/05/2014	08:07:00 p. m.	0.72	2.21	0.28
20/05/2014	08:12:00 p. m.	1.07	3.57	0.70
20/05/2014	08:15:00 p. m.	1.90	2.99	0.87
20/05/2014	08:26:00 p. m.	0.79	2.04	0.04
20/05/2014	09:06:00 p. m.	0.92	1.74	0.47
20/05/2014	09:10:00 p. m.	0.82	1.25	0.26
20/05/2014	09:14:00 p. m.	0.70	1.08	0.27
20/05/2014	11:15:00 p. m.	0.37	1.44	0.09
21/05/2014	01:01:00 a. m.	0.88	1.13	0.12
21/05/2014	01:40:00 a. m.	0.30	1.01	0.18

Tabla 2-1 Módulo de velocidad registrado



2.3 Análisis de datos registrados por los sensores

Debido a que si se utilizaran los datos “crudos” obtenidos principalmente por el sensor ubicado en “Punta de Perro” (puesto que en los registros hay ciertas variaciones demasiado bruscas, ocasionadas por factores externos como: paso de grandes embarcaciones hacia la laguna, el choque de las olas con la barrera física del sitio. Factores que provocan que el registro del sensor sea más errático), podrían generar inestabilidades en el modelo. Por lo que se optó por “suavizar” la señal registrada por medio de la Transformada discreta de Fourier.

La transformada discreta de Fourier nos permite encontrar las componentes de frecuencia de una señal. La transformada (F) se denota como:

$$F(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} f(t_n) \exp\left(-\frac{2\pi i n k}{N}\right) \quad (1)$$

Para poder suavizar la señal obtenida, se utilizó el método del valor umbral, en el que simplemente se hacen cero los coeficientes de Fourier que sean demasiado pequeños pues son los que provocan la distorsión de dicha señal; posteriormente se aplica la transformada inversa de Fourier que se define como:

$$f(t_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} F(n) \exp\left(\frac{2\pi i n k}{N}\right) \quad (2)$$

Para ambos casos:

$N = [T f_s] + 1$ Siendo T el periodo de la señal, f_s la frecuencia del muestreo de la misma.

El análisis con la transformada de Fourier se realizó con Matlab, el cual ya tiene dichas funciones precargadas, por lo tanto, para hacer la calibración y validación de los modelos, se tomaron los datos del 18 al 21 de mayo de 2014.

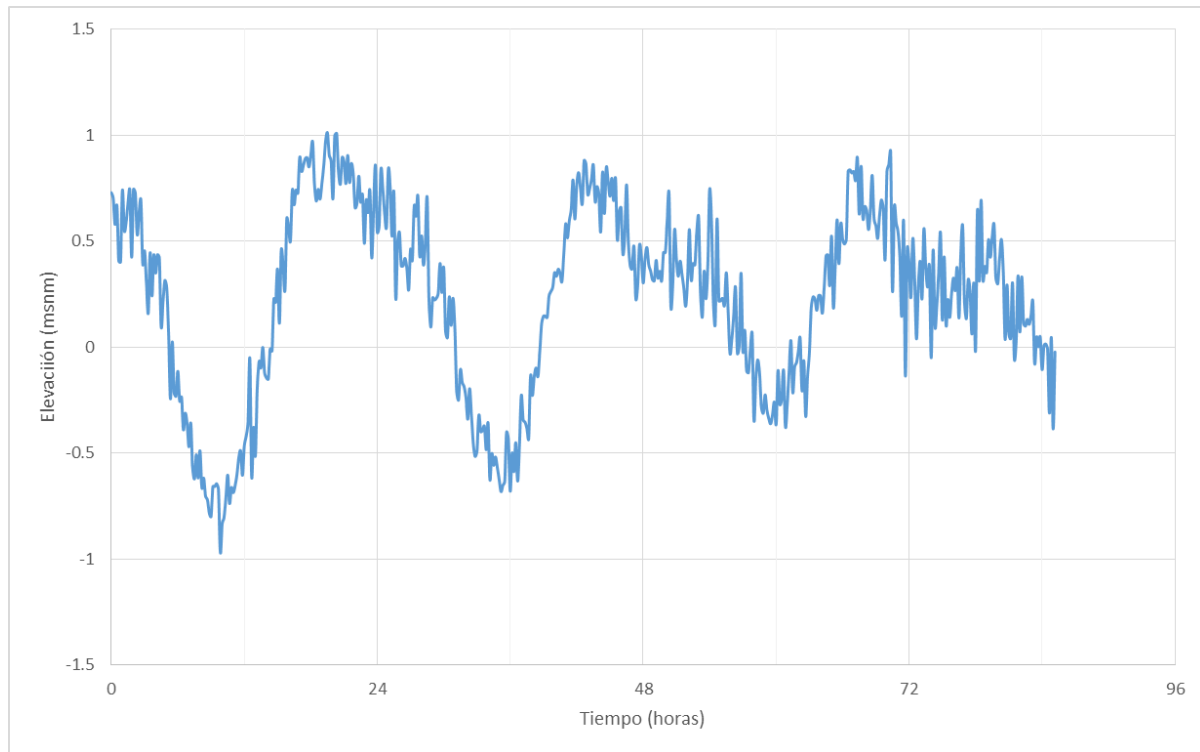


Figura 2-18 Niveles registrados “Punta de Perro” 18 al 22 de mayo

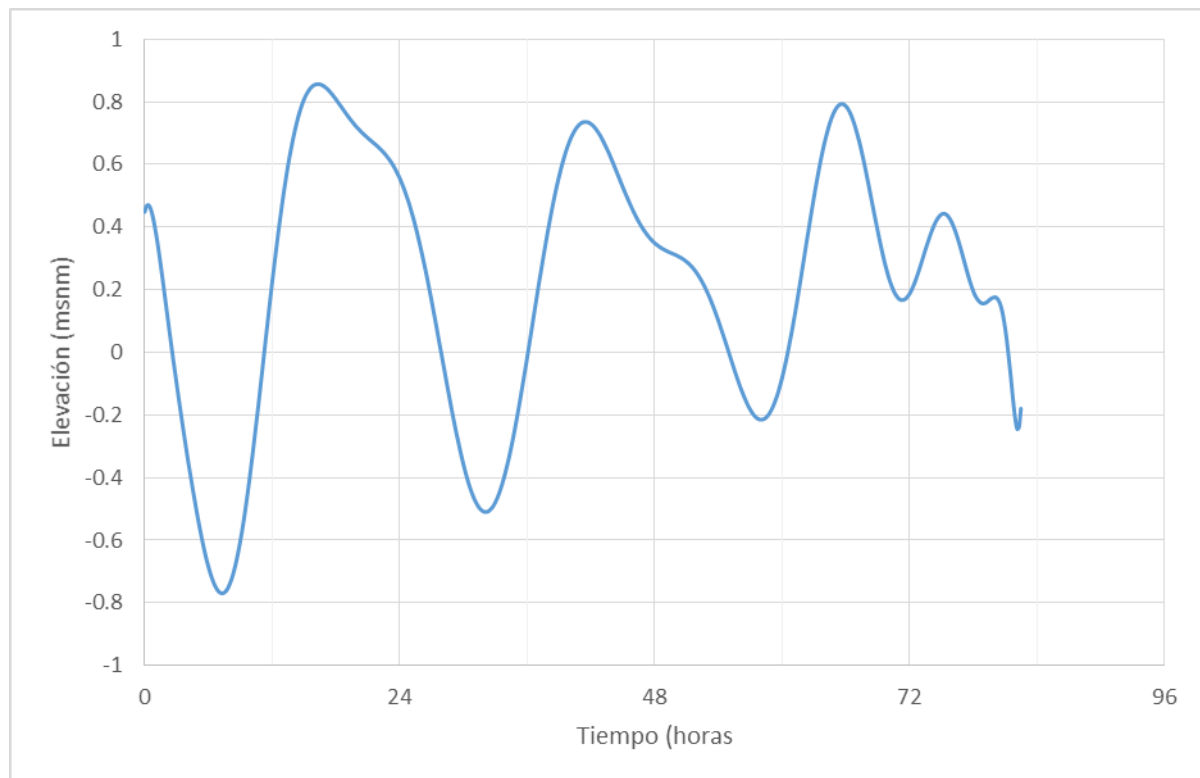


Figura 2-19 Señal filtrada “Punta de Perro” 18 al 22 de mayo



2.4.- Pronóstico de marea astronómica

Mareas

En este apartado se describen los tipos de mareas y la forma mediante la que se calculan; los datos serán utilizados como condición de frontera para el modelo.

Tipos de marea astronómica

La causa de las mareas astronómicas es la atracción gravitacional de la Luna y el Sol sobre la masa de agua de la tierra (la altura de las mareas se puede ver afectada por eventos climáticos, como en las mareas de tormenta, que se tratan más adelante), por tanto, la posición de los dos astros puede generar que su atracción se sume o por el contrario cuando están alejados dicha atracción se compense parcialmente. De ésta manera la marea en un sitio dado, puede alcanzar su altura máxima (pleamar) en un día distinto de otro, dependiendo de la fase lunar. Se distinguen dos clases de mareas, las llamadas vivas (o de sicigias) y muertas (o de cuadratura).

Mareas vivas o de sicigias. Se dan cuando el Sol, la Luna y la Tierra se encuentran alineados, es decir, cuando hay Luna llena o nueva; en el primer caso se llama oposición, es decir el Sol y la luna se encuentran en oposición con respecto a la tierra, cuando es Luna nueva, se llama conjunción, es decir la Luna y el Sol se encuentran en conjunción con respecto a la Tierra. En uno y otro caso las fuerzas de marea se suman, teniéndose entonces, pleamares más altas y bajamares más bajas que los valores promedio.

Sin embargo, es común encontrar mareas vivas más intensas que otras en distintas épocas del año, debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la eclíptica y la inclinación de la órbita de la Luna; de esta manera, si la Luna nueva o llena tiene lugar en los equinoccios de primavera y otoño, la alineación es mayor porque el Sol se encuentra sobre la línea del ecuador, es decir la declinación del Sol con respecto al eje de rotación de la Tierra es cero, en consecuencia la suma de atracciones es más eficiente produciendo mareas de sicigias más intensas.

Mareas muertas o de cuadratura. Son las mareas ocurridas cuando la Luna se encuentra en fase de cuarto menguante o creciente, son más bajas que las de sicigias debido a que la atracción gravitatoria del Sol y la Luna se compensa parcialmente.

Existe un retraso del momento en que se presentan las fases lunares a que surgen los efectos sobre la marea, tal retraso se llama edad de la marea.

Predicción de Mareas

Las predicciones de mareas se hacen para puertos concretos y se basan en ajustes numéricos a las series de datos obtenidas mediante mareógrafos instalados en los puertos de interés. Las series de datos se ajustan al modelo de Foreman (Foreman 1977):

$$\eta(\tau) = a_0 + \sum_{n=1}^k a_n \cos(\omega_n t + \alpha_n) \quad (3)$$



Donde $\eta(\tau)$ es la altura del agua en el instante τ , a_0 es la altura media del agua y a_n , ω_n y α_n , son las amplitudes, frecuencias angulares y fases de los k componentes armónicos utilizados para ajuste a partir de las series de datos. La precisión de la predicción será mayor conforme más componentes armónicos sean utilizados; es decir mientras k sea mayor y que no sea muy grande.

Para el presente trabajo, las predicciones se realizaron para un intervalo de tiempo que va del año 2000 a 2016, mediante el software MAR V1.0 propiedad del CICESE.

De los datos obtenidos para el periodo de tiempo antes mencionado se obtuvieron los niveles máximo y mínimo de marea, se recurrió al calendario lunar para comprobar que en los días seleccionados haya ocurrido en este caso Luna nueva y cuarto menguante.

Para la marea viva se utilizarán los siguientes datos:

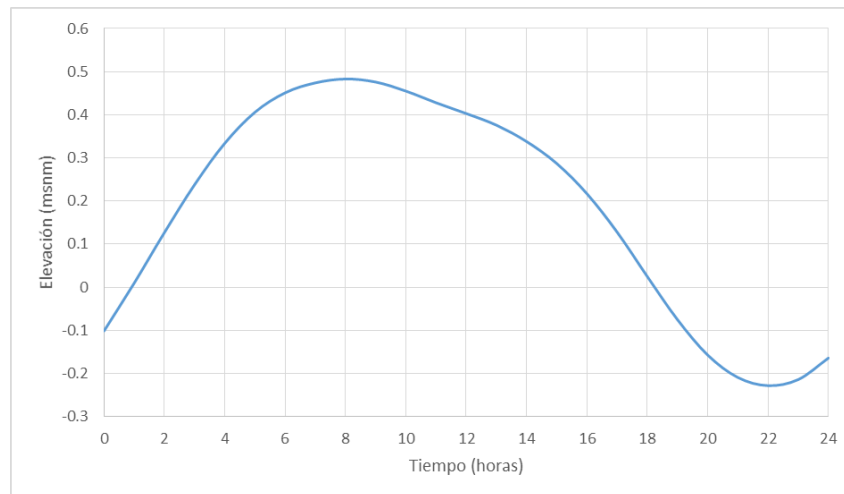


Figura 2-20 Gráfica Marea Viva

En el caso de la marea muerta:

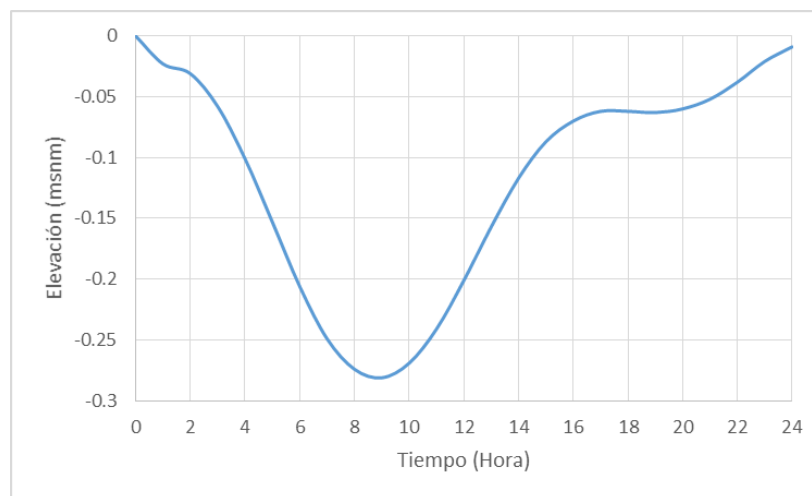


Figura 2-21 Gráfica Marea Muerta



Marea de tormenta

Si bien la interacción Sol-Tierra-Luna es la que genera las mareas antes descritas, las condiciones habituales de las mismas pueden verse afectadas por eventos climáticos

Los ciclones tropicales, por ejemplo, provocan un ascenso en el nivel medio del mar; dicho ascenso se debe, principalmente a los vientos del ciclón, y se le denomina **marea de tormenta** (Fuentes et al.)

Si bien la amplitud de la marea de tormenta depende de los vientos originados por el ciclón, ésta también depende en menor medida de otros parámetros como la presión atmosférica y ciertos aspectos físicos de la zona. Las mareas de tormenta pueden durar de 12 h a 3 días.

Las mareas de tormenta no son estáticas, van variando con el tiempo, por lo que la manera más exacta de obtenerlas es por medio de programas que resuelvan las ecuaciones que gobiernan la interacción del viento de los ciclones, su dirección, con los aspectos físicos del sitio en cuestión; sin embargo existen métodos de cálculo de la altura máxima alcanzada por la marea de tormenta que son fiables cuando se trata de analizar los efectos de algún ciclón a mediana escala (Fuentes et al)

Método simplificado para el cálculo de la marea de tormenta

Cálculo de la altura máxima de la marea de tormenta

Después de realizar análisis sobreelevaciones de la marea de tormenta y de expresiones empíricas propuestas en E.U.A. y Japón, se obtuvo la siguiente expresión:

$$h = (0.03R + 0.000119V^2 - 1.4421)F \quad (4)$$

Donde h (m) es la elevación más alta que alcanza la marea de tormenta, R es el radio máximo del viento en km, V es la velocidad sostenida del viento (en km/h).

$$R = 0.0007e^{0.01156p_0} \quad (5)$$

p_0 es la presión en el centro del ciclón en milibares

Si no se dispone de los datos precisos sobre la velocidad sostenida del viento del ciclón, se puede estimar con la siguiente expresión:

$$V = 20.1834(1013 - p_0)^{0.5} - 0.2618R \text{Sen}\phi + 0.5Vd \quad (6)$$

Donde Vd es la velocidad de desplazamiento

El factor de corrección F se determina con:

$$F = 0.6(1 + \text{sen}\alpha) \quad (7)$$

α es el ángulo formado por la línea de trayectoria del ciclón con la línea de tierra.

Como se mencionó en la introducción del presente trabajo, en el año 2010 se tuvo una de las peores inundaciones registradas en la historia reciente del municipio de Alvarado; aquello fue resultado de la conjunción de dos eventos meteorológicos, uno de ellos, fue el huracán “Karl”, que tocó tierra al norte del estado 17 de septiembre; así que como condición de frontera para modelar los niveles correspondientes a cada periodo de retorno se hará uso de los datos existentes del huracán para que sirva para comprender la interacción del sistema en cada condición de entrada con una marea de tormenta provocada por un evento de las características de “Karl”.

Según la información disponible los parámetros físicos de “Karl” son:

$V=185.2$ km/h

$Po=976$ mb

Cuando tocó tierra era huracán III en escala Saffir Simpson.

La trayectoria que siguió el ciclón desde su formación hasta su desaparición fue la siguiente:

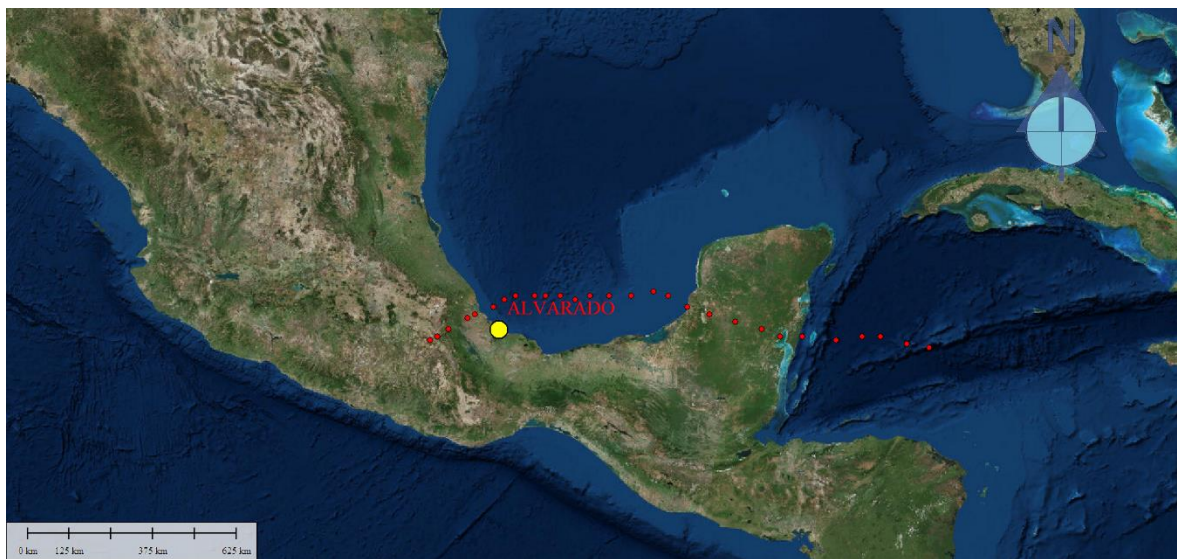


Figura 2-22 Trayectoria del huracán “Karl” (Fuente <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/2010H/KARL/track.dat>)

Determinación del ángulo que forma la trayectoria del ciclón con la línea de costa:

Si no se tienen datos sobre la trayectoria de huracán y se pueda deducir el ángulo que forma con la línea de costa se puede hacer uso de las imágenes siguientes:

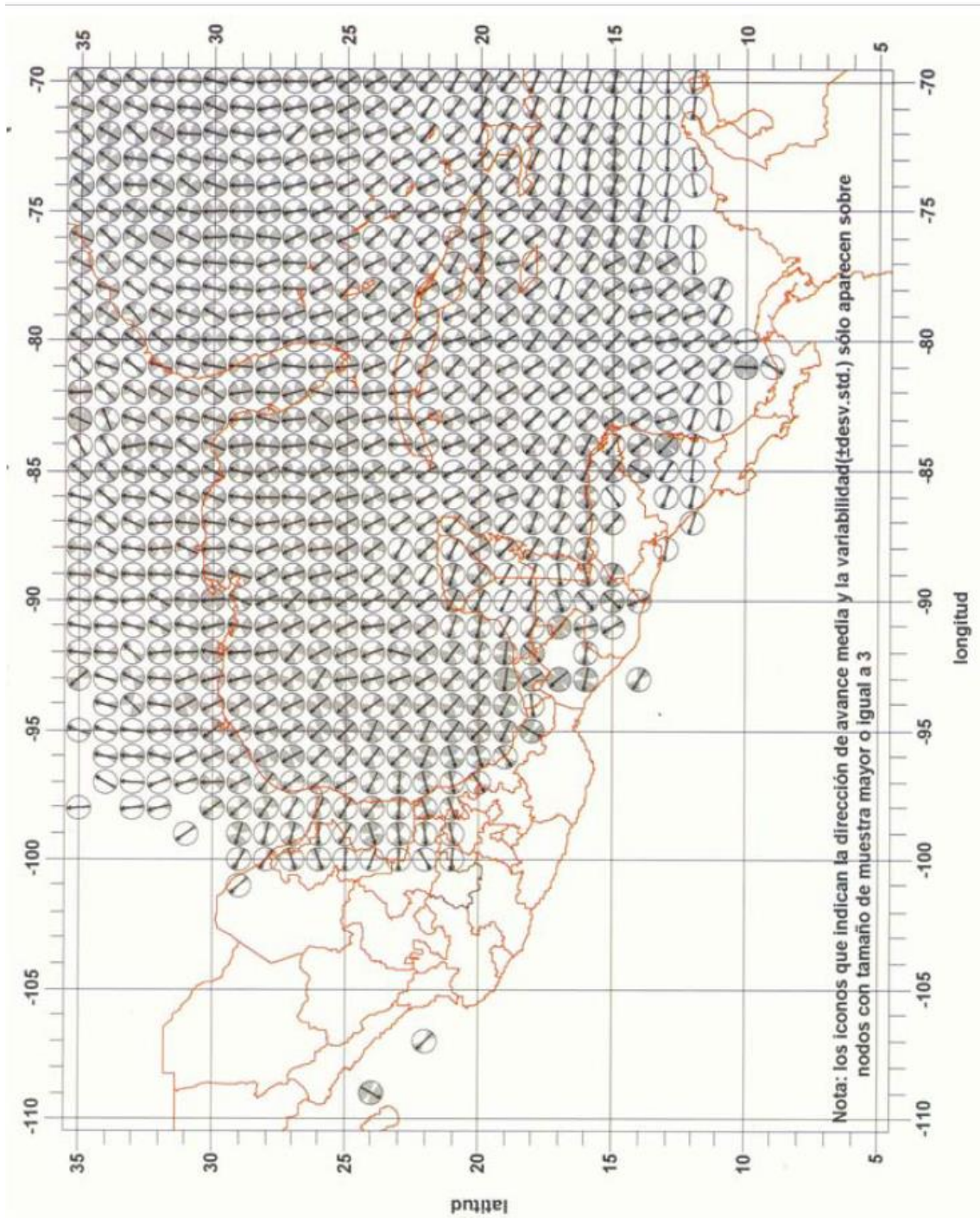


Figura 2-23 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Atlántico norte 1851-2000 (Rosengaus, et al., 2002)

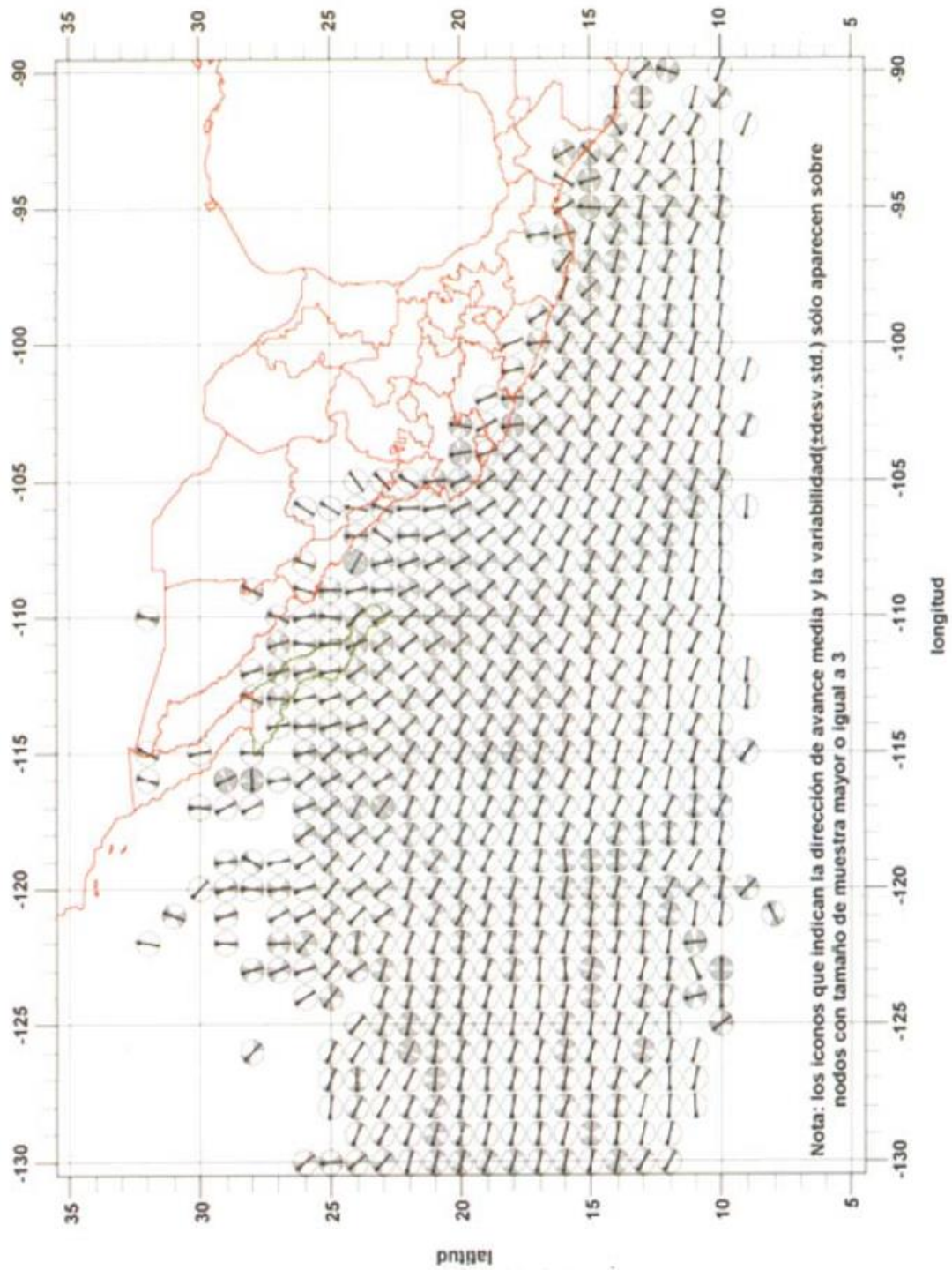


Figura 2-24 Dirección de la traslación (media y variabilidad) para ciclones tropicales en el Pacífico nororiental 1949-2000 (Rosengaus, et al., 2002)

Por tanto:

$$\alpha = 113^\circ$$

ρ_0	961
V	169
R	46.74
F	1.15
h	3.87

Tabla 2-2 Cálculo Marea de Tormenta

La altura se presenta dentro de la zona del mar donde se presentan los vientos más intensos, que tiene forma de anillo con centro en el ojo del huracán, el radio mayor tiene el doble del radio de máximo viento y el anillo menor corresponde a la mitad del radio de máximo viento:



Figura 2-25 Radios mayor y menor del huracán “Karl”, 17 de septiembre

Así, para el 17 de septiembre la marea de tormenta se encuentra a 138 km del ojo del huracán.

De esa forma se calculó la marea de tormenta durante el tiempo en que tuvo impacto en la zona de Alvarado.

En la tabla siguiente se muestra la trayectoria del huracán “Karl”, la velocidad del viento, la presión central en milibares así como su categoría en la escala Saffir-Simpson



Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado y su relación con el mar



ADV	LAT	LON	HORA	VIENTO mph	VIENTO km/h	PRESIÓN (mb)	STAT	
1	18.3	-84.2	09/14/21Z	35	56.3269	1001	TROPICAL	STORM
1A	18.4	-84.8	09/15/00Z	40	64.3736	999	TROPICAL	STORM
2	18.6	-85.5	09/15/03Z	40	64.3736	999	TROPICAL	STORM
2A	18.6	-86	09/15/06Z	40	64.3736	999	TROPICAL	STORM
3	18.5	-86.7	09/15/09Z	55	88.5137	995	TROPICAL	STORM
3A	18.6	-87.6	09/15/12Z	55	88.5137	991	TROPICAL	STORM
4	18.6	-88.2	09/15/15Z	50	80.467	992	TROPICAL	STORM
4A	18.8	-88.7	09/15/18Z	45	72.4203	994	TROPICAL	STORM
5	19	-89.4	09/15/21Z	40	64.3736	997	TROPICAL	STORM
5A	19.2	-90.1	09/16/00Z	35	56.3269	1000	TROPICAL	STORM
6	19.4	-90.7	09/16/03Z	35	56.3269	1000	TROPICAL	STORM
6A	19.7	-91.2	09/16/06Z	35	56.3269	1000	TROPICAL	STORM
7	19.8	-91.6	09/16/09Z	45	72.4203	1000	TROPICAL	STORM
8	19.7	-92.2	09/16/12Z	55	88.5137	987	TROPICAL	STORM
9	19.7	-92.8	09/16/15Z	65	104.6071	983	HURRICANE-1	
9A	19.7	-93.3	09/16/18Z	65	104.6071	983	HURRICANE-1	
10	19.6	-93.7	09/16/21Z	70	112.6538	977	HURRICANE-1	
10A	19.7	-94.1	09/17/00Z	70	112.6538	971	HURRICANE-1	
11	19.7	-94.5	09/17/03Z	85	136.7939	968	HURRICANE-2	
11A	19.7	-94.8	09/17/06Z	90	144.8406	967	HURRICANE-2	
12	19.7	-95.3	09/17/09Z	105	168.9807	961	HURRICANE-3	
12A	19.6	-95.6	09/17/12Z	105	168.9807	956	HURRICANE-3	
13	19.4	-95.9	09/17/15Z	105	168.9807	967	HURRICANE-3	
13A	19.2	-96.4	09/17/18Z	95	152.8873	979	HURRICANE-2	
14	19.1	-96.6	09/17/21Z	80	128.7472	985	HURRICANE-1	
14A	18.8	-97.1	09/18/00Z	60	96.5604	995	TROPICAL	STORM
15	18.6	-97.4	09/18/03Z	30	48.2802	1000	TROPICAL	DEPRESSION
16	18.5	-97.6	09/18/09Z	20	32.1868	1006	TROPICAL	DEPRESSION

Tabla 2-3 Avance y características del ciclón “Karl” (Fuente <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/2010H/KARL/track.dat>)

Se calculó la altura de la marea de tormenta para cada punto de la trayectoria del huracán indicado en la tabla anterior, así como el anillo donde se encuentra dicha elevación:

LAT	LON	R	h	Radio Mayor	Radio Menor
18.3	-84.2	74.2271345	1.33928443	148.454269	37.11356724
18.4	-84.8	72.5306896	1.41382033	145.061379	36.2653448
18.6	-85.5	72.5306896	1.41382033	145.061379	36.2653448
18.6	-86	72.5306896	1.41382033	145.061379	36.2653448
18.5	-86.7	69.2532293	1.80660726	138.506459	34.62661467
18.6	-87.6	66.1238684	1.69842811	132.247737	33.0619342
18.6	-88.2	66.8926956	1.53855312	133.785391	33.44634779
18.8	-88.7	68.4572715	1.42394384	136.914543	34.22863576
19	-89.4	70.8730166	1.35651609	141.746033	35.4365083
19.2	-90.1	73.3740094	1.30979267	146.748019	36.68700468
19.4	-90.7	73.3740094	1.30979267	146.748019	36.68700468
19.7	-91.2	73.3740094	1.30979267	146.748019	36.68700468
19.8	-91.6	73.3740094	1.59391098	146.748019	36.68700468
19.7	-92.2	63.1359146	1.59513727	126.271829	31.5679573
19.7	-92.8	60.2829781	1.92269132	120.565956	30.14148905
19.7	-93.3	60.2829781	1.92269132	120.565956	30.14148905
19.6	-93.7	56.2434605	2.02277371	112.486921	28.12173026
19.7	-94.1	52.474628	1.89248861	104.949256	26.23731401
19.7	-94.5	50.686002	2.65637627	101.372004	25.34300098
19.7	-94.8	50.1034454	2.94699222	100.206891	25.05172272
19.7	-95.3	46.7460508	3.86973771	93.4921016	23.37302539
19.6	-95.6	44.1207316	3.77898283	88.2414633	22.06036582
19.4	-95.9	50.1034454	3.98579978	100.206891	25.05172272
19.2	-96.4	57.5589579	3.53323427	115.117916	28.77947894
19.1	-96.6	61.6929571	2.74387966	123.385914	30.84647856
18.8	-97.1	69.2532293	2.01081729	138.506459	34.62661467
18.6	-97.4	73.3740094	1.19436961	146.748019	36.68700468
18.5	-97.6	78.6438771	1.19897018	157.287754	39.32193857

Tabla 2-4 Altura de la marea de tormenta y radio de influencia

De tal manera que las elevaciones de la marea de tormenta que tuvieron impacto en Alvarado fueron las ocurridas el 17 de Septiembre.

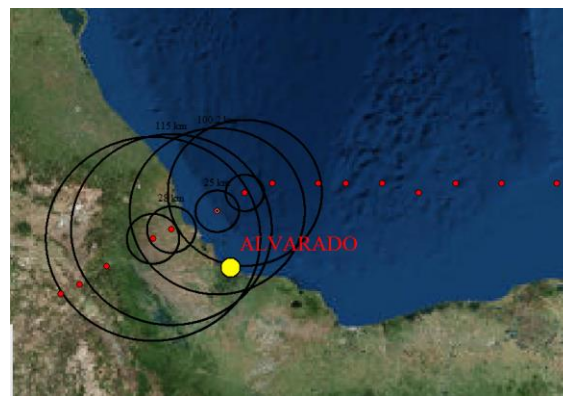


Figura 2-26 Radio de Influencia de la marea de tormenta 17 de septiembre de 2010



La altura máxima de la marea de tormenta y la hora registrada se presentan en la tabla siguiente:

Fecha/Hora	h (m)
09/17/09Z	3.86973771
09/17/12Z	3.77898283
09/17/15Z	3.98579978
09/17/18Z	3.53323427
09/17/21Z	2.74387966
09/18/00Z	2.01081729

Tabla 2-5 Altura de la marea de tormenta

Se utilizó la marea de tormenta de 2 metros que sumada a la marea astronómica tomada de la predicción de SICIGIAS, da como resultado la siguiente:

Tiempo (s)	Elev (m.s.n.m.)
0	1.934
3600	1.941
7200	1.97
10800	2.016
14400	2.076
18000	2.143
21600	2.207
25200	2.257
28800	2.287
32400	2.299
36000	2.295
39600	2.279
43200	2.257
46800	2.237
50400	2.224
54000	2.218
57600	2.216
61200	2.211
64800	2.199
68400	2.177
72000	2.14
75600	2.092
79200	2.045
82800	2.001
86400	1.968

Tabla 2-6 Marea de tormenta

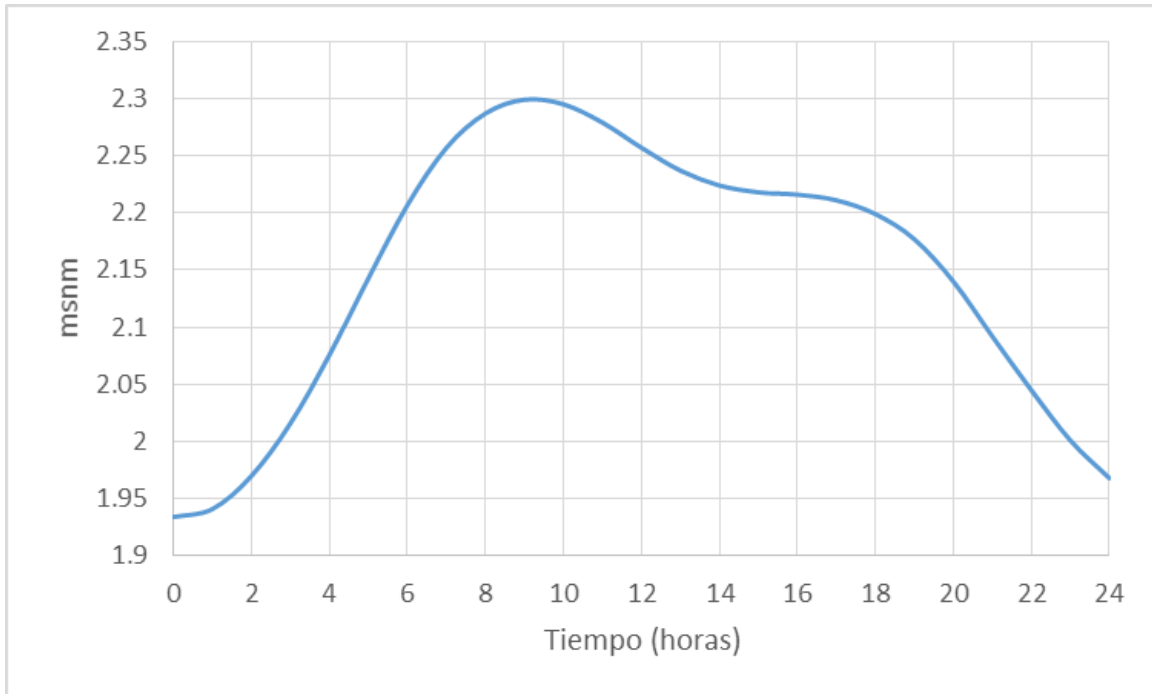


Figura 2-27 Gráfica Marea de Tormenta calculada



Caudales

Las mediciones realizadas en los ríos “Acula” y “Limón” respectivamente permitieron establecer una relación de dichas descargas a la laguna con respecto al río Papaloapan, la relación establecida para ambos es de 4 y 11% de la descarga del río Papaloapan, respectivamente.

Los gastos con los que se realizaron las modelaciones se muestran en la siguiente tabla:

Q (m ³ /s)		
Papaloapan	Limón	Acula
1000	118.29	40.07
2000	236.58	80.15
3000	354.87	120.22
4000	473.16	160.29
5000	591.45	200.36
6000	709.74	240.44
7000	828.03	280.51
8000	946.32	320.58
9000	1064.61	360.65
10000	1182.90	400.73
11000	1301.19	440.80
12000	1419.48	480.87

Tabla 2-7 Gastos de simulación



3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Coefficientes de rugosidad de la fórmula de Manning.

En esta sección se aborda la validación de los modelos matemáticos, y las posibles discrepancias que entre los dos puedan existir, primero se realizó un análisis de sensibilidad de los coeficientes de rugosidad de Manning, de esta manera se llegó a aquél que aproxima mejor los resultados obtenidos en las modelaciones.

La tabla de coeficientes de rugosidad para planicies de inundación (Chow, 1997)

Corrientes naturales				
Planicies de inundación		Mínimo	Normal	Máximo
a. Pastizales, con matorrales				
1. Pasto coro		0.030	0.040	0.050
2. Pasto Alto		0.040	0.050	0.070
b. Áreas cultivadas				
1. Sin cultivo		0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros		0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros		0.030	0.040	0.050
c. Matorrales				
1. Matorrales dispersos, mucha maleza		0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno		0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano		0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno		0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano		0.070	0.100	0.160
d. Árboles				
1. Sauces densos, rectos y en verano		0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños		0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, con una gran cantidad de retoños		0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos,		0.080	0.100	0.120
con poco crecimiento de matorrales,				
nivel de agua por debajo de las ramas				
5. Igual que el anterior pero con nivel de creciente		0.100	0.120	0.160
por encima de las ramas				
D-3 Corrientes mayores (ancho superficial en nivel				
creciente >100 pies). El valor de n es menor				
que el correspondiente a menores con descripción				



similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva			
a. Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025		0.060
b. Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

Tabla 3-1 Coeficientes de rugosidad de Manning (Chow, 1994)

Cuando se trata de corrientes mayores, como se ve en la tabla, si la sección es irregular, los valores para el coeficiente “n” van de un mínimo de 0.035 a un máximo de 0.100.

Calibración y validación

Con la calibración de un modelo se busca ajustar un conjunto de parámetros de entrada al modelo de tal forma que los resultados se ajusten a las mediciones o a los datos experimentales, requiriéndose, por tanto, de una verificación cuantitativa de los resultados. La validación consiste en cuantificar la confiabilidad con la que un modelo es capaz de predecir un proceso determinado (Trucano, et. Al 2006)

En este caso, el parámetro a variar será el coeficiente de rugosidad de Manning “n”; hasta que los resultados de la modelación sean aceptables; en este trabajo se utilizaron como medidas cuantitativas de los resultados, el error de la raíz media cuadrática (RMS) y el error porcentual promedio. El coeficiente de rugosidad a utilizar, por tanto, es aquel que presente el menor RMS y error porcentual entre las simulaciones.

El RMS se define como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Valor\ calculado)_i - (Valor\ medido)_i]^2}{N}} \quad (8)$$

Para la comparación, se utilizaron los caudales medidos en la salida de la laguna, los niveles registrados para la campaña mayo de 2014 y las velocidades medidas.

3.1 Condiciones de frontera de los registros históricos

Las condiciones de frontera fueron, por tanto, los niveles del agua registrados en los puntos “Chucumite” y “Punta de perro”, los cuales corresponden a los sitios de ingreso del río a la laguna, como del canal Laguna-mar, respectivamente. Los niveles que se simularon fueron ligeramente anteriores al primer dato de caudal registrado, pues un parámetro de tiempo importante a tomar en cuenta es el “tiempo de calentamiento”, es decir el tiempo que le tomaría al modelo pasar de las condiciones iniciales asumidas a una condición estacionaria.

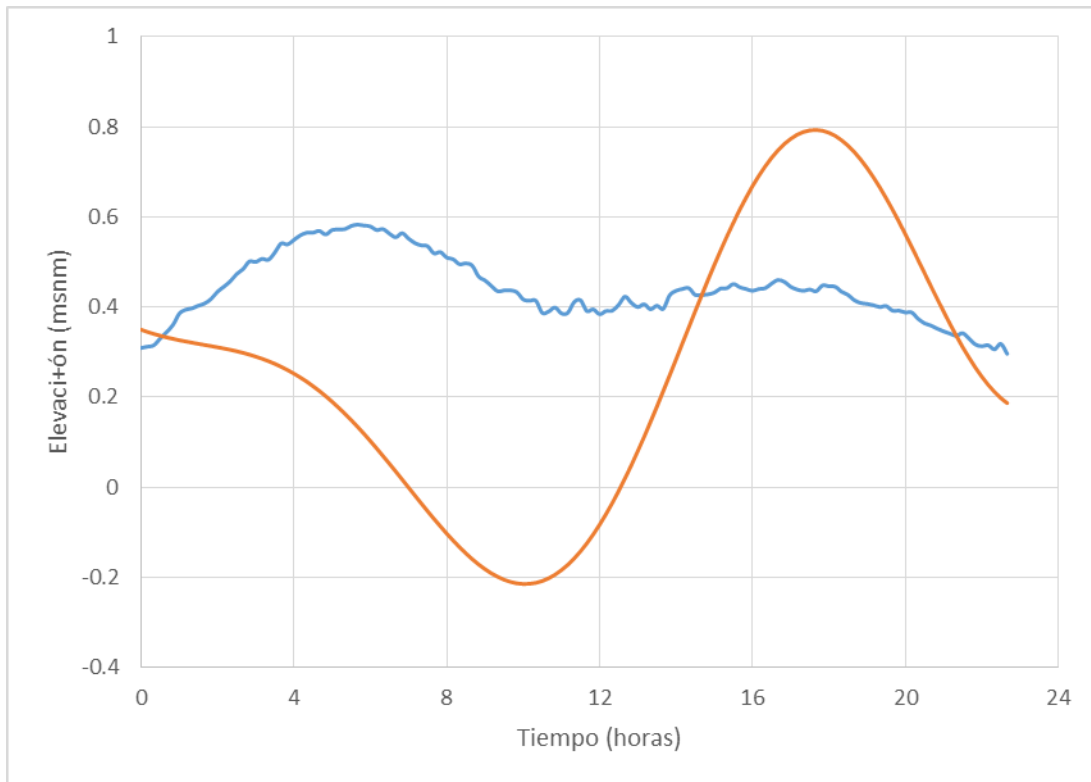


Figura 3-1 Condiciones de Frontera Calibración



3.2 Validación de los modelos: Iber

Los resultados obtenidos del gasto en el modelo Iber se muestran en la figura siguiente:

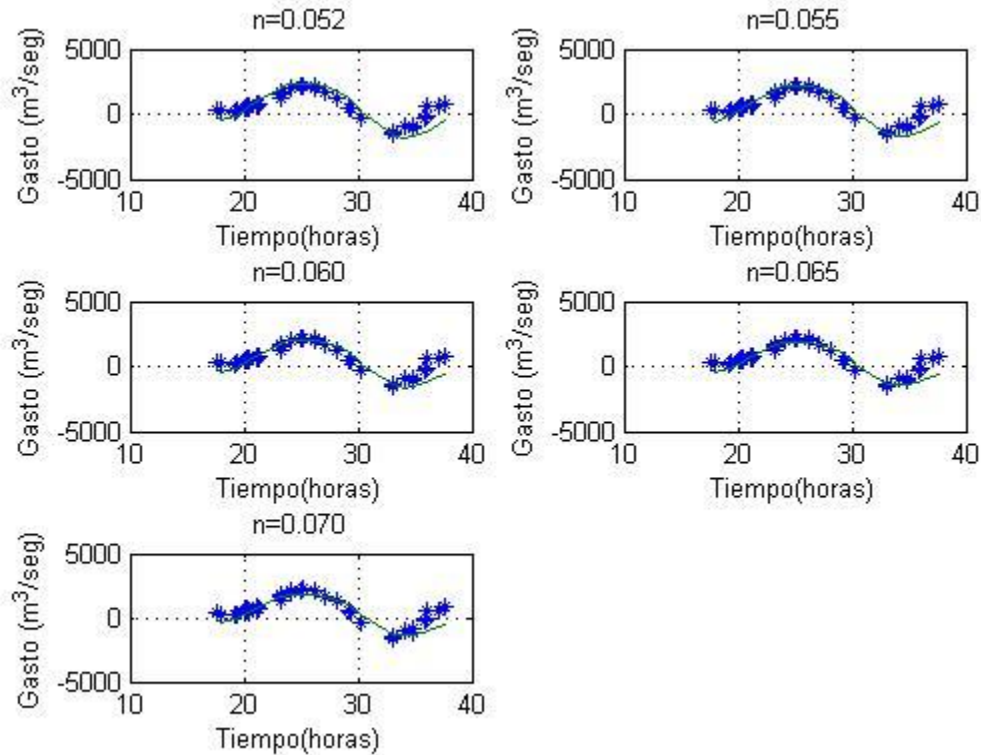


Figura 3-2 Gráficas de hidrograma calculado vs caudales medidos, obtenidos con iber

Para cada una de las simulaciones se obtuvieron los valores de RMS y el error porcentual

n	0.052	0.055	0.06	0.065	0.07
RMS	667.548394	639.311038	603.28291	570.388826	555.06682

Tabla 3-2 Error de la raíz media cuadrática, modelo Iber

Errores Porcentuales promedio				
0.052	0.055	0.06	0.065	0.07
5.05225791	4.88497214	4.96416014	8.25153413	6.30700171

Tabla 3-3 Error porcentual promedio, modelo Iber



Flubidi

Los hidrogramas obtenidos en el modelo, comparados con el caudal medido; así como los valores calculados para el RMS y el error porcentual correspondiente, son los siguientes:

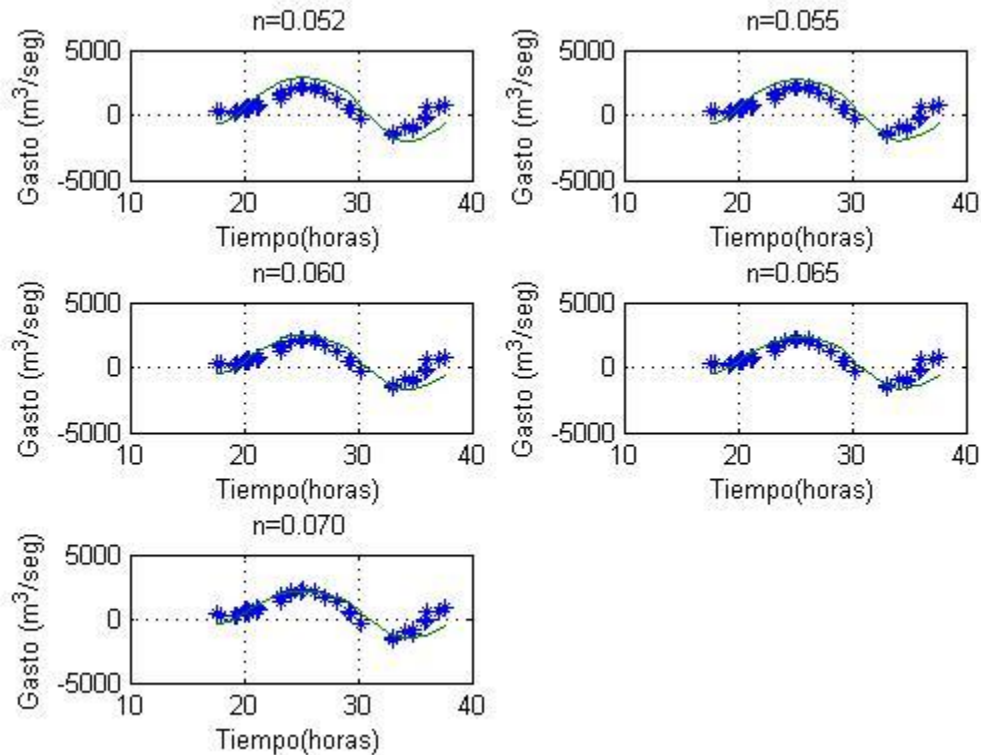


Figura 3-3 Gráficas de hidrograma calculado vs caudales medidos, obtenidos con Flubidi

n	0.052	0.055	0.06	0.065	0.07
RMS	942.291595	877.103317	737.653224	685.389638	644.305972

Tabla 3-4 Error de la raíz media cuadrática, modelo Flubidi

Errores Porcentuales promedio				
0.052	0.055	0.06	0.065	0.07
15.1671033	12.9502779	9.40241493	5.43352159	3.31826533

Tabla 3-5 Error porcentual promedio, modelo Flubidi

Comparación de resultados para $n=0.055$

Se compararon los resultados obtenidos con ambos modelos cuando el coeficiente de rugosidad es 0.055, para conocer en donde se encuentra la diferencia, para esto se graficaron los tirantes obtenidos con ambos modelos, así como las velocidades obtenidas en las mismas secciones y se eligieron los resultados para 7,200, 10,800 y 21,600 segundos de simulación.

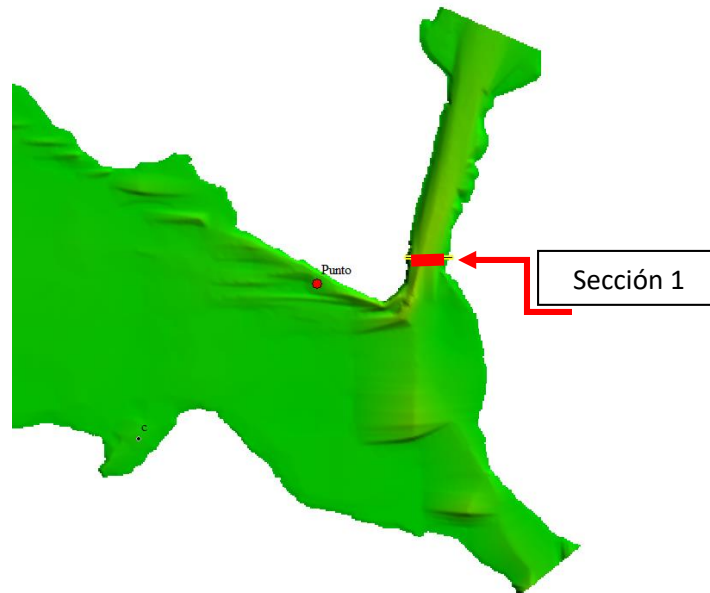


Figura 3-4 Sección 1 Tirante

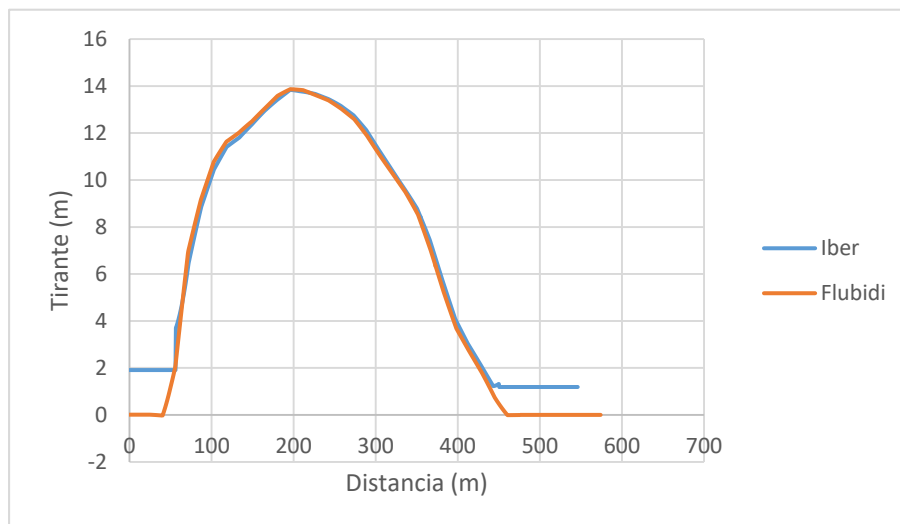


Figura 3-5 Comparación de tirantes, sección 1, 7,200 segundos

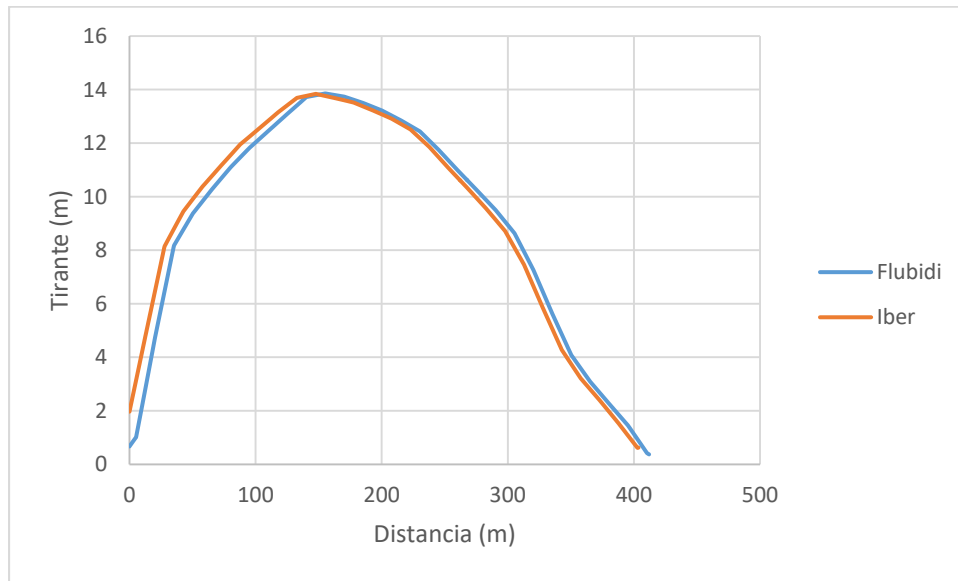


Figura 3-6 Comparación de tirantes, sección 1, 10,800 segundos

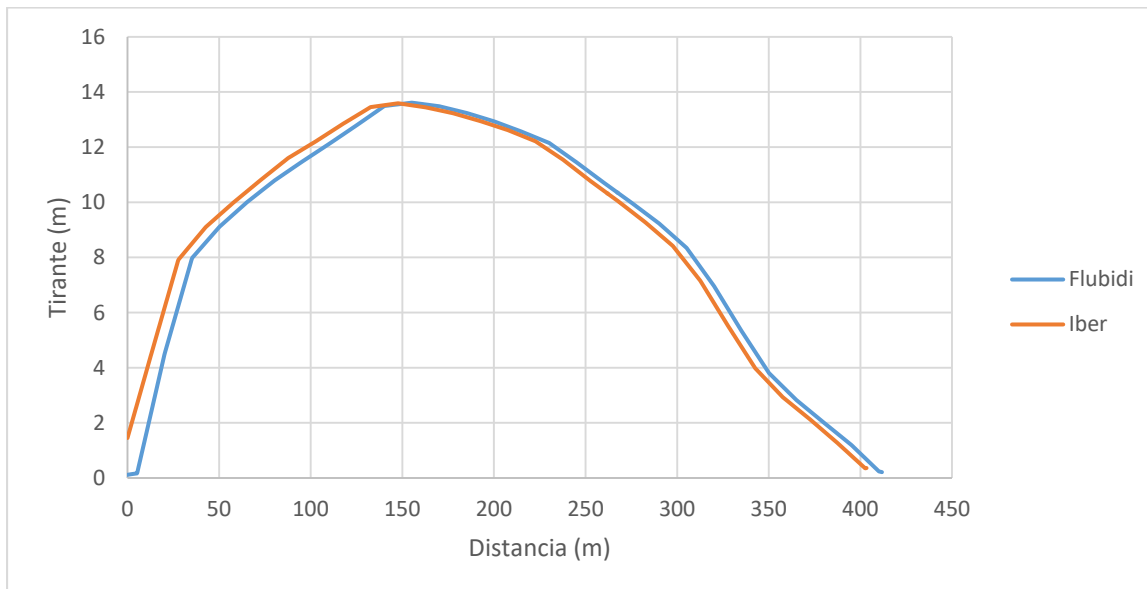


Figura 3-7 Comparación de tirantes, sección 1, 21,600 segundos

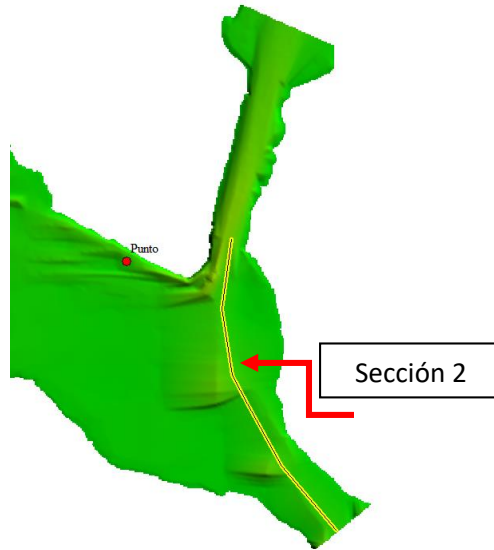


Figura 3-8 Sección 2 Tirante

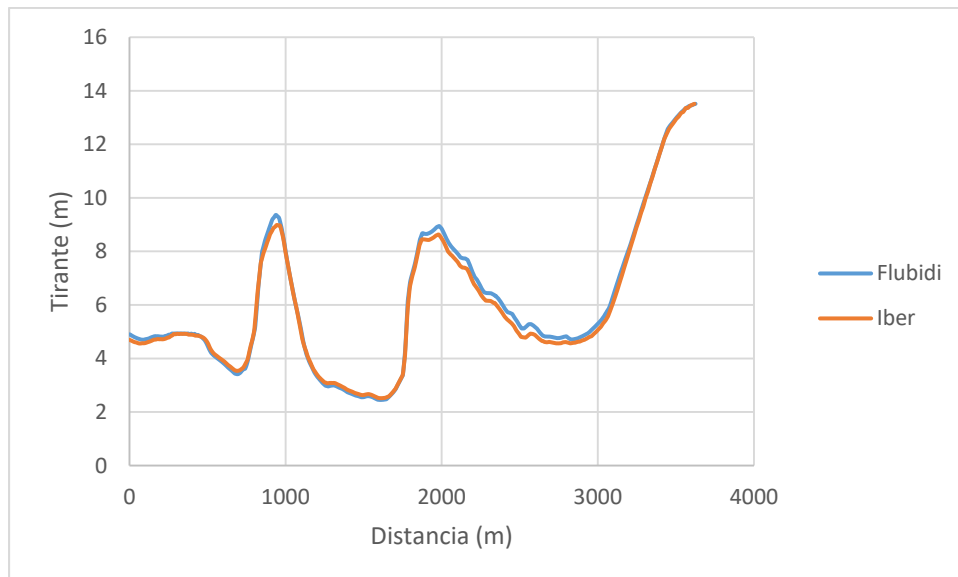


Figura 3-9 Comparación de tirantes Sección 2. 7,200 segundos

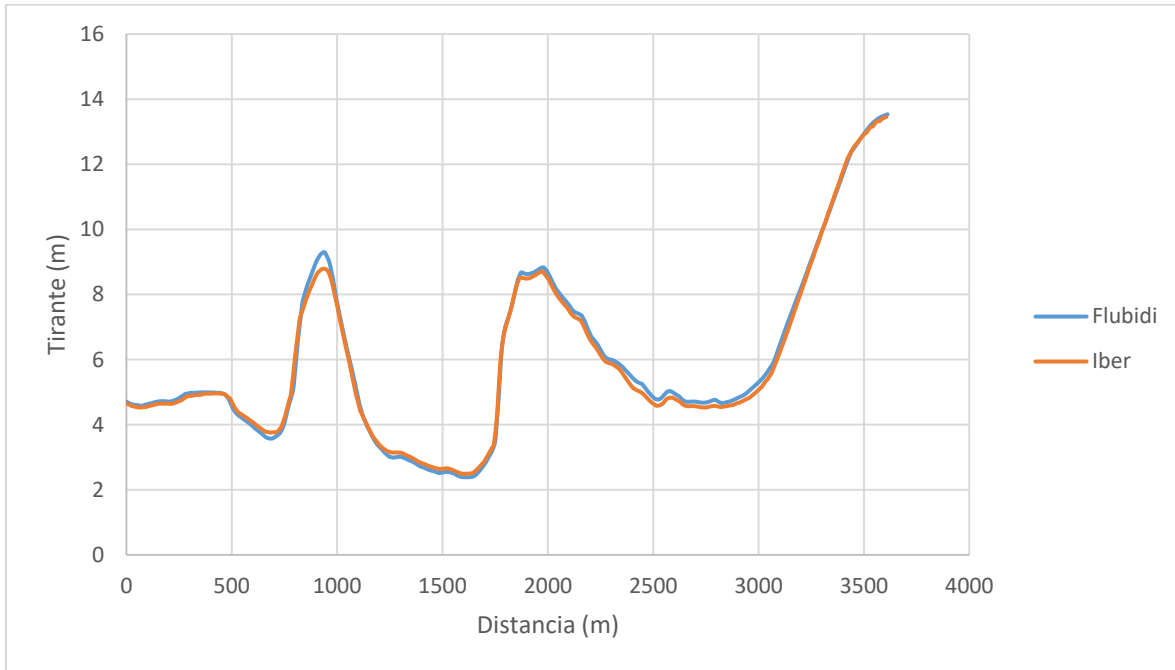


Figura 3-10 Comparación de tirantes Sección 2. 10,800 segundos

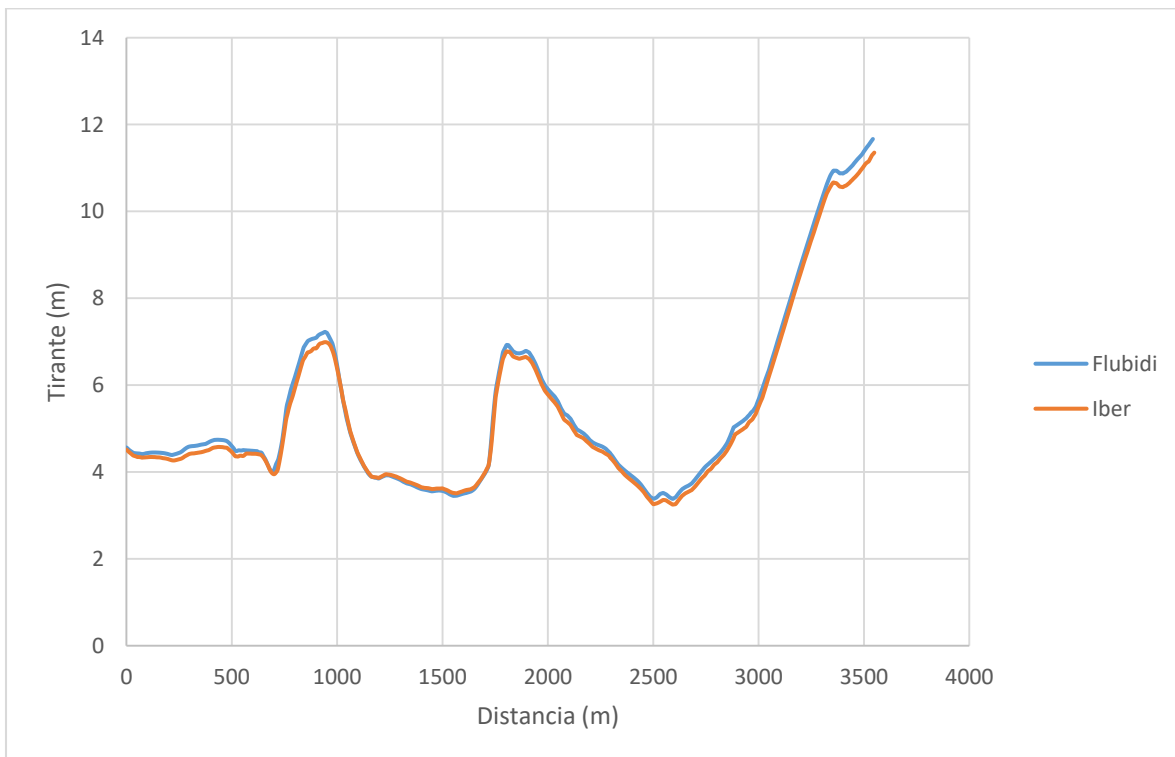


Figura 3-11 Comparación de tirantes Sección 2. 21,600 segundos

Comparación de velocidades calculadas

El análisis de los tirantes de las diferentes secciones e instantes de la modelación demostró que la diferencia no es significativa, relativamente hablando para que los gastos reportados sean sensiblemente distintos; por lo que se realizó la comparación de las velocidades en una sección, los instantes de la simulación escogidos para dicho análisis son los correspondientes a los 10,800 y 21,600 segundos:

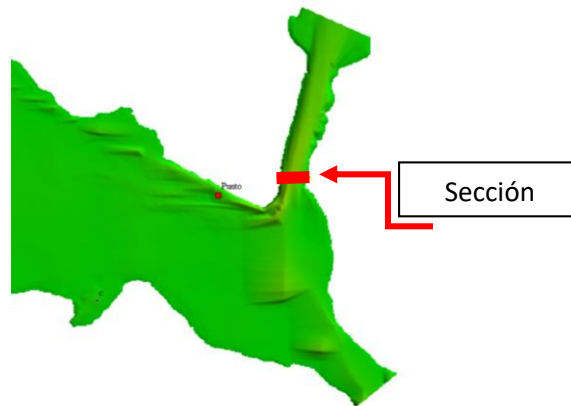


Figura 3-12 Sección donde se determinó velocidad

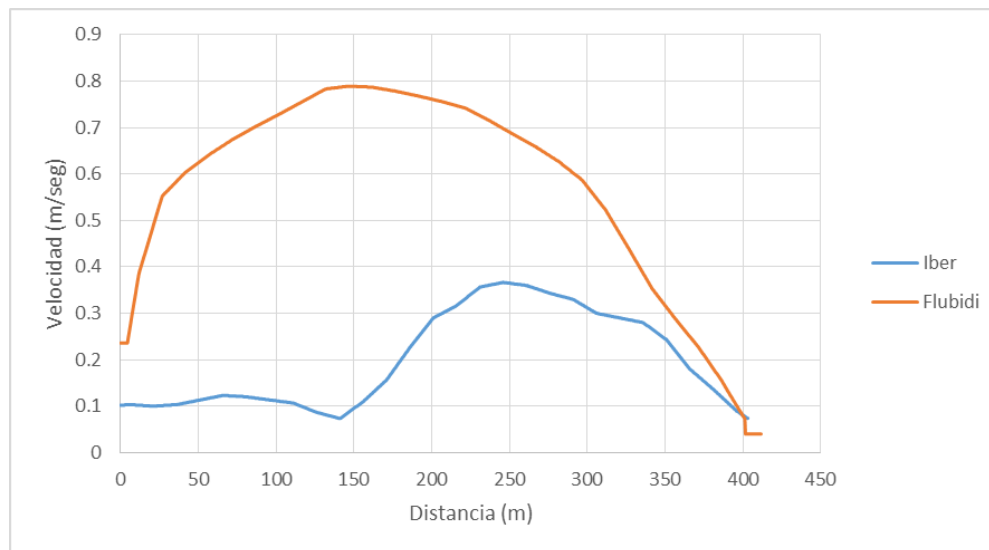


Figura 3-13 Comparación de velocidades, 10,800 segundos

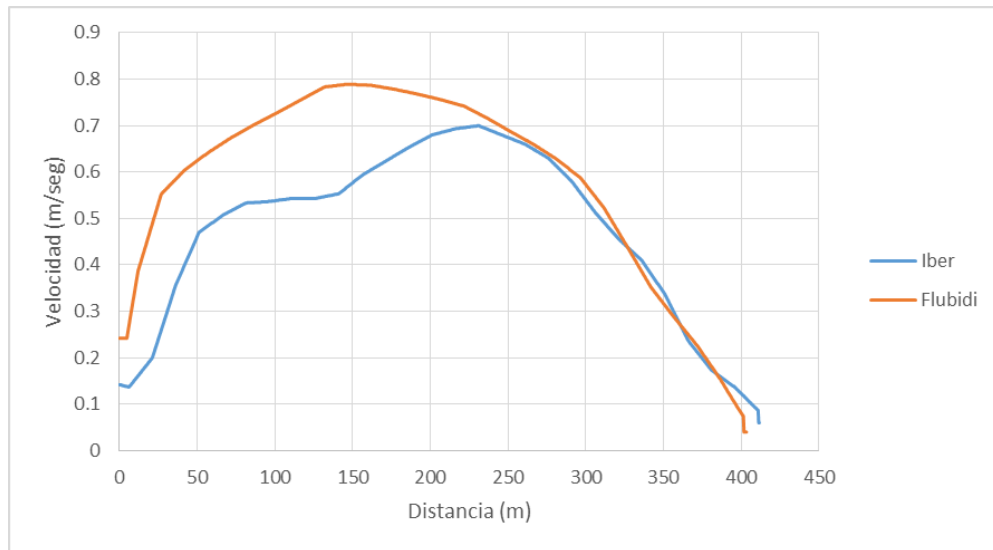


Figura 3-14 Comparación de velocidades, 21,600 segundos

Comparación de velocidades medidas contra calculadas

Con el fin de conocer las velocidades que se obtienen con el modelo, se compararon con las velocidades medidas.

El objetivo de dicha comparación es asegurar que los modelos no reportan velocidades mucho más altas o mucho más bajas de las medidas. Por lo tanto se esperaba que las velocidades calculadas con los modelos estuviesen cercanas a las medidas.

Los resultados se muestran en las gráficas siguientes:

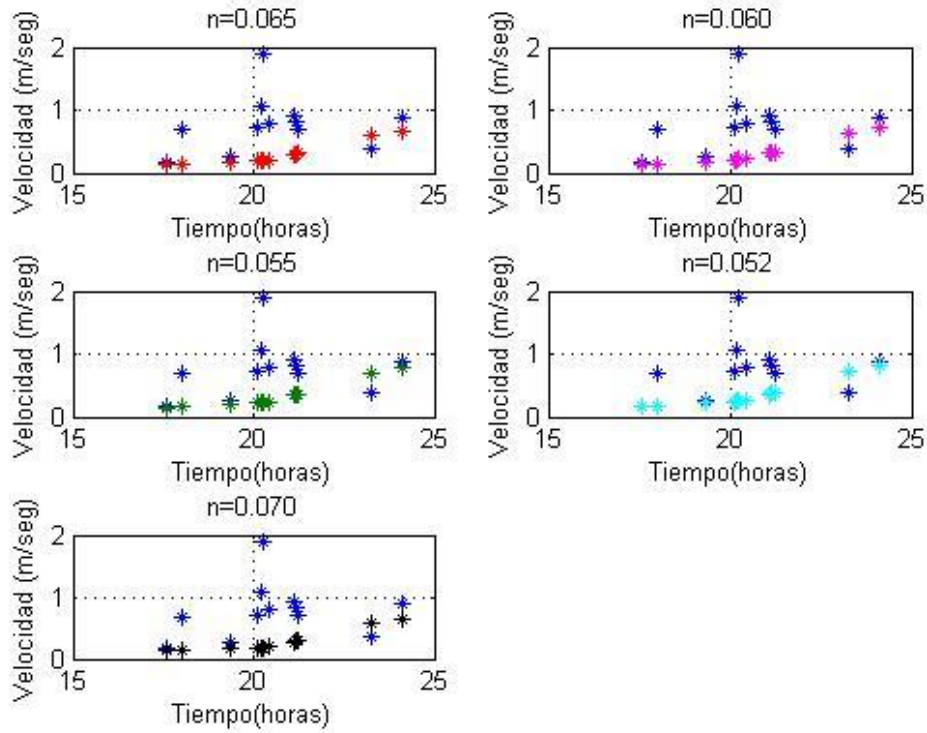


Figura 3-15 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad superficial

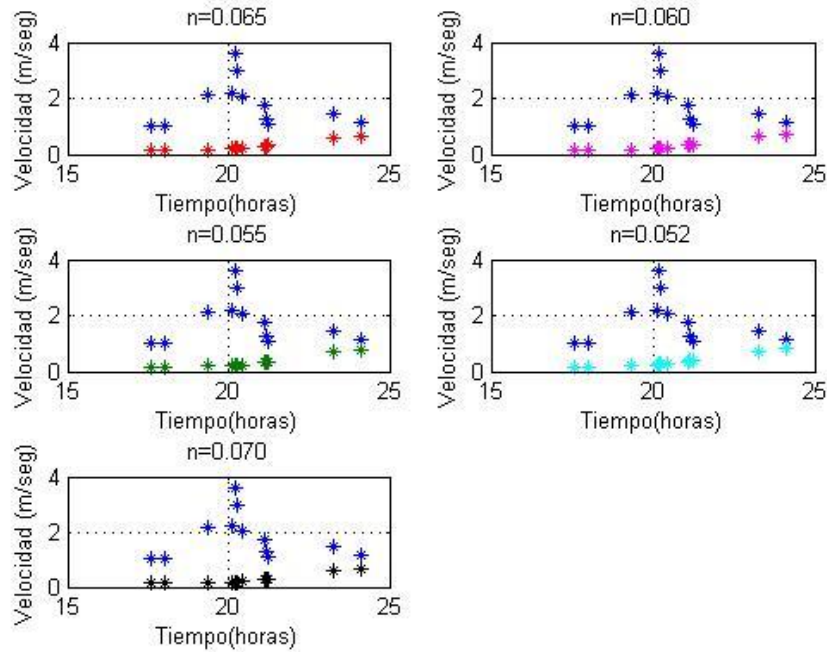


Figura 3-16 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad máxima

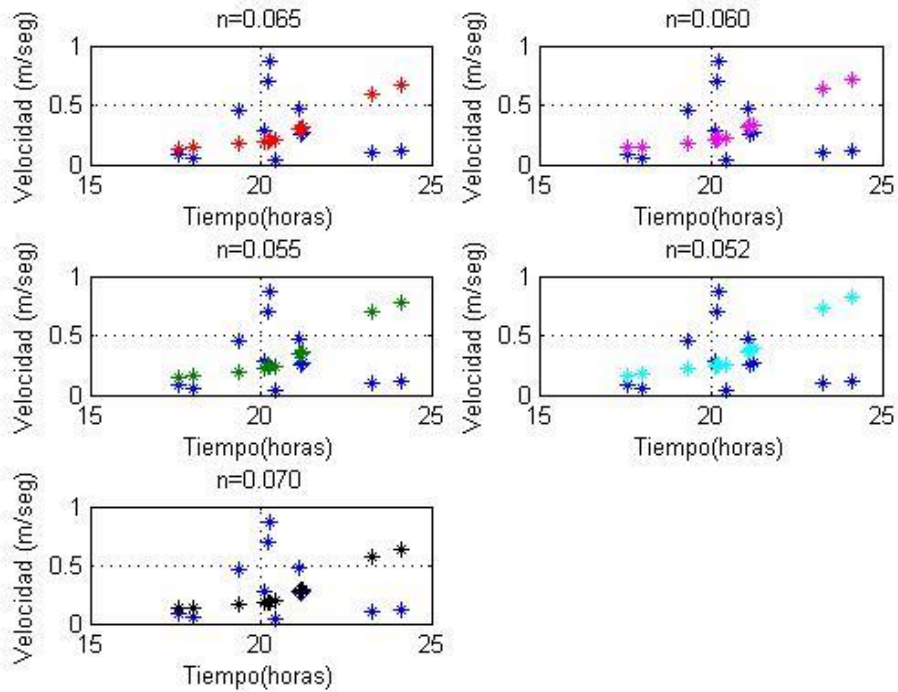


Figura 3-17 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Flubidi vs medida, para la velocidad de fondo

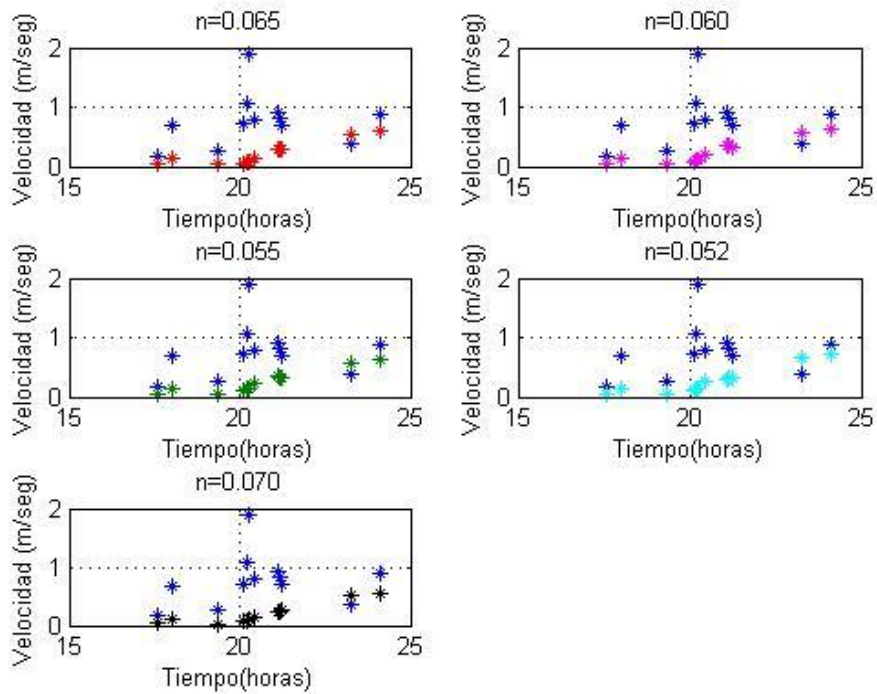


Figura 3-18 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Iber vs medida, para la velocidad superficial

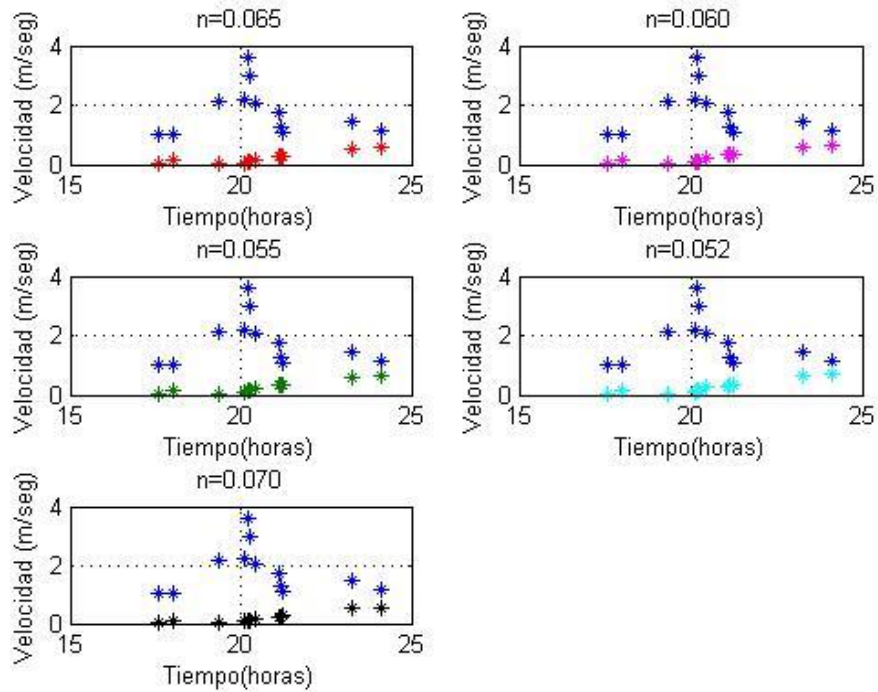


Figura 3-19 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Iber vs medida, para la velocidad máxima

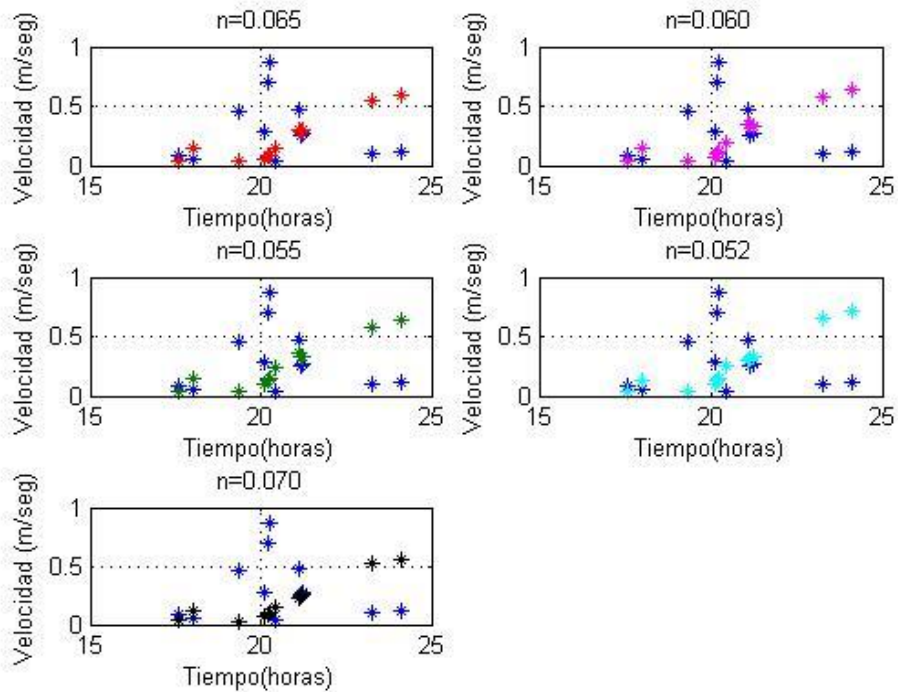


Figura 3-20 Gráficas velocidad calculadas con el modelo Iber vs medida, para la velocidad de fondo



Los caudales registrados se encuentran en la gráfica (puntos azules) mientras que los calculados son las líneas verdes. El menor RMS de entre los dos modelos, se obtuvo de los resultados con Iber, siendo de $555 \text{ m}^3/\text{s}$; con Flubidi el menor RMS fue de $644 \text{ m}^3/\text{s}$. El error porcentual menor para Iber fue cercano al 4.8 % mientras que Flubidi 3 %. Si la elección del coeficiente de rugosidad se hiciera tan solo tomando en cuenta el menor RMS, en ambos modelos se tendría que utilizar $n=0.070$; sin embargo, gráficamente se muestra que en uno y otro modelo hay diferencias en cuanto a la representación que realizan principalmente en el gasto máximo, para Iber el coeficiente que mejor reproduce dicho caudal es el de 0.055, mientras Flubidi lo hace con $n=0.070$, como lo muestra la gráfica siguiente:

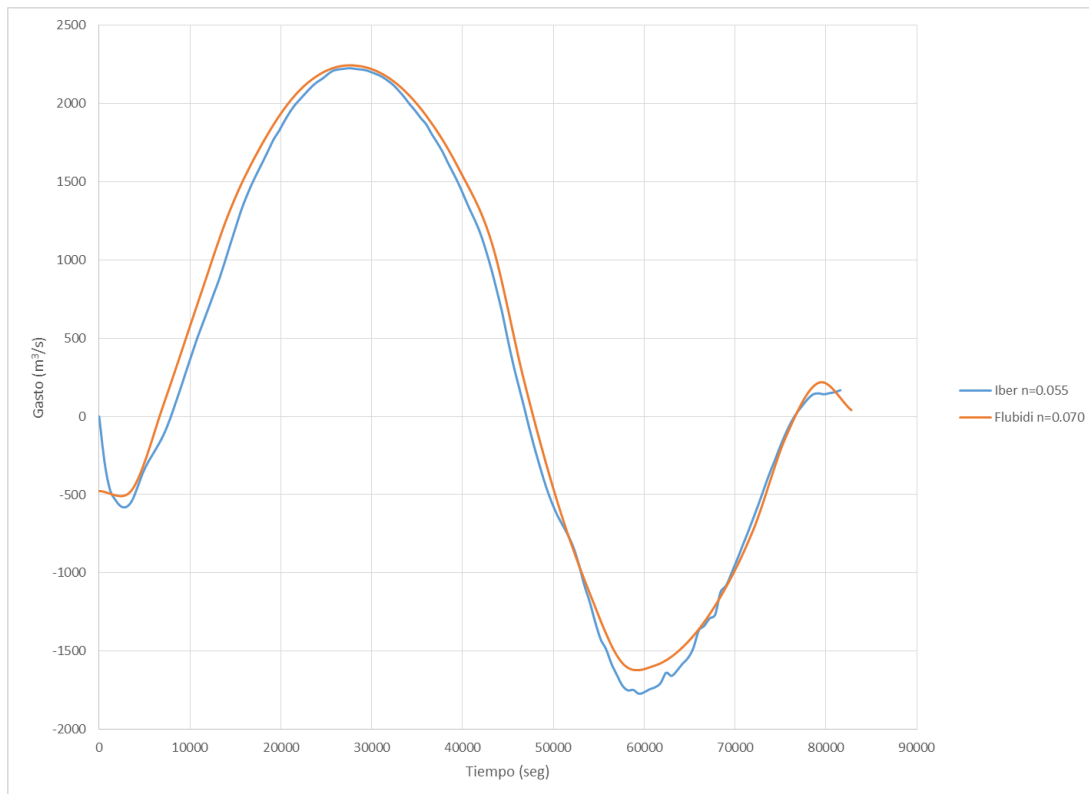


Figura 3-21 Gráfica Comparación de hidrogramas

Niveles

Para saber si los modelos reproducen de manera satisfactoria el movimiento de la masa de agua al interior de la laguna, se compararon los niveles registrados por los sensores con los calculados con cada uno de los modelos, dicha comparación de los niveles, se realizó con los registrados y los calculados en cada modelo con el coeficiente de rugosidad con que mejor se ajustó el gasto a la salida:

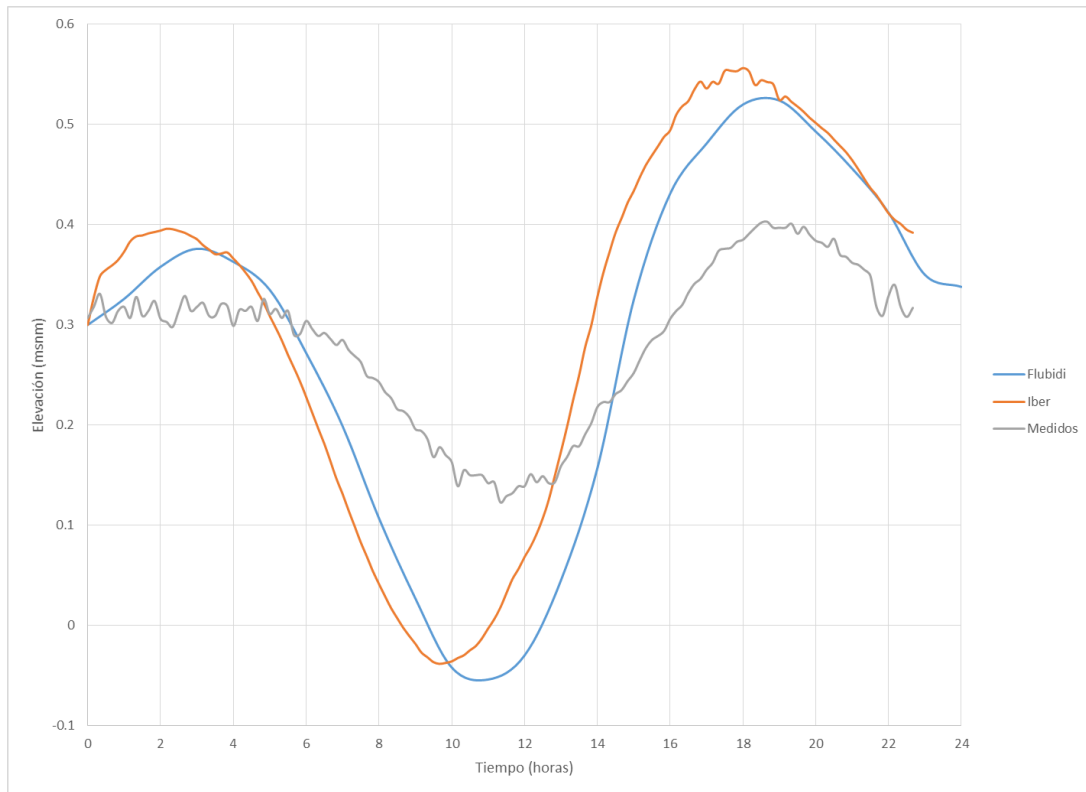


Figura 3-22 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Muelle”

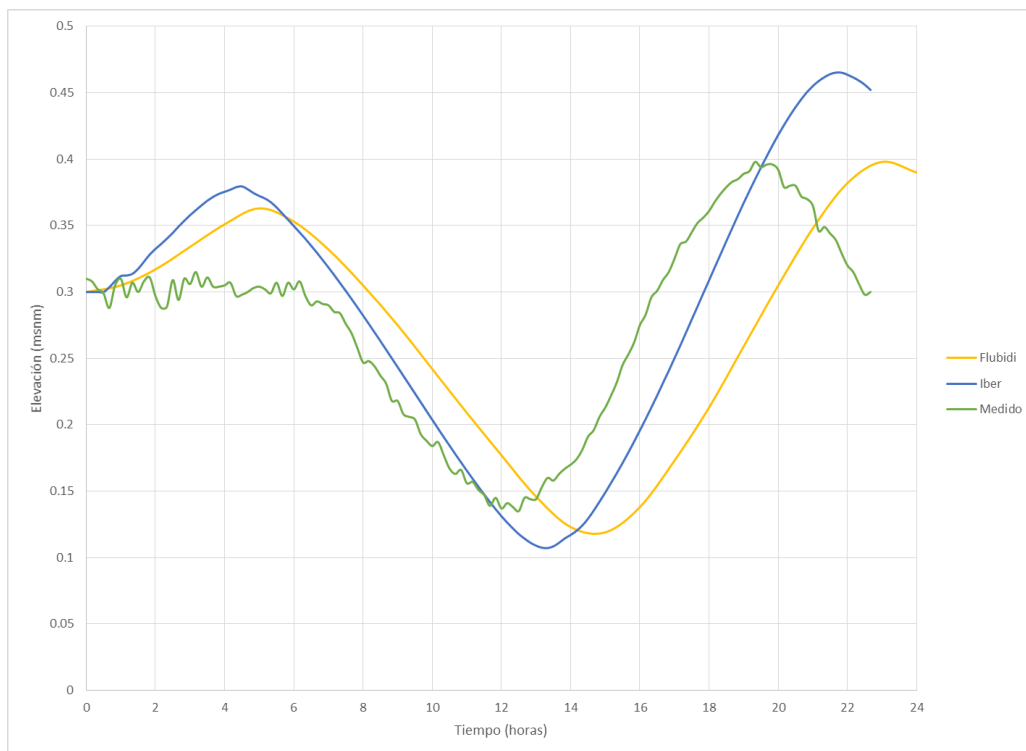


Figura 3-23 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Río de los Remedios”

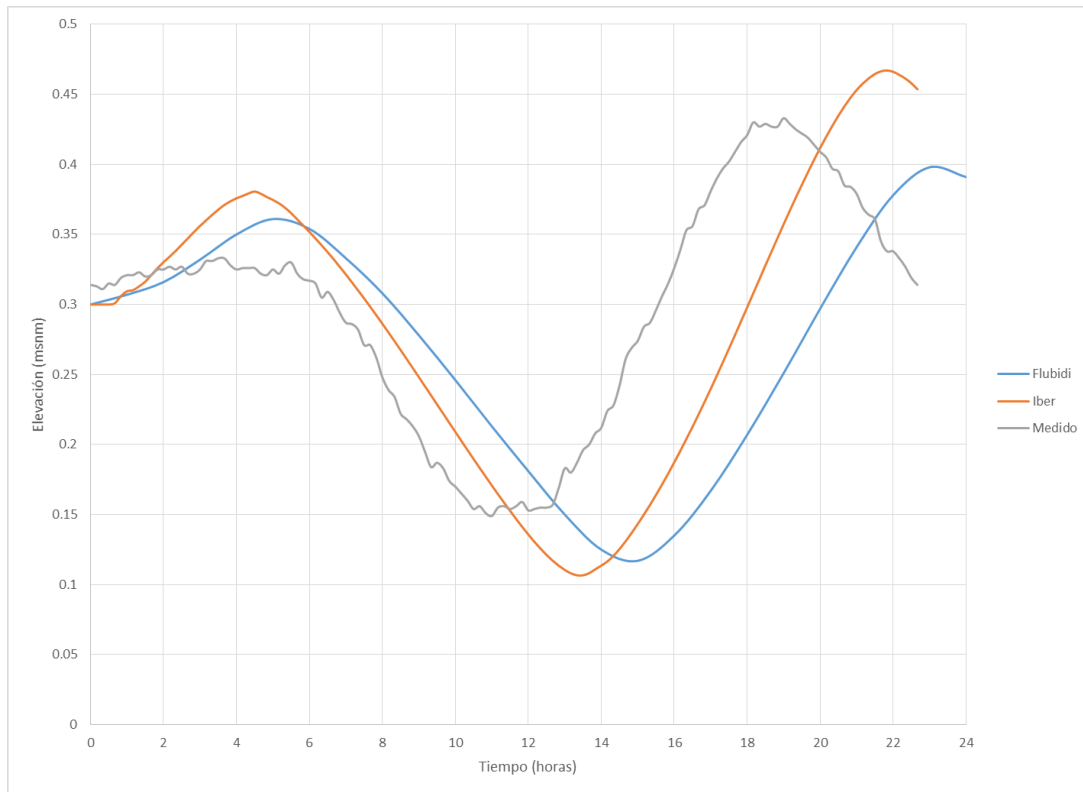


Figura 3-24 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Costa de San Juan”

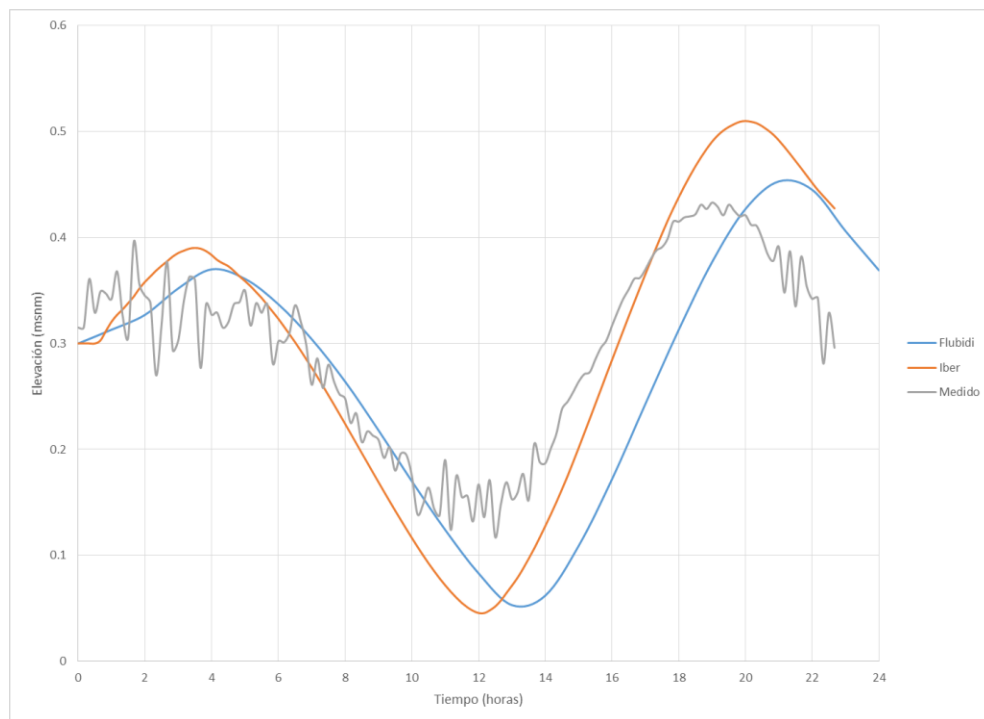


Figura 3-25 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Arbolillo”

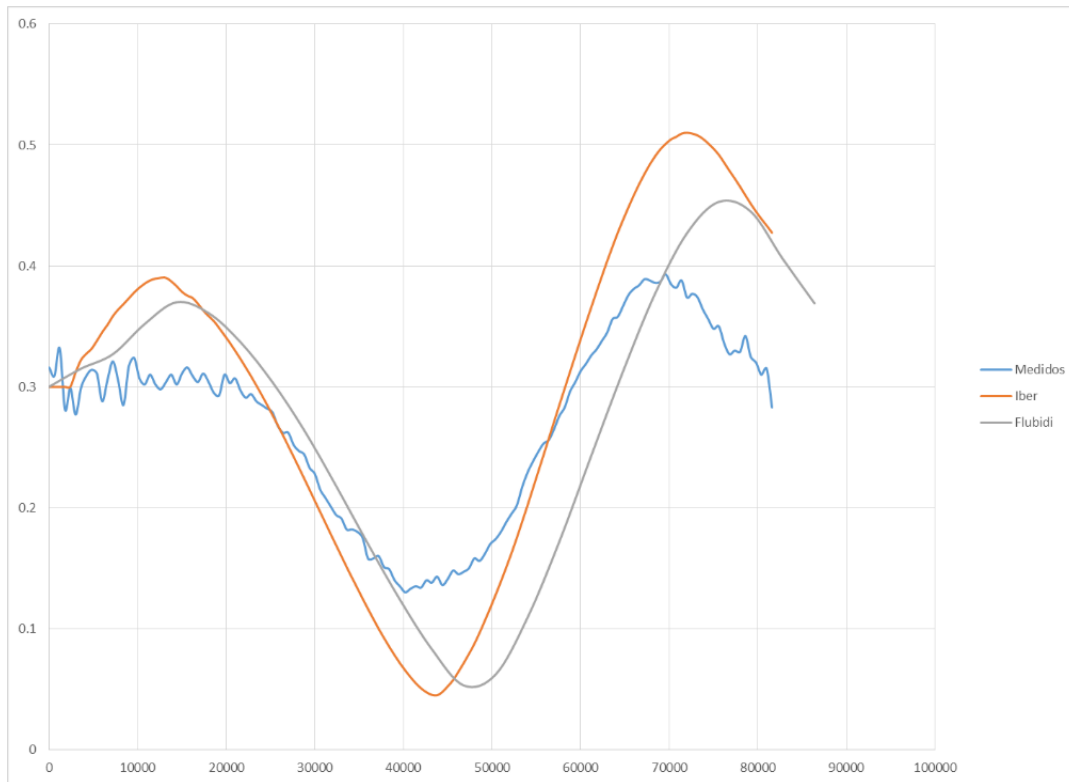


Figura 3-26 Gráficas niveles Registrados vs calculados, “Playas”

En conclusión el coeficiente de rugosidad de Manning que mejor reproduce los gastos registrados a la salida es 0.055 para el modelo Iber y 0.070 para Flubidi.

4. MODELACIÓN DE PRONÓSTICOS

En el apartado “Registros pronosticados” se hizo mención de los niveles de marea que se utilizaron en el presente trabajo; así como de los gastos y las hipótesis utilizadas como argumento de la utilización de dichos caudales. De tal manera que las modelaciones se realizarán de la manera siguiente: Para cada condición de marea se utilizarán los caudales que van de 1,000 a 12,000 m³/s para el río Papaloapan y los correspondientes caudales en los ríos Limón y Acula. Se buscará determinar los gastos máximos de descarga para cada condición de marea y finalmente se analizarán los resultados.

4.1 Resultados Marea Viva

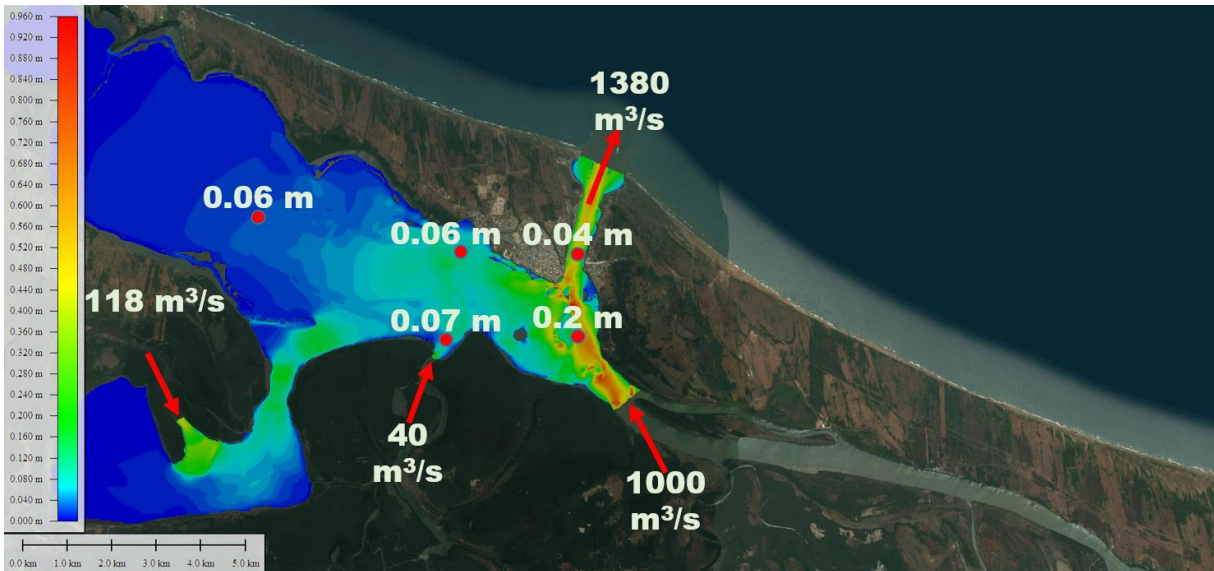


Figura 4-1 Resultados Marea viva Q_{ent}=1,158 m³/s

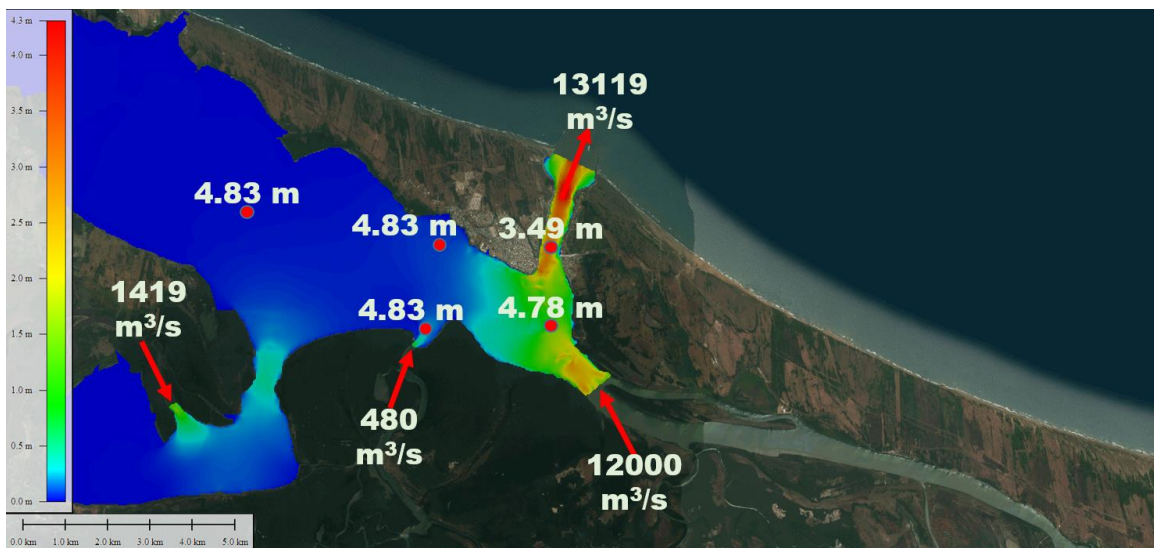


Figura 4-2 Resultados Marea viva Q_{ent}=13,900 m³/s

4.2 Resultados Marea Muerta

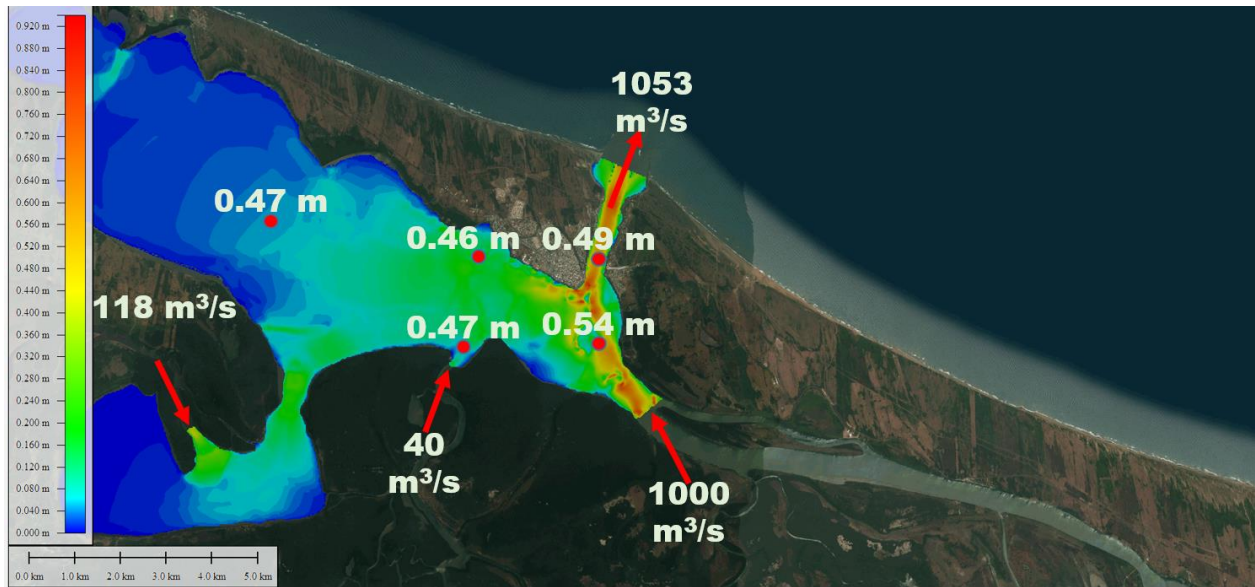


Figura 4-3 Resultados Marea muerta $Q_{ent}=1,158 \text{ m}^3/\text{s}$

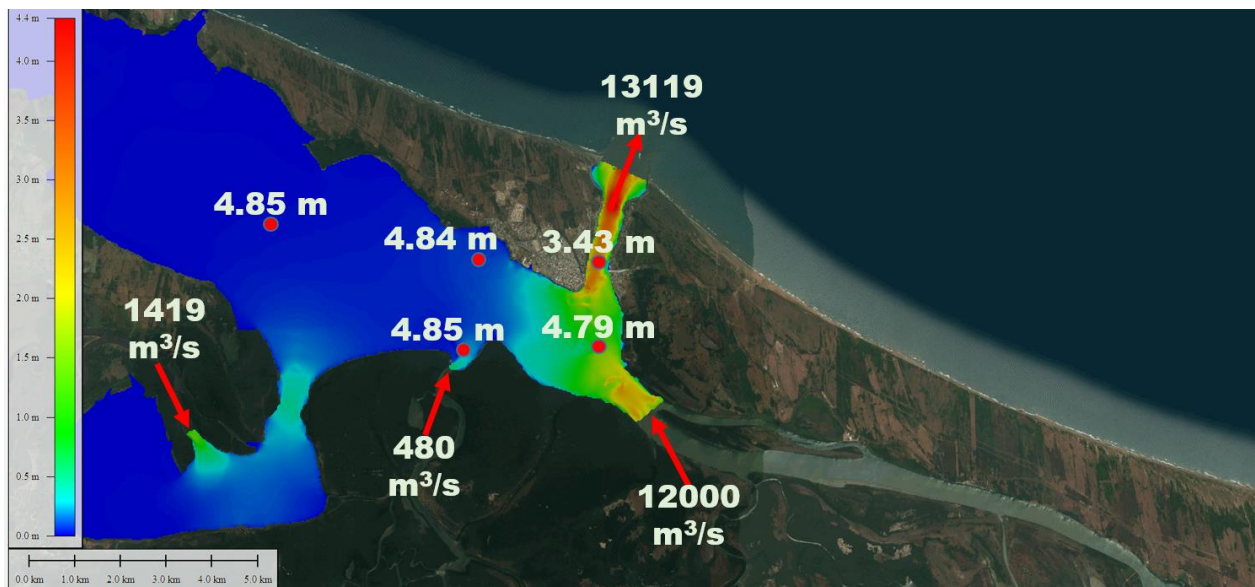


Figura 4-4 Resultados Marea muerta $Q_{ent}=13,900 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3 Resultados Marea de Tormenta

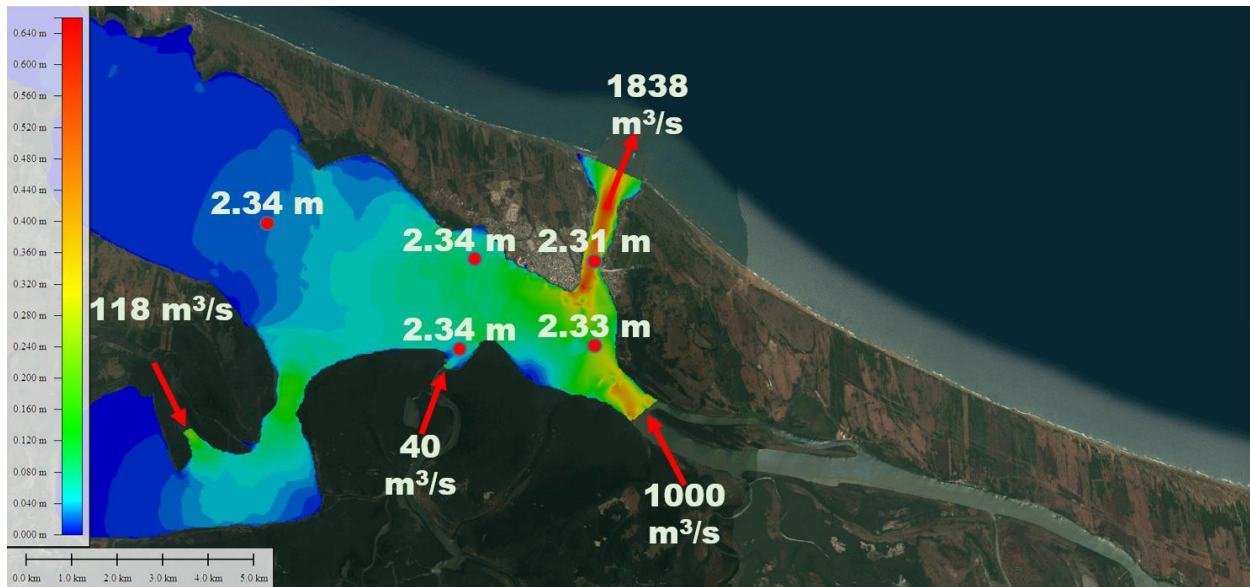


Figura 4-5 Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 1,158 \text{ m}^3/\text{s}$

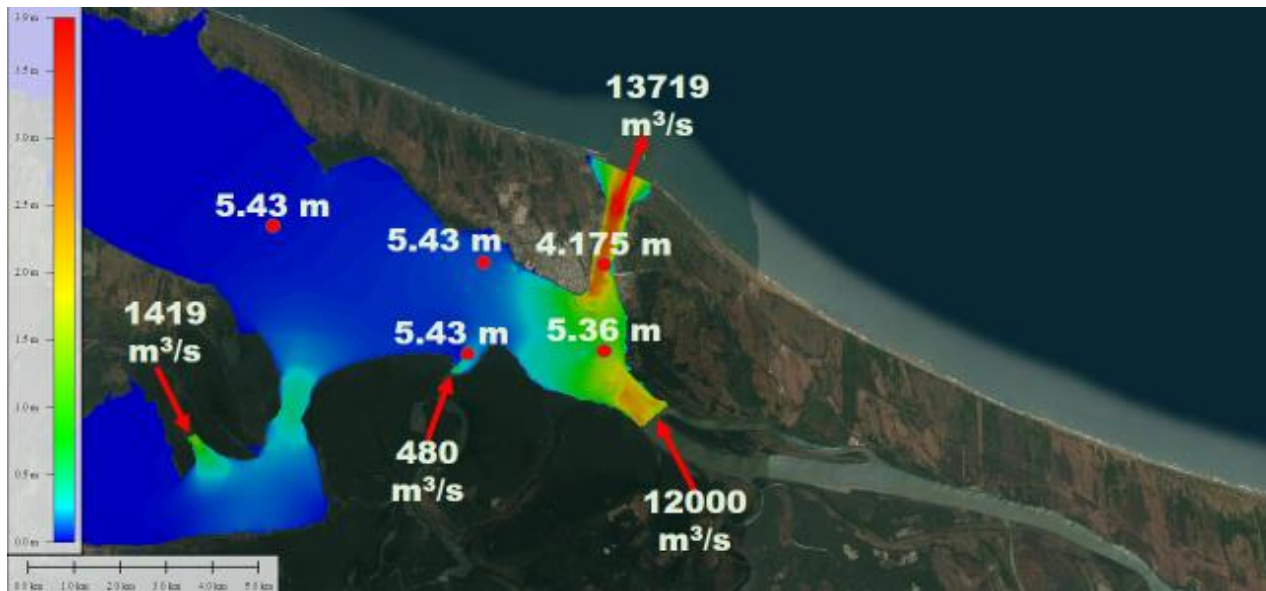


Figura 4-6 Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 13,900 \text{ m}^3/\text{s}$



4.4 Análisis de resultados

En este apartado se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el apartado anterior; para esto se llevaron los resultados de los gastos máximos de descarga y elevaciones en la laguna a gráficas Elevación – Gasto de cada una de las condiciones.

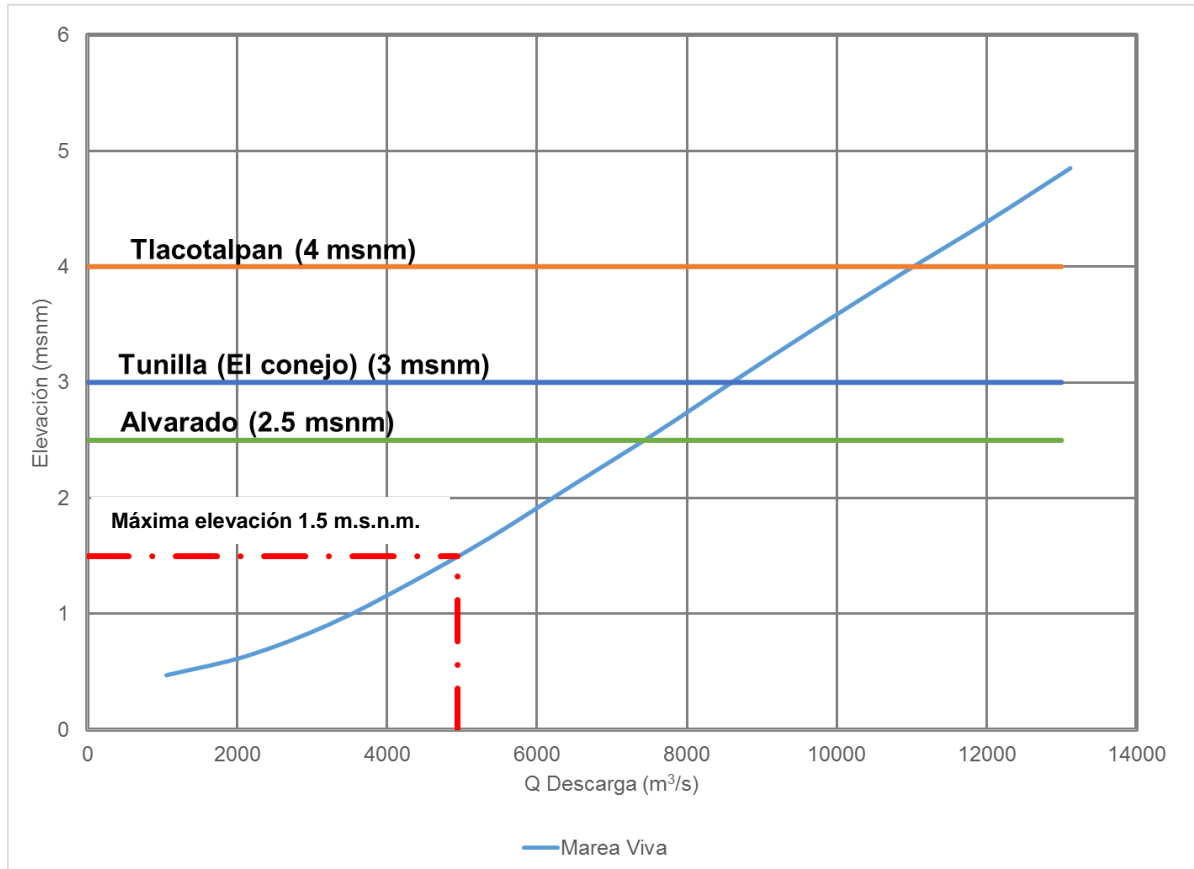


Figura 4-7 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea viva

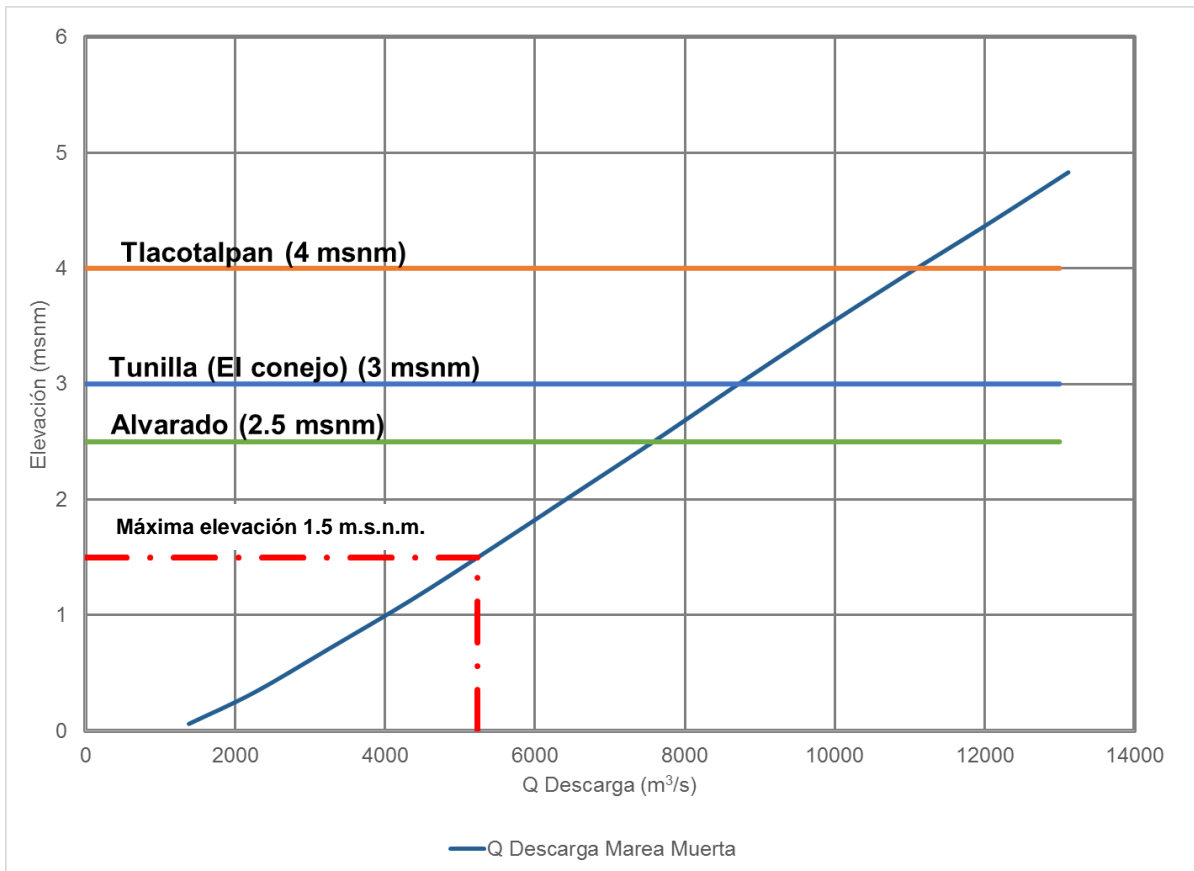


Figura 4-8 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea muerta

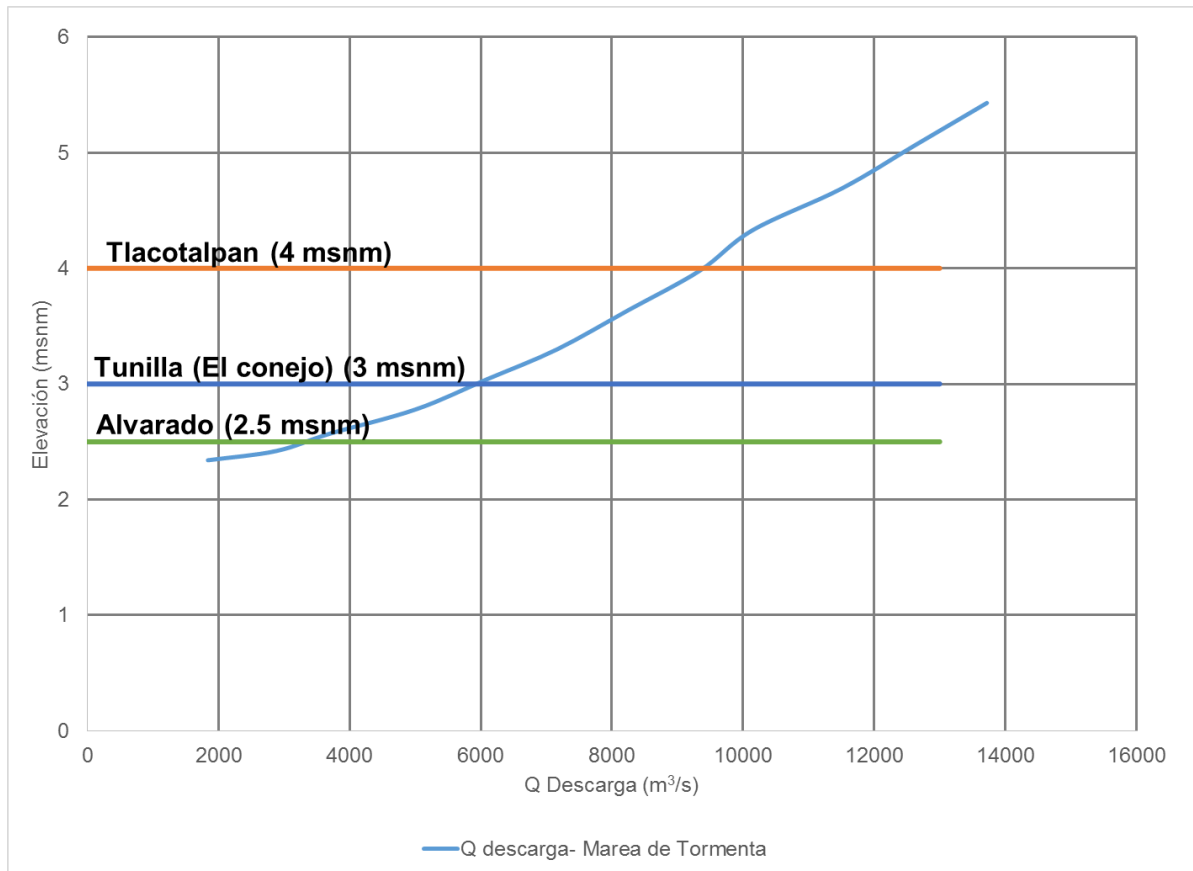


Figura 4-9 Gráfica Elevaciones-Gasto de descarga Marea de tormenta

De las gráficas anteriores, el gasto máximo de descarga cuando la condición del mar corresponde a marea viva, es de 4,940 m³/s; en el caso de marea muerta 5,232 m³/s, asociadas a una elevación de la superficie libre máxima de 1.5 m.s.n.m.; si se conserva dicha elevación como máxima en el caso de la marea de tormenta, se puede ver que la elevación mínima de la superficie libre del agua para dicha condición es superior a los 2 m.s.n.m., de tal manera que en ese caso existe una probabilidad alta de que se desborde el río aguas arriba de la laguna.

Si los resultados anteriores se llevan a gráficas que asocien el gasto de descarga, con el desnivel existente en el canal de comunicación, es decir, el desnivel de la superficie libre del agua entre el punto donde descarga el río Papaloapan a la laguna y en la salida de la misma al mar (Figuras 4.4.4 a 4.4.6); se observa que el menor desnivel ocurre cuando se tiene la marea de tormenta como condición de salida del modelo; teniendo un desnivel máximo para dicha condición de 1.2 m entre ambos puntos, mientras que para marea viva y muerta el máximo desnivel se encuentra cercano a 1.4 m.

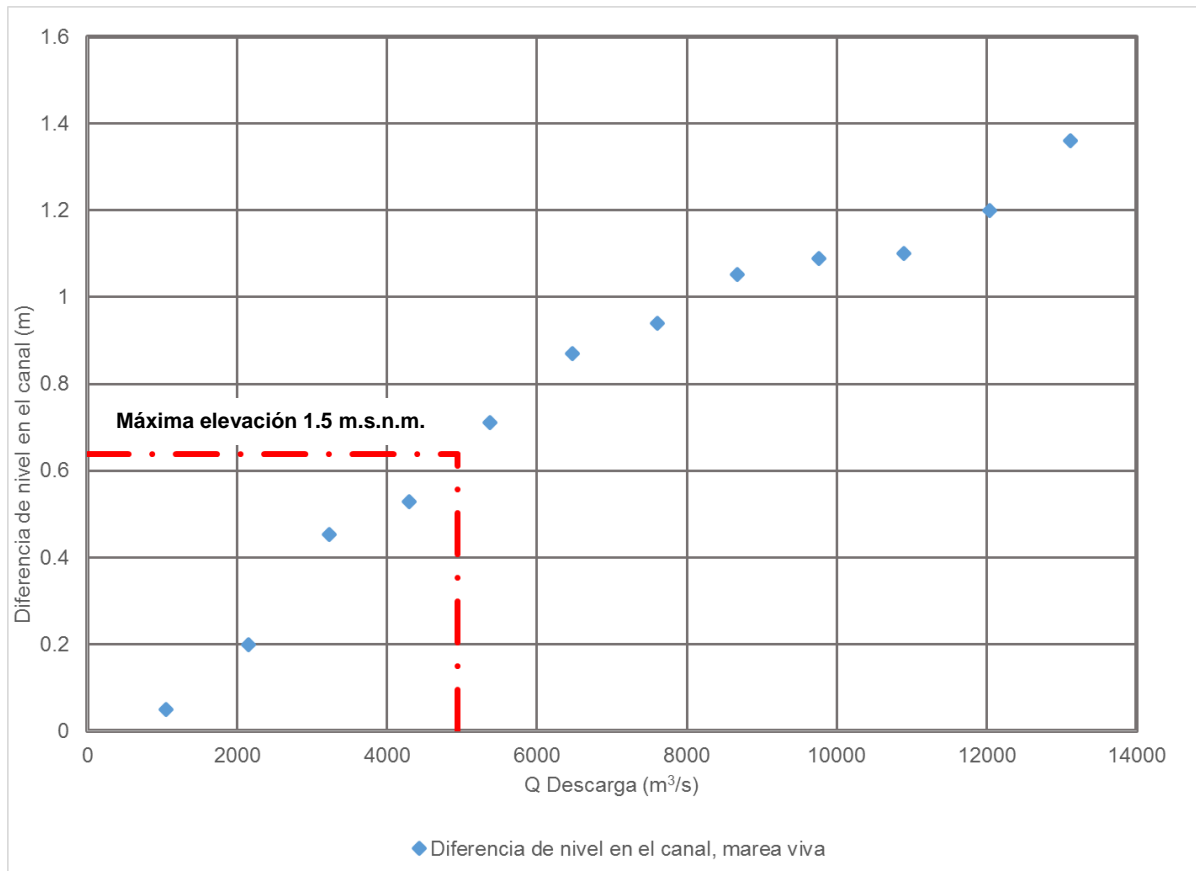


Figura 4-10 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea viva

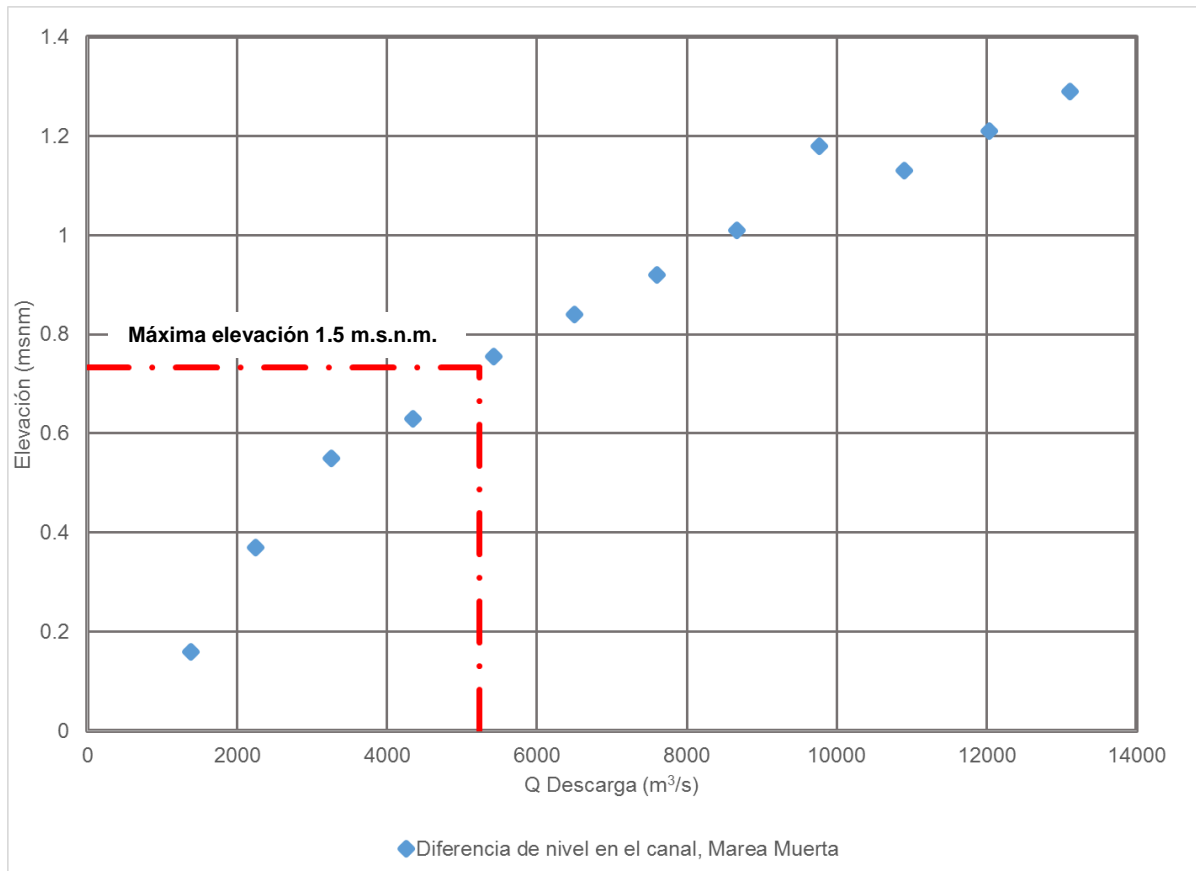


Figura 4-11 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea muerta

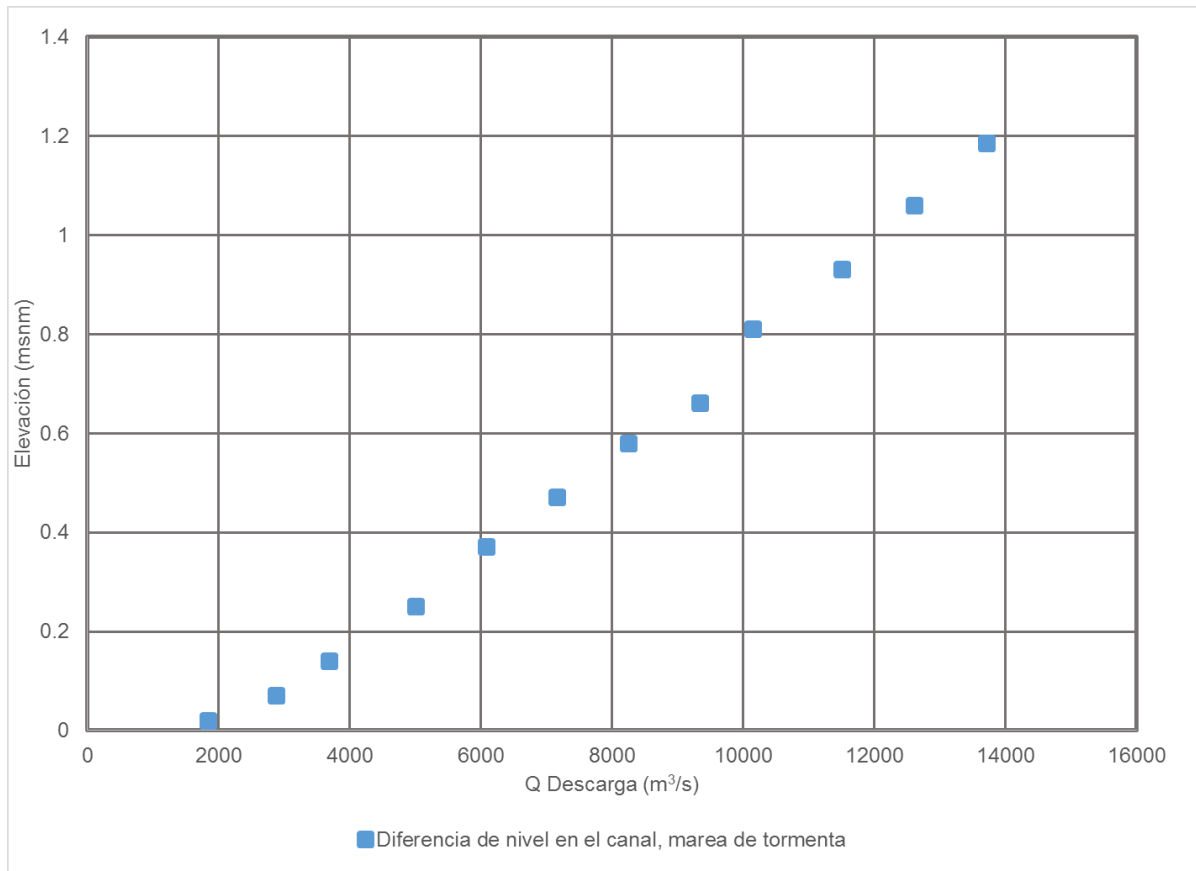


Figura 4-12 Gráfica Desnivel en el canal - Gasto de descarga Marea de tormenta



5. CONCLUSIONES

Los gastos de descarga de los ríos a la Laguna de Alvarado fueron para la condición de flujo permanente, ya que corresponde a lo observado durante el evento del año 2010.

Para la elevación de la superficie libre del agua en la Laguna de Alvarado de 1.5 m.s.n.m. (condición de marea viva) el gasto máximo de descarga es de alrededor de los 4,900 m³/s. Para la marea muerta, se obtuvo un caudal máximo de salida de aproximadamente de 5,200 m³/s.

Considerar como elevación máxima de la superficie libre del agua en la laguna a 1.5 m.s.n.m., se debe a que para esta elevación, el remanso hacia aguas arriba de los ríos, incrementa la elevación del espejo del agua, y alcanza un valor cercano al de desbordamiento del río Papaloapan en la ciudad de Tlacotalpan; además de que, las viviendas en la cercanía de la laguna, del municipio de Alvarado, se ubican a poco más de 1.5m de elevación.

Para un evento ciclónico de las características de “Karl” o mayores, el nivel de la superficie libre del agua en la salida al mar, se elevaría por marea de tormenta alrededor de 2 metros hasta que el ciclón haya pasado (de 6 horas a 3 días). Posteriormente, el nivel del mar vuelve o poca a poco variar de acuerdo con la marea astronómica.

Se obtuvieron curvas elevación – gasto para diferentes condiciones en la desembocadura del río Papaloapan a la Laguna de Alvarado, para tomarla en cuenta en estudios de inundaciones de la zona baja de la cuenca de este río y en la elaboración de mapas de riesgo, así como en la implantación de medidas de mitigación.

Los estudios de la hidrodinámica de la laguna de Alvarado permitirían considerar aspectos como salinidad y calidad del agua.

Se encontró que no existe gran movimiento de la masa de agua de la Laguna de Alvarado conforme se aleja de la zona del canal de comunicación con el mar.

Convendría que ampliar la zona de cálculo cuando se cuente con información detallada para analizar la región de humedales.

Dado que algunos estudio sobre inundaciones ha propuesto abrir un canal en la zona de “El conejo” para descargar al mar antes de su ingreso a la laguna, como lo muestra la figura 5.1



Figura 5-1 Canal Propuesto en “El Conejo”

A manera de ejercicio, se realizaron simulaciones adicionales, ampliando el canal de descarga de la laguna un ancho de 100 metros, para conocer los efectos que tendría en el flujo.

No se encontró una diferencia importante en los resultados, como se aprecia en la tabla siguiente y en las figuras 5.2 y 5.3.

	Condiciones Actuales		Canal Ampliado	
	Q sal	Nivel Laguna	Q sal	Nivel Laguna
Marea Viva	13119	4.85	13577	4.44
Marea Muerta	13119	4.83	13618	4.42
Marea de Tormenta	13719	5.43	13789	4.99

Tabla 5-1 Gastos comparativos en la descarga

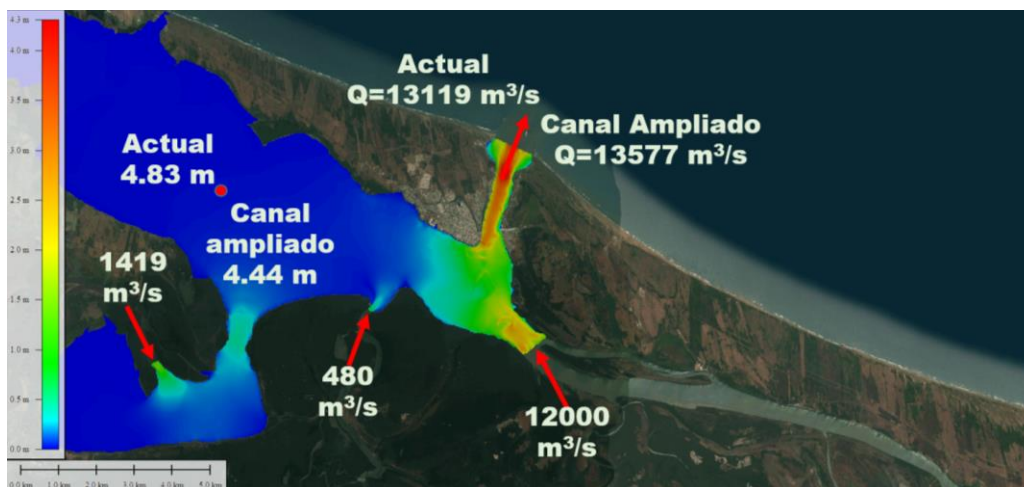


Figura 5-2 Comparación de descarga, Marea Viva

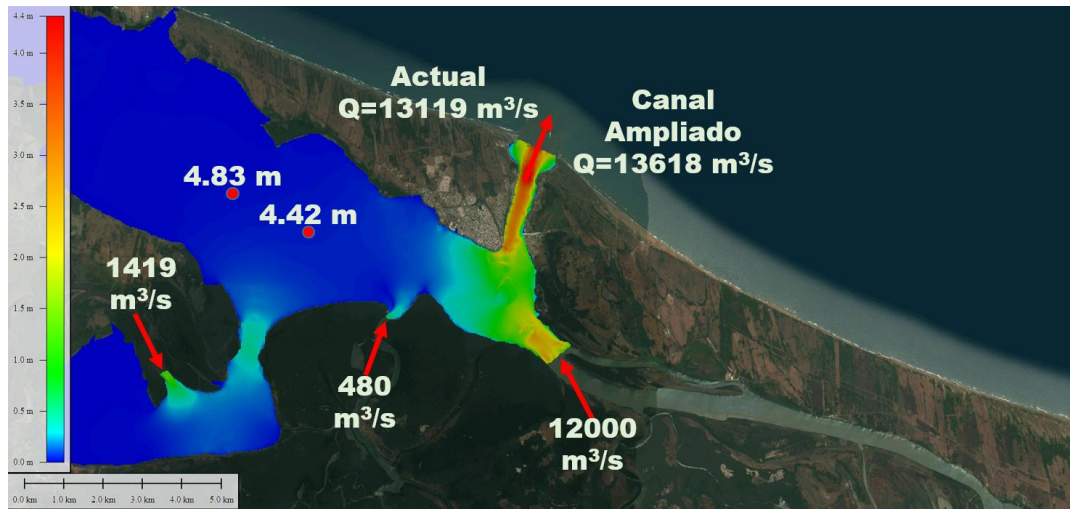


Figura 5-3 Comparación de descarga, Marea Muerta



Bibliografía

Fuentes, O., De Luna, F., et al. “Actualización del estudio de las propuestas de solución para el control de inundaciones en la cuenca del río Papaloapan, en el Estado de Veracruz”. 2012. CONAGUA. México, D.F.

Banco Nacional De Datos De Aguas Superficiales (BANDAS). CONAGUA. Datos de las EH 28014,28153 y 28136.

Fuentes, O., De Luna, F., Cruz, J. et al. “Funcionamiento hidráulico y modelado matemático del sistema lagunar Alvarado basado en mediciones de niveles y velocidades del agua. Capítulo 4 del Proyecto Hidrológico para la cuenca del río Papaloapan en los Estados de Veracruz, Puebla y Oaxaca.” UNAM-CONAGUA. 2013.

Servicio Mareográfico Nacional. UNAM, Datos de mareas del Puerto de Alvarado.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E., Dolz, J., Coll, A. (2014). “Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos”. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol.30 (1) pp.1-10

Hsu M., Kuo A., Kou j., Liu W. “Procedure to calibrate and verify numerical models of stuarine hydrodynamics.” Journal of hydraulic engineering. 125 n2 pp 166181. 2000.

García Francisco, García Uriel, Palacio Carlos. “Calibración de un modelo hidrodinámico 2d para la bahía de Cartagena.” Dyna, Diciembre, (2010) pp. 152-166.

Palacio T. C. “Metodología para la validación de modelos Hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: Aplicación a la bahía Melford en la costa del mar del Norte alemán.” Disertación Doctoral. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 2002.

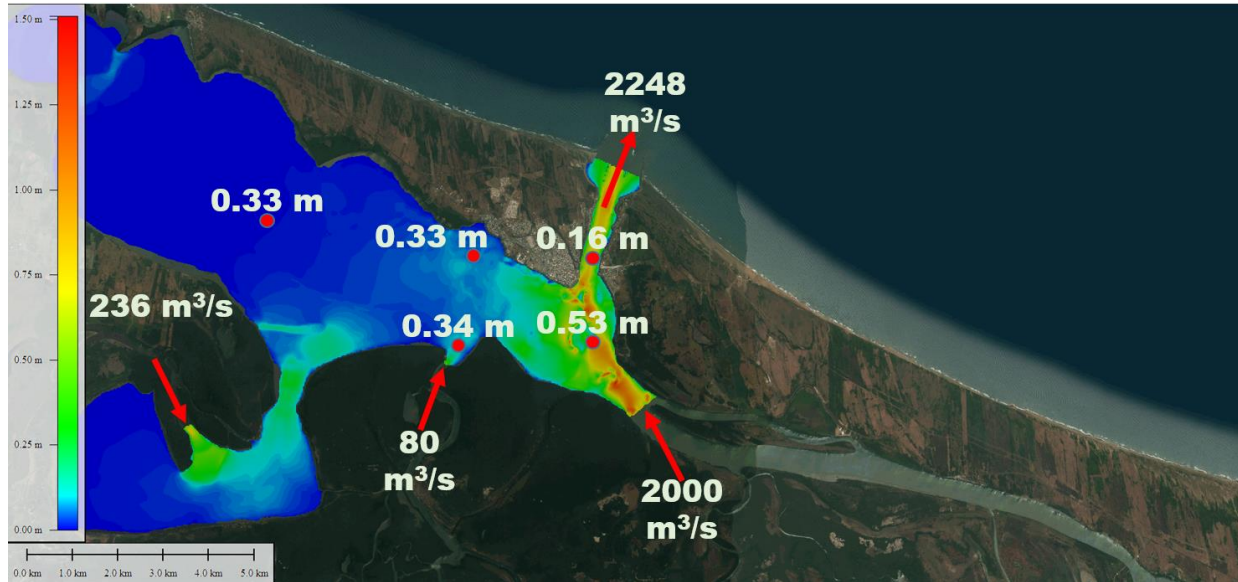
T. G. Trucano, L. P. Swiler, T. Igusa, W.L. Oberkampf, M. Pilch. “Calibration, validation, and sensitivity analysis: What's what?” Reliability Engineering & System Safety Volume 91, Issues 10–11, October–November 2006, Pages 1331–1357

O.A. Fuentes M, L.G. Matías R., M. Jiménez E., D. R. Mendoza E., C. Baeza R. “Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta.” CENAPRED.

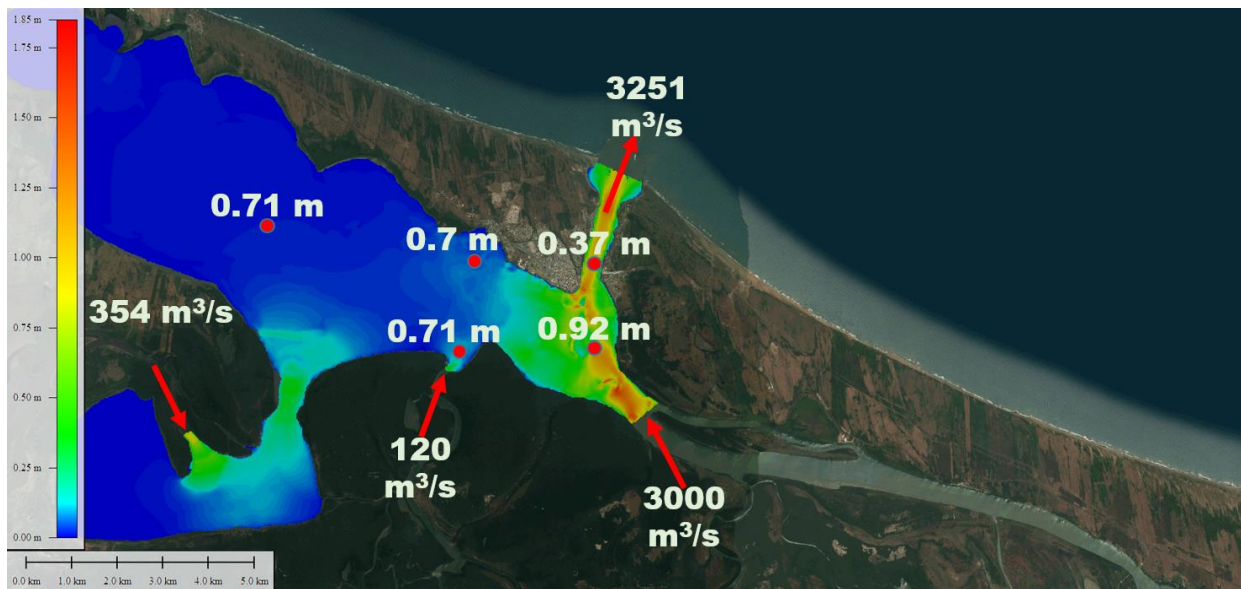
Anexos

Anexo A1

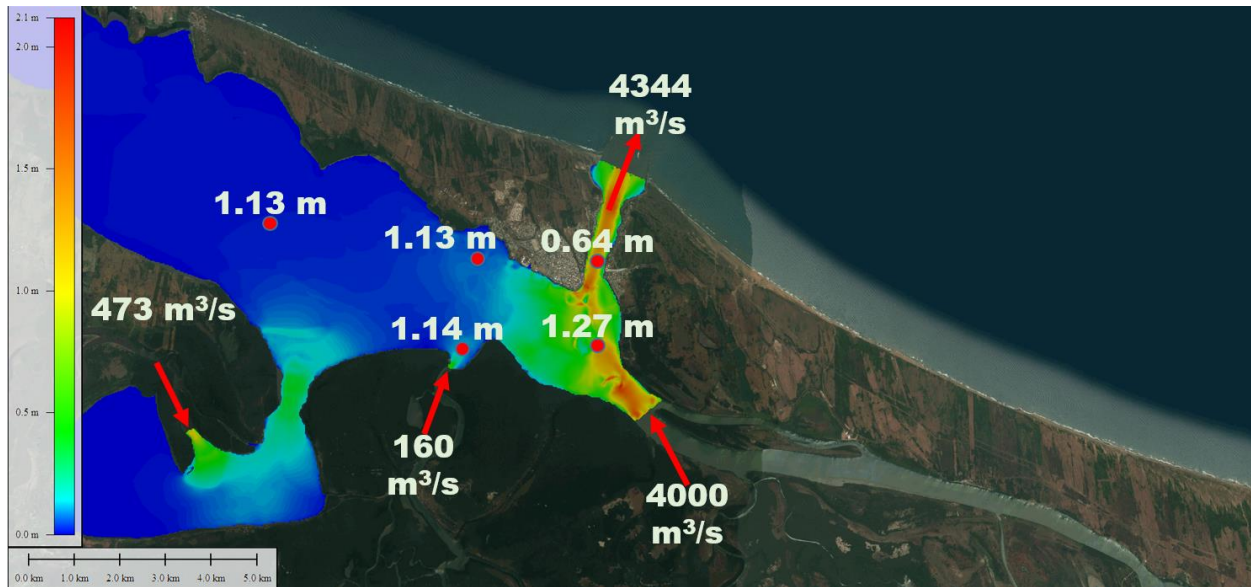
Resultados Marea Viva



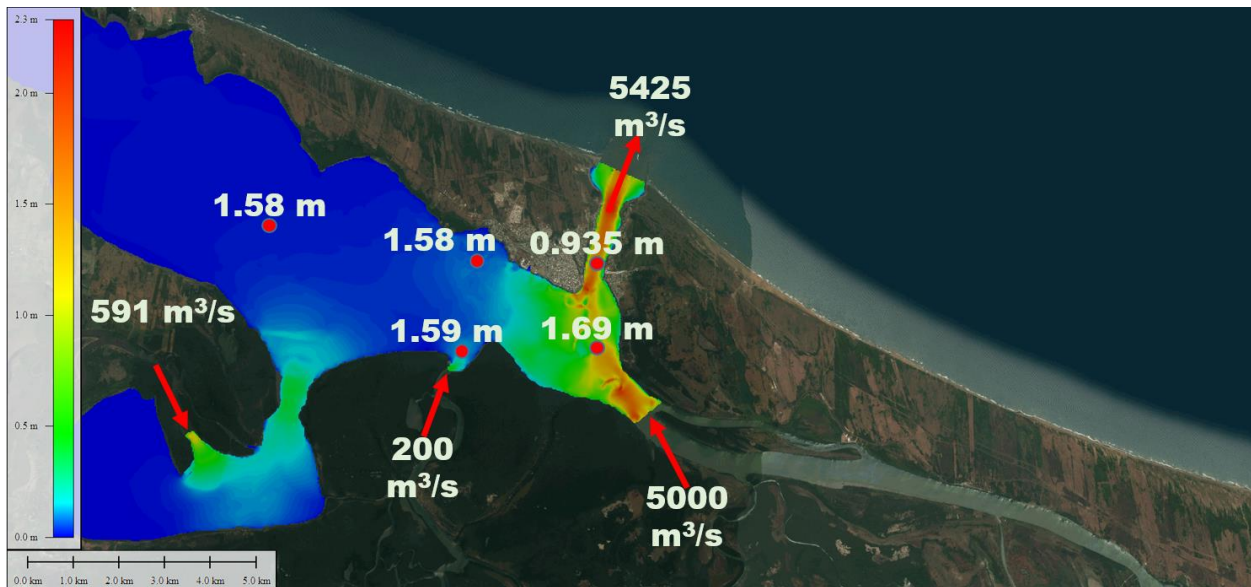
Resultados Marea viva $Q_{ent}=2,316 \text{ m}^3/\text{s}$



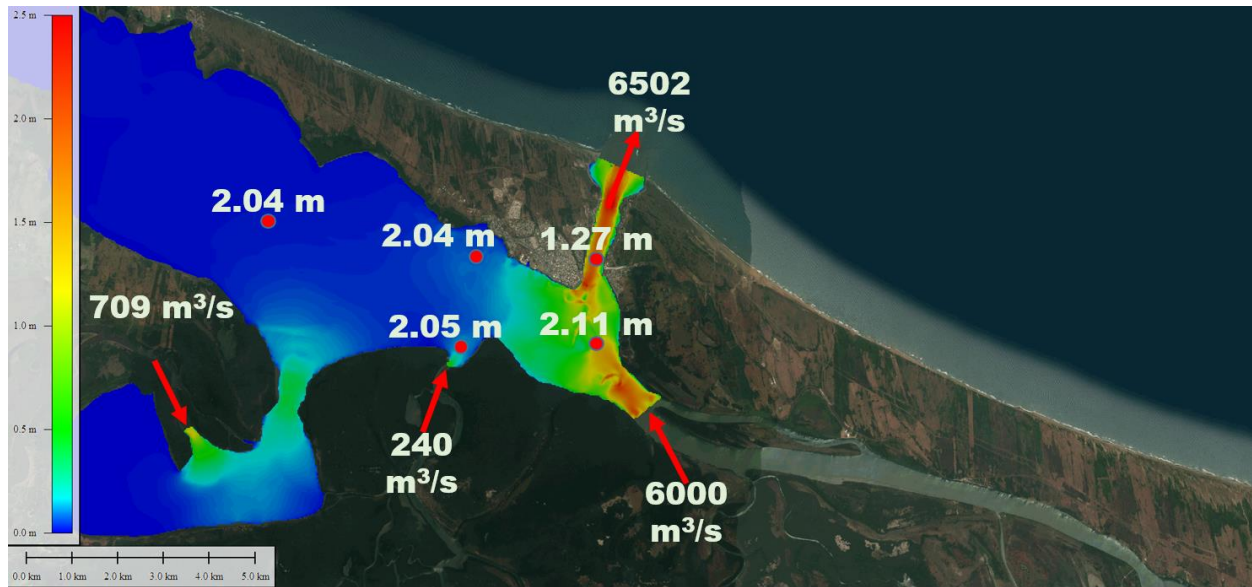
Resultados Marea viva $Q_{ent}=3,475 \text{ m}^3/\text{s}$



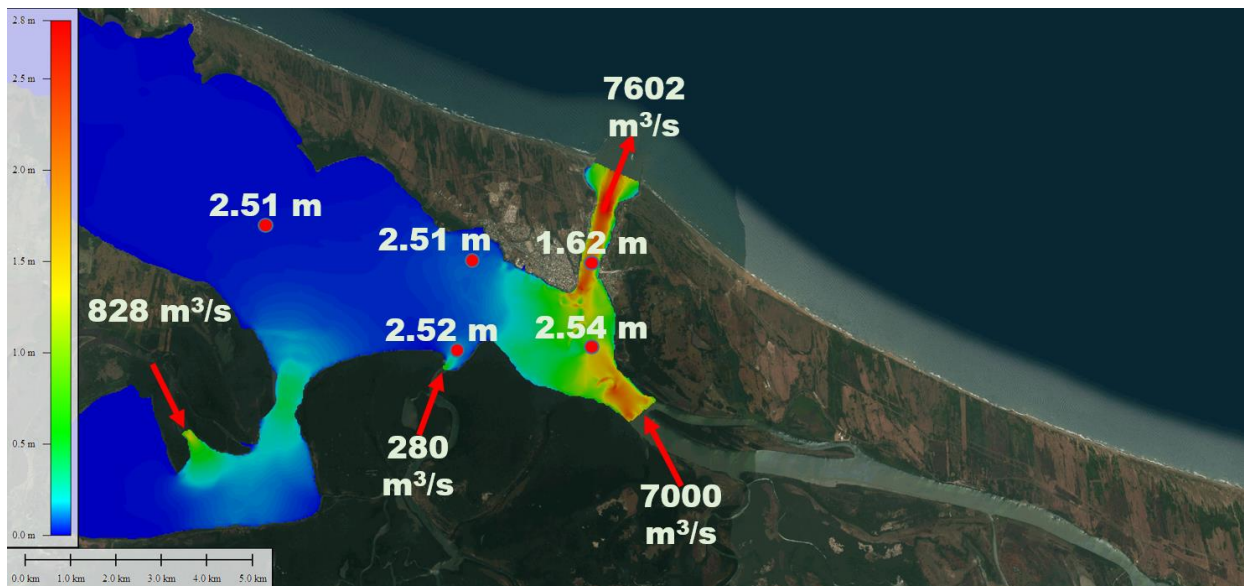
Resultados Marea viva Qent=4,633 m³/s



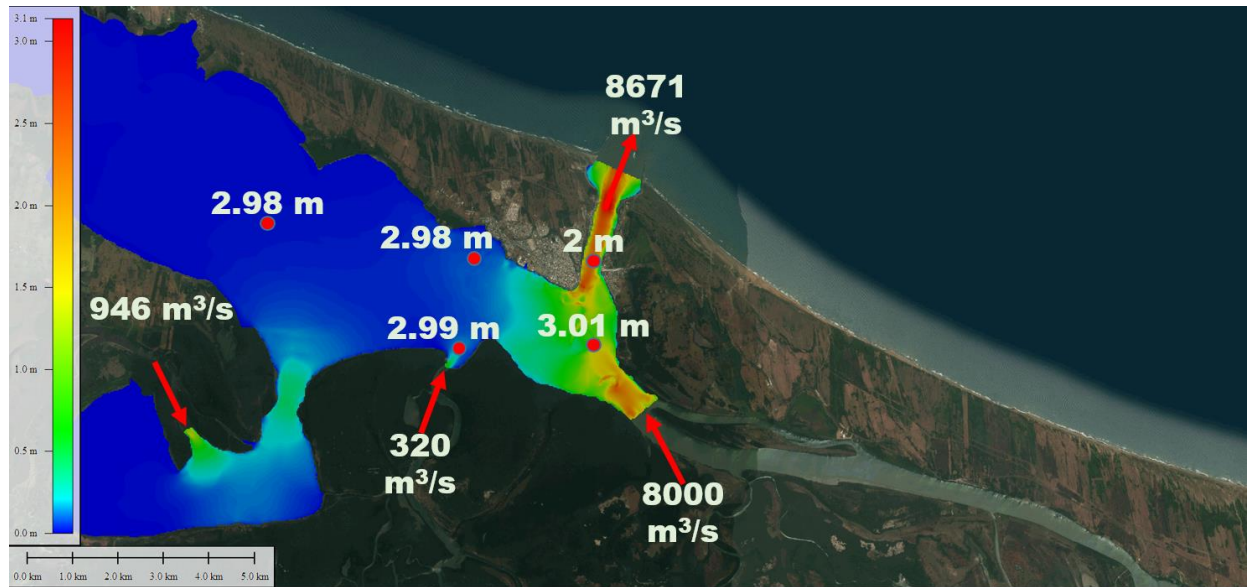
Resultados Marea viva Qent=5,791 m³/s



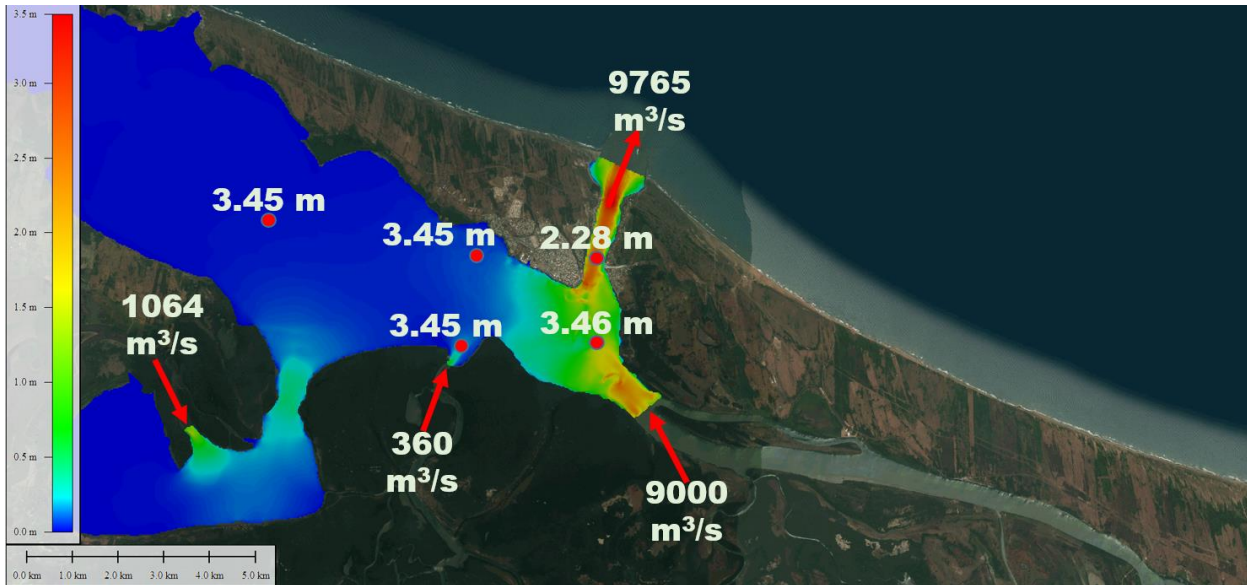
Resultados Marea viva $Q_{ent}=6,950 \text{ m}^3/\text{s}$



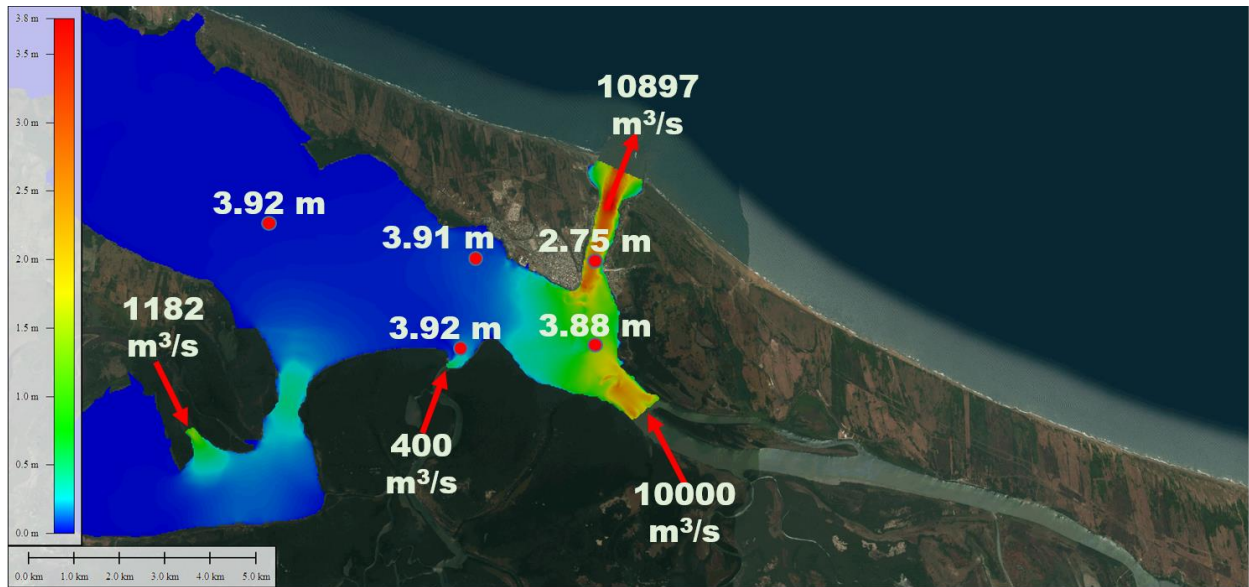
Resultados Marea viva $Q_{ent}=8,180 \text{ m}^3/\text{s}$



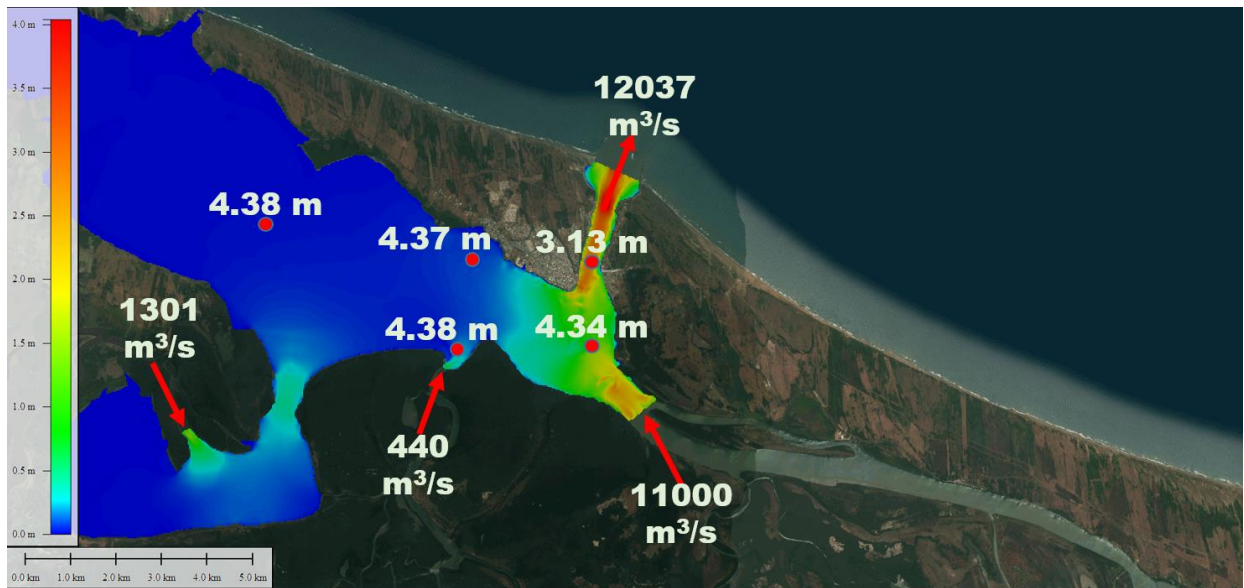
Resultados Marea viva $Q_{ent}=9,266 m^3/s$



Resultados Marea viva $Q_{ent}=10,425 m^3/s$



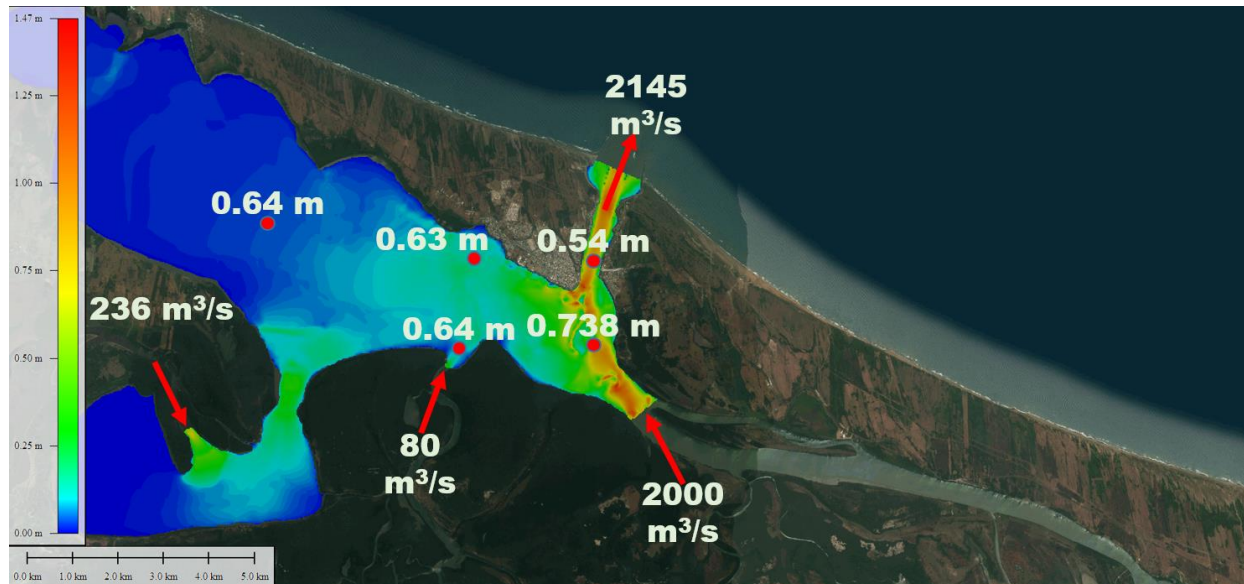
Resultados Marea viva Qent=11,583 m³/s



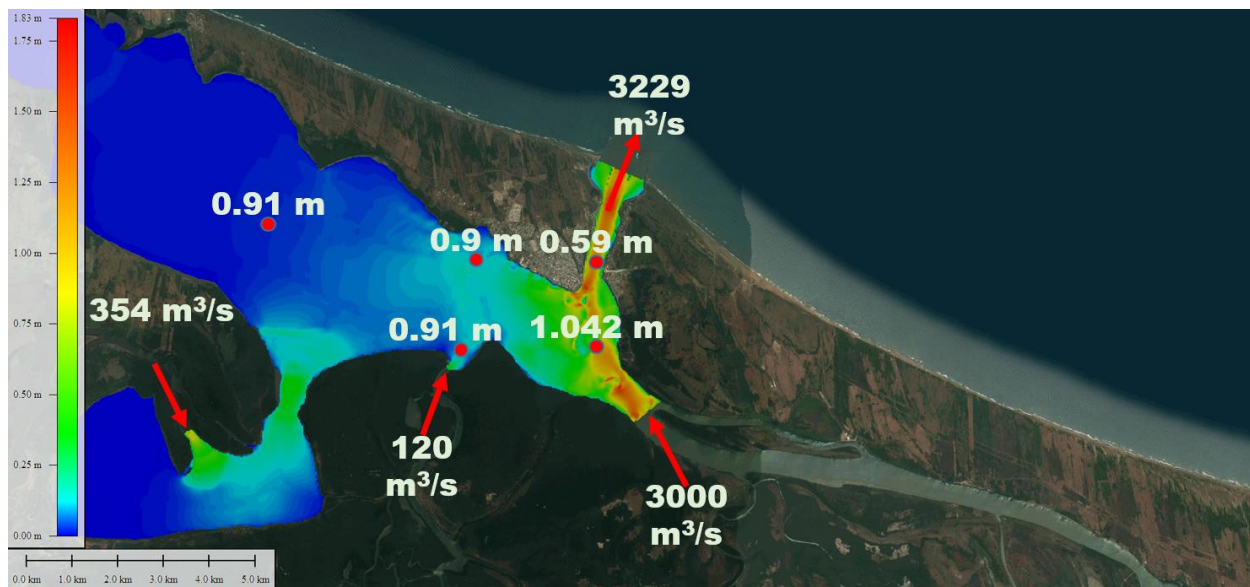
Resultados Marea viva Qent=12,741 m³/s



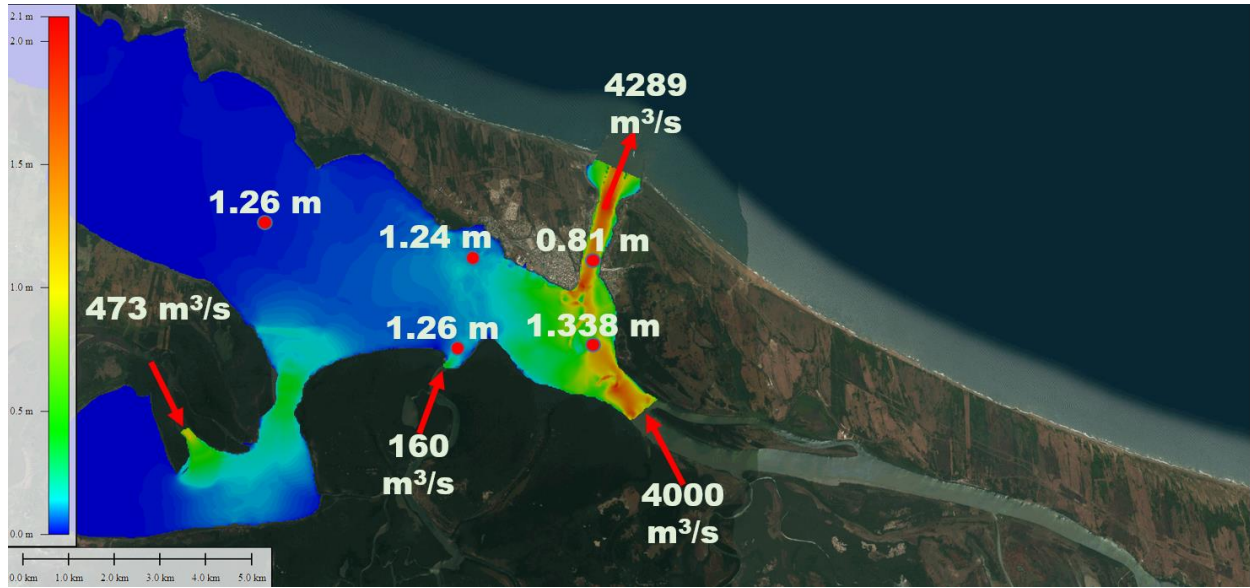
Resultados Marea Muerta



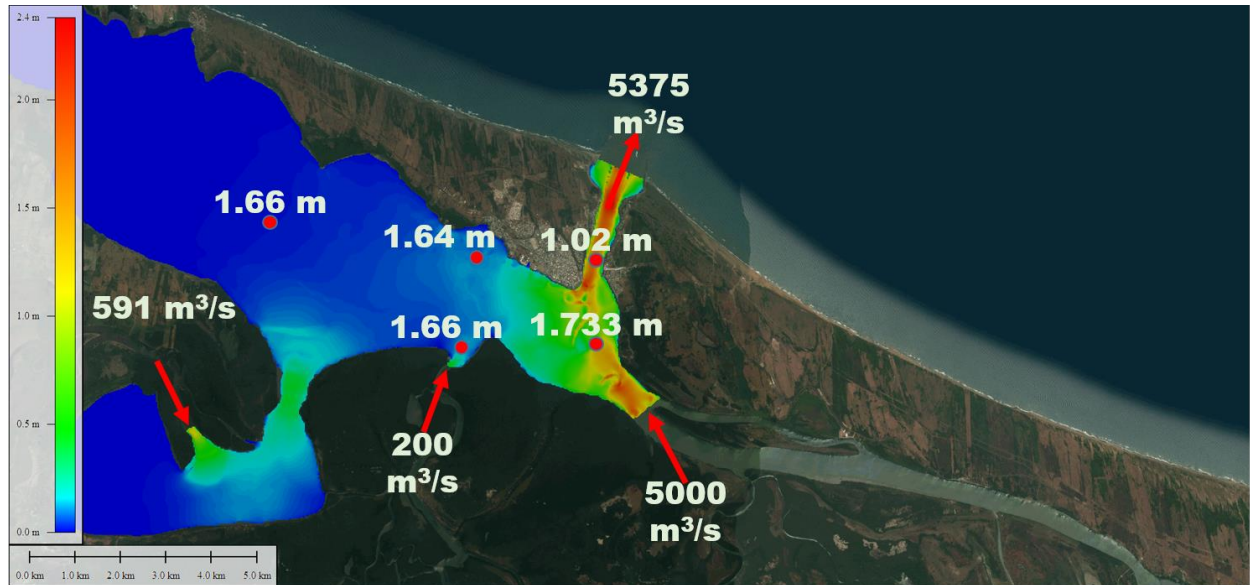
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=2,316 \text{ m}^3/\text{s}$



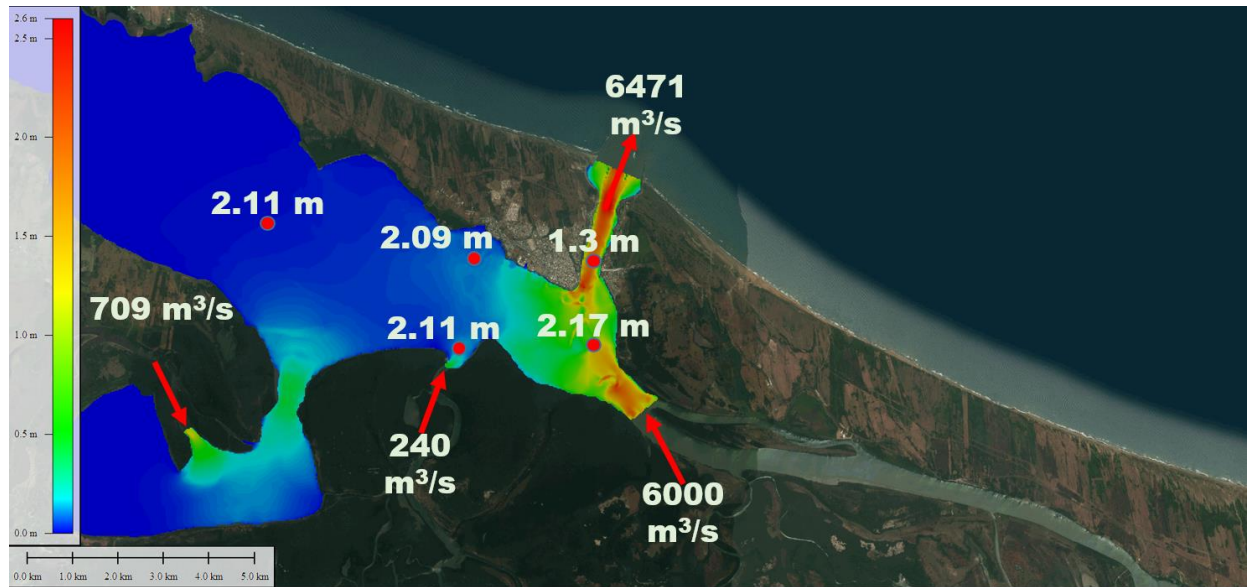
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=3,475 \text{ m}^3/\text{s}$



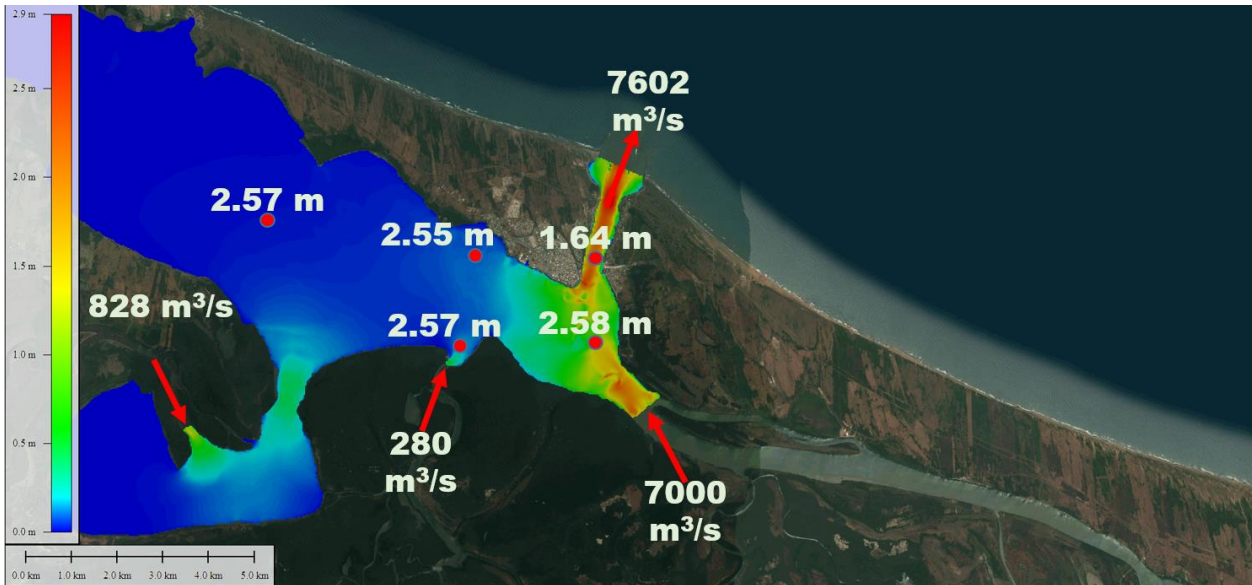
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=4,633 \text{ m}^3/\text{s}$



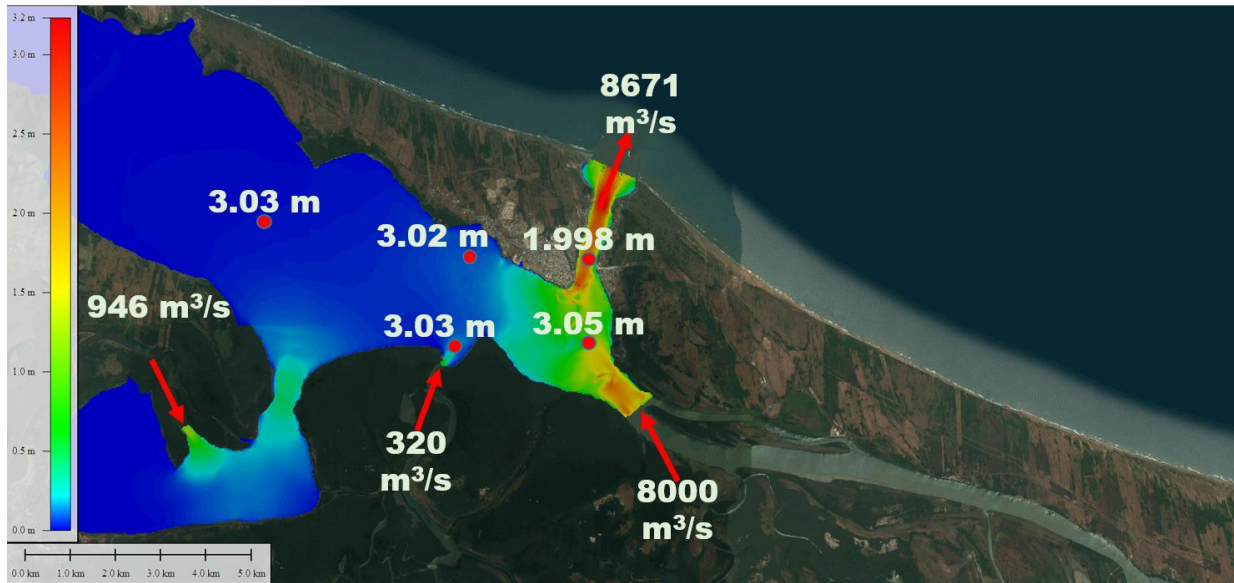
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=5,791 \text{ m}^3/\text{s}$



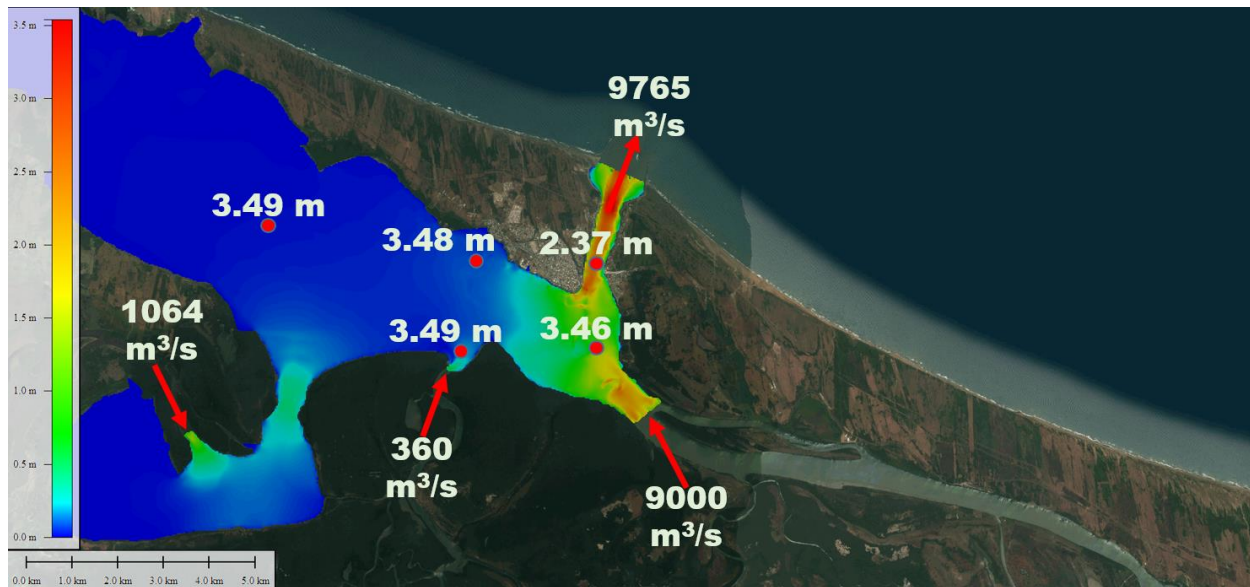
Resultados Marea muerta $Q_{ent} = 6,950 \text{ m}^3/\text{s}$



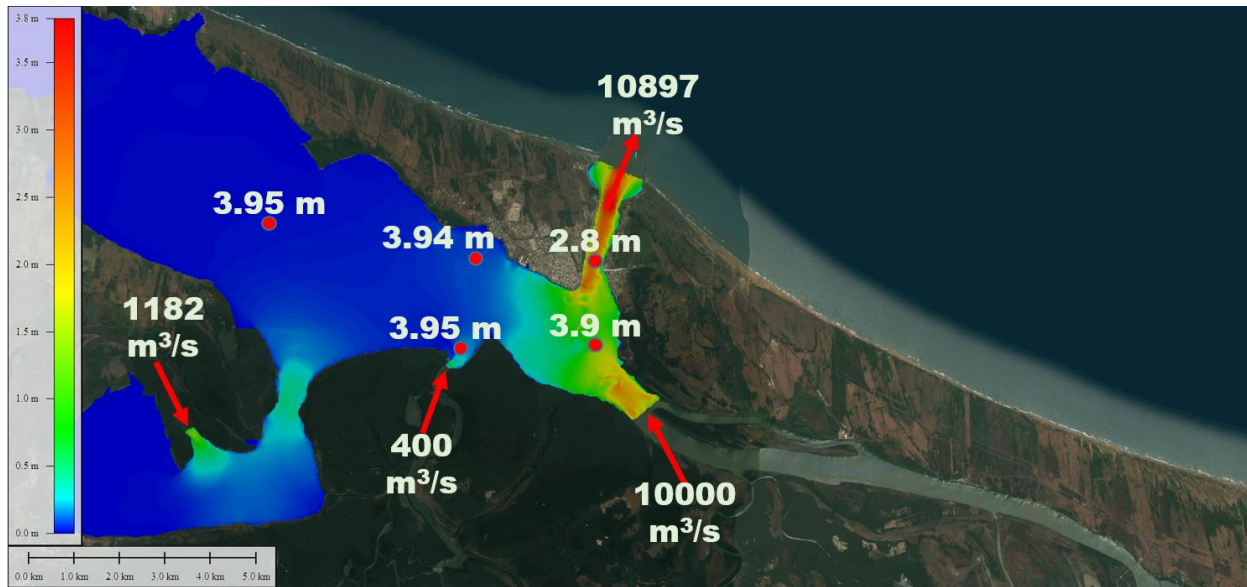
Resultados Marea muerta $Q_{ent} = 8,180 \text{ m}^3/\text{s}$



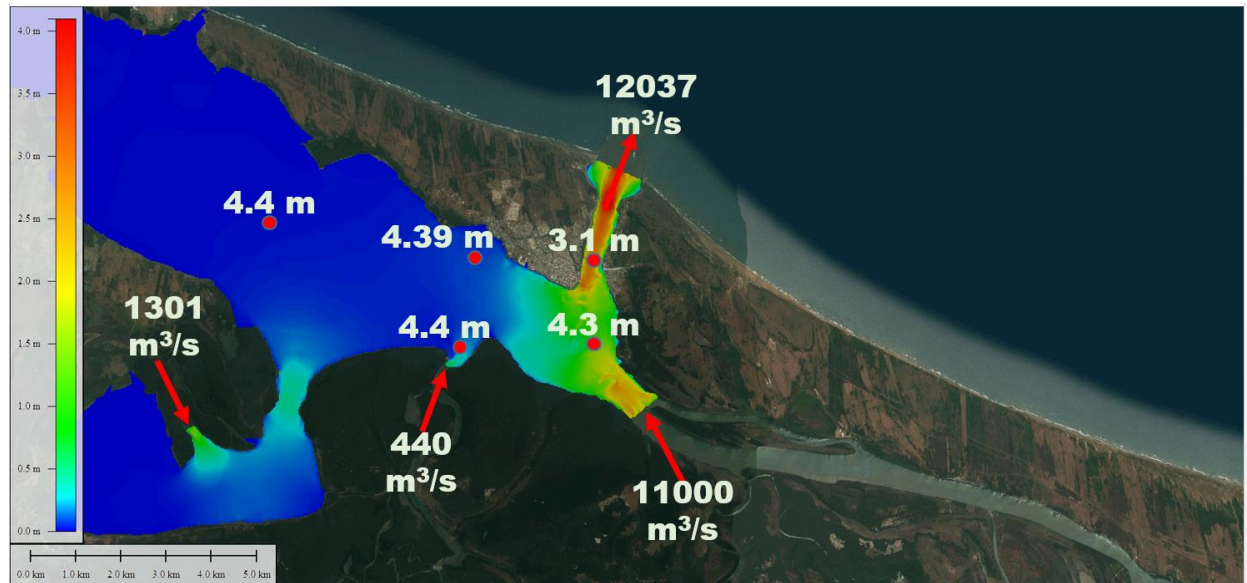
Resultados Marea muerta $Q_{ent} = 9,266 \text{ m}^3/\text{s}$



Resultados Marea muerta $Q_{ent} = 10,425 \text{ m}^3/\text{s}$



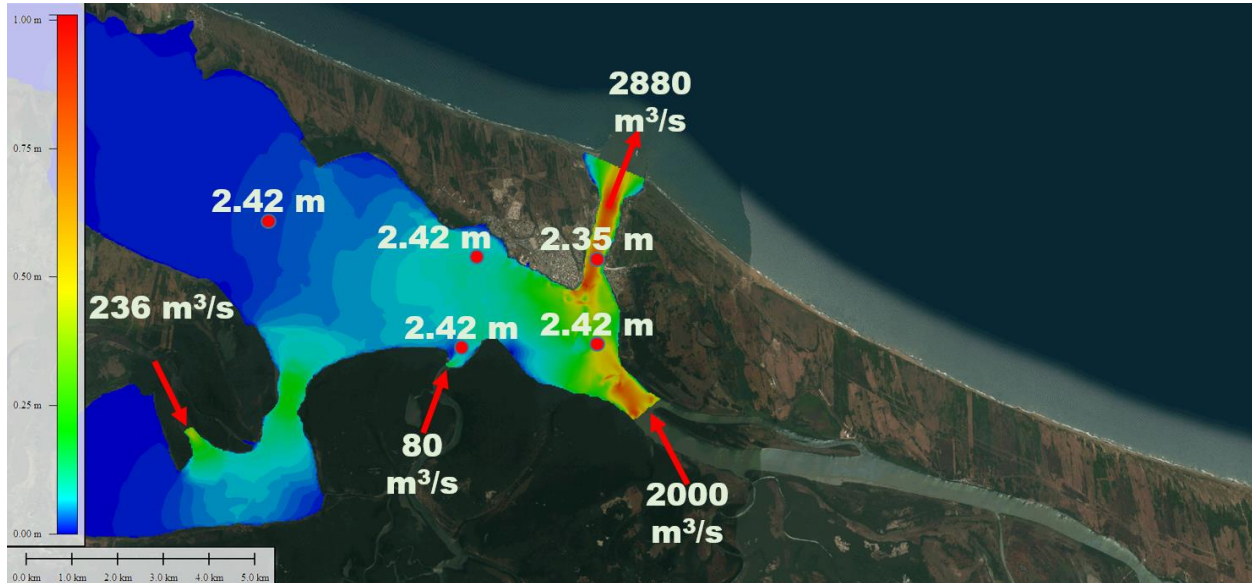
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=11,583 \text{ m}^3/\text{s}$



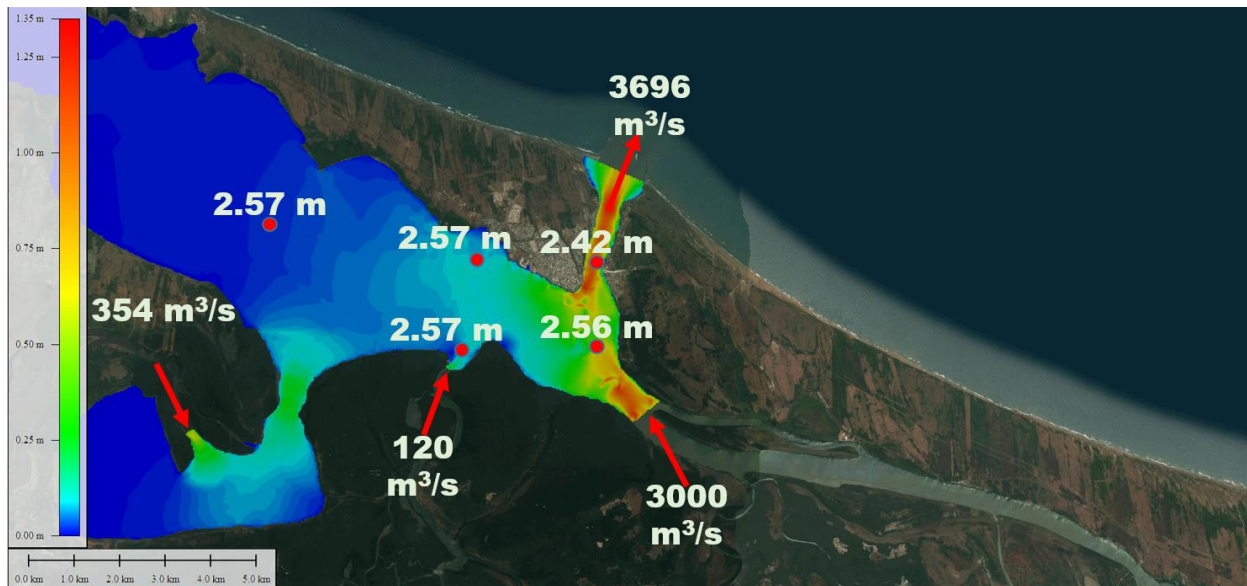
Resultados Marea muerta $Q_{ent}=12,741 \text{ m}^3/\text{s}$



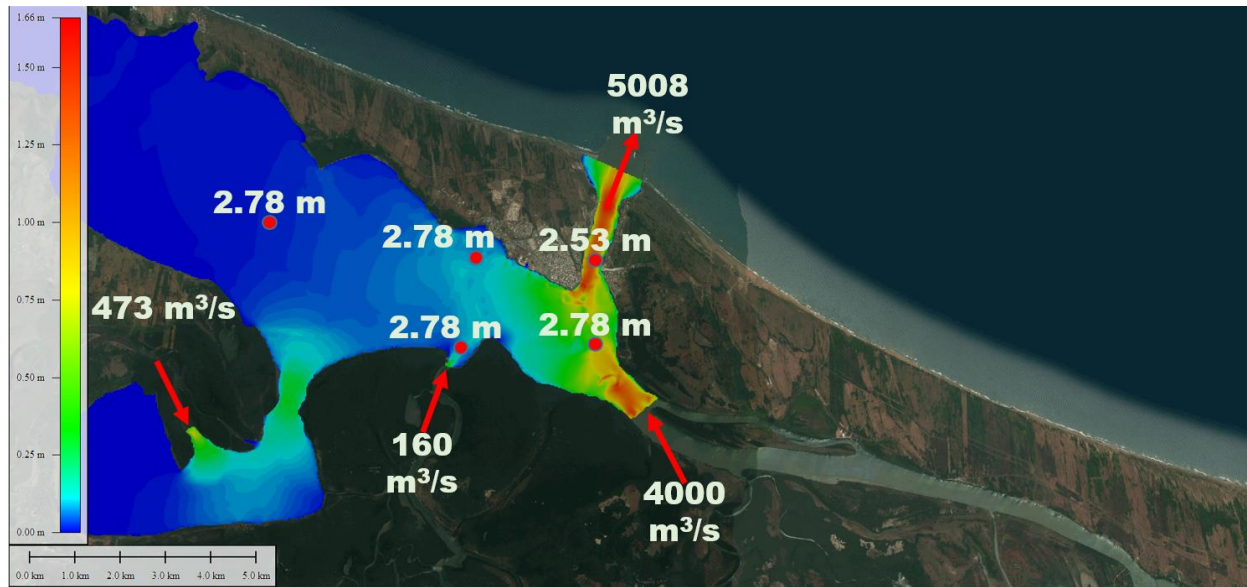
Resultados Marea de Tormenta



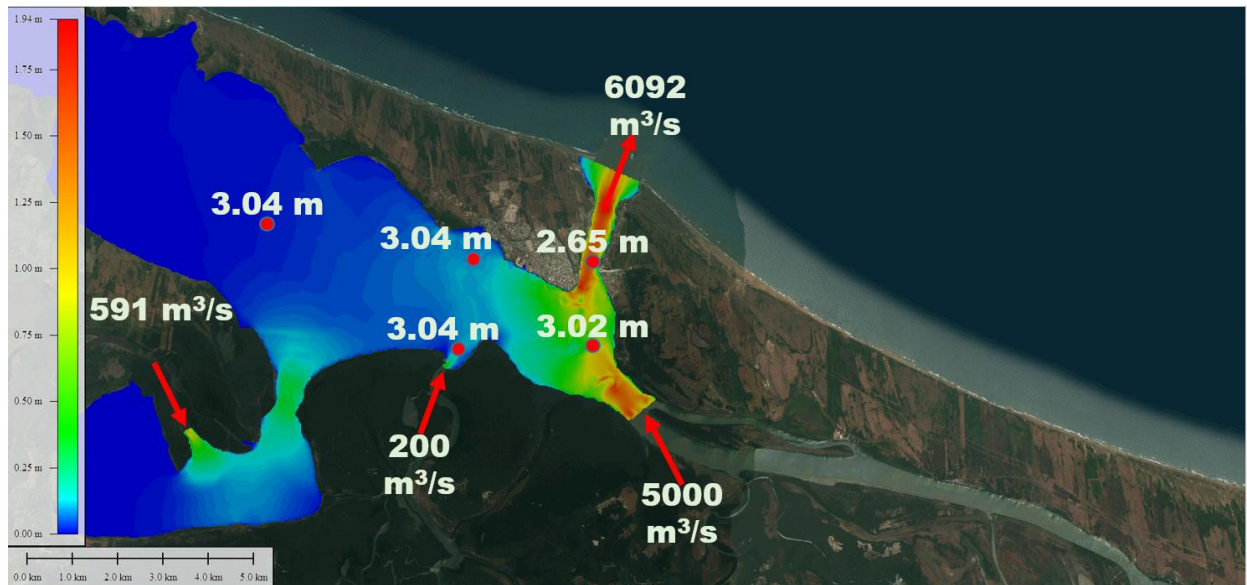
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=2,316 \text{ m}^3/\text{s}$



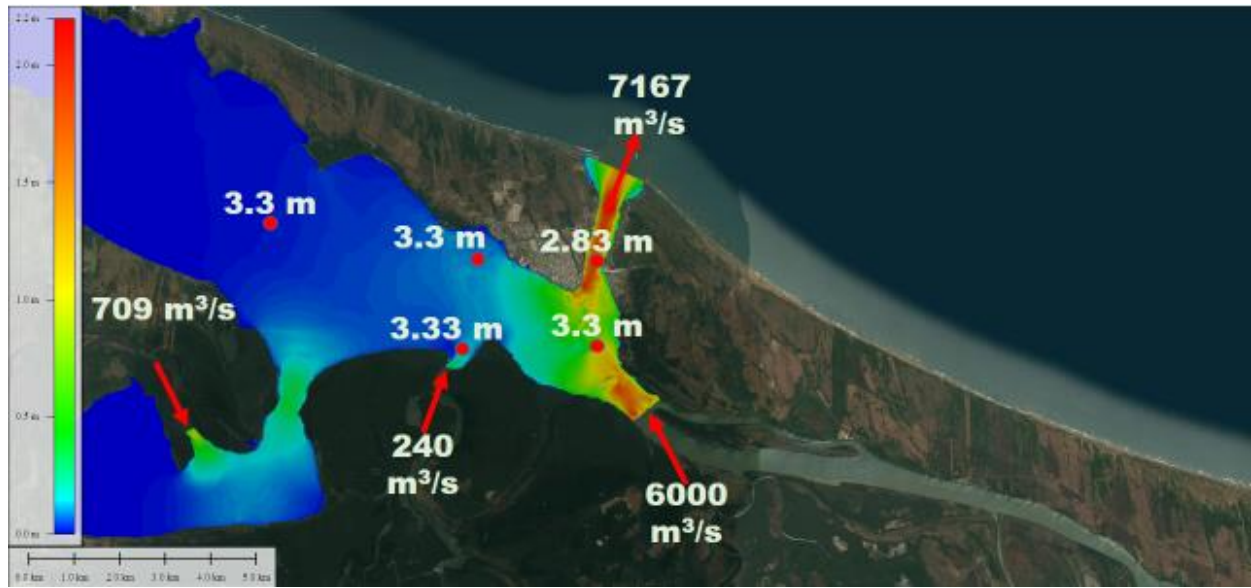
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=3,475 \text{ m}^3/\text{s}$



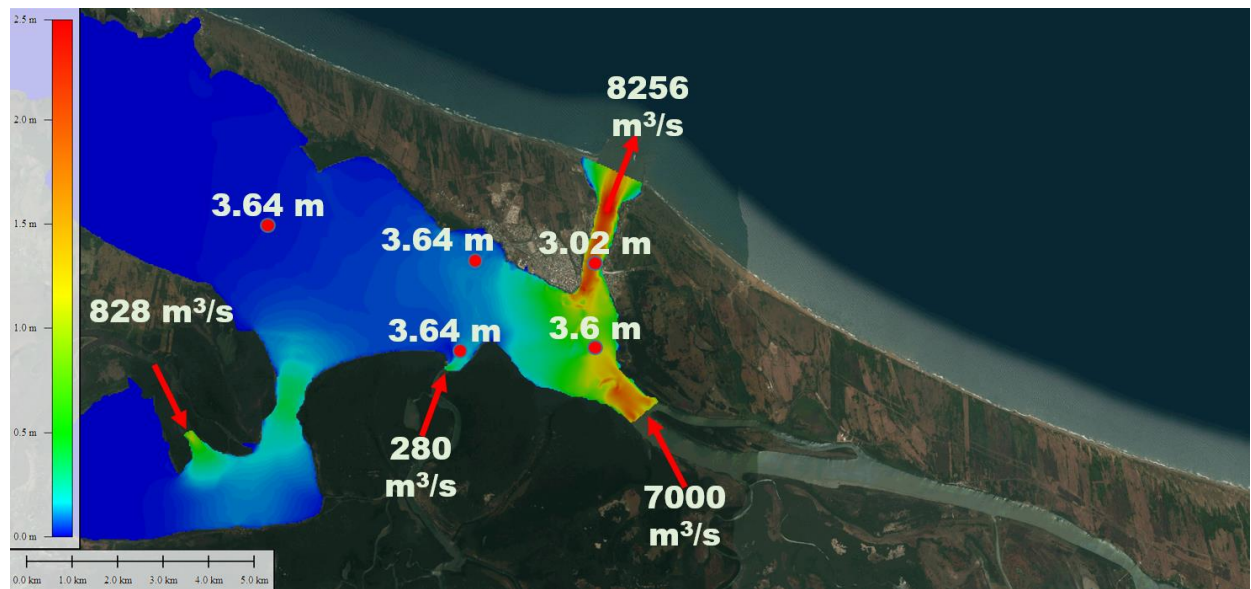
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=4,633 \text{ m}^3/\text{s}$



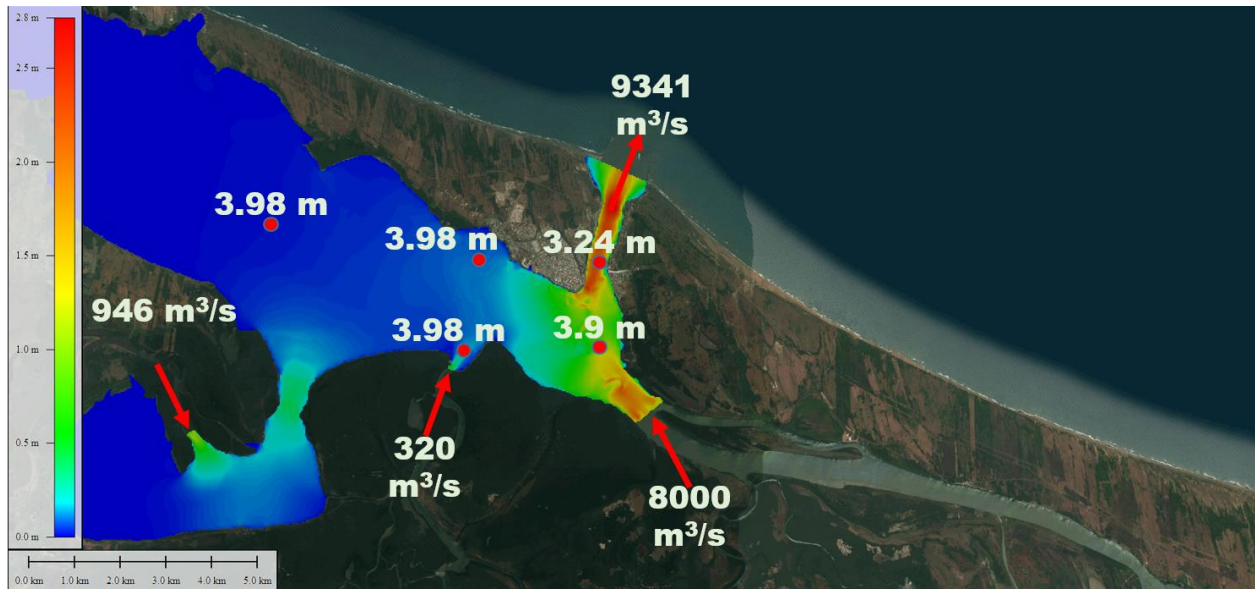
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=5,791 \text{ m}^3/\text{s}$



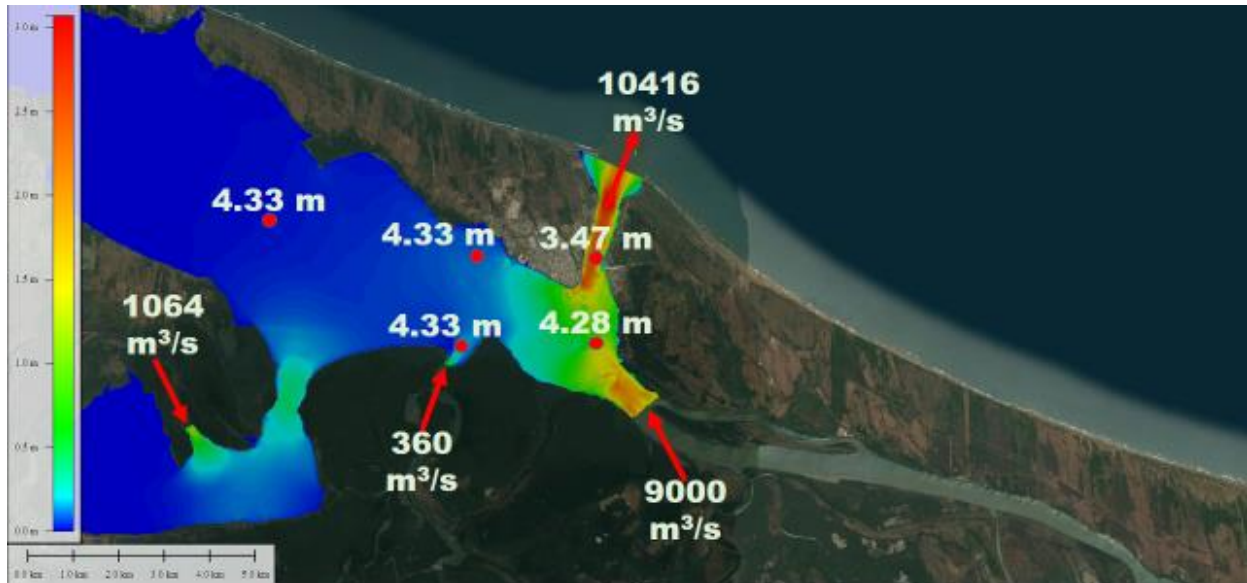
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 6,950 \text{ m}^3/\text{s}$



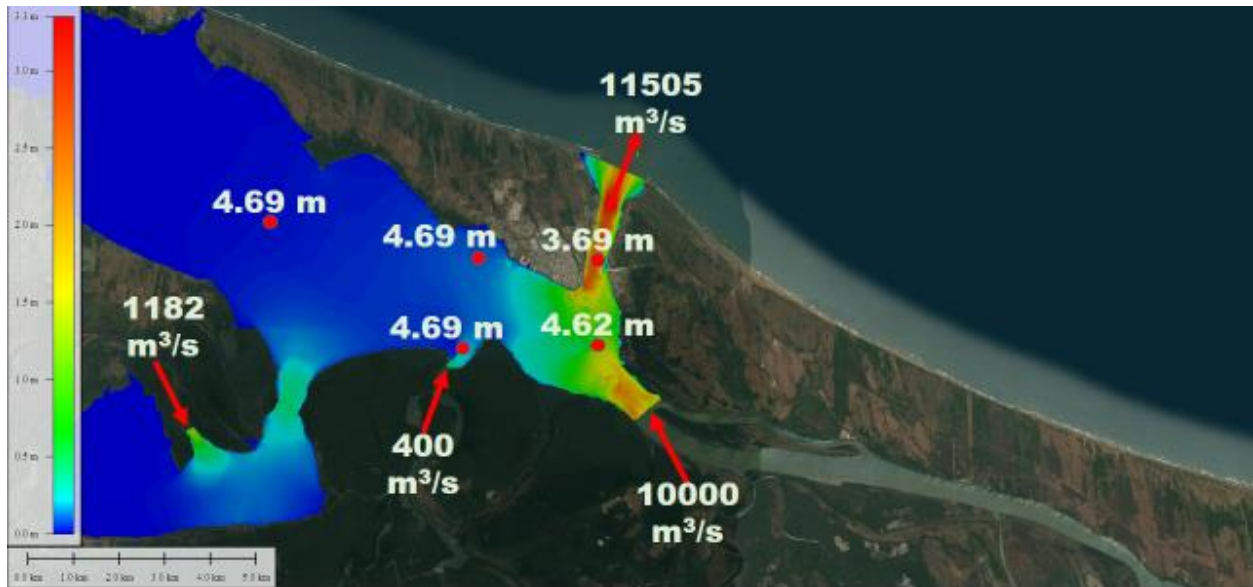
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 8,180 \text{ m}^3/\text{s}$



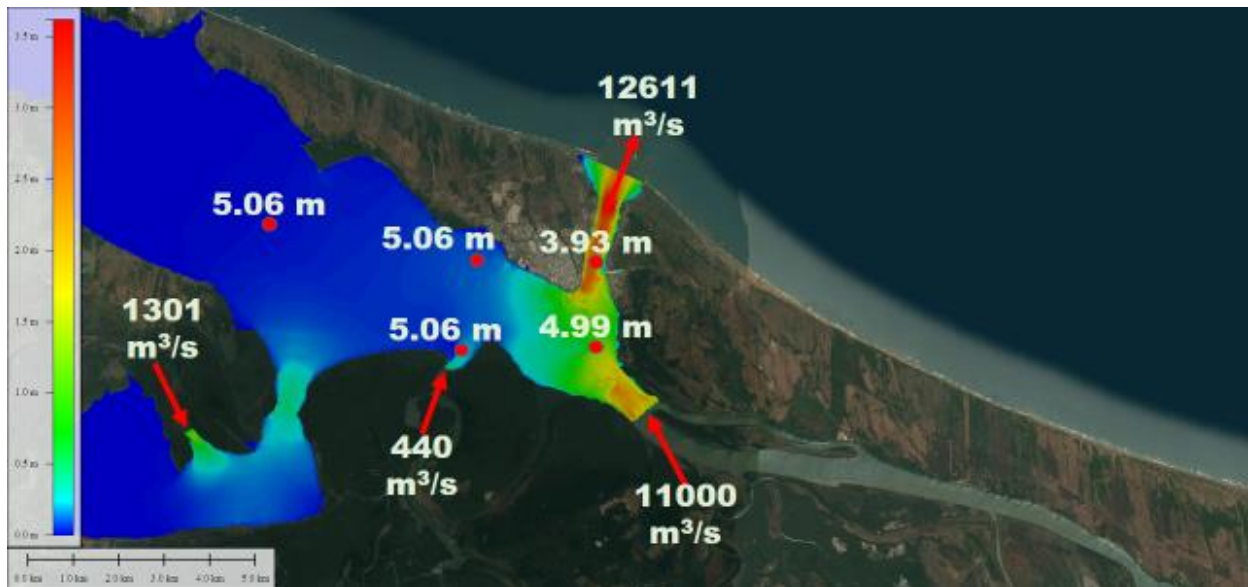
Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=9,266 \text{ m}^3/\text{s}$



Resultados Marea de tormenta $Q_{ent}=10,425 \text{ m}^3/\text{s}$



Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 11,583 \text{ m}^3/\text{s}$



Resultados Marea de tormenta $Q_{ent} = 12,741 \text{ m}^3/\text{s}$



Anexo A 2 Tabla de registros de niveles

			PNTPRR	MLLALV	BAHCHU	PNTPQT	RIORMD	CSTSJN	ARBOLI	PLAYAS	LAGPOT	Marea
05/20/14	01:30:00	PM	0.20	0.08	0.04	0.12	-0.69	0.11	0.13	0.11	0.09	0.08
05/20/14	01:40:00	PM	0.07	0.08	0.04	0.12	-0.69	0.10	0.12	0.10	0.08	0.08
05/20/14	01:50:00	PM	0.19	0.08	0.05	0.11	-0.69	0.09	0.12	0.10	0.08	0.08
05/20/14	02:00:00	PM	0.24	0.08	0.05	0.09	-0.69	0.11	0.11	0.10	0.08	0.07
05/20/14	02:10:00	PM	0.16	0.07	0.04	0.10	-0.69	0.09	0.11	0.11	0.08	0.07
05/20/14	02:20:00	PM	0.13	0.06	0.04	0.09	-0.69	0.08	0.10	0.09	0.06	0.07
05/20/14	02:30:00	PM	0.09	0.06	0.04	0.09	-0.69	0.08	0.09	0.08	0.06	0.07
05/20/14	02:40:00	PM	0.08	0.06	0.03	0.09	-0.69	0.06	0.09	0.07	0.06	0.07
05/20/14	02:50:00	PM	0.18	0.05	0.03	0.10	-0.69	0.07	0.08	0.10	0.07	0.07
05/20/14	03:00:00	PM	0.10	0.07	0.03	0.09	-0.69	0.07	0.08	0.10	0.05	0.07
05/20/14	03:10:00	PM	0.13	0.06	0.03	0.10	-0.69	0.06	0.08	0.06	0.04	0.07
05/20/14	03:20:00	PM	0.08	0.07	0.03	0.11	-0.69	0.05	0.08	0.06	0.04	0.07
05/20/14	03:30:00	PM	0.22	0.07	0.05	0.09	-0.69	0.05	0.09	0.09	0.05	0.07
05/20/14	03:40:00	PM	0.22	0.07	0.05	0.07	-0.69	0.05	0.08	0.10	0.04	0.07
05/20/14	03:50:00	PM	0.37	0.08	0.06	0.08	-0.69	0.07	-0.57	0.11	0.06	0.07
05/20/14	04:00:00	PM	0.49	0.07	0.06	0.08	-0.69	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
05/20/14	04:10:00	PM	-0.04	0.07	0.06	0.07	-0.69	0.06	0.07	0.10	0.05	0.07
05/20/14	04:20:00	PM	0.07	0.07	0.07	0.07	-0.69	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
05/20/14	04:30:00	PM	0.33	0.07	0.07	0.08	-0.69	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07
05/20/14	04:40:00	PM	0.19	0.07	0.08	0.09	-0.69	0.06	0.07	0.12	0.09	0.07
05/20/14	04:50:00	PM	0.11	0.07	0.09	0.07	-0.69	0.06	0.07	0.08	0.04	0.07
05/20/14	05:00:00	PM	0.18	0.08	0.11	0.07	-0.69	0.05	0.07	0.10	0.05	0.07
05/20/14	05:10:00	PM	0.12	0.07	0.12	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.10	0.03	0.07
05/20/14	05:20:00	PM	0.05	0.07	0.15	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.10	0.05	0.07
05/20/14	05:30:00	PM	-0.04	0.07	0.16	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.12	0.06	0.07
05/20/14	05:40:00	PM	0.09	0.06	0.16	0.09	-0.69	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07
05/20/14	05:50:00	PM	0.33	0.07	0.16	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.06	0.07	0.07
05/20/14	06:00:00	PM	0.09	0.07	0.17	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.15	0.04	0.07
05/20/14	06:10:00	PM	0.17	0.08	0.18	0.09	-0.69	0.07	0.08	0.11	0.06	0.07
05/20/14	06:20:00	PM	0.16	0.08	0.20	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.10	0.08	0.07
05/20/14	06:30:00	PM	0.31	0.08	0.21	0.07	-0.69	0.05	0.08	0.09	0.06	0.06
05/20/14	06:40:00	PM	0.39	0.08	0.22	0.06	-0.69	0.05	0.08	0.02	0.04	0.06
05/20/14	06:50:00	PM	0.03	0.07	0.23	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06
05/20/14	07:00:00	PM	-0.09	0.07	0.25	0.09	-0.69	0.06	0.08	0.13	0.08	0.06
05/20/14	07:10:00	PM	0.13	0.07	0.26	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.05	0.06	0.05
05/20/14	07:20:00	PM	0.00	0.07	0.26	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.06	0.06	0.05
05/20/14	07:30:00	PM	0.16	0.07	0.27	0.09	-0.69	0.08	0.09	0.09	0.06	0.04
05/20/14	07:40:00	PM	0.52	0.07	0.27	0.07	-0.69	0.07	0.09	0.12	0.06	0.04



**Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado
y su relación con el mar**



05/20/14	07:50:00	PM	0.36	0.07	0.28	0.07	-0.69	0.07	0.09	0.11	0.05	0.03
05/20/14	08:00:00	PM	-0.01	0.07	0.30	0.08	-0.69	0.07	0.09	0.03	0.06	0.03
05/20/14	08:10:00	PM	-0.12	0.06	0.30	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.09	0.06	0.02
05/20/14	08:20:00	PM	0.38	0.06	0.31	0.06	-0.69	0.07	0.08	0.08	0.06	0.01
05/20/14	08:30:00	PM	-0.01	0.06	0.32	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.08	0.07	0.01
05/20/14	08:40:00	PM	-0.01	0.06	0.33	0.08	-0.69	0.06	0.08	0.07	0.07	0.00
05/20/14	08:50:00	PM	0.00	0.06	0.33	0.08	-0.69	0.06	0.08	0.07	0.06	0.01
05/20/14	09:00:00	PM	-0.03	0.05	0.33	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.09	0.06	0.02
05/20/14	09:10:00	PM	0.12	0.05	0.32	0.09	-0.69	0.06	0.08	0.09	0.07	0.03
05/20/14	09:20:00	PM	-0.06	0.05	0.33	0.07	-0.69	0.07	0.08	0.10	0.06	0.03
05/20/14	09:30:00	PM	-0.26	0.04	0.33	0.08	-0.69	0.06	0.08	0.07	0.05	0.04
05/20/14	09:40:00	PM	-0.19	0.04	0.33	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.09	0.05	0.05
05/20/14	09:50:00	PM	-0.08	0.03	0.34	0.08	-0.69	0.07	0.09	0.08	0.06	0.06
05/20/14	10:00:00	PM	0.05	0.03	0.34	0.05	-0.69	0.06	0.08	0.09	0.06	0.07
05/20/14	10:10:00	PM	-0.26	0.03	0.34	0.05	-0.69	0.07	0.07	0.04	0.06	0.08
05/20/14	10:20:00	PM	-0.22	0.02	0.34	0.07	-0.69	0.06	0.07	0.06	0.05	0.09
05/20/14	10:30:00	PM	0.12	0.02	0.33	0.06	-0.69	0.07	0.07	0.06	0.05	0.10
05/20/14	10:40:00	PM	-0.25	0.01	0.33	0.05	-0.69	0.06	0.06	0.06	0.05	0.11
05/20/14	10:50:00	PM	-0.15	-0.01	0.32	0.06	-0.69	0.05	0.07	0.09	0.04	0.12
05/20/14	11:00:00	PM	-0.34	-0.01	0.32	0.05	-0.69	0.05	0.06	0.08	0.04	0.13
05/20/14	11:10:00	PM	-0.35	-0.02	0.33	0.04	-0.69	0.05	0.05	0.05	0.04	0.13
05/20/14	11:20:00	PM	-0.24	-0.02	0.31	0.05	-0.69	0.05	0.04	0.02	0.03	0.14
05/20/14	11:30:00	PM	-0.17	-0.04	0.30	0.04	-0.69	0.05	0.04	0.04	0.02	0.15
05/20/14	11:40:00	PM	-0.58	-0.03	0.30	0.03	-0.69	0.05	0.04	0.01	0.02	0.16
05/20/14	11:50:00	PM	-0.38	-0.04	0.30	0.03	-0.69	0.04	0.03	0.03	0.02	0.16



Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado y su relación con el mar



05/21/14	12:00:00	AM	-0.29	-0.05	0.28	0.01	-0.69	0.03	0.03	0.02	0.01	-
05/21/14	12:10:00	AM	-0.35	-0.06	0.28	0.01	-0.69	0.02	0.02	0.01	0.00	-
05/21/14	12:20:00	AM	-0.51	-0.07	0.27	0.01	-0.69	0.01	0.00	0.00	0.00	-
05/21/14	12:30:00	AM	-0.54	-0.08	0.27	0.00	-0.69	0.01	0.00	-0.02	-0.01	-
05/21/14	12:40:00	AM	-0.45	-0.08	0.26	-0.01	-0.69	0.01	-0.01	-0.01	-0.02	-
05/21/14	12:50:00	AM	-0.53	-0.09	0.26	-0.02	-0.69	0.00	-0.02	-0.04	-0.03	-
05/21/14	01:00:00	AM	-0.56	-0.09	0.25	-0.02	-0.69	-0.01	-0.03	-0.03	-0.04	-
05/21/14	01:10:00	AM	-0.59	-0.10	0.23	-0.03	-0.69	-0.02	-0.03	-0.03	-0.04	-
05/21/14	01:20:00	AM	-0.55	-0.10	0.22	-0.04	-0.69	-0.02	-0.04	-0.04	-0.05	-
05/21/14	01:30:00	AM	-0.49	-0.10	0.21	-0.04	-0.69	-0.03	-0.05	-0.05	-0.05	-
05/21/14	01:40:00	AM	-0.59	-0.10	0.20	-0.05	-0.69	-0.03	-0.06	-0.04	-0.06	-
05/21/14	01:50:00	AM	-0.34	-0.09	0.20	-0.07	-0.69	-0.03	-0.06	-0.07	-0.06	-
05/21/14	02:00:00	AM	-0.50	-0.10	0.20	-0.06	-0.69	-0.05	-0.06	-0.05	-0.07	-
05/21/14	02:10:00	AM	-0.48	-0.10	0.19	-0.07	-0.69	-0.05	-0.07	-0.05	-0.07	-
05/21/14	02:20:00	AM	-0.34	-0.10	0.18	-0.07	-0.69	-0.05	-0.07	-0.07	-0.09	-
05/21/14	02:30:00	AM	-0.60	-0.10	0.18	-0.10	-0.69	-0.05	-0.08	-0.11	-0.09	-
05/21/14	02:40:00	AM	-0.50	-0.11	0.18	-0.08	-0.69	-0.06	-0.08	-0.10	-0.09	-
05/21/14	02:50:00	AM	-0.34	-0.11	0.15	-0.09	-0.69	-0.07	-0.09	-0.08	-0.09	-
05/21/14	03:00:00	AM	-0.20	-0.10	0.15	-0.09	-0.69	-0.08	-0.09	-0.10	-0.10	-
05/21/14	03:10:00	AM	-0.44	-0.10	0.16	-0.09	-0.69	-0.07	-0.09	-0.11	-0.11	-
05/21/14	03:20:00	AM	-0.32	-0.09	0.15	-0.09	-0.69	-0.08	-0.09	-0.06	-0.11	-
05/21/14	03:30:00	AM	-0.30	-0.09	0.15	-0.09	-0.69	-0.08	-0.09	-0.12	-0.12	-
05/21/14	03:40:00	AM	-0.25	-0.09	0.17	-0.11	-0.69	-0.09	-0.09	-0.07	-0.11	-



Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado y su relación con el mar



05/21/14	03:50:00	AM	-0.19	-0.08	0.18	-0.11	-0.69	-0.09	-0.09	-0.09	-0.11	0.17
05/21/14	04:00:00	AM	-0.43	-0.08	0.15	-0.10	-0.69	-0.10	-0.09	-0.09	-0.11	0.16
05/21/14	04:10:00	AM	-0.29	-0.07	0.16	-0.10	-0.69	-0.09	-0.08	-0.11	-0.11	0.15
05/21/14	04:20:00	AM	-0.56	-0.07	0.15	-0.10	-0.69	-0.10	-0.09	-0.08	-0.11	0.14
05/21/14	04:30:00	AM	-0.37	-0.06	0.15	-0.09	-0.69	-0.10	-0.09	-0.11	-0.10	0.13
05/21/14	04:40:00	AM	-0.25	-0.06	0.15	-0.09	-0.69	-0.10	-0.09	-0.07	-0.11	0.13
05/21/14	04:50:00	AM	-0.04	-0.05	0.17	-0.09	-0.69	-0.10	-0.09	-0.13	-0.10	0.12
05/21/14	05:00:00	AM	0.01	-0.03	0.18	-0.09	-0.69	-0.09	-0.09	-0.10	-0.10	0.11
05/21/14	05:10:00	AM	0.00	-0.02	0.17	-0.09	-0.69	-0.09	-0.07	-0.08	-0.10	0.10
05/21/14	05:20:00	AM	-0.05	0.00	0.16	-0.08	-0.69	-0.09	-0.06	-0.09	-0.10	0.09
05/21/14	05:30:00	AM	0.01	0.00	0.17	-0.07	-0.69	-0.09	-0.06	-0.09	-0.10	0.08
05/21/14	05:40:00	AM	0.01	0.00	0.16	-0.06	-0.69	-0.08	-0.06	-0.07	-0.09	0.07
05/21/14	05:50:00	AM	-0.07	0.01	0.16	-0.06	-0.69	-0.08	-0.05	-0.09	-0.09	0.06
05/21/14	06:00:00	AM	0.05	0.02	0.16	-0.05	-0.69	-0.08	-0.04	-0.04	-0.08	0.05
05/21/14	06:10:00	AM	0.20	0.03	0.19	-0.03	-0.69	-0.07	-0.04	-0.06	-0.08	0.04
05/21/14	06:20:00	AM	0.21	0.04	0.20	-0.02	-0.69	-0.07	-0.03	-0.06	-0.07	0.03
05/21/14	06:30:00	AM	0.06	0.05	0.20	-0.01	-0.69	-0.06	-0.02	-0.04	-0.07	0.02
05/21/14	06:40:00	AM	0.30	0.06	0.20	-0.01	-0.69	-0.06	-0.02	-0.03	-0.06	0.01
05/21/14	06:50:00	AM	-0.04	0.07	0.19	-0.01	-0.69	-0.05	0.00	-0.01	-0.05	0.00
05/21/14	07:00:00	AM	0.16	0.09	0.19	0.00	-0.69	-0.04	0.02	0.00	-0.04	0.01
05/21/14	07:10:00	AM	0.37	0.08	0.19	0.01	-0.69	-0.03	0.03	0.01	-0.03	0.02
05/21/14	07:20:00	AM	0.17	0.10	0.19	0.02	-0.69	-0.03	0.03	0.02	-0.02	0.03
05/21/14	07:30:00	AM	0.36	0.09	0.20	0.03	-0.69	-0.02	0.04	0.03	-0.01	0.03
05/21/14	07:40:00	AM	0.28	0.11	0.20	0.04	-0.69	-0.01	0.04	0.03	0.00	0.04
05/21/14	07:50:00	AM	0.26	0.12	0.21	0.05	-0.69	0.01	0.05	0.04	0.01	0.05
05/21/14	08:00:00	AM	0.28	0.12	0.21	0.05	-0.69	0.01	0.06	0.05	0.01	0.06
05/21/14	08:10:00	AM	0.60	0.14	0.20	0.06	-0.69	0.02	0.07	0.06	0.02	0.07



Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado y su relación con el mar



05/21/14	08:20:00	AM	0.61	0.14	0.20	0.07	-0.69	0.04	0.08	0.07	0.03	0.07
05/21/14	08:30:00	AM	0.59	0.16	0.20	0.08	-0.69	0.04	0.10	0.08	0.04	0.08
05/21/14	08:40:00	AM	0.60	0.16	0.20	0.08	-0.69	0.06	0.11	0.10	0.05	0.08
05/21/14	08:50:00	AM	0.56	0.17	0.21	0.10	-0.69	0.06	0.11	0.11	0.06	0.09
05/21/14	09:00:00	AM	0.67	0.16	0.22	0.10	-0.69	0.07	0.12	0.12	0.07	0.09
05/21/14	09:10:00	AM	0.40	0.17	0.22	0.11	-0.69	0.08	0.13	0.12	0.07	0.09
05/21/14	09:20:00	AM	0.63	0.17	0.21	0.12	-0.69	0.09	0.14	0.12	0.08	0.10
05/21/14	09:30:00	AM	0.38	0.17	0.20	0.13	-0.69	0.10	0.15	0.13	0.09	0.10
05/21/14	09:40:00	AM	0.44	0.17	0.20	0.14	-0.69	0.10	0.15	0.14	0.09	0.10
05/21/14	09:50:00	AM	0.42	0.17	0.20	0.14	-0.69	0.11	0.16	0.15	0.10	0.10
05/21/14	10:00:00	AM	0.33	0.18	0.20	0.14	-0.69	0.11	0.17	0.15	0.11	0.10
05/21/14	10:10:00	AM	0.42	0.17	0.21	0.15	-0.69	0.12	0.17	0.17	0.11	0.10
05/21/14	10:20:00	AM	0.58	0.17	0.21	0.15	-0.69	0.12	0.18	0.17	0.12	0.10
05/21/14	10:30:00	AM	0.38	0.17	0.21	0.15	-0.69	0.13	0.19	0.17	0.13	0.10
05/21/14	10:40:00	AM	0.35	0.17	0.20	0.16	-0.69	0.14	0.18	0.17	0.14	0.10
05/21/14	10:50:00	AM	0.28	0.16	0.19	0.17	-0.69	0.14	0.19	0.18	0.14	0.10
05/21/14	11:00:00	AM	0.40	0.16	0.18	0.17	-0.69	0.15	0.18	0.19	0.14	0.10
05/21/14	11:10:00	AM	0.47	0.15	0.17	0.16	-0.69	0.15	0.18	0.18	0.14	0.09
05/21/14	11:20:00	AM	0.42	0.15	0.17	0.16	-0.69	0.15	0.19	0.19	0.14	0.09
05/21/14	11:30:00	AM	0.18	0.14	0.17	0.16	-0.69	0.15	0.19	0.18	0.14	0.09
05/21/14	11:40:00	AM	0.60	0.14	0.16	0.16	-0.69	0.16	0.18	0.18	0.15	0.08
05/21/14	11:50:00	AM	0.63	0.14	0.16	0.15	-0.69	0.16	0.18	0.19	0.14	0.08
05/21/14	12:00:00	PM	0.69	0.14	0.15	0.16	-0.69	0.16	0.18	0.18	0.14	0.07
05/21/14	12:10:00	PM	0.04	0.13	0.15	0.15	-0.69	0.16	0.17	0.17	0.14	0.07
05/21/14	12:20:00	PM	0.44	0.13	0.15	0.15	-0.69	0.15	0.17	0.18	0.13	0.07
05/21/14	12:30:00	PM	0.36	0.12	0.15	0.15	-0.69	0.14	0.16	0.17	0.13	0.06
05/21/14	12:40:00	PM	0.32	0.11	0.14	0.14	-0.69	0.14	0.15	0.17	0.13	0.06
05/21/14	12:50:00	PM	0.19	0.10	0.13	0.15	-0.69	0.14	0.15	0.15	0.12	0.05
05/21/14	01:00:00	PM	-0.08	0.08	0.12	0.13	-0.69	0.13	0.14	0.14	0.11	0.05
05/21/14	01:10:00	PM	0.37	0.09	0.11	0.13	-0.69	0.13	0.14	0.13	0.10	0.04
05/21/14	01:20:00	PM	-0.36	0.07	0.11	0.13	-0.69	0.13	0.14	0.15	0.11	0.04
05/21/14	01:30:00	PM	0.24	0.06	0.10	0.12	-0.69	0.11	0.13	0.10	0.09	0.04
05/21/14	01:40:00	PM	0.17	0.08	0.10	0.12	-0.69	0.11	0.12	0.14	0.08	0.03
05/21/14	01:50:00	PM	0.01	0.07	0.10	0.11	-0.69	0.11	0.12	0.09	0.09	0.03
05/21/14	02:00:00	PM	0.28	0.06	0.09	0.08	-0.69	0.10	0.10	0.14	0.08	0.02
05/21/14	02:10:00	PM	0.10	0.05	0.08	0.07	-0.69	0.09	0.09	0.11	0.10	0.02
05/21/14	02:20:00	PM	-0.19	0.05	0.07	0.09	-0.69	0.08	0.09	0.10	0.08	0.02
05/21/14	02:30:00	PM	0.06	0.05	0.08	0.10	-0.69	0.08	0.09	0.10	0.08	0.02
05/21/14	02:40:00	PM	0.18	0.05	0.07	0.08	-0.69	0.07	0.08	0.04	0.06	0.01
05/21/14	02:50:00	PM	0.00	0.05	0.08	0.07	-0.69	0.06	0.08	0.08	0.07	0.01
05/21/14	03:00:00	PM	0.33	0.04	0.06	0.08	-0.69	0.06	0.07	0.05	0.04	0.01



Funcionamiento hidráulico de la laguna de Alvarado y su relación con el mar

05/21/14	03:10:00	PM	0.15	0.04	0.07	0.06	-0.69	0.06	0.06	0.12	0.05	0.01
05/21/14	03:20:00	PM	0.06	0.05	0.07	0.07	-0.69	0.06	0.07	0.09	0.03	0.01
05/21/14	03:30:00	PM	0.15	0.04	0.07	0.07	-0.69	0.05	0.07	0.08	0.05	0.01
05/21/14	03:40:00	PM	-0.28	0.04	0.07	0.06	-0.69	0.04	0.07	0.10	0.04	0.00
05/21/14	03:50:00	PM	0.23	0.03	0.08	0.06	-0.69	0.03	0.06	0.07	0.05	0.00
05/21/14	04:00:00	PM	-0.13	0.03	0.08	0.05	-0.69	0.05	0.06	0.09	0.03	0.00
05/21/14	04:10:00	PM	-0.03	0.02	0.07	0.05	-0.69	0.04	0.06	0.11	0.05	0.00
05/21/14	04:20:00	PM	0.12	0.03	0.07	0.06	-0.69	0.05	0.07	0.05	0.06	0.00
05/21/14	04:30:00	PM	0.31	0.03	0.07	0.05	-0.69	0.06	0.07	0.09	0.04	0.01
05/21/14	04:40:00	PM	-0.10	0.03	0.08	0.07	-0.69	0.04	0.06	0.09	0.07	0.01
05/21/14	04:50:00	PM	0.20	0.03	0.09	0.04	-0.69	0.02	0.06	0.06	0.04	0.01
05/21/14	05:00:00	PM	-0.13	0.03	0.10	0.04	-0.69	0.06	0.07	0.14	0.04	0.01