



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

**BALANCE HIDRODINÁMICO EN HUMEDALES COSTEROS Y SU VALOR COMO
ELEMENTO DE PROTECCIÓN LITORAL**

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

PRESENTA:
VALERIA CHÁVEZ CERÓN

TUTOR PRINCIPAL
EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
COMITÉ TUTOR
RODOLFO SILVA CASARÍN, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
OSCAR FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM
MARÍA LUISA MARTÍNEZ VÁZQUEZ, INECOL

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ramón Domínguez Mora

Secretario: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Vocal: Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

1^{er.} Suplente: Dr. Rodolfo Silva Casarín

2^{d o.} Suplente: Dra. María Luisa Martínez Vázquez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Edgar Mendoza Baldwin, por su dirección e invaluable enseñanzas recibidas a lo largo de la realización de este trabajo.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín, por el apoyo brindado durante todos los años que he tenido el privilegio de colaborar en su grupo.

A todos aquellos que participaron en los trabajos de campo realizados a lo largo de esta investigación: mis compañeros del Grupo de Costas y Puertos del IIUNAM, los pobladores de La Mancha, y el personal del Instituto de Ecología y de la estación de CICOLMA. En especial al M.C. Víctor Manuel Vásquez Reyes por su orientación y colaboración, y a la Dra. Ma. Luisa Martínez por su apoyo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo de beca recibido (262940) para la realización de mis estudios de posgrado.

RESUMEN

Los humedales se consideran sistemas muy productivos a nivel mundial, pues cuentan con una importante diversidad biológica y son fuentes de agua y materia orgánica de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir. Un beneficio adicional que se obtiene de la presencia de humedales costeros es la reducción del riesgo por inundación y erosión en la costa. En esta investigación, se buscó caracterizar la protección física que brindan los humedales contra inundaciones, partiendo del monitoreo de los procesos físicos determinantes en el sistema y la estimación de su balance hidrodinámico, teniendo como caso de estudio la laguna de La Mancha, Veracruz, México. Se planteó y ejecutó una base metodológica que puede ser aplicada a cualquier humedal para adquirir los datos y la información necesaria que permitan desarrollar un análisis inicial. Luego, el éxito de las recomendaciones que pudieran derivar de los estudios, dependerá de la realización de un programa de monitoreo permanente que ofrezca flexibilidad y certeza al manejo integrado del humedal, así como atinencia con los balances naturales del mismo. De esta manera, será posible conservar los valores que proveen los ecosistemas a la comunidad y permitir un uso resiliente y adaptativo de las costas.

ABSTRACT

Wetlands are considered very productive systems worldwide, because are biological diverse and are sources of water and organic matter of which innumerable plant and animal species depend for subsistence. An additional benefit that is obtained from the presence of coastal wetlands is the reduction of risk due to flooding and erosion on the coast. In this research, we sought to characterize the physical protection provided by wetlands against floods, based on the monitoring of the physical processes that determine the system and the estimation of its hydrodynamic balance, taking as a case study the lagoon of La Mancha, Veracruz, Mexico. A methodological base was proposed and executed that can be applied to any wetland to acquire the necessary data and information that will allow an initial analysis to be developed. Then, the success of the recommendations that could derive from the studies, will depend on the realization of a permanent monitoring program that offers flexibility and certainty to the integrated management of the wetland, as well as relevance to the natural balances of the same. In this way, it will be possible to conserve the values that the ecosystems provide to the community and allow a resilient and adaptive use of the coasts.

CONTENIDO

I.	Introducción.....	1
I.1	Objetivos.....	4
I.1.1	Objetivo General.....	4
I.1.2	Objetivos particulares.....	4
I.2	Organización del trabajo.....	5
II.	Zona de estudio.....	6
II.1	Estudios previos.....	8
II.2	Temporadas climáticas.....	10
II.2.1	Años Tipo.....	13
II.3	Clima marítimo.....	14
II.4	Funciones y valores.....	16
III.	Monitoreo.....	17
III.1	Monitoreo de humedales.....	17
III.2	Procesos físicos en una laguna costera.....	19
III.2.1	Balance hídrico.....	21
III.3	Fechas de monitoreo en L a Mancha.....	22
III.4	Actividades.....	22
III.5	Métodos y Resultados del monitoreo.....	24
III.5.1	Datos topo-batimétricos.....	24
III.5.2	Muestreo de sedimentos en la playa y en la boca lagunar.....	26
III.5.3	Parámetros fisicoquímicos en la laguna.....	27
III.5.4	Descarga superficial.....	30
III.5.5	Descarga subterránea.....	31
IV.	Caracterización hidrodinámica.....	42
IV.1	Hidrología.....	42
IV.1.1	Cuenca hidrográfica.....	42
IV.1.2	Balance Hídrico Climatológico.....	42
IV.2	Hidrogeología.....	55

IV.2.1	Datos del acuífero	55
IV.2.2	Recarga y descarga	56
IV.2.3	Gastos subterráneos por unidad de espesor del acuífero	57
IV.2.4	Modelo de flujo subterráneo.....	59
IV.3	Circulación en la laguna	65
V.	Conclusiones	72
	Referencias.....	75
	Anexo: Análisis estadístico del oleaje para la zona de estudio: gráficas	78

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Clasificación de humedales (modificada de <i>WetlandInfo</i>).....	2
Figura 2. Clasificación de las funciones y valores de los humedales (modificado de Cervantes, 2007)	3
Figura 3. Laguna de La Mancha, Veracruz, México: localización (imagen modificada de Digital Globe, junio 2012)	7
Figura 4. Tipos de vegetación en la laguna de La Mancha	7
Figura 5. Precipitación media mensual	11
Figura 6. Frecuencia horaria de huracanes.....	11
Figura 7. Frecuencia horaria de nortes	12
Figura 8 Temporadas climáticas en La Mancha.....	12
Figura 9. Precipitación anual y máxima anual por tormenta, de 1984 a 2007 (años con registro completos en la estación 30353).....	13
Figura 10. Altura de ola significativa y periodo asociado promedio mensuales.....	14
Figura 11. Elementos fundamentales del monitoreo (modificado de Abarca, 2007)	17
Figura 12. Forzamientos en lagunas costeras, relevantes en tiempo y espacio (modificado de Miller <i>et al.</i> , 1990)	20
Figura 13. Balance hídrico en una laguna costera	21
Figura 14. Fechas de monitoreo realizadas en La Mancha	22
Figura 15. Puntos medidos de topografía y batimetría durante las Campañas 1 a 4	24
Figura 16. Modelo digital de elevaciones de La Mancha (en coordenadas UTM)	26
Figura 17. Variación del D ₅₀ en la playa y boca	27
Figura 18. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 3	28
Figura 19. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 4	29
Figura 20. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 5	29
Figura 21. Localización de los puntos de aforo en el Caño Gallegos	30
Figura 22. Gastos aforados	31
Figura 23 Diámetro característico para los aforos.....	31
Figura 24. Instalación de los piezómetros en el manglar	32
Figura 25. Niveles monitoreados en los piezómetros.....	33
Figura 26. Cargas piezométricas del ciclo anual de monitoreo	34
Figura 27. Evolución de los perfiles en los piezómetros de las baterías B01 a B06	35
Figura 28. Evolución de los perfiles en los piezómetros de las baterías B07 a B12	36
Figura 29. Variaciones de la salinidad por sectores de baterías de piezómetros	37
Figura 30. Vinculación marea-registro de cargas piezométricas, Campañas 3 y 4	38
Figura 31. Vinculación marea-registro de cargas piezométricas, Campañas 5 y 6	39
Figura 32. Diámetro característico en las baterías de piezómetros	40
Figura 33. Prueba slug B09-P2	40
Figura 34. Prueba slug B02-P1	40
Figura 35. Prueba slug B10-P1	41

Figura 36. Cuenca Arroyo Caño Gallegos	42
Figura 37. Precipitación diaria para 2014 y 2015.....	43
Figura 38. Precipitación y evaporación mensuales para 2014 y 2015.....	43
Figura 39. Precipitación y ETP (estimada) mensuales para 2014 y 2015	44
Figura 40. Balance hídrico climatológico datos del 2014.....	47
Figura 41. Balance hídrico climatológico datos del 2015.....	47
Figura 42. Balance hídrico climatológico datos de 1981 a 2015.....	48
Figura 43. Instalación del HOBO® Data Logging Rain Gauge - RG3-M	48
Figura 44. Recuento de eventos del pluviómetro	49
Figura 45. Curva masa de precipitación	49
Figura 46. Curvas de precipitación acumulada por tormenta	50
Figura 47. Esquema e instalación del CTD	53
Figura 48. Variación de niveles registrada con el Keller CTD.....	54
Figura 49. Tormentas y variación de niveles en la laguna.....	54
Figura 50. Localización del acuífero Valle de Actopan y profundidad del nivel estático del año 1992 (tomado de CONAGUA, 2009)	55
Figura 51. Rocas 1:250 000 (INEGI)	59
Figura 52. Fronteras del modelo en GMS.....	60
Figura 53. Malla rectangular en GMS	60
Figura 54. Estimación de la pendiente del manto rocoso	61
Figura 55. Malla delimitada por las fronteras seleccionadas y la superficie topográfica	62
Figura 56. Cargas iniciales en los nodos	63
Figura 57. Cargas dentro de la malla.....	64
Figura 58. Comparación de datos medidos contra el pronóstico de marea.....	65
Figura 59. Serie de tiempo de marea utilizada como forzamiento para el modelo	65
Figura 60. Dominio para la modelación numérica.....	66
Figura 61. Ubicación de los puntos de observación	66
Figura 62. Comparación: modelación numérica y datos medidos	67
Figura 63. Series de tiempo de la modelación numérica.....	68
Figura 64. Momentos analizados de la señal de marea para los resultados de la modelación	68
Figura 65. Distribución espacial de la elevación de la superficie libre (coordenadas UTM) ...	69
Figura 66. Distribución espacial de la velocidad: Vaciante	69
Figura 67. Distribución espacial de la velocidad: Bajamar.....	70
Figura 68. Distribución espacial de la velocidad: Llenante	70
Figura 69. Distribución espacial de la velocidad: Pleamar.....	71
Figura 70. Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa anual y por temporadas para todo el registro	78
Figura 71. Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa anual para años tipo	79
Figura 72. Frecuencia de altura de ola significativa por mes	79

Figura 73. Rosas de oleaje anual y por temporadas ($H > 2.5$ m).....	80
Figura 74. Rosas de oleaje anual para años tipo ($H > 2.5$ m).....	81
Figura 75. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo.....	82
Figura 76. Probabilidad conjunta de altura de ola y dirección de propagación.....	83
Figura 77. Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos anual y por temporadas para todo el registro.....	84
Figura 78. Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos anual para años tipo.....	84
Figura 79. Rosas de viento anual y por temporadas.....	85
Figura 80. Rosas de viento anual y por temporadas ($V > 10$ m/s).....	85
Figura 81. Rosas de viento anual para años tipo ($V > 10$ m/s).....	86
Figura 82. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia anual y por temporadas.....	86
Tabla 1. Datos medios mensuales de precipitación (hp) y evaporación (e), temperatura máxima ($T_{máx}$) y mínima ($T_{mín}$), y precipitación máxima ($hpmáx$) en La Mancha.....	10
Tabla 2. Precipitación anual ($hpanual$) y máxima anual por tormenta ($hpmáx$) de los Años Tipo en La Mancha.....	13
Tabla 3. Parámetros estadísticos del clima marítimo.....	14
Tabla 4. Actividades de monitoreo en las Campañas 1 (C1) a las 6 (C6).....	23
Tabla 5. Localización de los piezómetros.....	32
Tabla 6 Características de la cuenca.....	42
Tabla 7. Estimación de ETP.....	45
Tabla 8. Balance hídrico climatológico para 2014 y 2015.....	46
Tabla 9. Balance hídrico climatológico datos de 1981 a 2015.....	47
Tabla 10. Fecha y hora de inicio de las tormentas registradas.....	50
Tabla 11. Características del acuífero.....	56
Tabla 12. Gastos subterráneos por unidad de espesor del acuífero.....	58
Tabla 13 Tipo de fronteras.....	60

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los humedales son zonas en los cuales el agua es el principal factor controlador del medio biofísico. De acuerdo al Artículo 1.1 de la Convención sobre humedales de importancia internacional Ramsar, a la cual México pertenece desde el año 1985, los humedales son “extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros”.

Conservación Internacional de México (CI) determina una clasificación de los ecosistemas con base en la diversidad de ambientes acuáticos, costeros y marinos que existen en México, considerando su ubicación geográfica y tipo de cuerpo de agua, su extensión y otras características relevantes. Esta clasificación, esencialmente tipológica, muestra tres diferentes grupos de humedales con base en el sistema acuático al que pertenecen, con el objeto de facilitar su identificación (Figura 1):

1. Humedales interiores – lóticos (río, arroyo y petén) y lénticos (embalse, cenote, ciénega, lago y laguna)
2. Humedales costeros – marisma, manglar, estero, estuario, laguna costera y bahía
3. Humedales marinos – arrecife

Según la estimación del PNUMA-Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación, la superficie terrestre con presencia de humedales es de aproximadamente 570 millones de hectáreas. En México, alrededor del 5 % de la superficie del territorio nacional está cubierta por complejo de humedales y humedales (SEMARNAT, 2013). Se estima que 1 567 000 hectáreas corresponden a superficies estuáricas o humedales costeros (Contreras, 1993) y 1 751 500 hectáreas a humedales continentales, incluyendo algunos artificiales (de la Lanza y García, 1995). La superficie continental y el perímetro litoral de la República Mexicana están cubiertos en un 16.8 % por humedales. Se calcula que el 35 % de los humedales y ecosistemas de aguas profundas en México ha sufrido algún deterioro, se ha modificado sensiblemente o simplemente se ha perdido; esto representa alrededor de 1 161 475 hectáreas (Cervantes, 2007). Por otro lado, México cuenta con 142 humedales de importancia internacional inscritos en la Convención Ramsar, a octubre de 2018, los cuales abarcan 8 657 057 hectáreas (Ramsar, 2018).

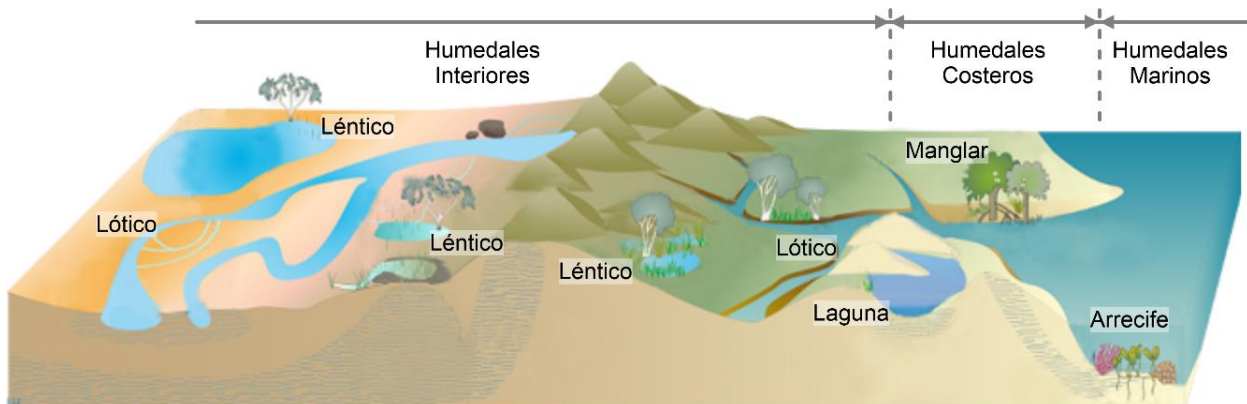


Figura 1. Clasificación de humedales (modificada de *WetlandInfo*)

Los humedales se consideran sistemas muy productivos a nivel mundial, pues cuentan con una importante diversidad biológica y son fuentes de agua y materia orgánica de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir (Mitsch y Gosselink, 2000). En años recientes, con especial interés, las múltiples funciones de los humedales y su valor para la humanidad, se han llegado a comprender y documentar (EPA, 2001; SEMARNAT, 2013). Por ello, las actividades antropogénicas que se desarrollan en estos ecosistemas, la crisis hídrica y los efectos del cambio climático, han motivado a numerosas acciones que buscan regular las actividades y actuaciones que se llevan a nivel mundial, para así restablecer las funciones hidrológicas y biológicas de humedales degradadas o interrumpidas (Mitsch y Gosselink, 2000).

Dentro de los servicios que brindan los humedales, pueden mencionarse: abastecimiento de agua (cantidad y calidad); pesca (más de dos tercios de las capturas mundiales de peces están vinculadas a la salud de los humedales costeros y continentales); agricultura, gracias a la facilidad de recarga de las capas freáticas en ellos y a la retención de nutrientes en las llanuras aluviales; producción de madera; recursos energéticos, como turba y materia vegetal; recursos de vida silvestre; transporte; y posibilidades de recreación y turismo. Además, los humedales poseen atributos especiales como parte del patrimonio cultural de la humanidad, pues están asociados a creencias religiosas y cosmológicas, formando parte de importantes tradiciones locales. Un beneficio adicional que se obtiene de la presencia de humedales costeros es la reducción del riesgo por inundación y erosión en la costa (Dohmen-Janssen *et al.*, 2012; TNC, 2014; Zhou *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2015). En la Figura 1 se presenta un esquema, modificado de Cervantes (2007), el cual proporciona una clasificación de funciones y valores de los humedales.

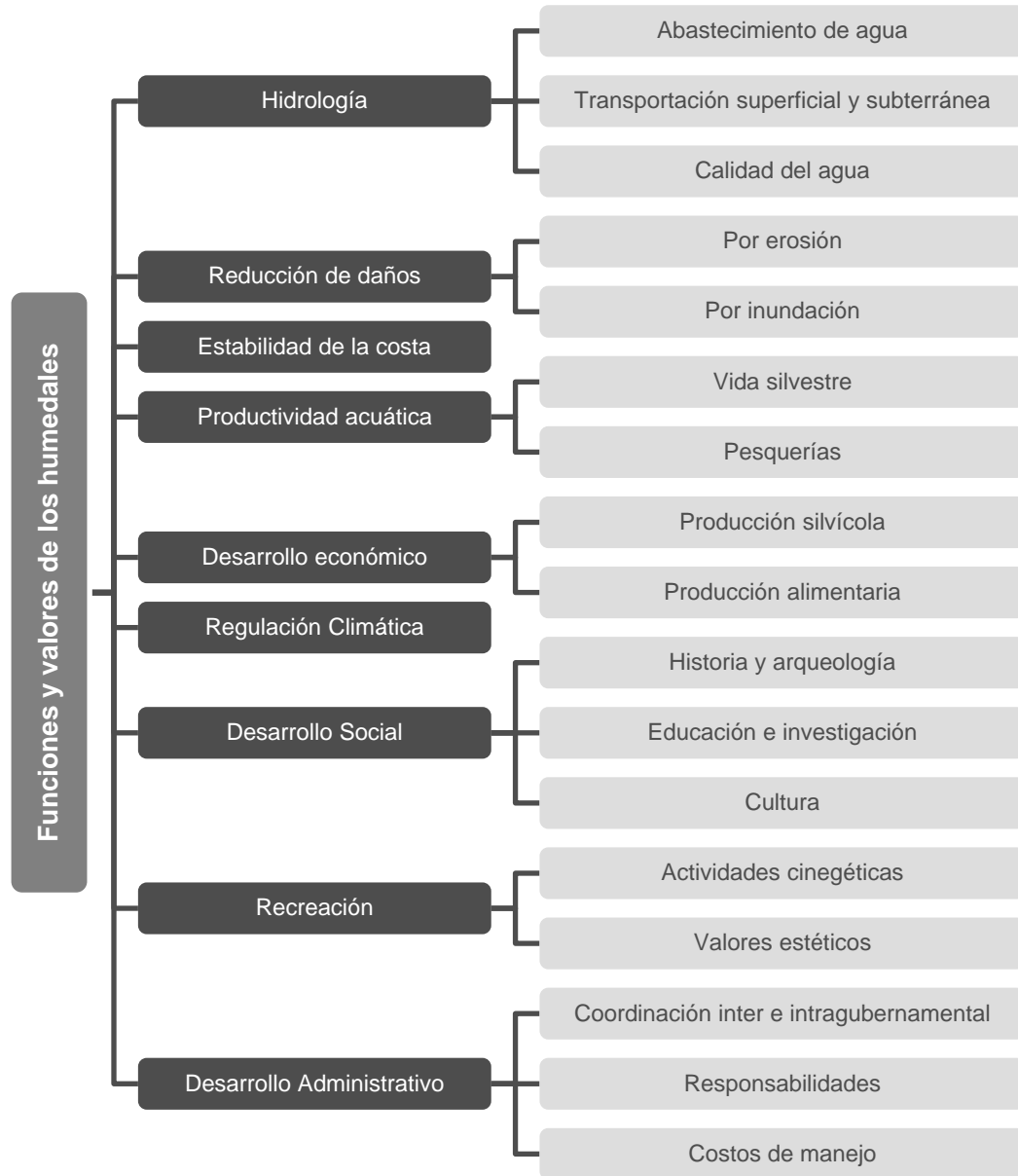


Figura 2. Clasificación de las funciones y valores de los humedales (modificado de Cervantes, 2007)

Legislación para la protección de humedales

En todo el mundo, la identificación de los beneficios que brindan los humedales ha derivado en el establecimiento de legislaciones para su protección. En México, el marco legal e institucional relacionado con la gestión ambiental, responsable de la prevención, preservación y protección de los humedales y otros ecosistemas acuáticos es complejo. En términos generales, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) es la autoridad responsable de establecer los instrumentos de política ambiental para proteger y conservar las diversas especies que pueden existir en un ecosistema acuático; la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), es responsable de la gestión de los cuerpos de agua en sí mismos; y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), tiene a su cargo la vigilancia del cumplimiento de la normatividad ambiental.

En materia de protección al ambiente en su conjunto, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) es el principal ordenamiento jurídico vigente en México, la cual fue publicada en 1988. La generalidad del contenido de la legislación ambiental es complementada por Normas Oficiales Mexicanas (NOM) (artículos 36 al 37 bis de la LGEEPA). Las NOM, anteriormente denominadas Normas Técnicas Ecológicas, de acuerdo con el artículo 36 de la LGEEPA buscan, garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas y son emitidas por la SEMARNAT. La Norma Oficial Mexicana de mayor importancia para la gestión y preservación de los humedales es la NOM-022-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Es importante señalar que existe un amplio número de NOM que pueden vincularse a la gestión de manglares, humedales y otros ecosistemas acuáticos, tales como: NOM-059-ECOL-2001 (Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres-categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-lista de especies en riesgo.); la NOM-061-ECOL-1994 (Especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en la flora y fauna silvestres por el aprovechamiento forestal) y la NOM-126-ECOL-2000 (Especificaciones para la realización de actividades de colecta científica de material biológico de especies de flora y fauna silvestres y otros recursos biológicos en el territorio nacional), entre otras.

Así mismo, la Ley General de Cambio Climático (LGCC) del año 2012 y reformada en 2018, aborda la importancia de la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad, dando prioridad a los humedales, manglares, arrecifes, dunas, zonas y lagunas costeras, que brindan servicios ambientales fundamentales para reducir la vulnerabilidad.

I.1 OBJETIVOS

I.1.1 Objetivo General

Estudiar la relación entre los elementos físicos e hídricos que interactúan en los humedales costeros para evaluar su capacidad de protección contra inundación y su contribución a la dinámica litoral.

I.1.2 Objetivos particulares

- A partir de muestreos topo-batimétricos, de tipo de suelo, cobertura vegetal y de parámetros hidrodinámicos, desarrollar una metodología de monitoreo de humedales para la evaluación de sus características físicas e hídricas.
- Caracterizar los intercambios hidráulicos entre el humedal y el mar.
- Caracterizar los intercambios hidráulicos entre el humedal y tierra.
- Realizar un análisis hidrodinámico integral del humedal.

- Determinar el nivel de protección costera brindado por la presencia del manglar.

I.2 ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo está organizado en cinco capítulos. En el primero de ellos se presenta una introducción que incluye la definición, clasificación e importancia de los humedales, así como los objetivos de la investigación.

En el Capítulo II, se hace una descripción de la zona de estudio, La Mancha, Veracruz, incluyendo datos de estudios previos, la definición de las temporadas climáticas, el clima marítimo, y los servicios que provee La Mancha a la comunidad.

La metodología propuesta y llevada a cabo para el monitoreo del sistema lagunar de La Mancha, realizado dentro de las actividades del Grupo de Ingeniería de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, además de los resultados obtenidos, se describen en el Capítulo III.

Los resultados de la caracterización hidrodinámica del sistema se presentan en el Capítulo IV y finalmente, en el Capítulo V se exponen las conclusiones del estudio y las futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO II

ZONA DE ESTUDIO

El humedal de La Mancha, ubicado en la zona central del estado de Veracruz, México, forma parte de la Lista de Humedales de Importancia Internacional Ramsar desde el 2 de febrero de 2004, y junto a la laguna de El Llano, ubicado 8 km al norte de La Mancha, suman 1 412 hectáreas. La Mancha es también considerada como sitio prioritario de conservación de manglares por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2008). La zona constituye una llanura acumulativa formada por sedimentos lacustres, fluviales y biogénicos, en ocasiones inter-estratificados con depósitos marinos. En la cubierta del suelo se pueden encontrar Arenosoles, Histosoles, Gleysoles, Solonchak y Fluvisoles, todos con características zonales del trópico húmedo. La vegetación se compone de bosque de mangles, selva tropical, herbazal de ciénaga tropical, vegetación secundaria, frutales, cultivos y pastos cultivados para la actividad ganadera (Hernández Trejo *et al.* 2006). El clima es del tipo Aw2 y se caracteriza por ser cálido subhúmedo (de humedad alta dentro de los climas Aw), con régimen de lluvias de verano (Vidal, 2005).

Dentro de La Mancha, la zona de estudio corresponde a la laguna y la zona costera y marina con la que interactúa, además del bosque de mangle que la rodea (Figura 3). La laguna costera de La Mancha cubre 132 ha, es salobre, poco profunda (< 3 m), y se encuentra en proceso natural de colmatación. En su morfología se identifica un estrechamiento central que divide a la laguna en dos sectores: norte y sur (Figura 3). La laguna se encuentra intermitentemente conectada con el mar a través de una sola boca, la cual presenta periodos de apertura y cierre a lo largo del año. La playa en la que se desemboca la laguna presenta dos cordones de dunas orientados en dirección norte-sur (recuadro A, Figura 3). El recambio de agua se lleva a cabo a través de corrientes de reflujo y es determinada por los Nortes, las descargas fluviales y pluviales, y la apertura inducida por los pescadores de la zona. Su régimen hidrológico consiste en aumento del nivel y baja salinidad mientras la boca se encuentra cerrada; cuando se abre, se favorece la disminución del nivel, aumento en la salinidad y acumulación de sedimento en el delta de marea (Psuty *et al.*, 2009). Las condiciones de salinidad varían entre oligohalinas y polihalinas. El principal aporte continental permanente es la descarga del Caño Gallegos, y también puede identificarse la descarga del Caño Juan Pérez. De acuerdo con la Secretaría de Marina (SEMAR), en esta área la marea es de tipo diurna, con un rango mareal de 0.48 m, determinado con datos medidos de 1999 a 2013. En perímetro continental, la laguna está rodeada por un bosque de mangle. Dentro de este bosque se pueden encontrar cuatro especies: mangle rojo (*Rhizophora mangle*), mangle negro (*Avicennia germinans*), mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) y mangle botoncillo (*Conocarpus erectus*) (Figura 4).

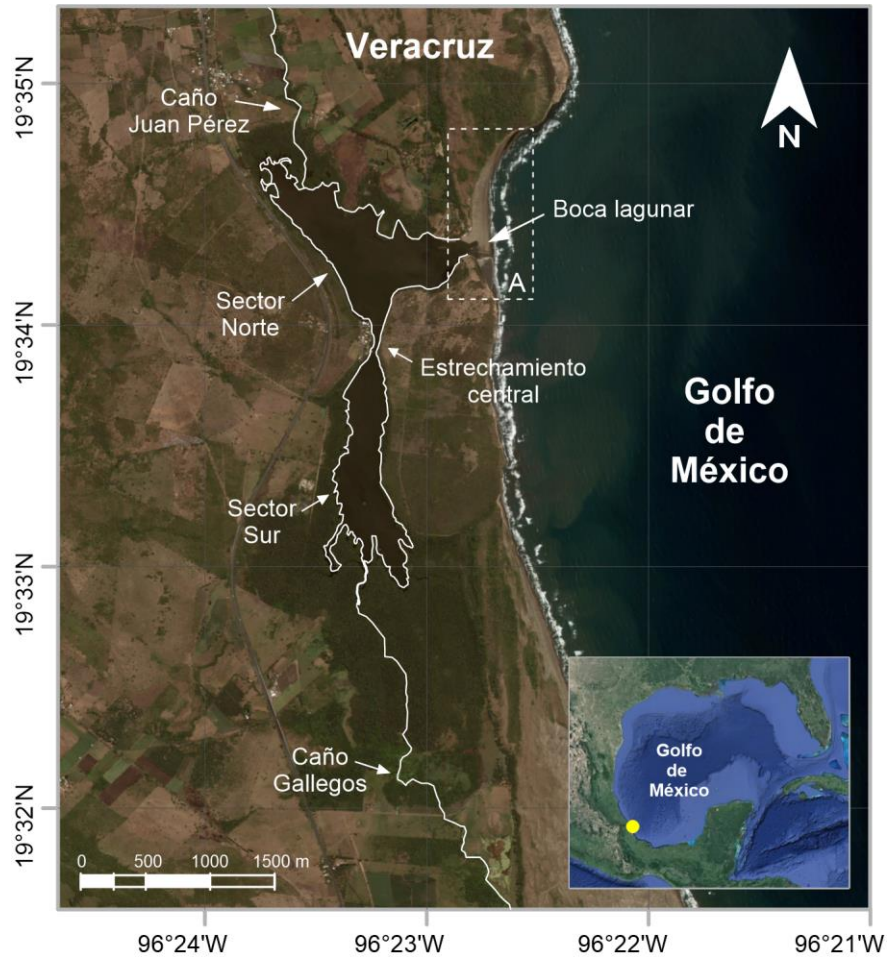


Figura 3. Laguna de La Mancha, Veracruz, México: localización (imagen modificada de Digital Globe, junio 2012)

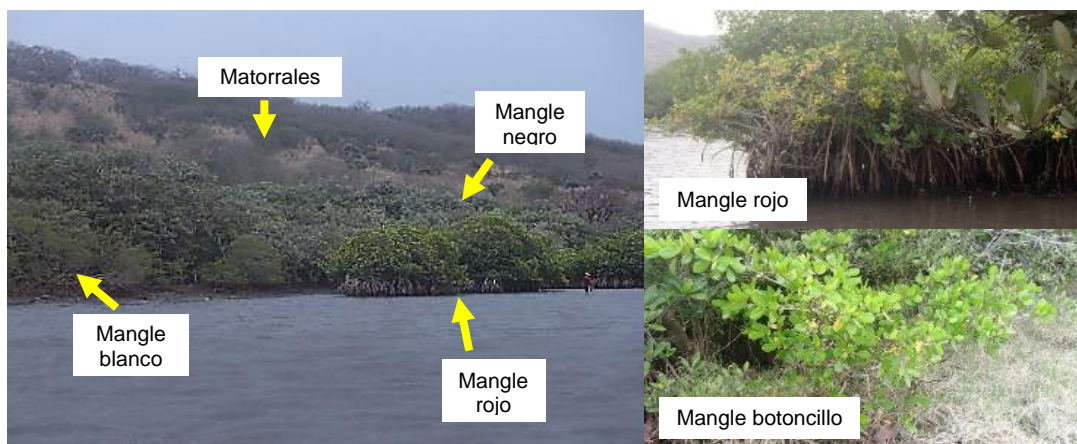


Figura 4. Tipos de vegetación en la laguna de La Mancha

II.1 ESTUDIOS PREVIOS

Numerosas investigaciones han sido realizadas en la zona de La Mancha desde la década de los años 70. En estos trabajos se ha abordado el estudio de la zona con la finalidad de analizar sus características ecológicas y biológicas, determinadas a partir de la presencia de fitoplancton, vegetación, productividad primaria, zooplancton, bentos, necton, aves y de contaminación, así como estudios sobre la actividad pesquera y acuicultura (González *et al.*, 1982; Barreiro *et al.*, 1990; Flores *et al.*, 1990; Barreiro *et al.*, 1993; Aramburu *et al.*, 1995; Hernández *et al.*, 1998; Cazares *et al.*, 2005; Borello *et al.*, 2001; por mencionar algunos). Por ser de mayor interés para la presente investigación, a continuación se detallan algunos trabajos que abordan aspectos de tipo geológico e hidrológico en la zona de estudio:

Matus *et al.* (1992), de 1984 a 1988, realizaron un estudio sistemático sobre la hidrología de la laguna y su relación con los aspectos climáticos. A partir de identificar comportamientos característicos en los valores de salinidad, temperatura y transparencia, se regionalizó la laguna en relación con la precipitación pluvial, evaporación y régimen de temperatura. Los datos fueron analizados mediante varias pruebas estadísticas. A partir de los registros meteorológicos se diferencian tres períodos climáticos Nortes (noviembre a febrero), secas (marzo a mayo) y lluvias (junio a octubre). Durante cada uno de ellos se identificaron comportamientos diferentes en cuanto al régimen hidrológico en la laguna encontrándose distintos patrones de regionalización respecto a cada una de las variables estudiadas y al conjunto de ellas. De acuerdo con sus resultados, la precipitación pluvial es la variable climática que más influye sobre la regionalización lagunar, y la salinidad es la variable hidrológica más relevante que diferencia las regiones.

Matus *et al.* (1994) bajo un enfoque geológico, analizaron el comportamiento espacio-temporal de las características sedimentológicas de la laguna. A partir de registros de 1991 a 1993 en las épocas secas, de lluvias y de nortes, determinaron la distribución de los tipos de granos del sedimento, batimetría, tasa de sedimentación y sólidos suspendidos en la laguna de la Mancha, Veracruz, México. Los resultados mostraron una fuerte variación temporal y espacial. Los tipos de sedimentos predominantes fueron los arcillo-limosos y limo-arcillosos, las arenas finas sólo se presentaron en las pequeñas regiones de alta energía: boca y afluente fluvial. La batimetría fue somera y presentó un canal de mareas, el cual se desplazó en los diferentes períodos climáticos. La tasa de sedimentación fue variable a lo largo del año, aunque siempre se mantuvo con valores elevados. Los resultados obtenidos manifestaron que la sedimentología de la laguna fue muy dinámica, exportando y recibiendo grandes cantidades de sólidos orgánicos e inorgánicos. En cuanto a la relación entre el aporte y erosión de sedimentos, se observó que la laguna presenta una tendencia gradual hacia el azolve total, que se aprecia principalmente en las áreas de aporte marino y fluvial.

Contreras *et al.* (2005) cuantificaron el volumen de agua que circula por la boca de la laguna y su composición química. Los muestreos se realizaron los meses de junio (boca abierta), agosto y octubre (boca cerrada), diciembre (boca abierta) y febrero (boca cerrada) de 2002 y 2003. El efecto de la apertura de la boca implica que la laguna pierda, a lo largo de este período (157 días)

1 148 000 m³ de su volumen original; cuando la boca se cierra, el incremento de agua hacia el interior del sistema se calcula en aproximadamente 950 400 m³. Cuando la laguna permaneció comunicada con el mar (del 23 de junio al 25 de noviembre), los parámetros medidos mostraron las siguientes medianas: la salinidad de 22.0 ups, el oxígeno disuelto 3.33 ml/l y un pH de 7.3. En cambio, cuando la laguna se encuentra incomunicada, la salinidad manifestó un descenso (16.5 ups), igualmente que la concentración de oxígeno (2.58 ml/l) y el pH fue ligeramente mayor (7.58).

Hernández *et al.* (2006) emplearon principios estructuro-genético e histórico-evolutivos que permitieron el levantamiento, clasificación y cartografía de los paisajes de manglares a escala detallada (1:25 000). Los resultados sugieren que el enfoque físico-geográfico complejo puede ser de gran utilidad para el inventario, caracterización y cartografía de manglares a escala detallada, brindando información sobre el tipo genético del relieve, composición litológica, periodicidad de inundación de las superficies, cobertura vegetal y suelos, lo cual es de inestimable valor para el ordenamiento ecológico y la preservación de estos ecosistemas.

Hernández (2009), tomando como base los resultados obtenidos durante la primera fase de su investigación (Hernández *et al.*, 2006), desde un punto de vista ecológico, realizó una descripción de los cambios en la estructura del manglar (distribución de tamaños, mortalidad acumulada y tipo de muerte) y se analizaron los cambios de cobertura y las tasas de modificación del manglar, con información del periodo comprendido entre 1964 y 2004.

Psuty *et al.* (2009) concluyeron que décadas atrás un abundante suministro de sedimento a lo largo de la costa provocó una apertura y cierre cíclico de la boca. El régimen hidrológico de la laguna consistió en un aumento del nivel del agua y una disminución de la salinidad durante los cierres, mientras que la apertura favorece un menor nivel de agua, mayor salinidad y acumulación de sedimento en el delta de inundación de marea. Actualmente, el suministro de sedimento a lo largo de la costa ha disminuido, afectando la morfología de la boca y el régimen de descargas. Esta variación morfológica fue realizada a partir del trazo de la línea de costa en fotografías aéreas de los años 1980, 1995 y 2006. Además, se realizó un análisis de opciones de manejo, concluyendo que existe un conflicto de intereses en cuanto a respaldar la dirección de los cambios en la dinámica de la zona o preservar los hábitats que existen actualmente.

II.2 TEMPORADAS CLIMÁTICAS

En la Tabla 2 se presentan datos promedio de precipitación, evaporación y temperatura, los cuales fueron obtenidos del registro histórico (1981 a 2008) de la estación climatológica 30353 La Mancha ubicada a 20 msnm (19°35'46" N 96°23'01" W), operada por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Tabla 1. Datos medios mensuales de precipitación (\overline{hp}) y evaporación (e), temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) y mínima ($T_{m\acute{i}n}$), y precipitación máxima ($hp_{m\acute{a}x}$) en La Mancha.

Mes	\overline{hp} (mm)	e (mm)	$T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$T_{m\acute{i}n}$ (°C)	$hp_{m\acute{a}x}$ (mm)
ENE	17.4	3.1	26.1	17.6	29.0
FEB	12.7	3.8	26.7	18.3	54.5
MAR	16.1	4.5	28.7	20.2	76.0
ABR	18.7	5.3	30.7	22.1	70.0
MAY	60.0	5.3	32.7	23.8	88.0
JUN	191	5.0	33.2	24.6	153
JUL	256	4.7	32.2	23.4	117
AGO	262	4.7	32.4	23.6	151
SEP	218	4.4	32.2	23.5	144
OCT	104	4.0	31.0	22.2	108
NOV	45.7	3.3	29.0	20.4	91.1
DIC	18.6	2.8	26.7	18.6	77.0

En la Figura 5 se presenta la precipitación media mensual; la zona sombreada indica los meses cuya precipitación es menor a la media de todo el registro (103.3 mm). Se observa que los meses de mayor precipitación son de junio a octubre, los cuales se designaron como los correspondientes a la temporada de lluvias.

A partir de la implementación del modelo híbrido WAM-HURAC (Silva *et al.*, 2009) se generaron, para los años 1948 a 2010, los datos horarios del Atlas del Clima Marítimo (velocidad de vientos sostenidos, altura de ola significativa, periodo medio, y sus direcciones de incidencia y arribo, respectivamente). De ellos se recopilaron los correspondientes a la celda ubicada en las coordenadas 19.75°N 96.00°W, localizada a 44 km de la boca de la laguna. Para la determinación de los meses en que se presentan huracanes en la zona, se cuantificó la cantidad de datos generados por el módulo HURAC del modelo, que corresponde a la frecuencia horaria de ocurrencia de huracanes en el periodo modelado, obteniendo los resultados de la Figura 6. Se observa que las mayores frecuencias, se presentan de agosto a octubre, coincidiendo con los meses de lluvias superiores al promedio.

Finalmente, para la determinación de los meses con presencia de Nortes se seleccionaron, de los datos del Atlas, aquellos vientos que tuvieran una dirección de incidencia predominantemente Norte y Noreste (-11.25 a 33.75° respecto al Norte) y una velocidad mayor a 50 km/h (equivalente a vientos fuertes de acuerdo a la escala de Beaufort). En la Figura 7 se observa la frecuencia horaria de nortes, siendo los valores más altos para los meses de noviembre a diciembre. De esta forma, los meses de abril y mayo corresponden a la temporada de secas. Matus (1992), limita estas mismas tres temporadas, difiriendo en el mes de marzo, el cual incorpora a la temporada de secas, a partir de un análisis realizado con datos de tres estaciones del Sistema Meteorológico Nacional de 1955 a 1990.

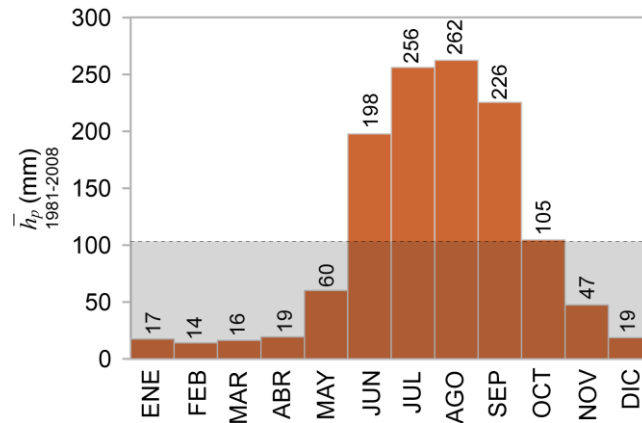


Figura 5. Precipitación media mensual

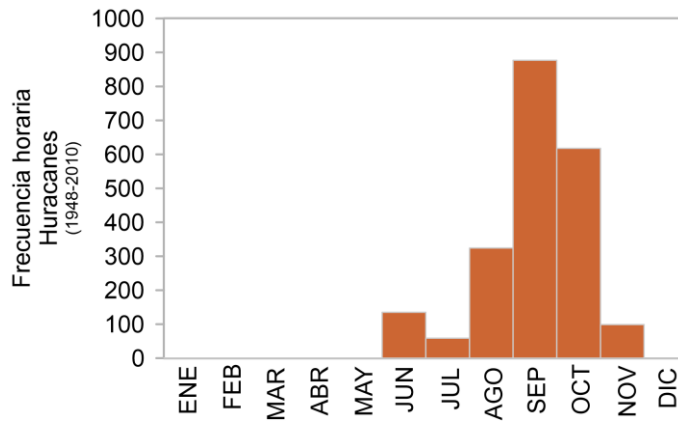


Figura 6. Frecuencia horaria de huracanes

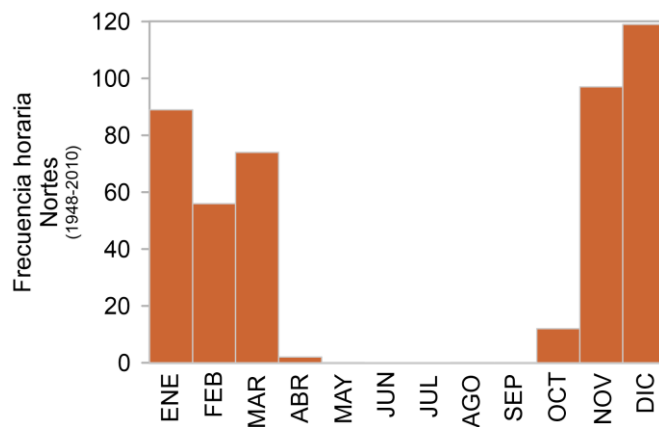


Figura 7. Frecuencia horaria de nortes

En la Figura 8 se muestran las temporadas climáticas delimitadas en La Mancha y una síntesis de los criterios empleados para ello.



Figura 8 Temporadas climáticas en La Mancha

II.2.1 Años Tipo

Además de la determinación de las temporadas climáticas, se seleccionaron tres Años Tipo en función del valor de precipitación diaria media anual: el año con la precipitación mayor, como Año Lluvioso; el de menor precipitación, como Año Seco; y uno de precipitación cercana al promedio, como el Año Medio. Estos años se seleccionaron de los datos de la estación 30353 del SMN de la CONAGUA (Figura 9). A partir de estos datos, podrá clasificarse el tipo de año en que se realice el monitoreo durante la presente investigación. De la Figura 9 se determina que el año lluvioso corresponde a 1992, el año medio a 2007 y el año seco a 2004, como se detalla en la Tabla 3.

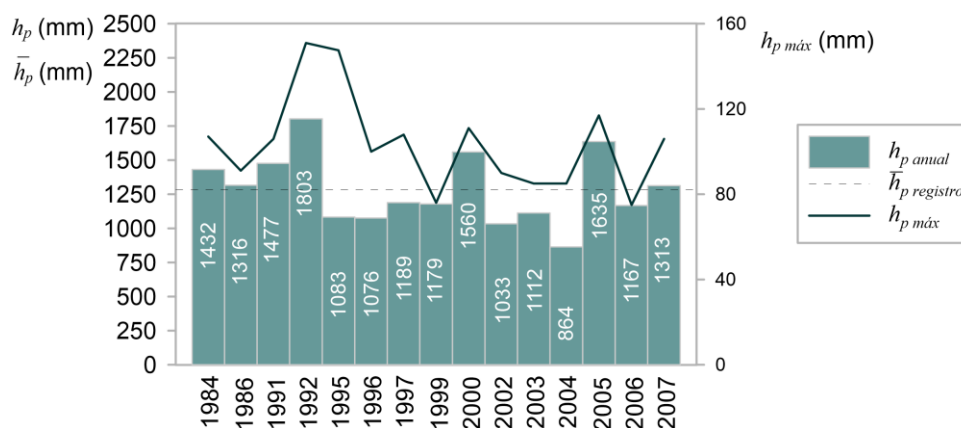


Figura 9. Precipitación anual y máxima anual por tormenta, de 1984 a 2007 (años con registro completos en la estación 30353)

Tabla 2. Precipitación anual ($h_{p\ anual}$) y máxima anual por tormenta ($h_{p\ máx}$) de los Años Tipo en La Mancha

Año	$h_{p\ anual}$ (mm)	$h_{p\ máx}$ (mm)
Lluvioso 1992	1803	151
Medio 2007	1313	106
Seco 2004	864	85

II.3 CLIMA MARÍTIMO

Como ya se mencionó, la caracterización del clima marítimo de la zona se realizó a partir de los datos del Atlas del Clima Marítimo, para los años 1948 a 2010. Del total de los datos del modelo, se obtuvieron la altura y periodo de ola significantes por mes, mostrados en la Figura 10. Se observa que las alturas de ola más altas se presentan en los meses correspondientes a la temporada de nortes y las menores durante los meses de lluvias. Otros parámetros estadísticos estimados del total de datos se presentan en la Tabla 3.

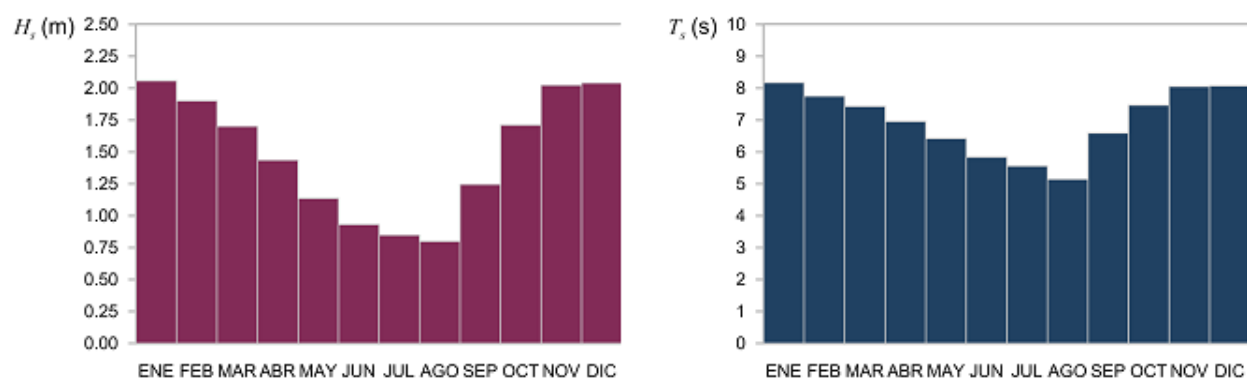


Figura 10. Altura de ola significativa y periodo asociado promedio mensuales

Tabla 3. Parámetros estadísticos del clima marítimo

Mes	Temporada	\bar{H} (m)	\bar{T} (s)	H_{rms} (m)	H_s (m)	T_s (s)	$H_{1/10}$ (m)	$T_{1/10}$ (s)	$H_{m\acute{a}x}$ (m)	$T_{m\acute{a}x}$ (s)
ENE	NORTES	1.22	6.41	1.45	2.06	8.17	3.08	9.34	7.6	13.3
FEB	NORTES	1.16	6.34	1.29	1.90	7.75	2.83	8.83	5.7	11.9
MAR	NORTES	1.07	6.11	1.24	1.70	7.43	2.57	8.75	7.1	12.4
ABR	SECAS	0.99	5.94	1.06	1.44	6.96	1.99	7.80	3.8	10.2
MAY	SECAS	0.81	5.44	0.87	1.14	6.42	1.45	6.93	2.9	7
JUN	LLUVIAS	0.67	4.73	0.70	0.93	5.84	1.19	6.35	2.6	9.6
JUL	LLUVIAS	0.64	4.44	0.67	0.85	5.56	1.03	6.00	2.8	6.4
AGO	LLUVIAS	0.59	4.01	0.64	0.80	5.14	1.06	5.93	8	10.9
SEP	LLUVIAS	0.76	4.73	0.93	1.25	6.59	2.01	7.84	11	12.8
OCT	LLUVIAS	1.05	5.88	1.23	1.71	7.47	2.53	8.61	9.8	12.1
NOV	NORTES	1.20	6.38	1.40	2.02	8.05	2.99	9.23	7.1	13.7
DIC	NORTES	1.20	6.39	1.43	2.04	8.07	3.08	9.35	6.8	13.4
ANUAL		0.94	5.56						11	12.8

A partir de análisis estadístico de los datos del Atlas del Clima Marítimo (Anexo A), se identificaron las siguientes características:

Las alturas de ola significativa menores a 1 m tienen 50 % de probabilidad de excedencia para el periodo anual (Figura 70). Las alturas más altas se esperan en la temporada de lluvias, llegando hasta un valor de 11 m; en Nortes se tienen alturas máximas entre 7 y 8 m, mientras que en secas no superan los 4 m.

En el Año Medio se alcanzaron las alturas de ola más altas, mientras que para el seco y el lluvioso, los valores son muy similares (Figura 71).

Las alturas mayores a 9 m se presentan con baja frecuencia durante enero, septiembre y octubre (Figura 72).

La dirección predominante del arribo del oleaje es Norte y Nornoreste, presentándose en mayor porcentaje olas de 2.5 a 3.5 m de altura (Figura 73). Entre los años tipo, el mayor porcentaje de olas superiores a 2.5 m arribando de la dirección Norte y Nornoreste son para el Año Medio (Figura 74).

Las alturas mayores se presentan en conjunto con los periodos más largos, y esto ocurre con probabilidad baja (Figura 75).

La mayor probabilidad conjunta de altura de ola significativa y dirección de propagación es para direcciones de 45 ° y alturas de ola entre 2 y 4 m. En temporada secas se tiene oleaje en todas direcciones, al igual que en otoño e invierno, siendo en todos los casos las olas de alturas menores a 4 m las predominantes (Figura 76).

Las velocidades de vientos sostenidos máximas se presentan en lluvias, alcanzando los 35 m/s, mientras que en nortes y secas las velocidades disminuyen y no alcanzan los 20 m/s (Figura 77 y Figura 78).

Se observa que las direcciones predominantes de incidencia de vientos son de Norte a Este, principalmente Noreste, presentándose con mayor frecuencia velocidades entre 5 y 10 m/s (Figura 79).

Para vientos incidentes con velocidades mayores a 10 m/s, la dirección predominante es Norte (Figura 80 y Figura 81)

La mayor probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia es para direcciones entre 0 y 90 °, con velocidades predominantes entre 0 y 30 m/s. Para el resto de las direcciones se tienen velocidades no mayores a 20 m/s (Figura 82).

II.4 FUNCIONES Y VALORES

En la actualidad existe una creciente conciencia sobre la necesidad de conservar los humedales y mantener las funciones y servicios ecosistémicos que proporcionan (Berlanga-Robles *et al.*, 2007), pues las actividades antropogénicas que se desarrollan en estos ecosistemas, la crisis hídrica y los efectos del cambio climático, han motivado a numerosas acciones que buscan mejorar las prácticas a nivel mundial a partir del Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC).

La Mancha ofrece diversos servicios ecosistémicos, pues es refugio de animales terrestres, aves, reptiles, peces, crustáceos, moluscos e insectos. En particular, el manglar sirve como refugio y provee de alimento a los peces durante la primera etapa de su vida, los cuales al llegar a la edad adulta tienen la necesidad de salir al mar para su reproducción (Travieso-Bello y Moreno-Casasola, 2006). Estos peces en edad adulta, constituyen la base económica de la industria pesquera local (Barreiro-Güermes y Matus, 1993).

El manglar también funciona como una barrera física contra la inundación de la laguna y como una barrera ecológica (Travieso-Bello y Moreno-Casasola, 2006). Pero, a pesar de su presencia, la laguna tiene altos niveles de contaminación debido a los asentamientos humanos en las márgenes de la laguna, incluyendo metales pesados, resultado de la descarga de aguas residuales agrícolas (Martínez, 2017).

Dado que una de las principales actividades económicas de los pobladores de La Mancha es la industria pesquera local, y sólo cuando la boca de la laguna está abierta los peces marinos de interés comercial se encuentran disponibles en la laguna, 2 o 3 veces al año los pescadores locales inducen la apertura de la boca para mejorar sus capturas (Rivera-Guzmán *et al.*, 2014). Este manejo pragmático ha producido una presión considerable sobre el sistema lagunar, debido a los cambios ecológicos y fisicoquímicos abruptos, causados por la repentina intrusión de agua salina.

Por otro lado, los pobladores de La Mancha han buscado actividades económicas alternativas de bajo impacto para preservar los ecosistemas, desarrollando actividades y proyectos de ecoturismo productivos como La Mancha en Movimiento (<http://www.ecoturismolamancha.com/>), enfocados a la promoción, conservación y disfrute de los recursos naturales de la región (flora y fauna silvestre).

CAPÍTULO III

MONITOREO

III.1 MONITOREO DE HUMEDALES

El marco conceptual sobre monitoreo ha sido abordado por numerosos autores en diferentes áreas geográficas y con distintos enfoques (Spellberg, 1991; Mudrock y MacKnight, 1994; Díaz et al., 1995; Bain y Stevenson, 1999; De la Lanza, 2000, por mencionar algunos). De acuerdo con Shear (1995), monitoreo es “la colección, análisis e interpretación rutinaria de datos físicos, químicos y biológicos en un sitio definido, a lo largo de un período dado y con una frecuencia de muestreo establecido”. Un esquema general de los elementos básicos de monitoreo se observa en la Figura 11.

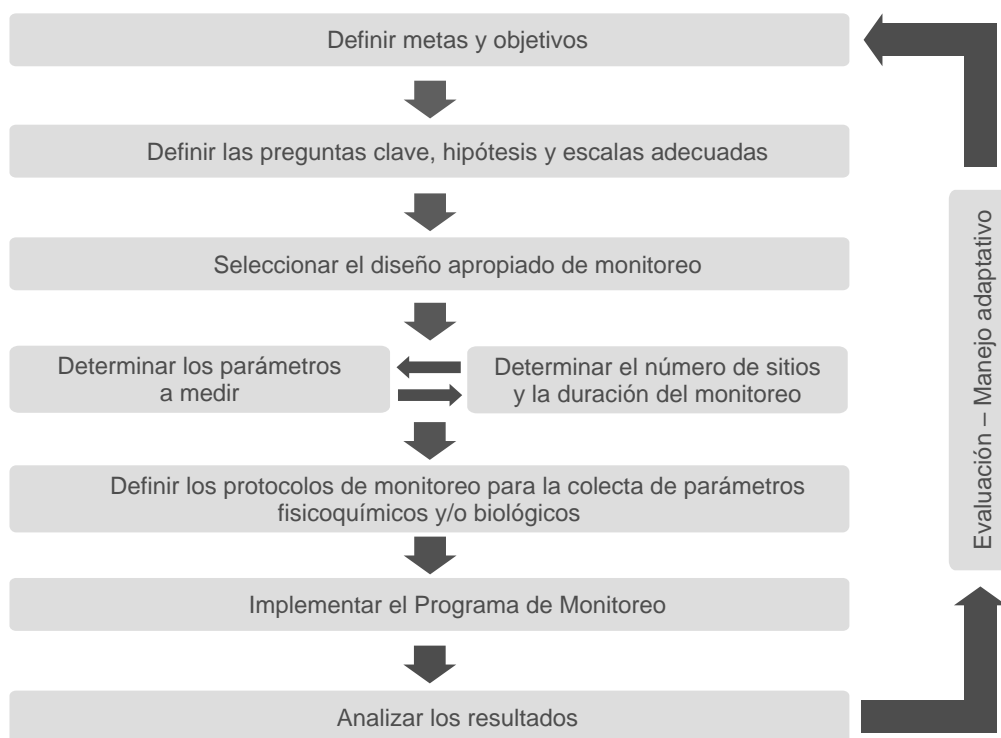


Figura 11. Elementos fundamentales del monitoreo (modificado de Abarca, 2007)

En la mayoría de los casos, el monitoreo de tipo ecológico se ha concentrado en medir la calidad ambiental en aire y agua. En el caso de los humedales, la definición de metodologías

específicas ha sido propuesta particularmente por la Convención Ramsar, en los años 1995, 1996, 2004 y 2005. Y recientemente, se ha buscado monitorear a los humedales desde un enfoque de integridad ecológica. De acuerdo con MacDonald *et al.* (1991) y Roni (2005) se pueden distinguir los siguientes tipos de monitoreo de humedales:

- Monitoreo base: caracterización de la biota existente y de las condiciones físicas y químicas para propósitos de planeación o comparación futura.
- Monitoreo del estado o condición: caracterización de la condición (variabilidad espacial) de los atributos físicos o biológicos en un área dada.
- Monitoreo de la tendencia: evaluación de los cambios en la biota o las condiciones del ecosistema a través del tiempo.
- Monitoreo de implementación (administrativo): evaluación si el proyecto fue implementado como se planeó.
- Monitoreo de la efectividad de una acción: evaluación para saber si las acciones tuvieron el efecto esperado en una cuenca, procesos físicos o en el hábitat.
- Validación (investigación: evaluación sobre si la hipótesis es válida respecto a la relación causa-efecto entre las acciones de restauración y la respuesta obtenida (física, química o biológica).

Por otro lado, en la Resolución 6.1 de la Convención Ramsar, se propone un diagrama descriptivo para establecer un programa de monitoreo de un humedal, el cual debe tener los siguientes componentes:

- Descripción del problema
- Objetivo
- Hipótesis
- Métodos y variables
- Viabilidad/efectividad de costos
- Estudio piloto
- Muestreo
- Análisis
- Informes

Monitoreo de humedales en México

En México, aunque se están realizando esfuerzos para contar con un inventariado nacional de humedales con la participación de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), Comisión Nacional De Áreas Naturales Protegidas (CONANP), CONAGUA, CONABIO, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), instituciones académicas y expertos del país (CONAGUA, 1998,

1998b y 2005; De la Lanza, 2002) todavía no se tiene el proceso concluido. Por otro lado, Ducks Unlimited de México A.C. (DUMAC) se encuentra desarrollando un proyecto de inventariado y clasificación de humedales en varias partes del país, desde el año 1991. La publicación *Inventario y clasificación de humedales en México: Parte I* (Carrera y de la Fuente, 2003) corresponde al noroeste del país y es la única hasta ahora.

Un aspecto poco desarrollado en México es la promoción de la participación comunitaria y voluntaria de personas que, sin tener una preparación profesional, pero con un interés muy fuerte por la conservación del medio ambiente, pueden contribuir a lograr los programas de monitoreo. Tanto en los Estados Unidos como en Canadá existen redes y programas bien establecidos para diferentes regiones, con metodologías estándar y relativamente sencillas, que el ciudadano común puede entender y aplicar de manera adecuada. A largo plazo, los beneficios de la participación ciudadana se traducen en la aportación en especie (tiempo de cada persona), que representa miles de pesos, y mantiene el interés por conservar los recursos acuáticos de los cuales depende la sociedad (Abarca, 2007).

III.2 PROCESOS FÍSICOS EN UNA LAGUNA COSTERA

Los procesos físicos en las lagunas costeras están influenciados principalmente por el viento, la marea y su geomorfología. Entre los factores morfológicos más importantes están las dimensiones de la boca (el paso que conecta la laguna con el mar), la relación entre el ancho lagunar y su profundidad, la batimetría, y la profundidad media. Las dimensiones de la boca controlan el intercambio de agua, incluyendo el material disuelto y suspendido que contiene, y esto a su vez determina las tasas de recambio y tiempos de residencia. La batimetría de la laguna juega un papel importante en la circulación mareal y no mareal en la laguna. La profundidad media puede ser el más importante de los tres factores geométricos (Bird, 1994).

Las lagunas costeras son particularmente poco profundas, lo cual provoca la ocurrencia de condiciones hidráulicas e hidrográficas específicas. En profundidades bajas, el agua es especialmente sensible a los procesos de calentamiento y enfriamiento. En escalas de tiempo diurno, el calentamiento y el enfriamiento son distintos. Por otro lado, los efectos del viento provocan oleaje intenso y mezclado en la vertical que puede extenderse hasta el fondo. Como resultado, las lagunas poco profundas presentan homogeneidad térmica vertical, y son poco comunes gradientes de densidad significativos en la vertical (Kjerfve, 1994).

La comprensión de los mecanismos de intercambio de agua con el mar adyacente es de suma importancia por tres razones. Primero, es un determinante de la calidad del agua de la laguna. En segundo lugar, el océano es el responsable de gran parte de la flora y fauna de las lagunas, en particular las formas larvarias que colonizan las lagunas. En tercer lugar, en escalas temporales más largas que la de las mareas lunares, la laguna tiende a subir y bajar en concierto con el mar,

lo que añade un importante componente hidráulico (Miller *et al.*, 1990). Un esquema conceptual de los forzamientos y sus escalas de tiempo y espacio se presenta en la Figura 12.

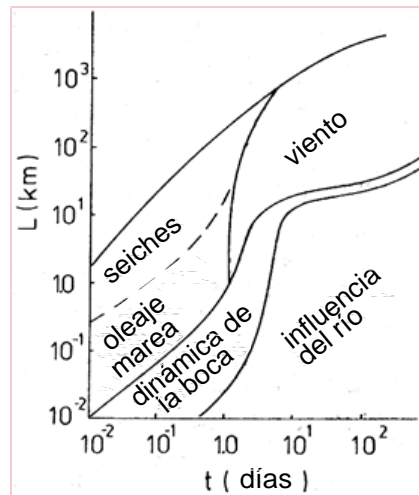


Figura 12. Forzamientos en lagunas costeras, relevantes en tiempo y espacio (modificado de Miller *et al.*, 1990)

La circulación en las lagunas costeras es el resultado de forzamientos locales y no locales. Los forzamientos locales son la acción del viento en la superficie de la laguna (circulación friccional); y gradientes horizontales de densidad que producen gradientes de presión que afectan la circulación gravitacional (asociados a entradas de agua dulce o salada). Los forzamientos no locales incluyen la marea (entrada y salida de la corriente de marea a través de la boca lagunar) y variaciones de baja frecuencia en el nivel del mar (aumento y descenso del nivel del mar en respuesta a cambios de presión en la superficie y al viento). La onda de marea aporta el nivel base de la circulación en las lagunas, por lo que su evolución debe ser cuantificada y comprendida (Göenc & Wolflin, 2004).

En aguas someras, la influencia de la fricción del fondo puede extenderse hasta la superficie, y las corrientes son rápidamente amortiguadas una vez que el forzamiento cesa. Para mantener patrones de circulación bien definidos, el forzamiento debe ser continuo. La marea es un forzamiento continuo en un sentido periódico, pero las oscilaciones inducidas son producto del intercambio con aguas continentales adyacentes, así que en la boca lagunar puede ocurrir una rápida dispersión y la atenuación de la corriente de marea. Las oscilaciones mareales pueden ser significativas sólo en las inmediaciones de la boca. El viento puede ser a la vez local y no local (cambiando el nivel del mar afuera de la boca), pero es intermitente en el tiempo, y variable en la velocidad y la dirección. De este modo, en general, en la boca las corrientes de marea son el forzamiento dominante, mientras que en el interior de la laguna, el viento es el principal responsable de mantener la circulación de la laguna. Por último, aguas poco profundas intensifican el movimiento residual, o neto, que se produce durante cualquier ciclo completo de marea. La circulación de una laguna costera es muy variable en el espacio y en el tiempo (Kjerfve, 1994).

III.2.1 Balance hídrico

El objetivo de este balance es la cuantificación de las entradas y salidas de agua de la laguna (Figura 13) y la descripción de los mecanismos por los cuales el agua es redistribuida en la laguna. Un estudio integral se representa por medio de una ecuación hidrológica, la cual es una ecuación de continuidad que explica los cambios de columna en términos de los procesos que involucran tanto agua dulce como salada (Smith, 1994):

$$\frac{dV}{dt} = P - E + D + G + A$$

donde

V : volumen de la laguna

P : tasa de precipitación

E : tasa de evaporación

D : descargas de agua dulce

G : flujo subterráneo

A : ganancia o pérdida advectiva

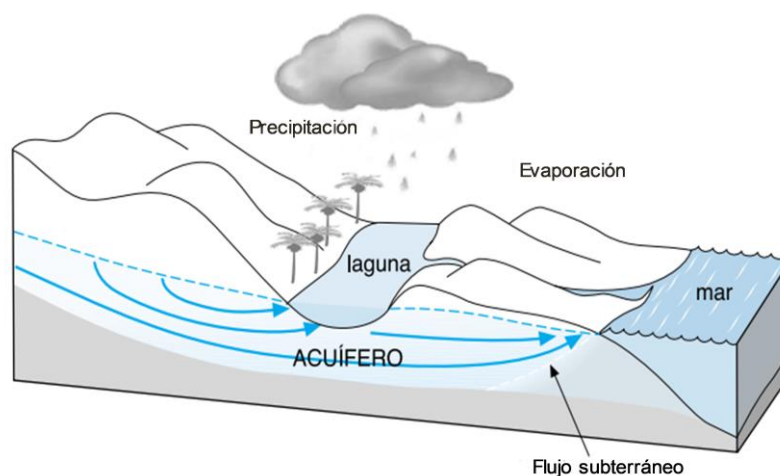


Figura 13. Balance hídrico en una laguna costera

La precipitación puede ser estimada con datos de estaciones climatológicas ubicadas en el área circundante a la laguna. La evaporación requiere de mediciones de humedad y de viento que sean representativas. Las descargas de agua dulce deben obtenerse del aforo de los principales cauces que descargan en la laguna. La entrada de agua dulce en la laguna incluye los escurrimientos superficiales y el flujo subterráneo.

La variabilidad temporal de los términos de la ecuación es considerable. La precipitación varía en escalas de horas a meses, pero con una variación estacional anual. La evaporación puede mostrar cierto grado de estacionalidad, pero es un término relativamente estable. Las descargas

de agua dulce varían en escalas de días hasta estaciones. El movimiento advectivo es el de fluctuación más rápida, pues las aguas someras responden rápidamente a las variaciones temporales del viento.

III.3 FECHAS DE MONITOREO EN LA MANCHA

En función de las temporadas climáticas definidas, se propusieron 4 visitas a lo largo de un ciclo anual para el monitoreo en La Mancha. Del año 2014 a 2015, se realizó el monitoreo organizado en 6 campañas de campo (C1 a C6), en las fechas mostradas en el calendario de la Figura 14.

2014-2015	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	
ABR/MAY	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	C1				3	4
JUL/AGO	28	29	30	31	1	2	3	C2				8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
OCT/NOV	27	28	29	30	31	1	2	3	C3				8	9	10	11	12	13	14	15	16	
NOV/DIC	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	4	5	6	7	
DIC	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
DIC/ENE	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
ENE/FEB	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	C4				7	8	
FEB/MAR	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	1	
MAR/ABR	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
ABR/MAY	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	1	2	3	
MAY	4	5	C5			9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
MAY/JUN	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
JUL/AGO	27	28	29	30	31	1	2	C6				8	9	10	11	12	13	14	15	16		

- Monitoreo, boca abierta
- Monitoreo, boca cerrada
- Apertura inducida de la boca
- Apertura natural de la boca
- Boca cerrada

Figura 14. Fechas de monitoreo realizadas en La Mancha

III.4 ACTIVIDADES

Tomando en consideración el marco conceptual de monitoreo en humedales y los procesos físicos que ocurren en una laguna costera, se planteó una metodología de monitoreo con enfoque ingenieril e integral que permitió cuantificar parámetros físicos e hídricos para caracterizar los flujos en los humedales, tomando muestreos topo-batimétricos e hidrodinámicos (oleaje- corriente), de las características del medio (tipo de suelo, cobertura vegetal) y tomando menor actuación en cuanto a características químicas y biológicas de la calidad del agua se refiere, aunque sí se consideran aspectos como la salinidad y temperatura de la misma.

Las actividades realizadas durante las Campañas (identificadas con la letra “C” seguida de un número consecutivo) tuvieron como objetivos:

1. Diseñar la metodología de monitoreo con la finalidad de cuantificar los intercambios hidráulicos de la laguna y caracterizar el medio.
2. Monitorear un ciclo anual de la metodología del punto 1.
3. Levantar muestreos para la determinación de la protección ecológica que brinda el manglar (Gómez Martínez, 2017).

En la Tabla 4 se enlistan las actividades realizadas para alcanzar los objetivos mencionados.

Tabla 4. Actividades de monitoreo en las Campañas 1 (C1) a las 6 (C6)

ACTIVIDAD	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Reconocimiento de la zona	✓					
Aforo del Caño Gallegos		✓	✓	✓	✓	✓
Colocación de piezómetros en el manglar		✓				
Toma de niveles y parámetros físico-químicos en los piezómetros		✓	✓	✓	✓	✓
Toma de muestras de suelo y agua en área de los piezómetros		✓				
Toma de muestras de suelo y agua en los puntos de aforo		✓				
Batimetría en el mar		✓				
Topografía en la boca		✓	✓	✓	✓	✓
Muestreo de sedimentos en playa-boca		✓	✓	✓		
Batimetría en la laguna			✓	✓		
Toma de parámetros físico-químicos en la laguna (barrido)			✓	✓	✓	✓
Lances de sonda de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) en la laguna			✓	✓	✓	
Lances de CTD en la boca			✓			
Registro de niveles en la boca durante los días de la campaña			✓	✓	✓	✓
Levantamiento de las cotas de los piezómetros						✓
Pruebas Slug en los piezómetros						✓

III.5 MÉTODOS Y RESULTADOS DEL MONITOREO

III.5.1 Datos topo-batimétricos

Utilizando una Ecosonda Knudsen Engineering 1612, se realizaron las mediciones batimétricas en el mar y en la laguna, a una frecuencia de 1 Hz. En el mar, los transectos de medición se extendieron desde la orilla hasta la cota -10 m, en dirección este-oeste, con un espaciamiento norte-sur de 100 m aproximadamente. El procesamiento se realizó promediando profundidades para una misma posición y eliminando datos falsos (provocados por la reflexión de la señal de manera equivocada). La batimetría en el mar se obtuvo sólo en una campaña, y en la laguna durante 2 campañas (ver Tabla 4), esto con la finalidad de tener una mayor cantidad de datos (Figura 15).

Los muestreos topográficos fueron realizados utilizando GPS diferenciales Leica System 1200, grabando datos a una frecuencia de 1 Hz. Utilizando el software LeicaGeo Office, se realizó el procesamiento de los datos, utilizando los archivos RINEX proporcionados vía electrónica por la RGN del INEGI para hacer la corrección de la base del GPS y de las alturas geoidales. La construcción del modelo digital de elevaciones de La Mancha, que serviría como dominio para la modelación numérica, se realizó con una interpolación de Kriging en una malla de 12 x 14 km, en celdas cuadradas de 10 m. Los muestreos topográficos empleados para dicha interpolación, corresponderían a la época que se deseara modelar. Para completar el área donde no se tomaron datos de campo, se utilizaron los datos del modelo digital de elevación de alta resolución LIDAR, obtenido del INEGI. En la Figura 16 se muestra el modelo generado con los datos de la Campaña 3. El análisis de la variación temporal de la playa y de la boca lagunar realizado con los datos obtenidos durante las campañas, lo presenta Ramírez Méndez, 2018.

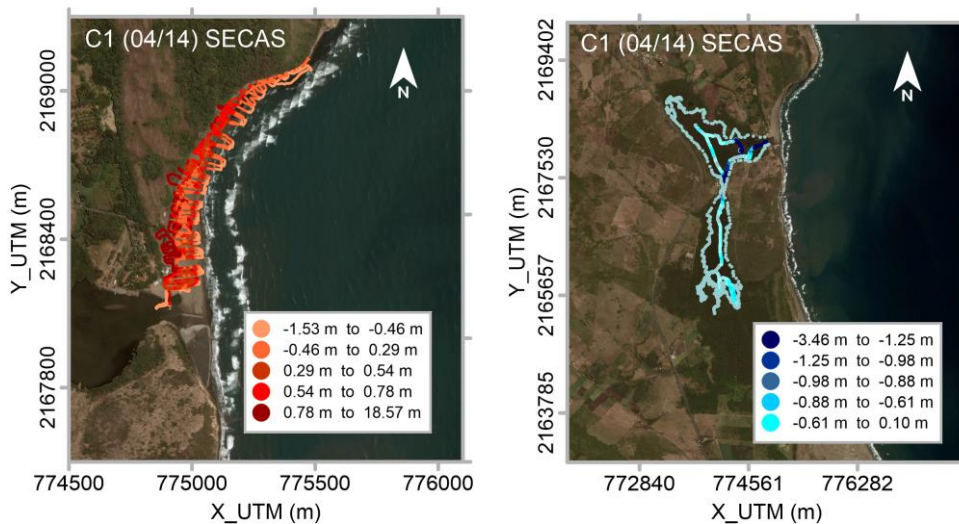


Figura 15. Puntos medidos de topografía y batimetría durante las Campañas 1 a 4

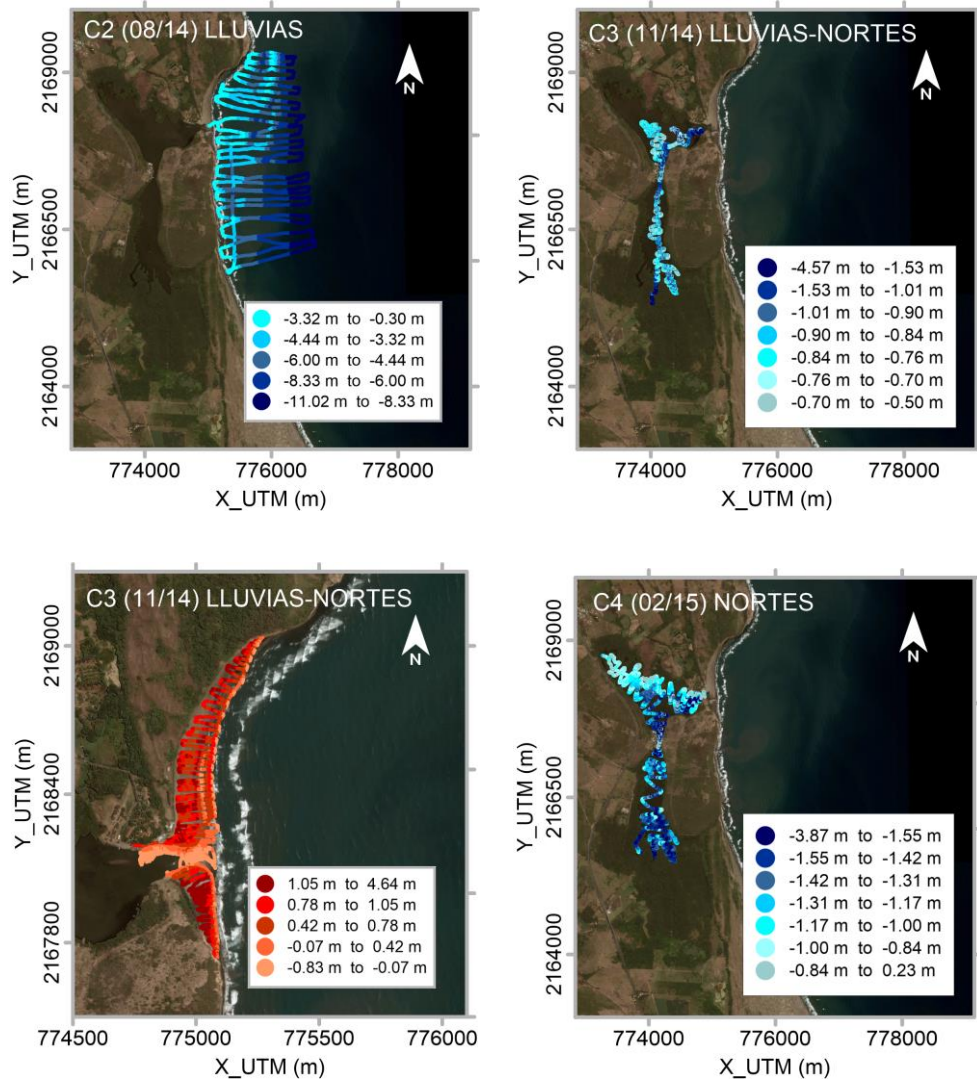


Figura 15 (Continúa). Puntos medidos de topografía y batimetría durante las Campañas 1 a 4

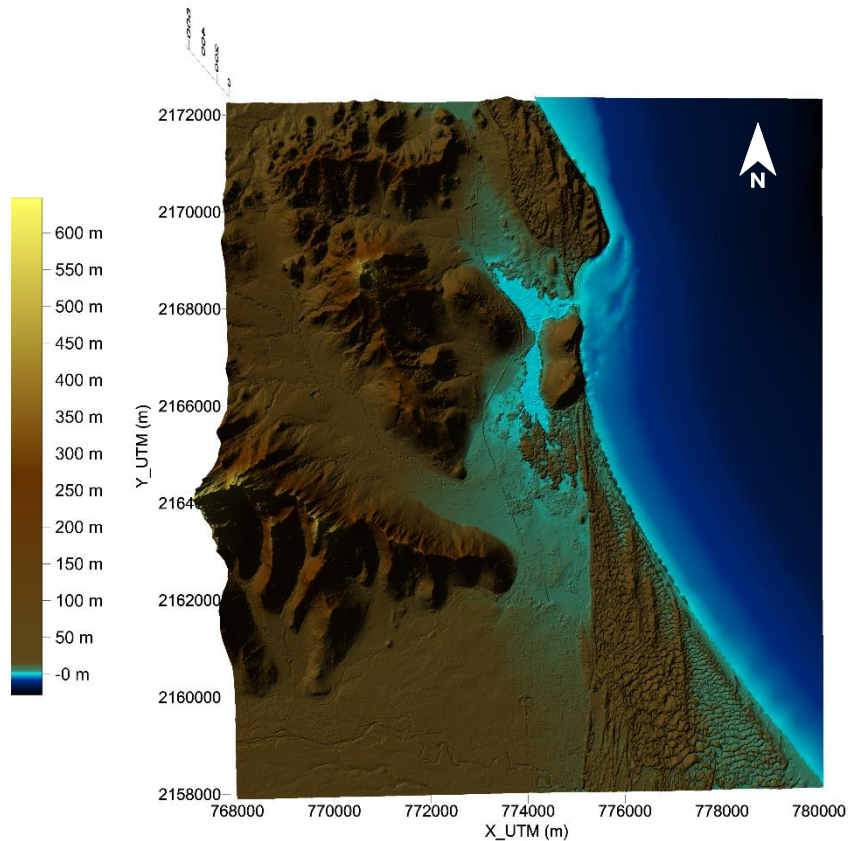


Figura 16. Modelo digital de elevaciones de La Mancha (en coordenadas UTM)

III.5.2 Muestreo de sedimentos en la playa y en la boca lagunar

Las muestras de sedimento fueron recolectadas en distintos perfiles, graficados en la Figura 17. Estas muestras fueron procesadas en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería UNAM, utilizando el Sistema de análisis granulométrico por imágenes CAMSIZER de la firma Retsch Technology. Con él se obtiene la densidad, curva granulométrica y algunos parámetros estadísticos del sedimento.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el sistema playa-boca, la densidad relativa del sedimento varía entre 1.671 y 2.777. Para la playa, el diámetro varía entre 0.176 y 0.305 mm (Figura 17), siendo clasificada como arena fina de acuerdo a la norma ASTM D 2487. Como tendencia general, el D_{50} más pequeño corresponde a la muestra de la zona seca, pero de las muestras tomadas, no se observa una tendencia de incremento o disminución del diámetro al acercarse a la línea de costa.

La variación del diámetro en la boca se muestra en la Figura 17 para las Campañas 2 y 4, pues la boca se encontraba abierta y cerrada, respectivamente. Se observa que el sedimento se vuelve más fino hacia el mar y el D_{50} mayor se encuentra en la muestra “a” para la condición de la boca

abierta, lo cual puede atribuirse al transporte e intercambio de material que se hace con la zona terrestre. Cuando se encontró cerrada la boca con una barra, se observa la misma tendencia, pero con un rango de variación menor.

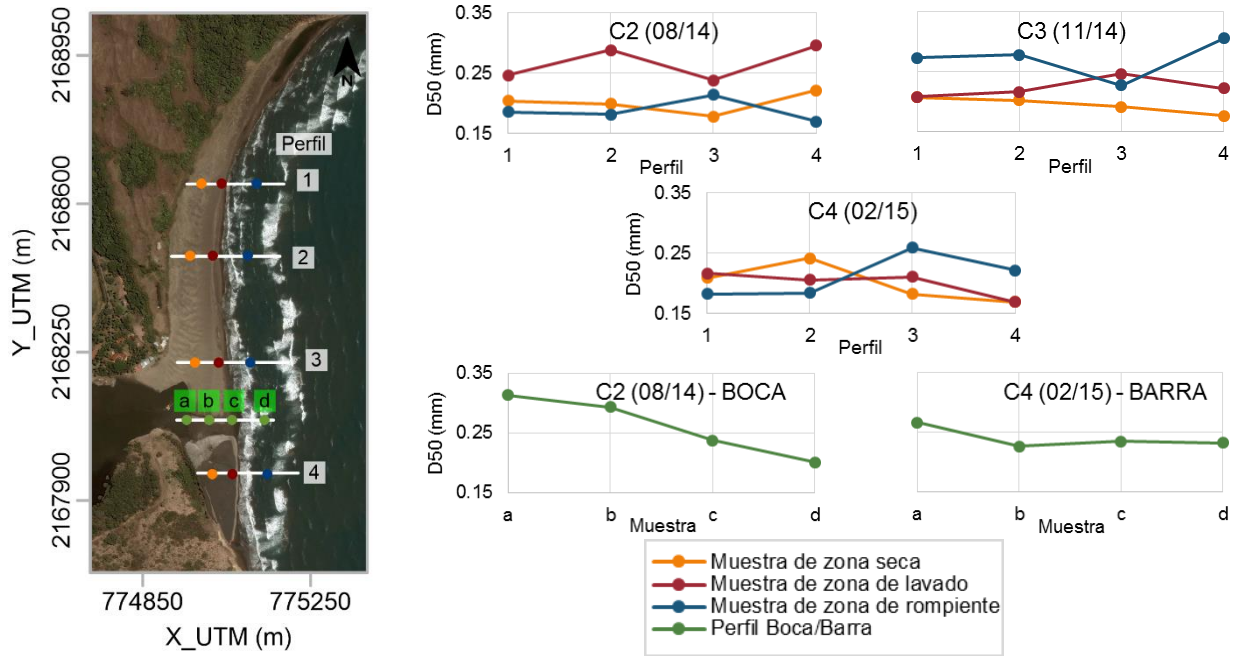


Figura 17. Variación del D₅₀ en la playa y boca

III.5.3 Parámetros fisicoquímicos en la laguna

La toma de parámetros fisicoquímicos en la laguna, se realizó en forma de barrido utilizando un sensor multiparamétrico portátil HANNA de la firma PCE Inst. Los resultados de las Campañas 3, 4 y 5, se presentan en los mapas de la Figura 18, Figura 19 y Figura 20. Además, se presenta la señal de marea mixta, predominantemente diurna, registrada utilizando un CTD Diver en la boca, las mediciones corresponden a los lapsos indicados por las barras grises.

Se observa que durante la Campaña 3 (noviembre), la temperatura oscila entre 27 y 29 °C en todo el sector norte y la parte alta del sector sur, únicamente llega a 30 °C en la parte Este inferior del sector Sur. La descarga del Caño Gallegos, presenta una temperatura similar a la típica en la laguna. La temperatura promedio fue de 28.5 °C, oscilando entre 25 y 30 °C. Durante la Campaña 4 (febrero), se observa que las temperaturas son mucho más bajas a las de noviembre, siendo la máxima 2 °C menor a la mínima de noviembre. La temperatura promedio fue de 22 °C, oscilando entre 19 y 23 °C. La distribución de la intensidad de la temperatura muestra el mismo patrón que en noviembre.

Para la Campaña 5 (mayo), el extremo oeste del sector Norte presenta las temperaturas más altas, pues es la zona más somera, la cual fue inaccesible durante las campañas anteriores, debido a tamaño de la lancha utilizada para realizar las mediciones. En general, el sector Norte tiene temperaturas mayores comparadas con las del sector Sur, a diferencia de los registros anteriores. En este caso, la temperatura media fue de 30.7 °C, oscilando entre 29 y 32 °C.

Las mediciones en noviembre se realizaron en llenante y en mayo, durante pleamar, lo cual se espera tenga efecto en los parámetros registrados. En todos los casos, el patrón es que la salinidad más alta se encuentra en la boca (valores de agua de mar mesohalina) y disminuye hacia el estrechamiento y la parte central del sector sur (agua de mar oligohalina). Hacia el sur se registra nuevamente un incremento en la salinidad, dentro de la misma clasificación (oligohalina). Esto puede atribuirse a que las filtraciones y escurrimientos provenientes del sur reciben agua de potreros y cañales, principalmente, y esto incrementa los registros de salinidad. Evidentemente, durante febrero, al estar la boca cerrada, la salinidad disminuye considerablemente, siendo los valores más altos de 18 ups, mientras que en noviembre llegan a la salinidad del mar.

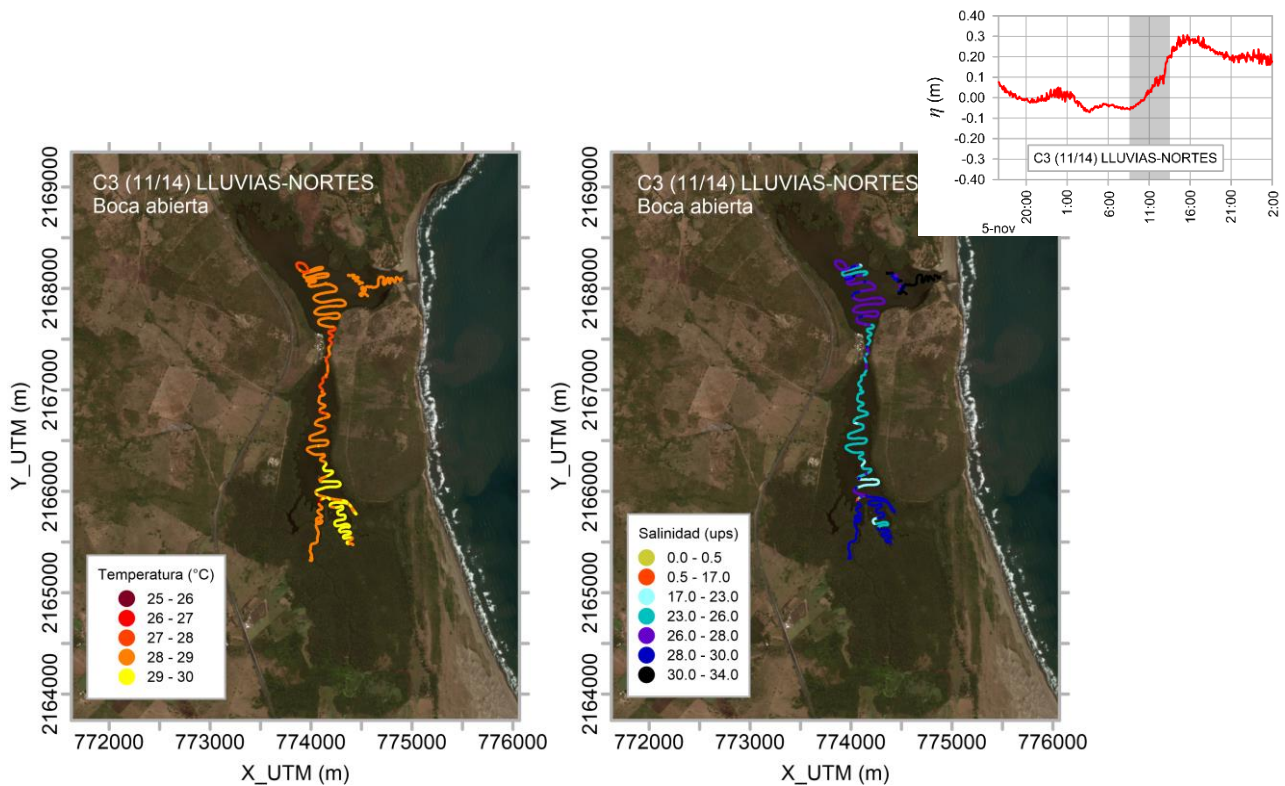


Figura 18. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 3

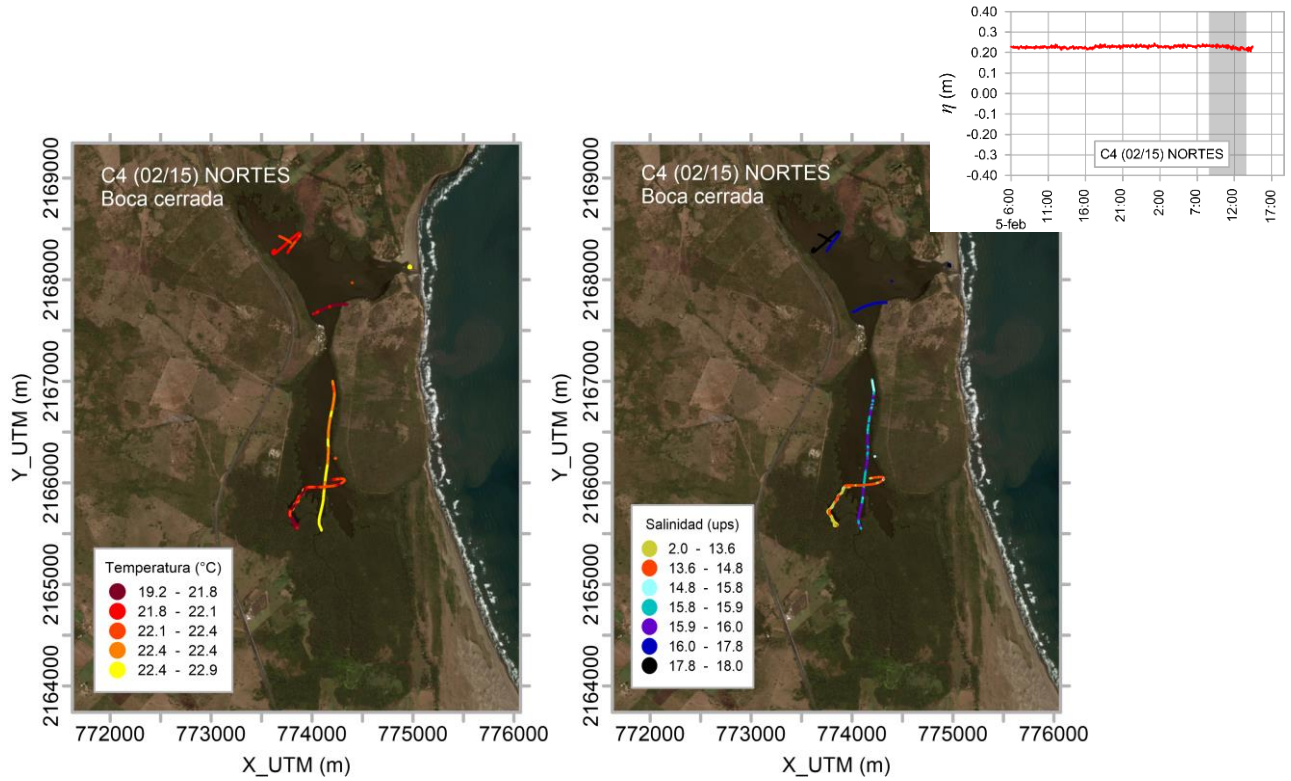


Figura 19. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 4

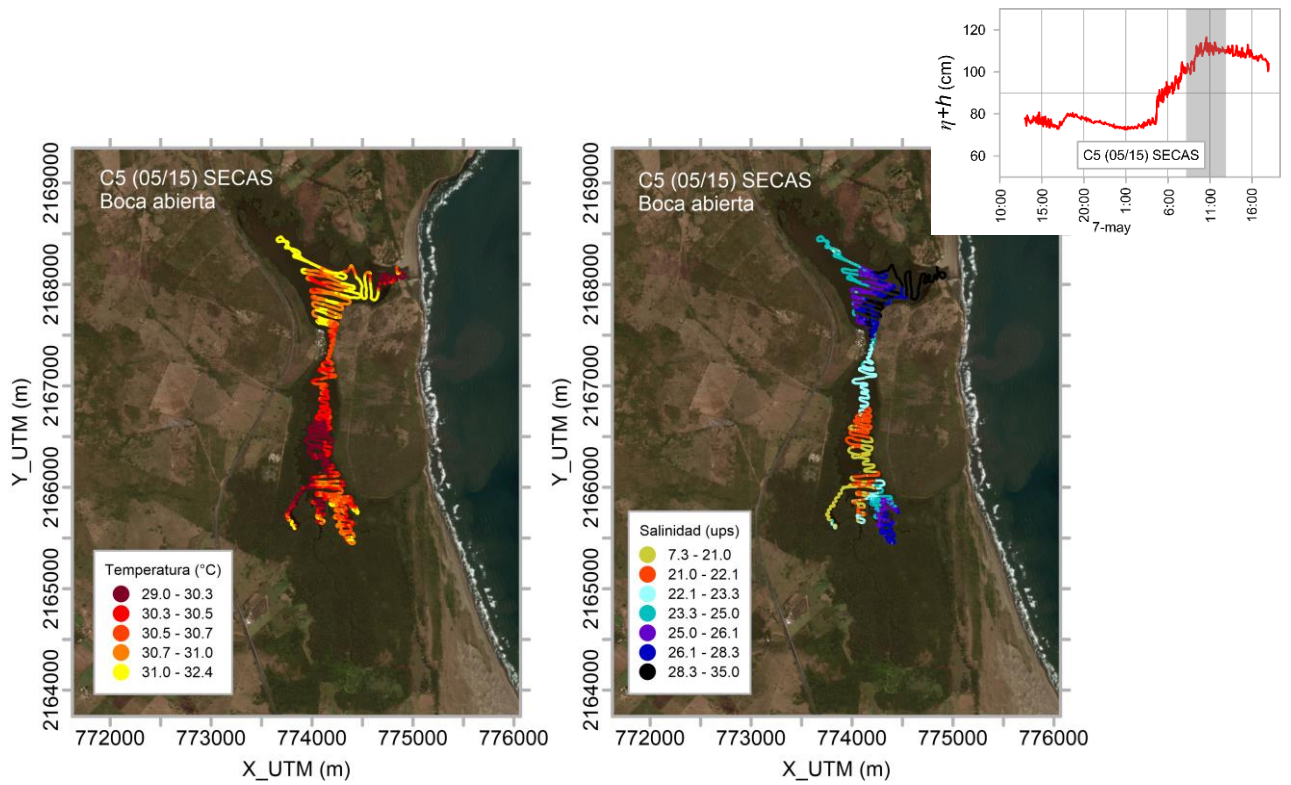


Figura 20. Parámetros físicos de la laguna, Campaña 5

III.5.4 Descarga superficial

Dos corrientes de agua dulce descargan en la laguna: Caño Juan Pérez en el Norte, y Caño Gallegos en el Sur (ver Figura 3), siendo Caño Gallegos la descarga más importante. Por esta razón, el flujo Caño Gallegos se aforó utilizando el método de sección velocidad en cuatro puntos en su cauce: 1) cerca de la carretera Cardel-Nautla (MEX 180), 2) aguas abajo de la descarga de manantiales, 3) aguas arriba de la descargar al humedal de agua dulce, al sur del manglar y 4) en el manglar. La ubicación de estos puntos se muestra en la Figura 21. Se registró la velocidad media del agua a partir de mediciones puntuales en la vertical para las diferentes dovelas, utilizando un correntímetro Valeport Modelo 0012/B, y la velocidad superficial, utilizando un flotador. La frecuencia de muestreo fue de 1 Hz, tomando el valor medio de 50 mediciones.

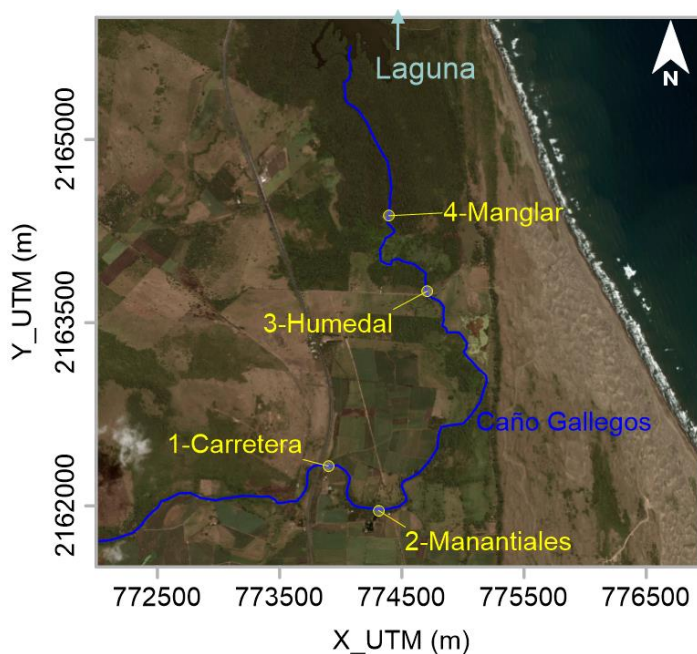


Figura 21. Localización de los puntos de aforo en el Caño Gallegos

La Figura 22 muestra los gastos aforados en los 4 registros incluidos en un ciclo anual: C2 (08/14) a C5 (05/15). El caudal mínimo se produce en el punto 1, excepto en febrero, cuando el mínimo se registró en el punto 4. Este cambio se debe a la reducción de la circulación alrededor de la laguna cuando la boca está cerrada. En este periodo, también hay un aumento en el nivel del agua del arroyo Caño Gallegos y la laguna, que inunda el manglar circundante. Se puede observar que la descarga de Caño Gallegos aumenta del punto 1 al 3, y disminuye en el punto 4, excepto durante la temporada de lluvias (agosto de 2014). Esto se puede atribuir al aumento de las contribuciones pluviales y fluviales de la temporada.

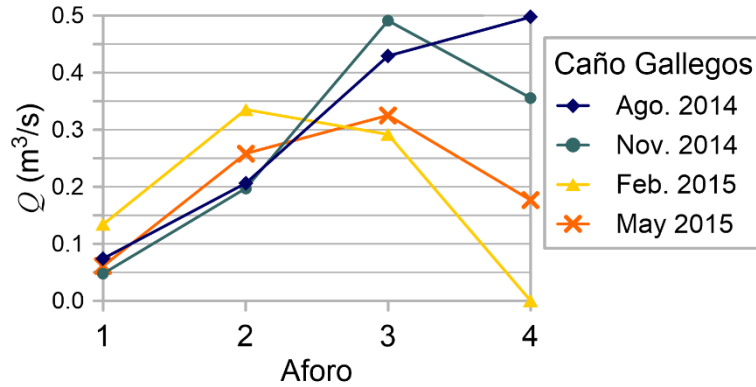


Figura 22. Gastos aforados

A partir del análisis granulométrico del sedimento recolectado en los puntos de aforo, se obtuvieron los diámetros característicos mostrados en la Figura 23. De acuerdo con la norma ASTM D 2487, en el punto 1 se trata de arena gruesa, y del 2 al 4 de arena media.

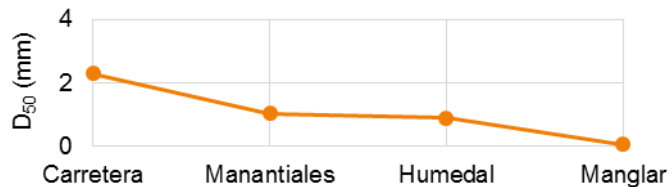


Figura 23 Diámetro característico para los aforos

III.5.5 Descarga subterránea

Instalación de los piezómetros

Se realizó la colocación de 23 tubos piezométricos dentro del mangle utilizando una barrenadora manual, con la finalidad de monitorear niveles freáticos, organizados en 12 baterías (B01 a B12) de 2 tubos cada una (P1 y P2), con separación de 100 m en dirección de entrada hacia la laguna (Tabla 5). Para ello, se utilizaron tubos de PVC sanitario de 1.5 in de diámetro y 3 m de largo. Con cople y tapa en el fondo para evitar la intrusión de sedimento. Anclados 2 m en el suelo y ranurados a cada 4 cm (Figura 24).

Tabla 5. Localización de los piezómetros

Batería	Piezómetro	X (m)	Y (m)
B01	P1	773281	2169003
	P2	773320	2168893
B02	P1	773495	2169041
	P2	773528	2168943
B03	P1	774090	2168595
	P2	774174	2168559
B04	P1	774712	2168476
	P2	774580	2168379
B05	P1	774264	2167039
	P2	774264	2167039
B06	P1	774569	2165639
	P2	774509	2165713
B07	P1	774392	2164960
	P2	774289	2165010
B08	P1	774562	2164796
	P2	774461	2164757
B09	P1	774184	2164730
	P2	774310	2164702
B10	P1	774081	2165046
	P2	774192	2164982
B11	P1	773637	2165655
	P2	773739	2165669
B12	P1	773834	2166666
	P2	773832	2166910

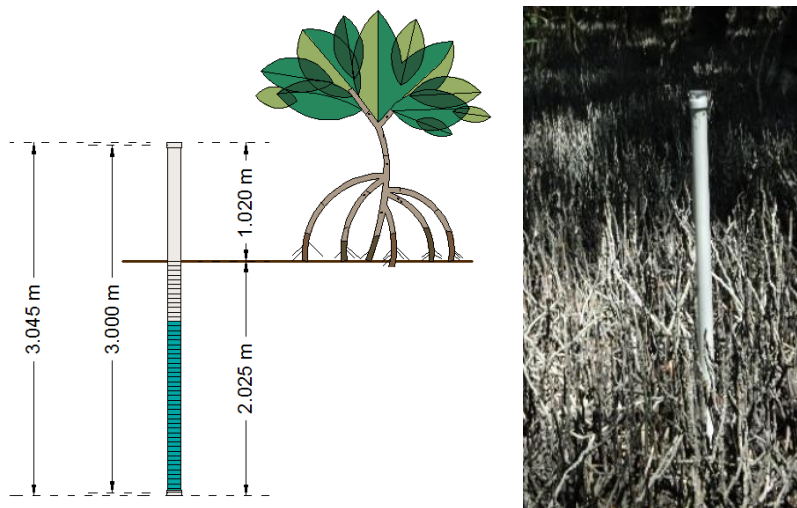
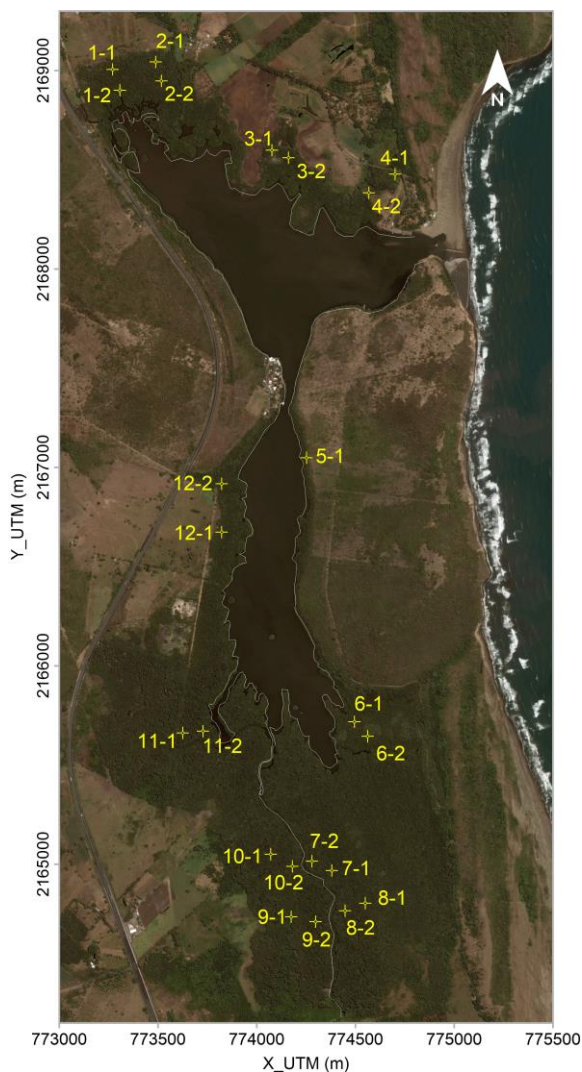


Figura 24. Instalación de los piezómetros en el manglar

Monitoreo en los piezómetros

El monitoreo realizado en los piezómetros consistió en:

1. Toma en sitio de los niveles NPB (Nivel Piezométrico referido al Brocal), como se muestra en la Figura 25.
2. Registro de la variación en la vertical de la salinidad y la temperatura utilizando una probeta CTD de la firma Keller, modelo DCX-22 VG CTD.
3. Medición de parámetros físico-químicos del agua freática superficial y del fondo, utilizando un multiparamétrico ULTRAPARAMETER II 6PFC^E de la firma Myron L Company. El reporte de estos datos puede encontrarse en Gómez Martínez, 2017.

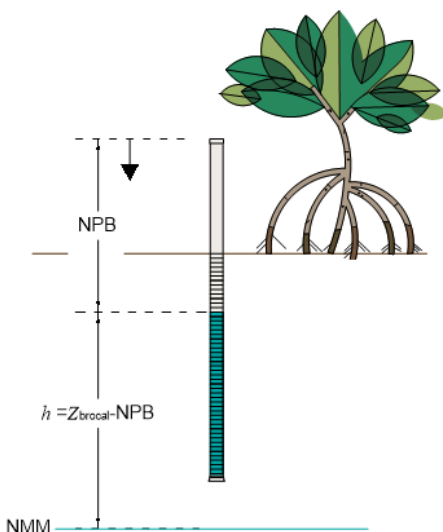


Figura 25. Niveles monitoreados en los piezómetros

Cargas piezométricas

Como se muestra en la Figura 25, las cargas piezométricas pueden obtenerse en función de NPB y la cota del brocal del piezómetro (Z_{brocal} , referida al nivel medio del mar NMM). Para determinar de esta última, se realizó el levantamiento topográfico en el manglar utilizando un nivel automático marca SETL/Laica con una precisión de 2 mm. Los levantamientos se realizaron a partir de dos puntos de control, seleccionados de los bancos de nivel que han sido establecidos por el INEGI. Estos fueron el V30504 y el V30507.

Los niveles registrados, la carga piezométrica, en los tubos C2 a C6 se grafican en la Figura 26. Se observa que a lo largo del año monitoreado, únicamente una vez se encontró el manglar inundado. Esto correspondiendo a la época en la que la boca de la laguna se encontraba cerrada, con lo que se determina que esta condición de la boca es la única que permite la inundación del bosque de mangle, debido al aumento de los niveles de la laguna.

Salinidad y temperatura

La variación en la vertical de la salinidad y la temperatura del agua dentro de los piezómetros, registrada con la probeta CTD Keller, a lo largo de la temporada de Nortes (C4), secas (C5) y lluvias (C6), se presenta en la Figura 27 y la Figura 28. En ella se distingue que, a cierta profundidad, las

variaciones dejan de ser visibles, principalmente para el caso de la salinidad. Esto quiere decir que las condiciones del agua superficial no afectan de manera importante al agua subterránea, es decir, se mantienen constantes a pesar de la inundación y secado del manglar.

Para comparar la variación espacial de los perfiles, en la Figura 29 se muestran los perfiles agrupados por sectores, de acuerdo con el mapa de la misma Figura 29. Se observa que las baterías que se encuentran en los márgenes del Caño Gallegos presentan condiciones relativamente constantes, pues no hay cambios importantes en el tiempo ni en el espacio. Los valores de la salinidad oscilan entre 40 y 55 ups, que corresponden a condiciones de salmuera. Por otro lado, las condiciones en el sector norte son distintas. Para este caso, las variaciones son más grandes, yendo de agua dulce a salmuera. Esto indica que las aportaciones de agua dulce son más importantes en este sector.

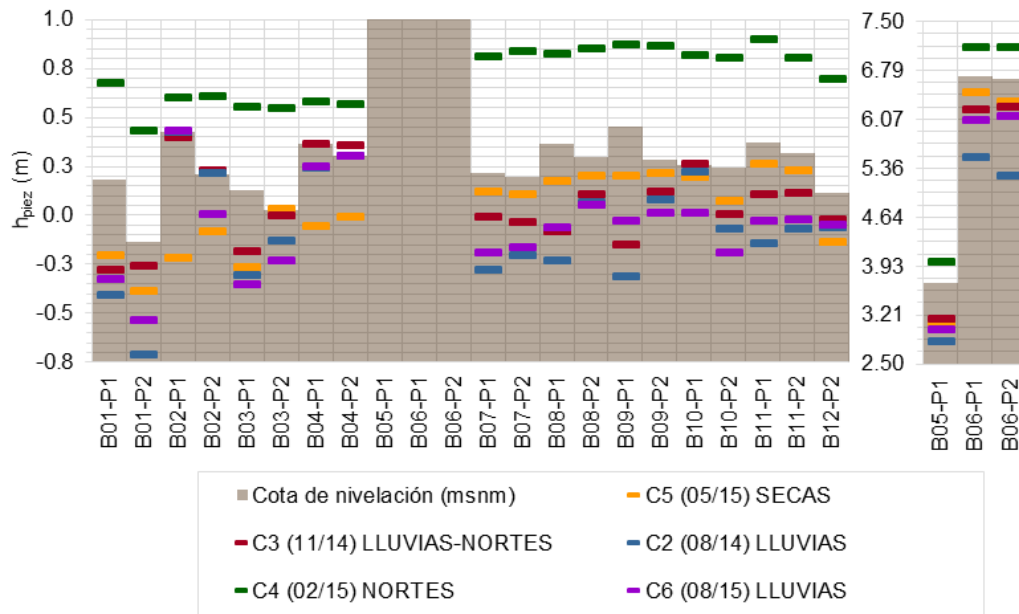


Figura 26. Cargas piezométricas del ciclo anual de monitoreo

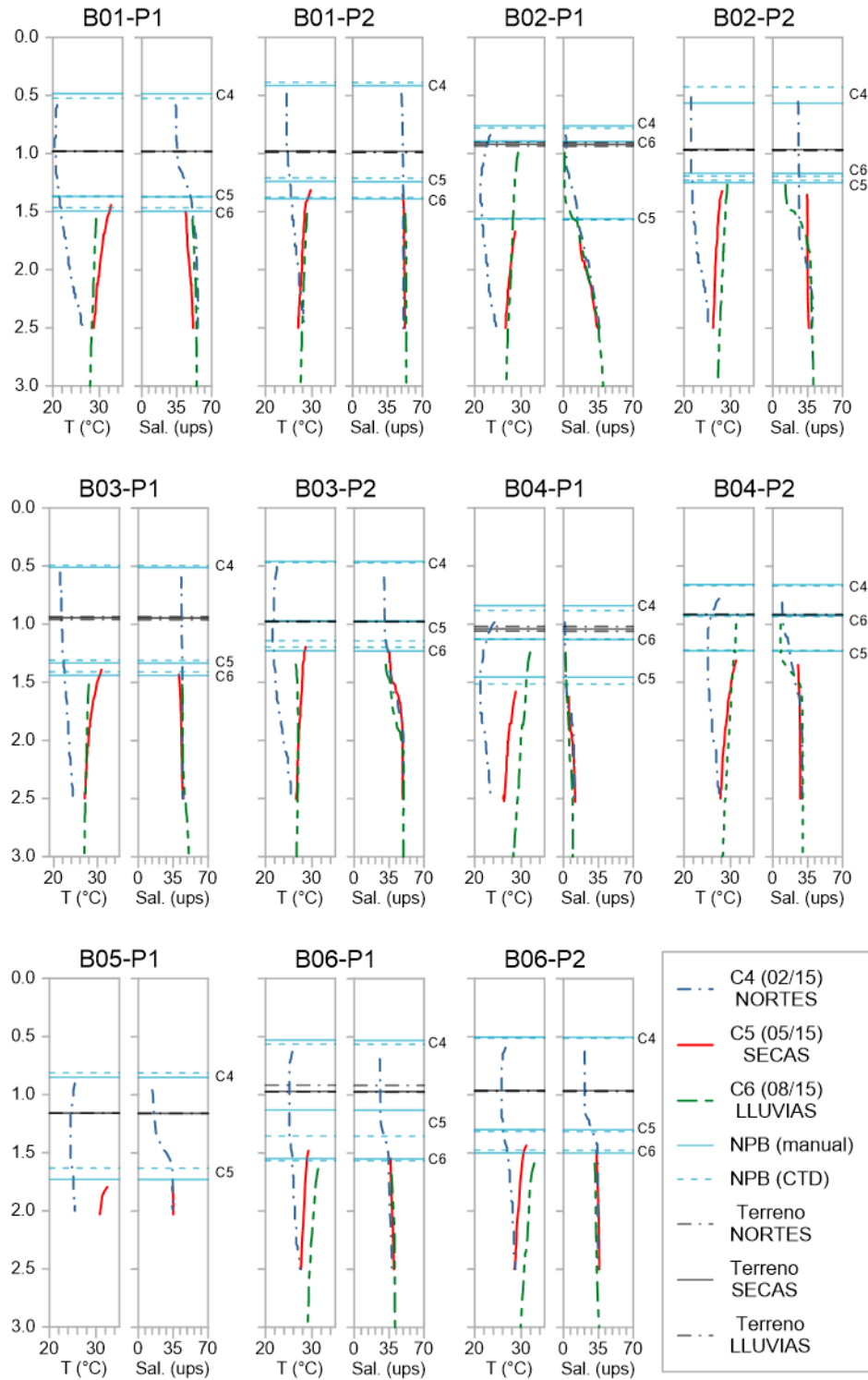


Figura 27. Evolución de los perfiles en los piezómetros de las baterías B01 a B06

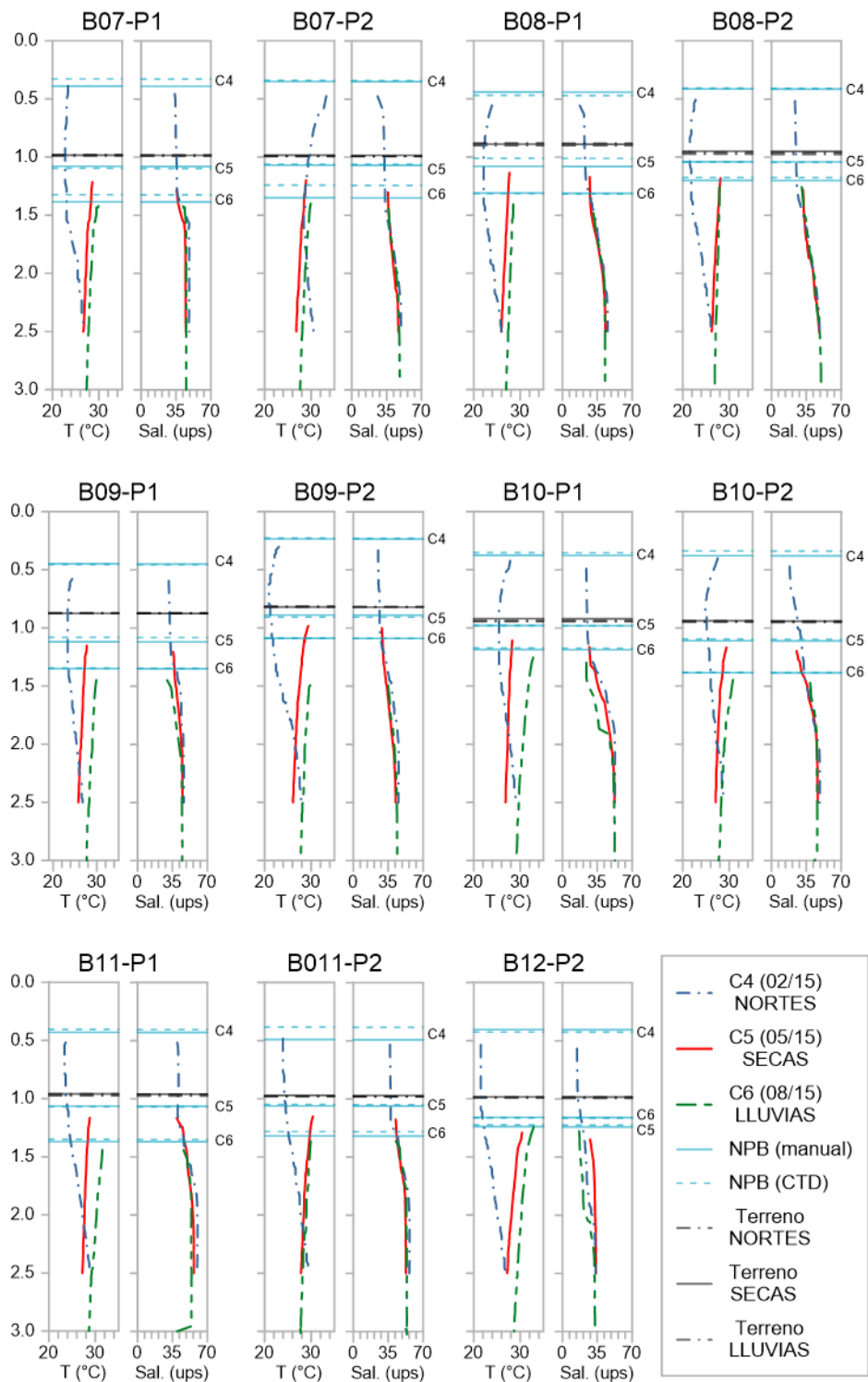


Figura 28. Evolución de los perfiles en los piezómetros de las baterías B07 a B12

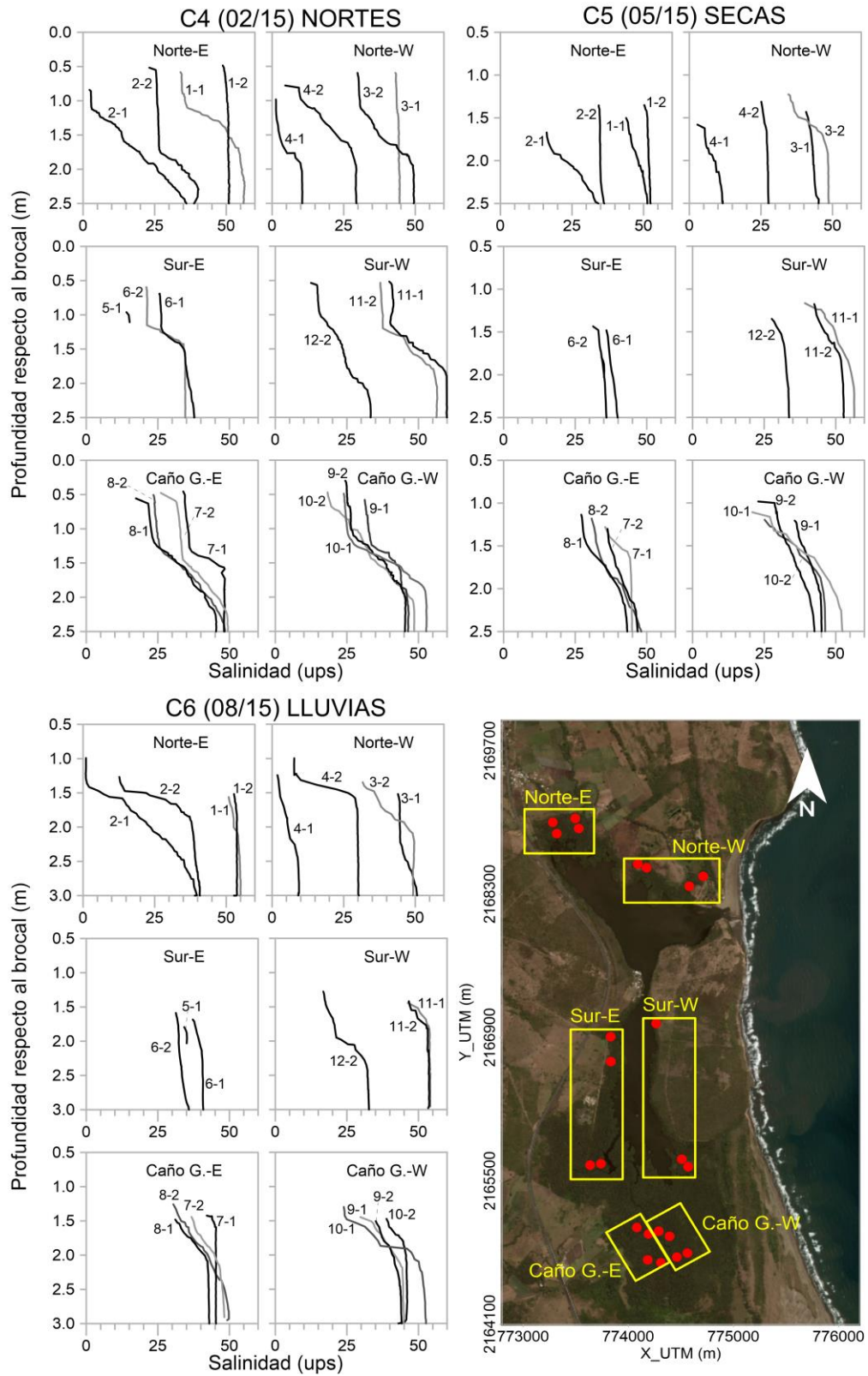


Figura 29. Variaciones de la salinidad por sectores de baterías de piezómetros

Vinculación de la marea con las cargas piezométricas registradas

En la zona de estudio, la marea es de tipo mixta predominantemente diurna. En las siguientes figuras se observan los calendarios de marea del pronóstico que realiza el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por medio de su Programa MARV 1.0. Estos calendarios corresponden a los meses de las campañas en Veracruz, Veracruz, sitio para el que se ha encontrado válido su utilización para La Mancha. Además, se presentan las mediciones de las cargas piezométricas sobre la señal de marea. Durante C3 se registró en la transición de mareas muertas a vivas. En C4 y C5 durante mareas vivas. Y en C6 durante mareas muertas.

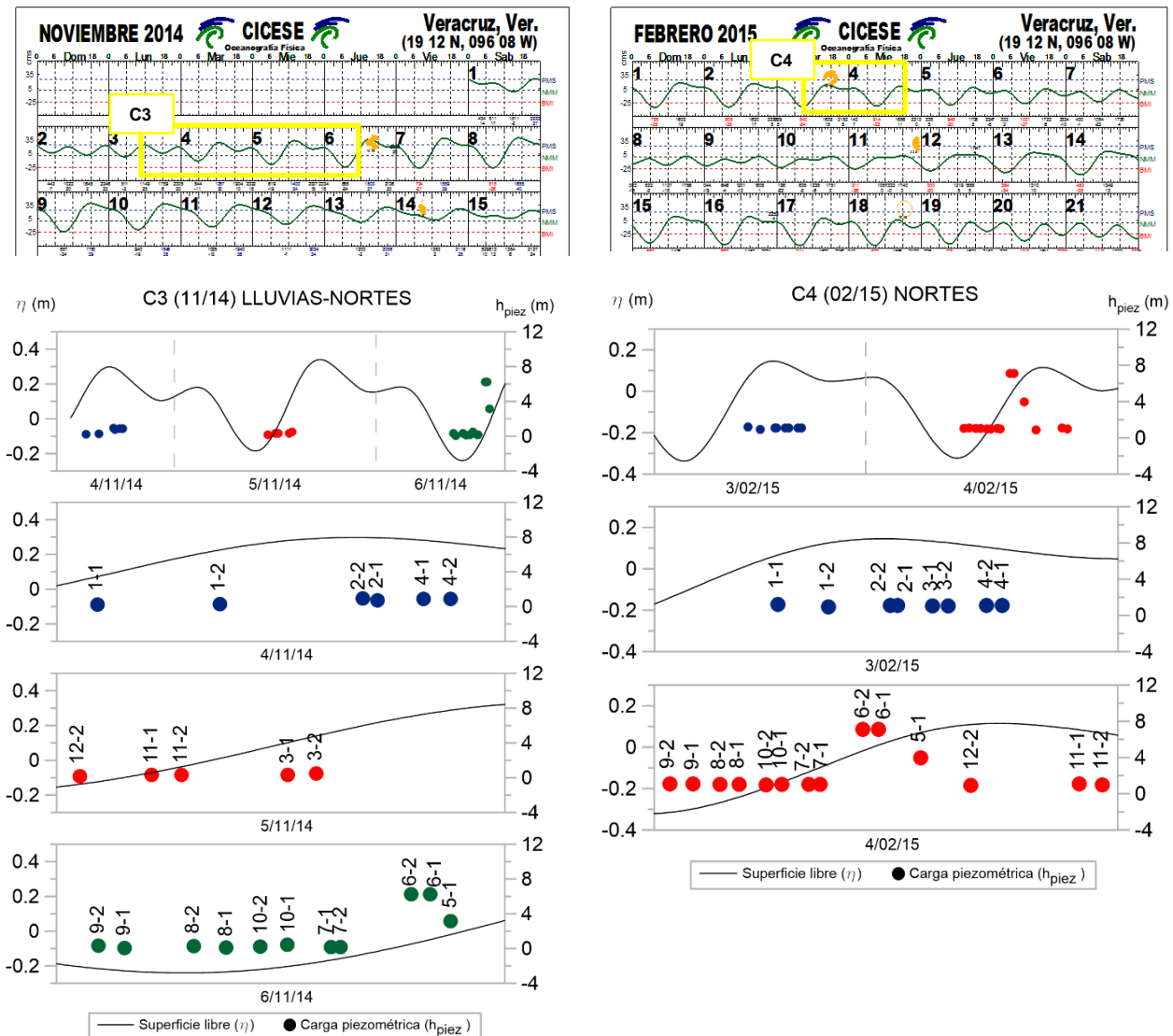


Figura 30. Vinculación marea-registro de cargas piezométricas, Campañas 3 y 4

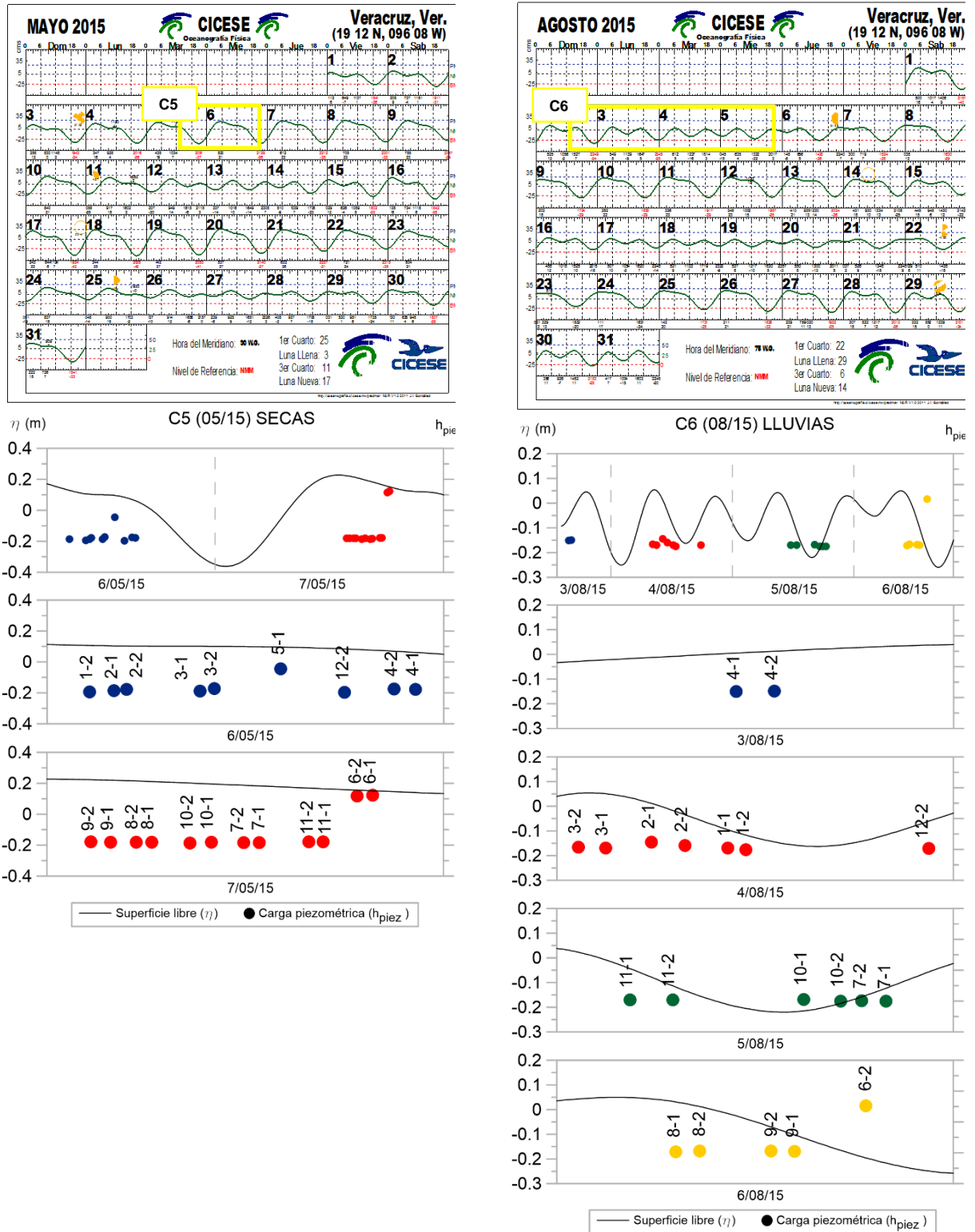


Figura 31. Vinculación marea-registro de cargas piezométricas, Campañas 5 y 6

Sedimento en las baterías de piezómetros

Se realizaron muestreos de sedimento en cada batería de piezómetros, encontrándose limos, excepto en B03, 04 y 06, que corresponden a arena fina.

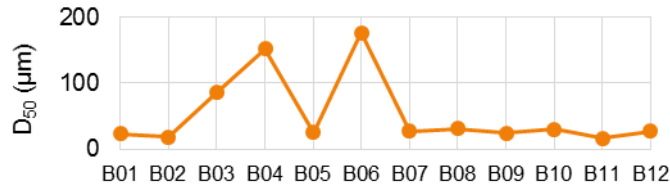


Figura 32. Diámetro característico en las baterías de piezómetros

Conductividad hidráulica

Durante la C6, las pruebas slug realizadas fueron de extracción de volumen. La representación de la evolución de la prueba para tres piezómetros se presentan de la Figura 33 a la Figura 35. En ellas el eje vertical representa:

$$\text{Carga normalizada} = \text{Desplazamiento/Desplazamiento inicial} = H(t)/H_0$$

donde

el desplazamiento (H) es el cambio en el nivel del agua (ascendente en este caso), medido desde el nivel estático a lo largo de la recuperación

el desplazamiento inicial (H₀) es el cambio del nivel del agua (descendente en este caso) medido desde el nivel estático, al inicio de la prueba slug

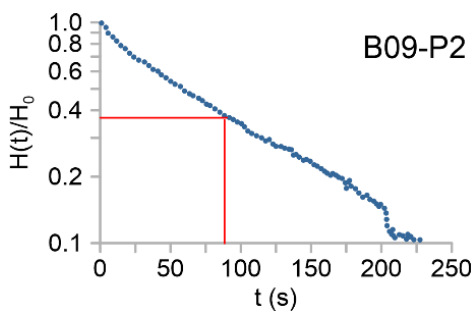


Figura 33. Prueba slug B09-P2

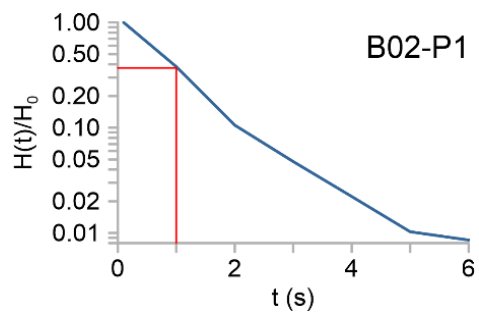


Figura 34. Prueba slug B02-P1

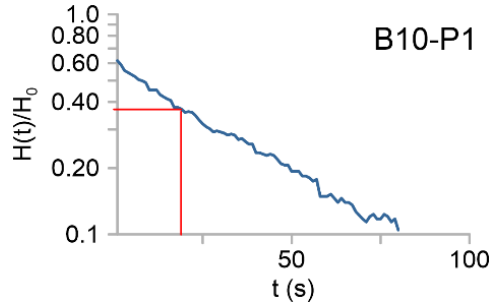


Figura 35. Prueba slug B10-P1

Debido a que el conjunto de estratos permeables en el humedal se comporta como un acuífero libre (Fornés, 2009), se utilizó el Método de Hvorselv para el procesamiento de las pruebas (Hvorselv, 1951), pues este método puede ser empleado para acuíferos libres. Con él, la permeabilidad se obtiene como:

$$K = \frac{r_{tu} \ln \frac{L}{r_f}}{2Lt_{37}}$$

donde

K : conductividad hidráulica

r_{tu} : radio de la entubación (igual a r_f en este caso)

L : longitud de la parte ranurada de la perforación

r_f : radio de la zona filtrante (igual a r_{tu} en este caso)

t_{37} : tiempo en que se tiene el 37% del ascenso (descenso, en este caso) instantáneo inicial

Para todos los piezómetros el radio de la entubación (y de la zona filtrante) corresponde al diámetro del piezómetro, igual a 3.54 cm. La longitud ranurada es igual a 200 cm.

Para B09-P2: $t_{37} = 88.5$ s, entonces $K = 4.03^{-04}$ cm/s

Para B02-P1: $t_{37} = 1$ s, entonces $K = 3.57^{-02}$ cm/s

Para B10-P1: $t_{37} = 18.9$ s, entonces $K = 1.89^{-02}$ cm/s

Por otro lado, el rango reportado de conductividad hidráulica para el humedal de agua dulce y el manglar por Yetter (2004), es de 10^{-2} a 10^{-6} cm/s.

CAPÍTULO IV

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA

IV.1 HIDROLOGÍA

IV.1.1 Cuenca hidrográfica

De acuerdo con Cuencas Hidrográficas de México 2007 de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, La Mancha se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica Arroyo Caño Gallegos, mostrada en la Figura 36, la cual cuenta con las características de la Tabla 6.

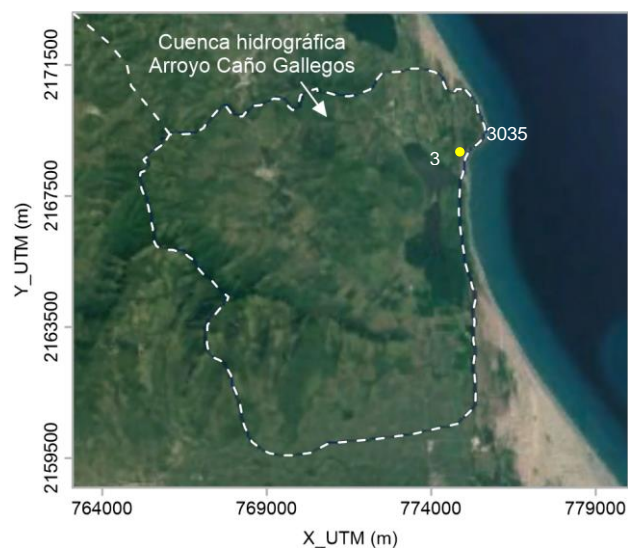


Figura 36. Cuenca Arroyo Caño Gallegos

Tabla 6 Características de la cuenca

Código	CH_1158
Área (m ²)	87962100.21
Perímetro (m)	40434.82
Topónimo	Arroyo Caño Gallegos
Estado al que pertenece	Veracruz
Tipo de cuenca según su desembocadura	Exorreica
Altura máxima (msnm)	700
Altura mínima (msnm)	0
Región Hidrológica	Papaloapan
Subregión hidrológica	Actopan La Antigua
Tipo de patrón de drenaje dominante	Desordenado

IV.1.2 Balance Hídrico Climatológico

Precipitación

Para los años correspondientes a las campañas de campo, 2014 y 2015, los datos de la estación climatológica ubicada en CICOLMA fueron proporcionados por la Red de Ecología Funcional del Instituto de Ecología, A. C. A continuación, se muestran dichos datos (Figura 37 y 38).

De acuerdo con los datos de precipitación y la clasificación de años tipo realizada en la sección 0, ambos años pueden clasificarse como secos.

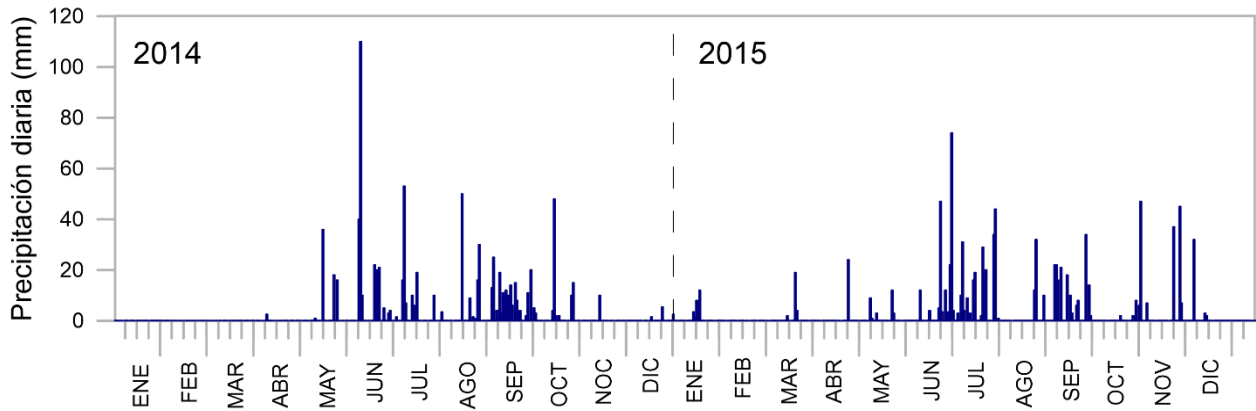


Figura 37. Precipitación diaria para 2014 y 2015

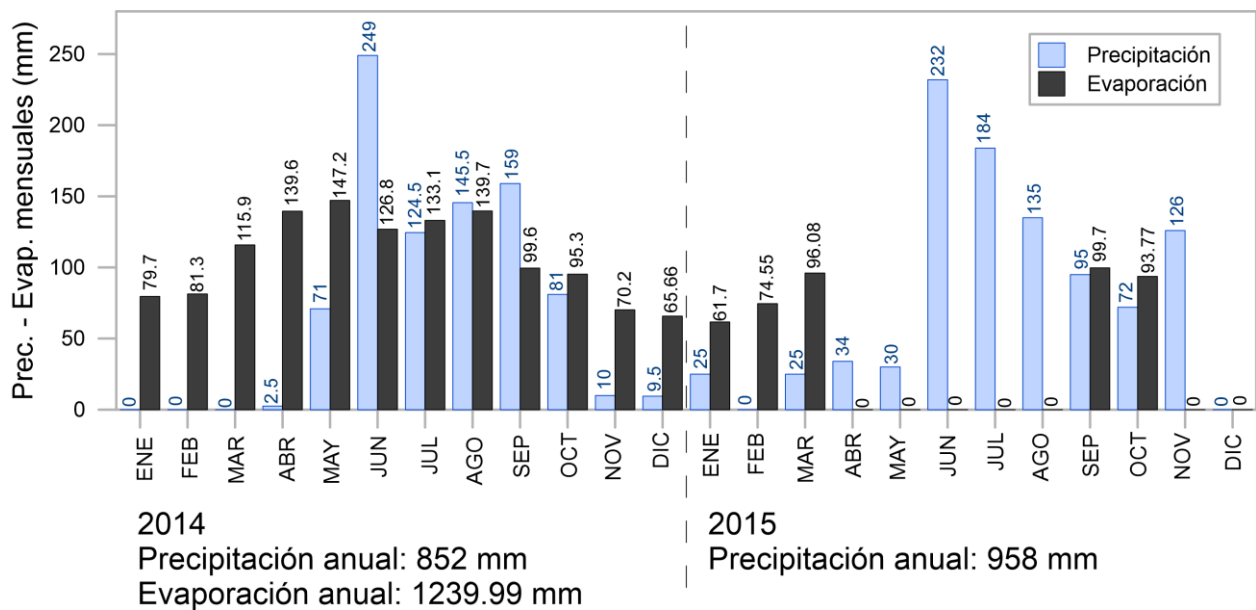


Figura 38. Precipitación y evaporación mensuales para 2014 y 2015.

NOTA: Para el año 2015, no se contó para algunos meses de datos evaporación

Evapotranspiración potencial (ETP)

En manglares de región subhúmeda (precipitación moderada a alta), se estima P/Etp entre 0.5 y 0.75 (SEMARNAT, 2009). Para estimar la evapotranspiración potencial mensual se utilizó el método de Thornthwaite (1948), el cual utiliza una fórmula empírica basada en la latitud (representativa de la extensión de horas-sol por día) y la temperatura media. La relación entre temperatura media mensual y el potencial de evapotranspiración se obtiene como:

$$E_m = 16 \left(10 \frac{T}{I}\right)^a$$

donde E_m es la evapotranspiración mensual en mm, para un mes ficticio de 30 días y una insolación teórica durante 12 de las 24 horas del día, T es la temperatura media mensual en °C para el mes considerado, I es el índice calórico anual obtenido como la suma de índices mensuales:

$$I = \sum_1^{12} i, \quad i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$$

y el exponente a es una función del índice calórico anual:

$$a = 675 * 10^{-9}I^3 - 771 * 10^{-7}I^2 + 1792 * 10^{-5}I + 0.49239$$

El valor de evapotranspiración sin ajustar se corrige con un coeficiente que tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol según la latitud del lugar:

$$ETP_m = k_m E_m$$

$$k_m = (N/12)(m/30)$$

$$N = 2 \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta)$$

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.405\right)$$

donde m es el número de días del mes, N la heliofanía astronómica expresada en horas ($hr = rad * 24/2\pi$), ϕ la latitud (0.3420 rad para La Mancha), δ la declinación solar y J es el día juliano.

Para los datos disponibles de 2014 y 2015 de la sección anterior, los valores correspondientes se presentan en la Figura 39 y la Tabla 7.

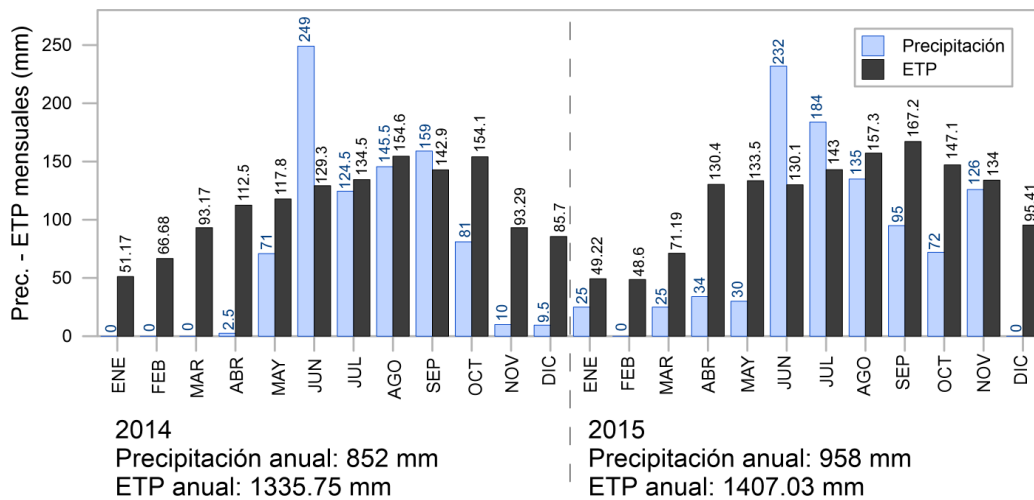


Figura 39. Precipitación y ETP (estimada) mensuales para 2014 y 2015

Tabla 7. Estimación de ETP

	Mes	T (°C)	i	E_m (mm)	J (día 15 mes)	δ	N (hr)	m	k_m	ETP_m (mm)
2014	ENE	18.87	7.47	46.61	2456672.5	0.2688	12.750	31	1.098	51.17
	FEB	21.50	9.10	70.26	2456703.5	0.0744	12.203	28	0.949	66.68
	MAR	23.48	10.40	92.71	2456731.5	-0.1206	11.670	31	1.005	93.17
	ABR	25.57	11.83	121.08	2456762.5	-0.3028	11.149	30	0.929	112.49
	MAY	25.90	12.07	126.16	2456792.5	-0.3993	10.848	31	0.934	117.85
	JUN	26.93	12.80	142.60	2456823.5	-0.3895	10.880	30	0.907	129.29
	JUL	26.73	12.65	139.18	2456853.5	-0.2767	11.226	31	0.967	134.55
	AGO	27.52	13.22	152.52	2456884.5	-0.0848	11.769	31	1.013	154.57
	SEP	26.70	12.63	138.76	2456915.5	0.1307	12.358	30	1.030	142.89
	OCT	26.73	12.65	139.18	2456945.5	0.3052	12.859	31	1.107	154.11
	NOC	22.85	9.98	85.07	2456976.5	0.4015	13.159	30	1.097	93.29
	DIC	22.03	9.44	75.87	2457006.5	0.3884	13.117	31	1.130	85.70
2015	ENE	18.85	7.46	44.83	2457037.5	0.2688	12.750	31	1.098	49.22
	FEB	19.64	7.94	51.20	2457068.5	0.0744	12.203	28	0.949	48.60
	MAR	21.71	9.24	70.84	2457096.5	-0.1206	11.670	31	1.005	71.19
	ABR	26.80	12.70	140.32	2457127.5	-0.3028	11.149	30	0.929	130.36
	MAY	26.95	12.81	142.91	2457157.5	-0.3993	10.848	31	0.934	133.50
	JUN	26.98	12.84	143.45	2457188.5	-0.3895	10.880	30	0.907	130.06
	JUL	27.24	13.02	147.96	2457218.5	-0.2767	11.226	31	0.967	143.04
	AGO	27.65	13.32	155.19	2457249.5	-0.0848	11.769	31	1.013	157.27
	SEP	28.03	13.60	162.37	2457280.5	0.1307	12.358	30	1.030	167.21
	OCT	26.35	12.39	132.89	2457310.5	0.3052	12.859	31	1.107	147.15
	NOV	25.68	11.91	122.22	2457341.5	0.4015	13.159	30	1.097	134.02
	DIC	22.92	10.03	84.47	2457371.5	0.3884	13.117	31	1.130	95.41
Anual	Año	$T_{media-anual}$ (°C)	I	a						ETP_{anual} (mm)
	2014	24.57	134.25	3.14						1335.75
	2015	24.90	137.25	3.24						1407.03

Evapotranspiración real (ETR)

Para cada mes, se pueden presentar dos escenarios:

- 1) $P \geq ETP \rightarrow ETR = ETP$
- 2) $P < ETP \rightarrow ETR = P + |\Delta Alm|$

donde P es la precipitación mensual, ETP es evapotranspiración potencial, ETR es la evapotranspiración real y ΔAlm la variación de almacenaje de agua útil.

Para estimar la variación de almacenaje de agua útil, primero se calcula la diferencia entre precipitación y evapotranspiración (Δ). Posteriormente, se identifica al mes en el que finaliza el período de Δ positivo (o negativo, según fuera el caso), y se asigna un Almacenaje de Agua Útil (Alm) igual a 100 (ó 0, si $ETP < P$). Después, se calcula el Alm del siguiente mes como suma del mes anterior más Δ . El Almacenaje sólo puede tomar valores entre 0 (suelo seco, sin agua disponible para las plantas) y 100 (contenido óptimo de humedad). Si se obtiene un valor menor a cero, se considera un Déficit (Def) y si el valor fuera mayor a 100 es un Exceso (Ex). Finalmente, la Variación de Almacenaje de Agua Útil (ΔAlm) es el resultado de la diferencia entre en valor de almacenaje de agua útil del mes considerado y el del mes anterior. Si tiene signo positivo, significa

Reposición de humedad en el suelo, y si tiene signo negativo, significa Utilización de la humedad del suelo.

Balance

A partir de los resultados anteriormente descritos, el balance hídrico climatológico anual entre la precipitación y la evapotranspiración puede obtenerse como: $ETP + Ex = P + Def$. Los resultados, utilizando los registros del año 2014 y los de 2015, se encuentran en la Tabla 8, Figura 40 y Figura 41. Debido a la variabilidad que los datos de precipitación pueden presentar en 1 año, en la Tabla 10 se presenta la estimación de la evapotranspiración real promedio por mes, incluyendo datos del año 1981 al 2015. Para este caso, la ETP fue recalculada, utilizando los datos de temperatura correspondientes a los promedios del año 1981 al 2015 (Tabla 9 y Figura 42).

Tabla 8. Balance hídrico climatológico para 2014 y 2015

	Mes	ETP_m (mm)	P (mm)	Δ (mm)	Alm (mm)	Déficit (mm)	Exceso (mm)	Δ Alm (mm)	Escenario	ETR_m (mm)
2014	ENE	51.17	0.0	-51.2	0.0	-51.2		0.0	2	0.0
	FEB	66.68	0.0	-66.7	0.0	-66.7		0.0	2	0.0
	MAR	93.17	0.0	-93.2	0.0	-93.2		0.0	2	0.0
	ABR	112.49	2.5	-110.0	0.0	-110.0		0.0	2	2.5
	MAY	117.85	71.0	-46.8	0.0	-46.8		0.0	2	71.0
	JUN	129.29	249.0	119.7	100.0		19.7	100.0	1	129.3
	JUL	134.55	124.5	-10.0	90.0			-10.0	2	134.5
	AGO	154.57	145.5	-9.1	80.9			-9.1	2	154.6
	SEP	142.89	159.0	16.1	97.0			16.1	1	142.9
	OCT	154.11	81.0	-73.1	23.9			-73.1	2	154.1
	NOC	93.29	10.0	-83.3	0.0	-59.4		-23.9	2	33.9
	DIC	85.70	9.5	-76.2	0.0	-76.2		0.0	2	9.5
2015	ENE	49.22	25.0	-24.2	0.0	-24.2		0.0	2	25.0
	FEB	48.60	0.0	-48.6	0.0	-48.6		0.0	2	0.0
	MAR	71.19	25.0	-46.2	0.0	-46.2		0.0	2	25.0
	ABR	130.36	34.0	-96.4	0.0	-96.4		0.0	2	34.0
	MAY	133.50	30.0	-103.5	0.0	-103.5		0.0	2	30.0
	JUN	130.06	232.0	101.9	100.0		1.9	100.0	1	130.1
	JUL	143.04	184.0	41.0	100.0		41.0	0.0	1	143.0
	AGO	157.27	135.0	-22.3	77.7			-22.3	2	157.3
	SEP	167.21	95.0	-72.2	5.5			-72.2	2	167.2
	OCT	147.15	72.0	-75.1	0.0	-69.6		-5.5	2	77.5
	NOV	134.02	126.0	-8.0	0.0	-8.0		0.0	2	126.0
	DIC	95.41	0.0	-95.4	0.0	-95.4		0.0	2	0.0
Anual	Año	ETP_{anual} (mm)	P_{anual} (mm)			Def_{anual} (mm)	Ex_{anual} (mm)	Balance hídrico (mm) $ETP+Ex = P+Def$		ETR_{anual} (mm)
	2014	1335.75	852.0			-503.5	19.7	1355.5	1355.5	832.29
	2015	1407.03	958.0			-491.9	42.9	1449.9	1449.9	915.10

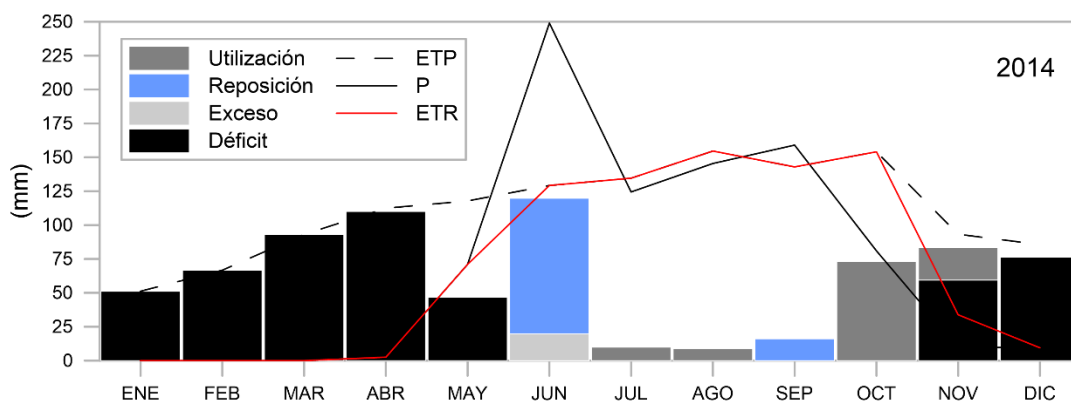


Figura 40. Balance hídrico climatológico datos del 2014

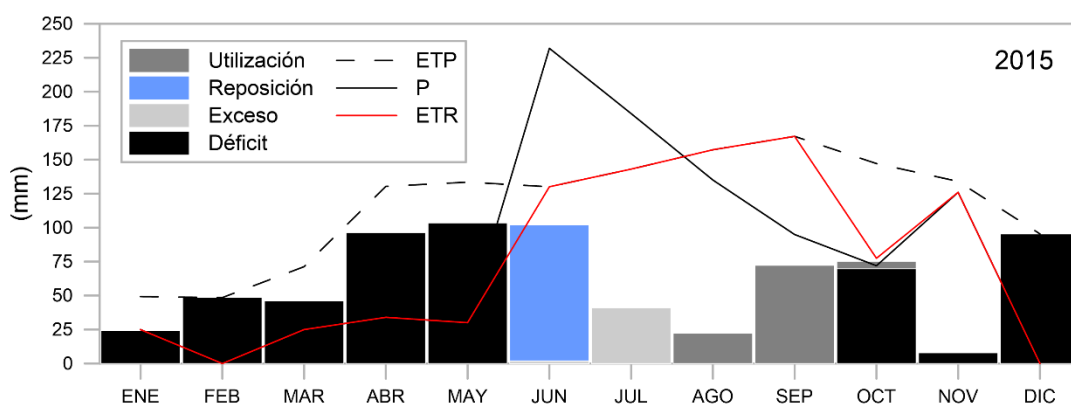


Figura 41. Balance hídrico climatológico datos del 2015

Tabla 9. Balance hídrico climatológico datos de 1981 a 2015

Mes	ETP_m (mm)	$P_{(1981-2015)}$ (mm)	Δ (mm)	Alm (mm)	Déficit (mm)	Exceso (mm)	Δ Alm (mm)	Escenario	ETR_m (mm)
ENE	74.64	17.4	-57.3	0.0	-57.3		0.0	2	17.4
FEB	71.47	12.7	-58.8	0.0	-58.8		0.0	2	12.7
MAR	101.81	16.1	-85.7	0.0	-85.7		0.0	2	16.1
ABR	123.62	18.7	-104.9	0.0	-104.9		0.0	2	18.7
MAY	156.93	60.0	-97.0	0.0	-97.0		0.0	2	60.0
JUN	164.18	190.9	26.7	26.7			26.7	1	164.2
JUL	153.47	255.7	102.2	100.0		28.9	73.3	1	153.5
AGO	164.67	261.8	97.1	100.0		97.1	0.0	1	164.7
SEP	164.57	217.7	53.2	100.0		53.2	0.0	1	164.6
OCT	150.87	104.3	-46.5	53.5			-46.5	2	150.9
NOC	114.67	45.7	-68.9	0.0	-15.5		-53.5	2	99.2
DIC	87.32	18.6	-68.7	0.0	-68.7		0.0	2	18.6
	ETP_{anual} (mm)	P_{anual} (mm)			Def_{anual} (mm)	Ex_{anual} (mm)	Balance hídrico (mm) ETP+Ex=P+Def		ETR_{anual} (mm)
	1528.21	1219.6			-487.7	179.1	1707.4 1707.4		1040.5

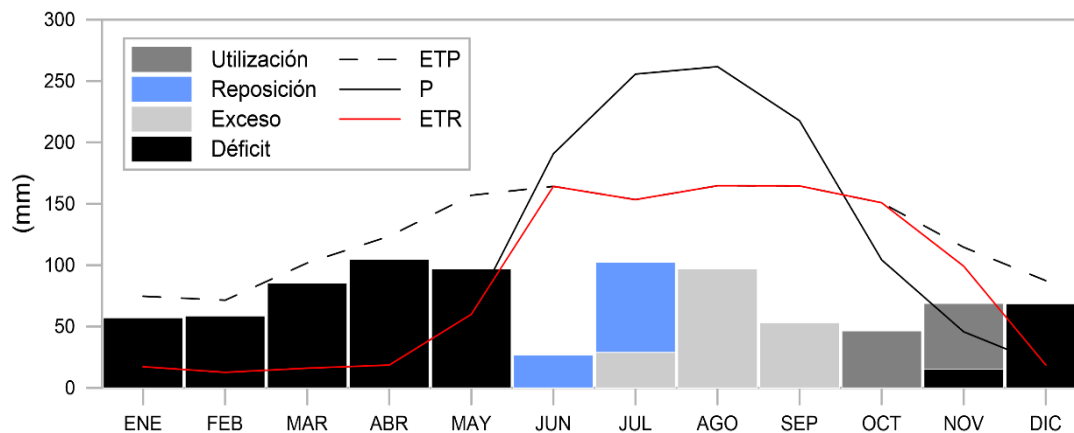


Figura 42. Balance hídrico climatológico datos de 1981 a 2015

Relación entre la precipitación y los niveles de superficie libre en la laguna

Se realizó la instalación de un pluviómetro en la estación de investigación CICOLMA del Instituto de Ecología, A. C. para registrar con alta resolución durante un mes, los datos de lluvia en La Mancha (Figura 43). El equipo es un HOBO® Data Logging Rain Gauge - RG3-M de la firma Onset. La toma de datos es automática, con una frecuencia de registro de 1 s, que son almacenados en un datalogger que se encuentra dentro del cilindro. Esto fue realizado durante el año 2017, en los meses de septiembre y octubre (correspondientes a la temporada de lluvias), posterior a las actividades de monitoreo descritas en la sección anterior.

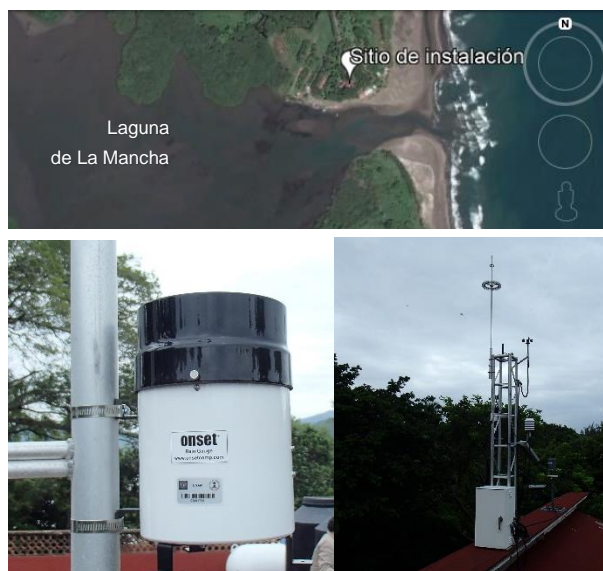


Figura 43. Instalación del HOBO® Data Logging Rain Gauge - RG3-M

Utilizando un HOBO® Waterproof Shuttle (U-DTW-1), los datos guardados en el datalogger son descargados y posteriormente visualizados en el programa HOBOWare Pro. Los datos registrados se muestran en la Figura 44 y Figura 45. Durante los días que el equipo registró datos,

se identificaron 18 tormentas. La Tabla 10 muestra las fechas de inicio de cada una de ellas y la Figura 46 presenta la precipitación acumulada y la duración en minutos, de las mismas.

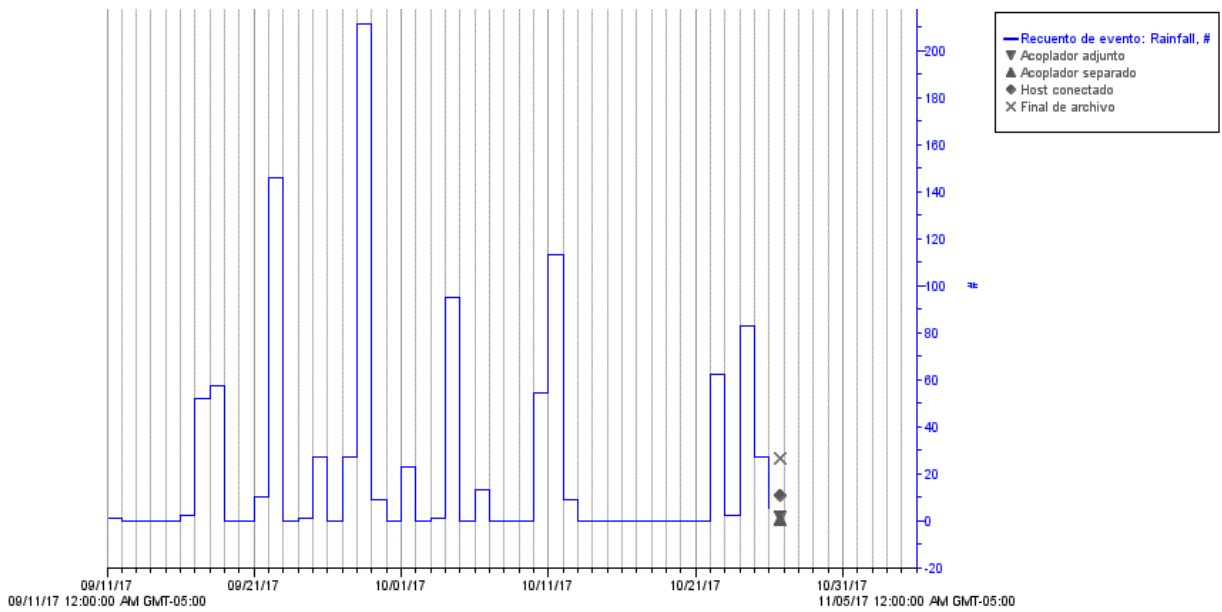


Figura 44. Recuento de eventos del pluviómetro

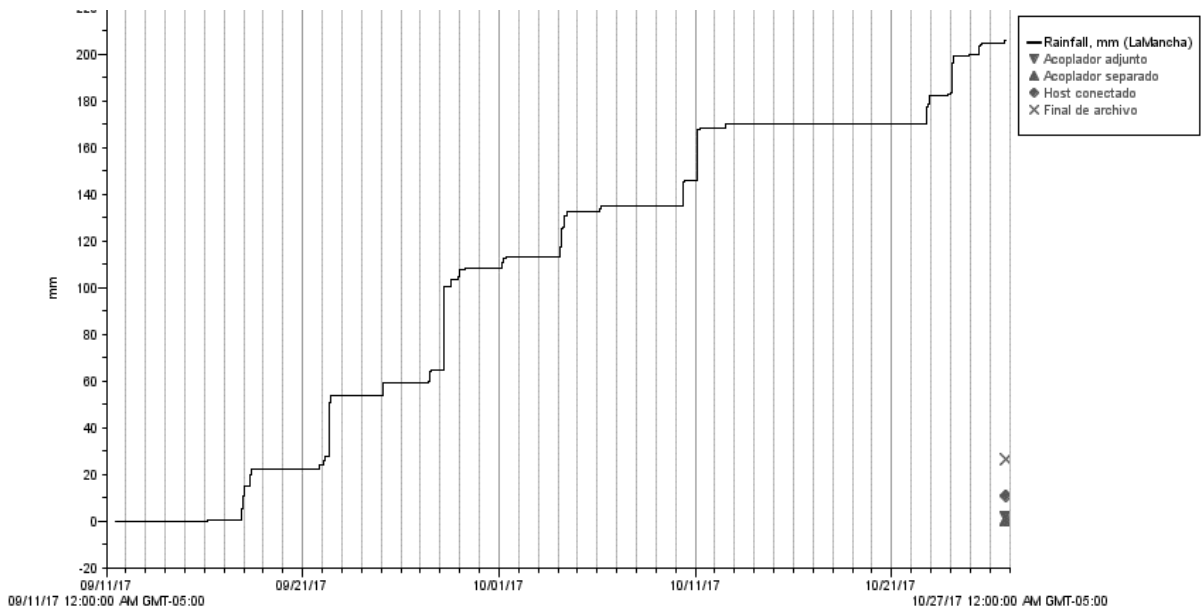


Figura 45. Curva masa de precipitación

Tabla 10. Fecha y hora de inicio de las tormentas registradas

Tormenta	Fecha de inicio	Tormenta	Fecha de inicio
1	17/09/2017 21:33:15	11	28/09/2017 12:41:05
2	17/09/2017 23:03:32	12	28/09/2017 22:24:56
3	18/09/2017 00:16:29	13	29/09/2017 05:29:36
4	18/09/2017 08:14:33	14	01/10/2017 03:09:19
5	21/09/2017 20:17:56	17	04/10/2017 02:56:37
6	22/09/2017 01:51:42	18	06/10/2017 03:31:50
8	25/09/2017 02:06:10	19	10/10/2017 08:15:28
9	27/09/2017 10:11:28	20	11/10/2017 01:41:15
10	28/09/2017 03:54:52	21	12/10/2017 12:23:06

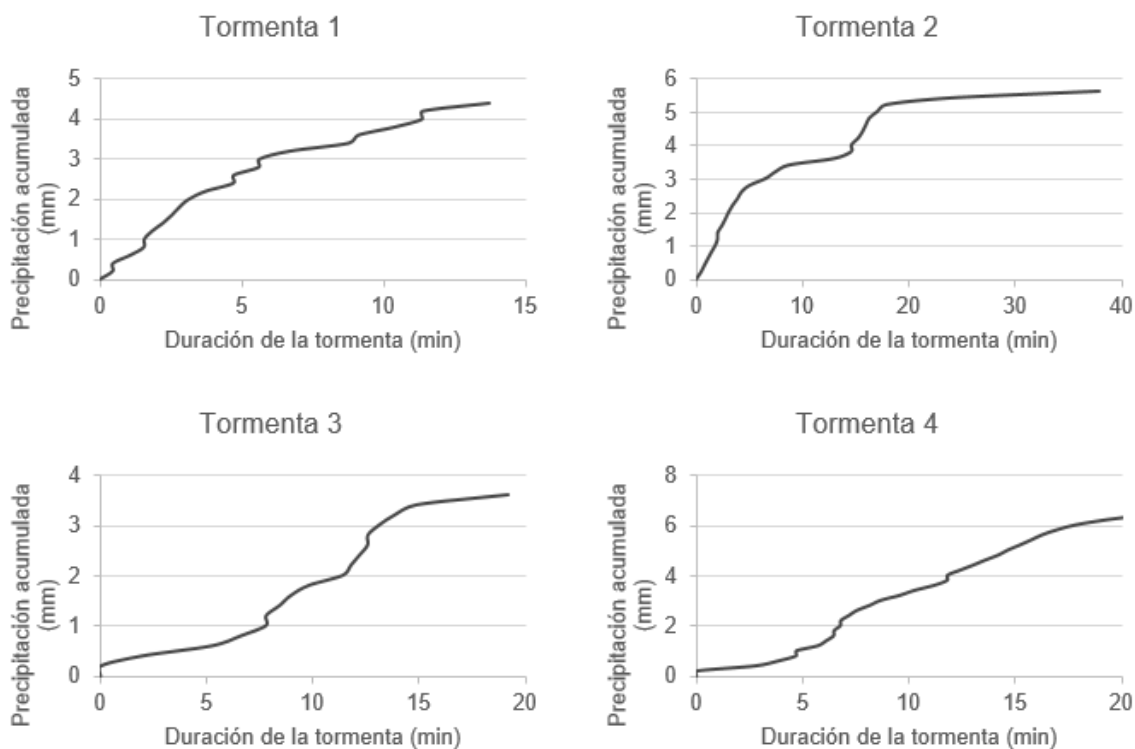


Figura 46. Curvas de precipitación acumulada por tormenta

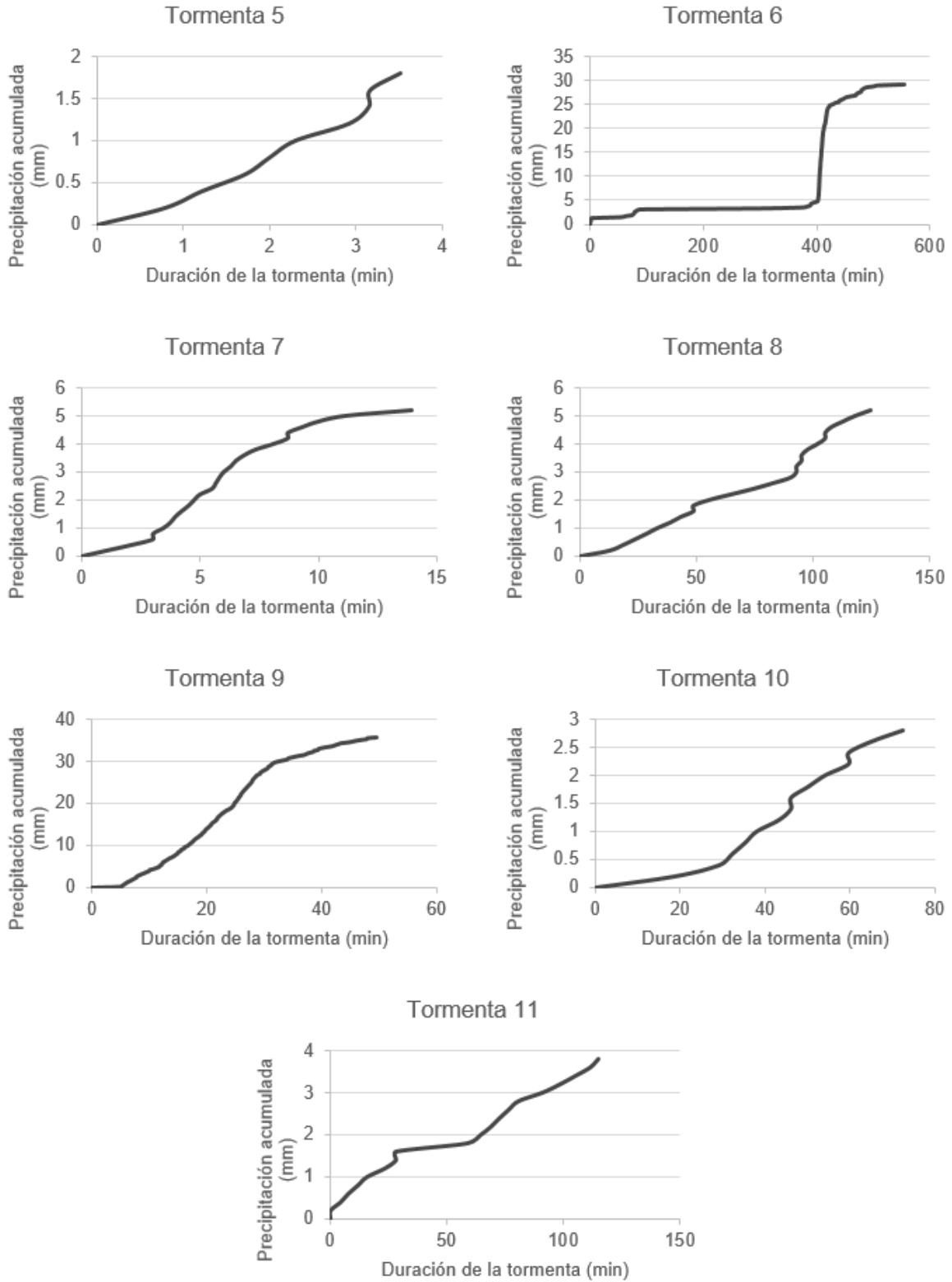


Figura 46 (Continúa). Curvas de precipitación acumulada por tormenta

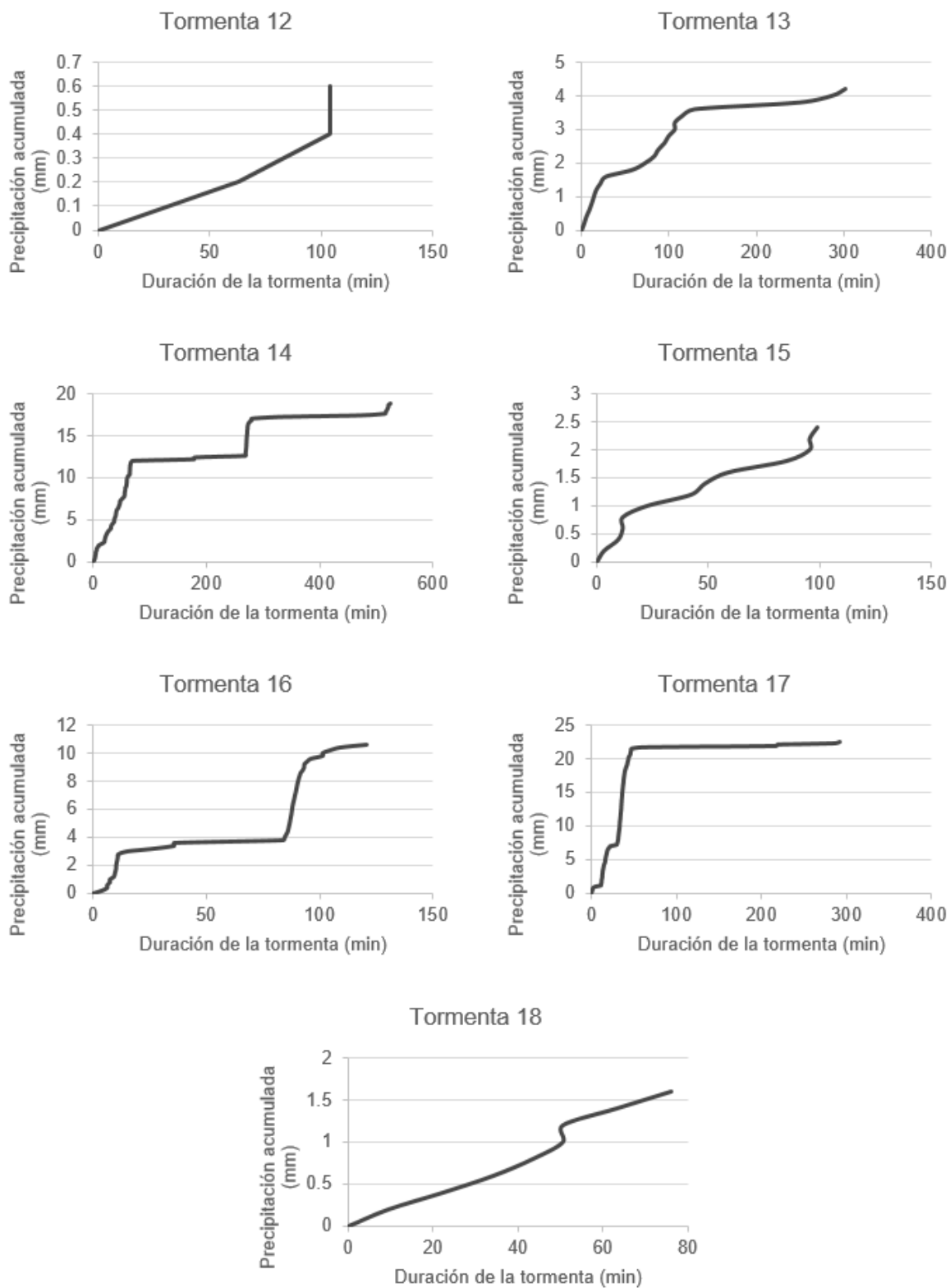


Figura 46 (Continúa). Curvas de precipitación acumulada por tormenta

Para el registro de niveles dentro de la laguna, se instaló en el sector Sur de la laguna, un Keller CTD ($19^{\circ} 34.682 \text{ N } 96^{\circ} 23.245 \text{ W}$). Esta probeta fue colocada dentro de un tubo de 2.80 m de longitud, en el cual el punto de medición se encontraba a 1 m de la base del tubo. Dicho tubo fue sujetado a un poste de madera que forma parte de un criadero de ostiones en desuso. De esta manera, el nivel de la superficie libre del agua respecto al NMM se estimó como: $Z_{\text{base-tubo}} + x + \text{PCTD}$. El equipo fue programado para registrar datos cada 10 minutos, durante un mes.

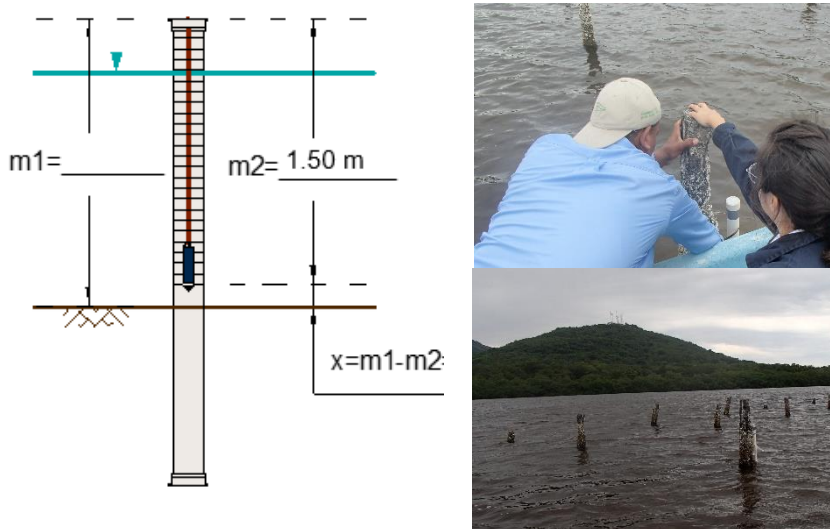


Figura 47. Esquema e instalación del CTD

Los niveles registrados y la variación de la marea de acuerdo al pronóstico del CICESE se muestran en la Figura 48. En este caso, la boca de la laguna se mantuvo abierta durante el registro de datos, pero debido a la entrada anticipada de Nortes, existe una tendencia de aumento en el nivel de la laguna. Los vientos fuertes aumentan el transporte sedimentario en la playa, tendiendo a cerrar la barra que obstruirá eventualmente la comunicación del mar y la laguna, además de que el incremento en la precipitación aumenta la cantidad de agua presente en la laguna. Se observa una relación en la amplitud de las variaciones de la oscilación del nivel dentro de la laguna respecto a las de la marea. Posteriormente, se relaciona esta evolución de los niveles, con las tormentas registradas que se presentaron en la sección anterior.

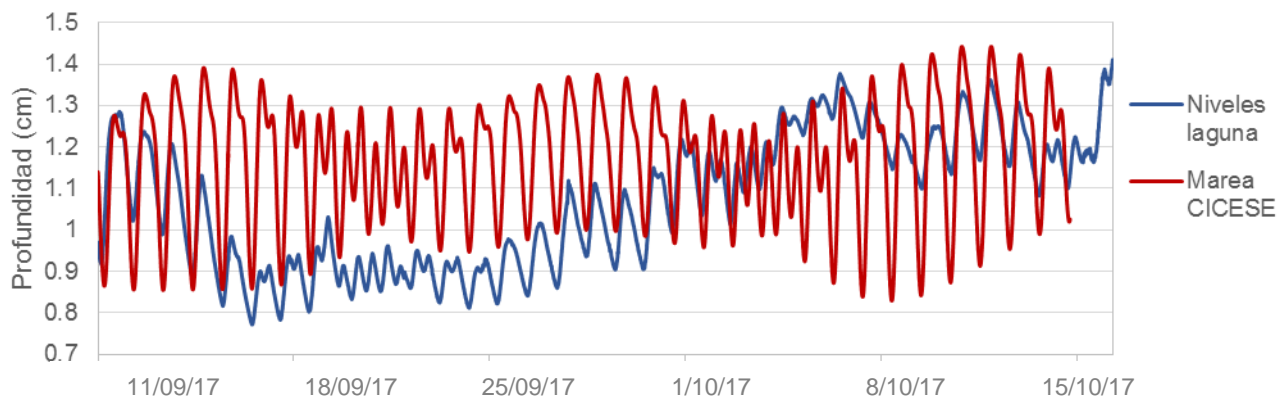


Figura 48. Variación de niveles registrada con el Keller CTD

En la Figura 48 se observa la variación de niveles de superficie libre del agua a través de los cambios de presión medidos por el CTD. Se observa que, con la presencia de las tormentas, la oscilación de los niveles tiene una tendencia ascendente. Algunas de estas tormentas fueron especialmente intensas ya que ocurrieron debidas a la entrada de Nortes y frentes fríos en la región. También es importante considerar que estos datos fueron recabados después del paso del huracán Katia, el cual tocó tierra en Veracruz con categoría 1, el 9 de septiembre de 2017.

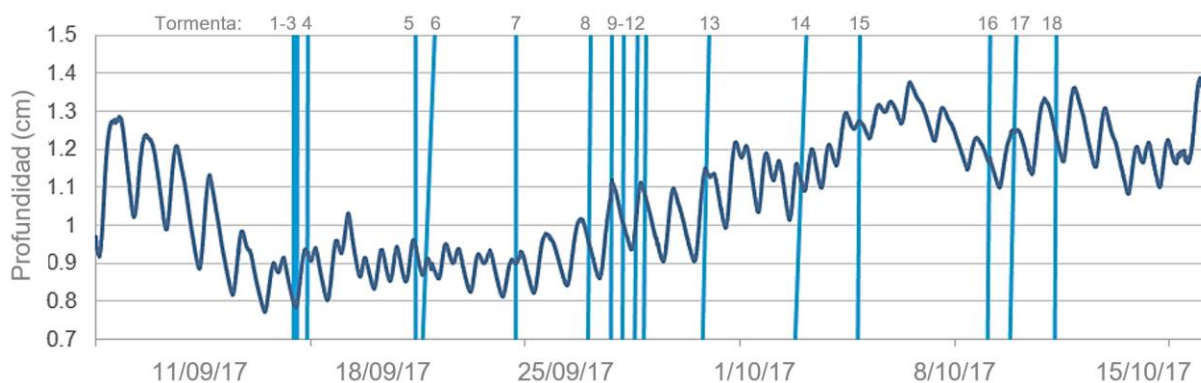


Figura 49. Tormentas y variación de niveles en la laguna

IV.2 HIDROGEOLOGÍA

IV.2.1 Datos del acuífero

La laguna de La Mancha se localiza dentro del acuífero Valle de Actopan. En la Figura 50 se observa su localización. Además, se identifica la piezometría del año 1992 para la zona sur-este del acuífero, obtenida de la Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea del Acuífero (3005) Valle de Actopan del Estado de Veracruz (CONAGUA, 2009). De dicho documento se obtienen las características del acuífero Valle de Actopan que se muestran en la Tabla 12.

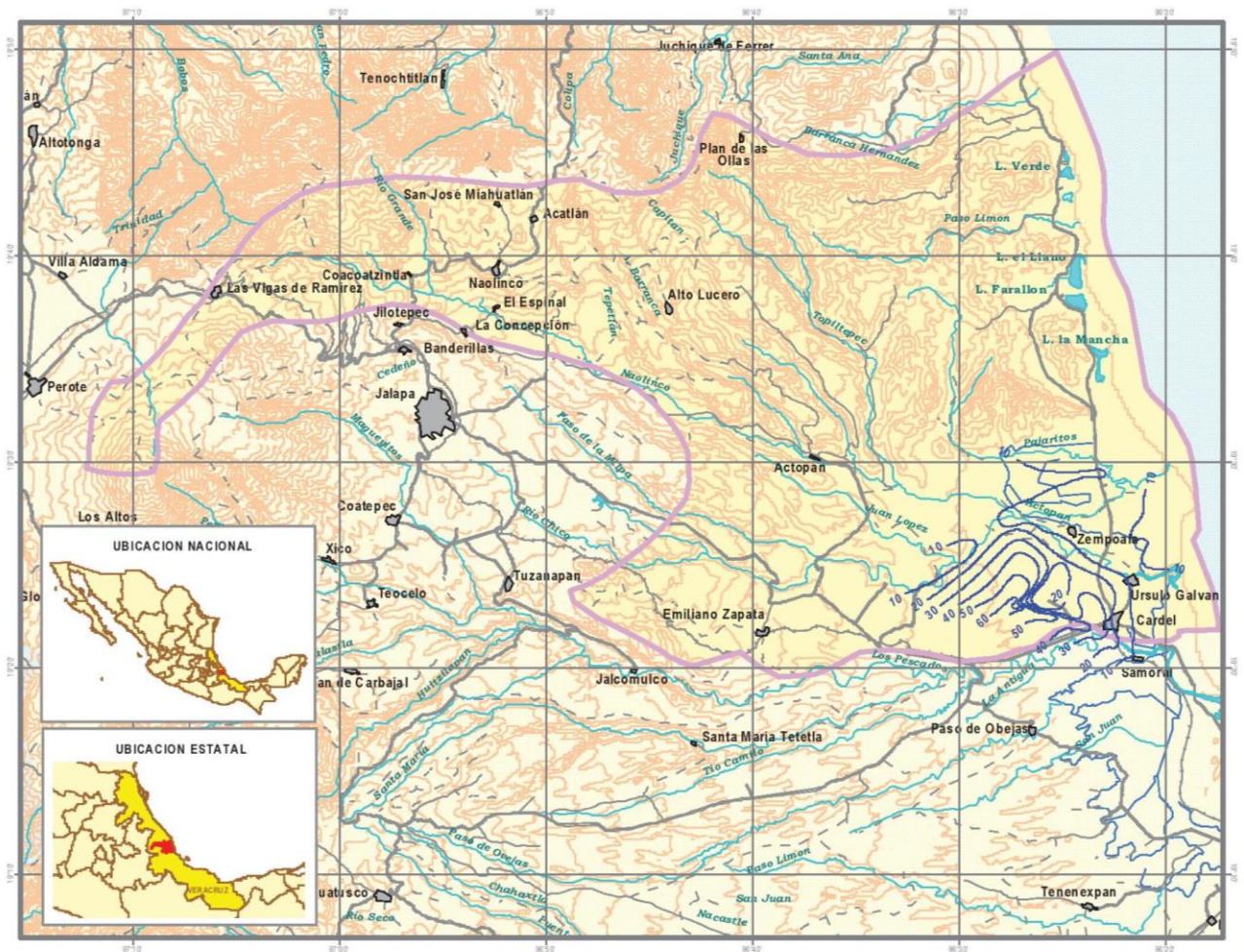


Figura 50. Localización del acuífero Valle de Actopan y profundidad del nivel estático del año 1992 (tomado de CONAGUA, 2009)

Tabla 11. Características del acuífero

Código	3005
Área (km ²)	445.20
Transmisividad en la unidad de dunas (m ² /s)	0.041 – 0.095
Transmisividad en depósitos de grava y arena (m ² /s)	0.010 – 0.016
Transmisividad para llanuras de inundación (m ² /s)	0.001 – 0.005
Coefficiente de almacenamiento	0.085
Material	Granular no consolidado
Tipo	Libre
Espesor de la unidad acuífera	>300 m

En cuanto al nivel estático, se tiene que en la porción central del acuífero la profundidad predominante es de 10 m. Por otro lado, la elevación del nivel estático sigue la tendencia de las curvas de igual elevación y de la línea de costa, por lo que el flujo se presenta de Oeste a Este.

IV.2.2 Recarga y descarga

De acuerdo con la Norma para determinar la disponibilidad media anual, la recarga media anual es de:

Recarga (400.4 Mm³) = Recarga natural (240.0 Mm³) + Recarga inducida (60.0 Mm³) + Recarga horizontal (100.40 Mm³)

donde

Recarga natural: se estimó como el 60 % del volumen de agua que proviene de la infiltración de agua de lluvia

Recarga inducida: recarga favorecida por el distrito de riego proveniente del río La Antigua y el Actopan

Flujo horizontal: definido por estudios anteriores

La descarga fue cuantificada de:

Descargas (397.26 Mm³) = evapotranspiración (23.95 Mm³) + descargas naturales (340.90 Mm³) + extracción de agua subterránea (23.86 Mm³) + flujo subterráneo (8.55 Mm³)

IV.2.3 Gastos subterráneos por unidad de espesor del acuífero

A partir de los datos de conductividad hidráulica, calculados como resultados de las actividades de monitoreo en campo, es posible estimar el gasto del fuljo subterráneo utilizando la ley de Darcy:

$$Q = AKi$$

donde

Q : gasto subterráneo

$A = B \cdot b$: área a través de la cual ocurre la descarga

B : ancho de la frontera por la que ocurre la descarga

b : espesor del acuífero

$i = dh/dL$: gradiente hidráulico horizontal

dh : variación de la carga pizométrica

dL : distancia entre los piezómetros

El gasto por unidad de espesor de estrato ($q = B \cdot K \cdot i$) se calculó en función los polígonos generados en el área cubierta por el manglar, cuyo gradiente hidráulico resultara representativo en función de la ubicación de los piezómetros, como se muestra en la siguiente figura. De esta forma se obtuvieron los datos presentados.

El área que rodea a la laguna está compuesta por los materiales enlistados a continuación (Hernández, 2009):

Tipo I: llanura lacuno-fluvio-palustre formada por depósitos arcillosos humificados.

Tipo II: llanura lacuno-palustre acumulativa formada por depósitos areno-limosos.

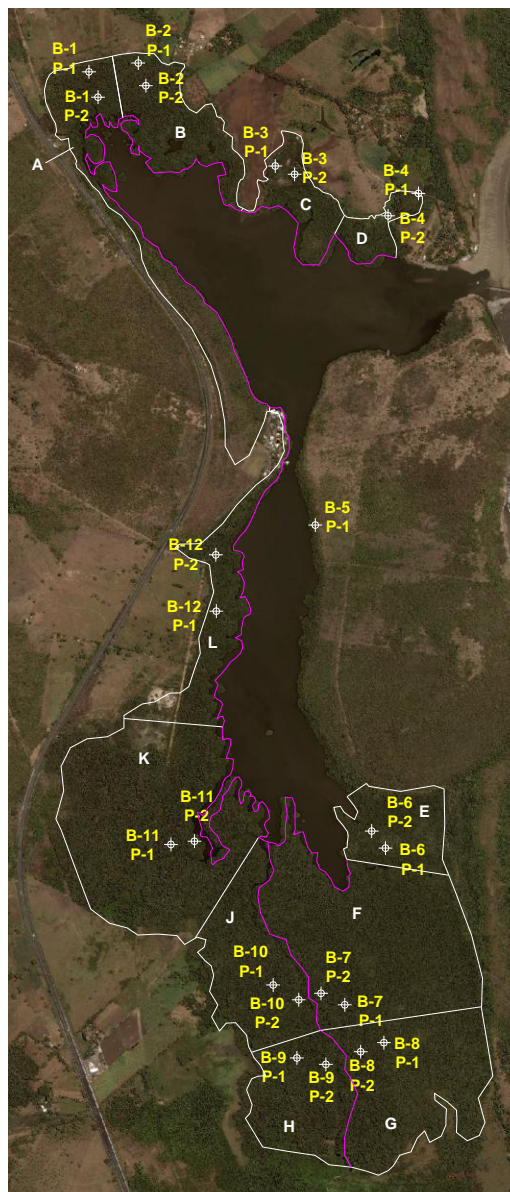
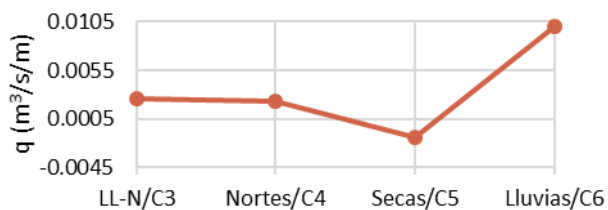
Tipo III: llanura deluvio-coluvial acumulativa formada por depósitos areno-limosos.

El material Tipo I puede encontrarse en todos los polígonos establecidos para el cálculo del gasto subterráneo, excepto el C y D, que se ubican en material Tipo II. El material Tipo III se encuentra en una franja estrecha de la margen Este de la laguna, la cual está rodeada por colinas volcánico-abrasivas formadas por andesitas basálticas que se encuentran limitadas por el mar.

En la Tabla 12 se presentan los resultados. Los gastos positivos corresponden a una descarga hacia la laguna, y los gastos negativos a salidas. Como se verifica, la descarga hacia la laguna más grande ocurre durante la temporada de lluvias. Durante la época de secas, el balance indica que la laguna es quien alimenta al subsuelo.

Tabla 12. Gastos subterráneos por unidad de espesor del acuífero

Polígono	q (m ³ /s/m)			
	C3 (11/14) LLUVIAS- NORTES	C4 (02/15) NORTES	C5 (05/15) SECAS	C6 (08/15) LLUVIAS
A	-1.45E-04	1.99E-03	1.46E-03	1.67E-03
B	3.51E-03	-2.29E-04	-2.83E-03	8.92E-03
C	-5.61E-04	1.56E-05	-9.20E-04	-3.90E-04
D	5.23E-06	1.39E-05	-4.27E-05	-4.27E-05
E	-7.62E-05	1.65E-05	2.95E-04	-1.34E-04
F	1.92E-04	-1.73E-04	5.97E-05	-1.73E-04
G	-4.71E-04	-5.76E-05	-7.01E-05	-2.96E-04
H	-5.74E-04	1.47E-05	-1.68E-05	-7.98E-05
J	7.24E-04	3.05E-05	3.36E-04	5.72E-04
K	-5.18E-05	6.88E-04	2.81E-04	-1.48E-05
Total	2.56E-03	2.31E-03	-1.44E-03	1.00E-02



IV.2.4 Modelo de flujo subterráneo

Tipos de fronteras

Se construyeron las fronteras del modelo, utilizando curvas de nivel, un mapa geológico escala 1:250000 del INEGI (Figura 51) y una imagen satelital de Digital Globe. Las fronteras propuestas fueron: la cuenca hidrográfica (debido a falta de información estratigráfica), la línea de costa, el contorno de la laguna, el cauce del Caño Gallegos, y la frontera de las formaciones de toba, como se observa en la Figura 51.

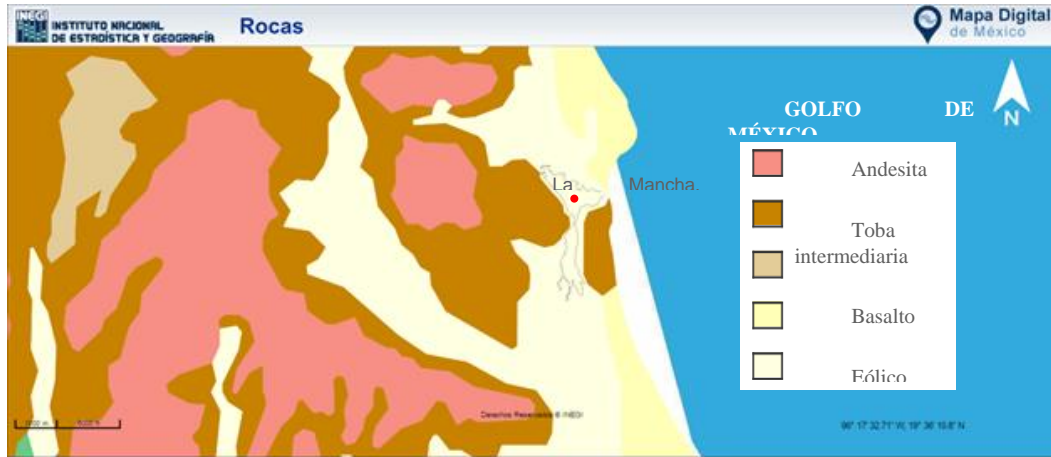


Figura 51. Rocas 1:250 000 (INEGI)

Para delimitar la zona de influencia de flujo subterráneo hacia la laguna, se propusieron las siguientes fronteras: la cuenca hidrográfica (debido a falta de información estratigráfica), la línea de costa, el contorno de la laguna, el cauce del Caño Gallegos, y la frontera de las formaciones de toba de acuerdo al mapa geológico escala 1:250000 del INEGI. De esta forma, se tienen 11 arcos como se observa en la Figura 52, Las cargas contantes en cada arco quedará definida por la carga en los nodos que lo delimitan.

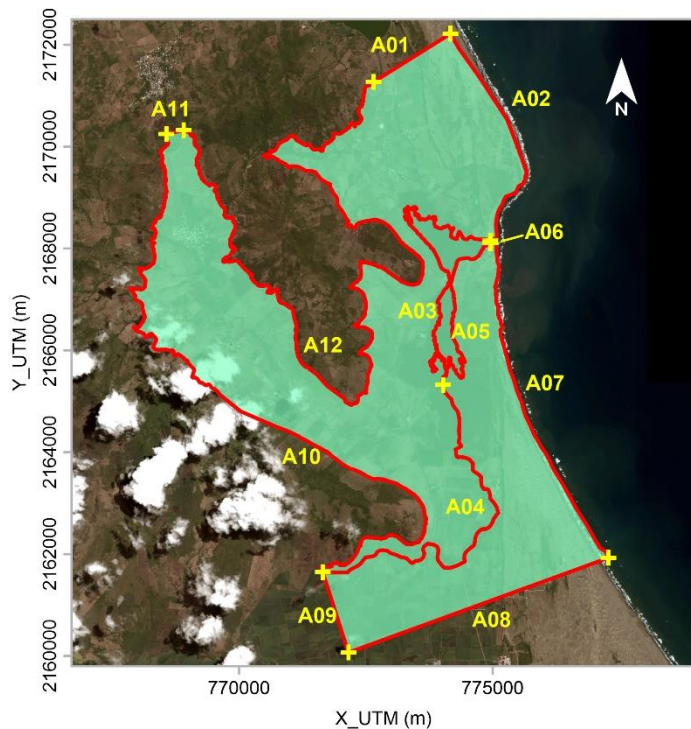


Figura 52. Fronteras del modelo en GIS

Tabla 13 Tipo de fronteras

Arco	Tipo
A01	De carga constante
A02	De carga constante
A03	De carga constante
A04	De carga constante
A05	De carga constante
A06	Sin flujo
A07	De carga constante
A08	Sin flujo
A09	De carga constante
A10	Sin flujo
A11	De carga constante
A12	Sin flujo

Construcción de la malla

Se seleccionó una malla de 2 capas y 30x60 celdas, en un dominio de 1730x5220 m, teniendo celdas de 57x87 m, la cual contiene las fronteras descritas, como se muestra en la Figura 53.

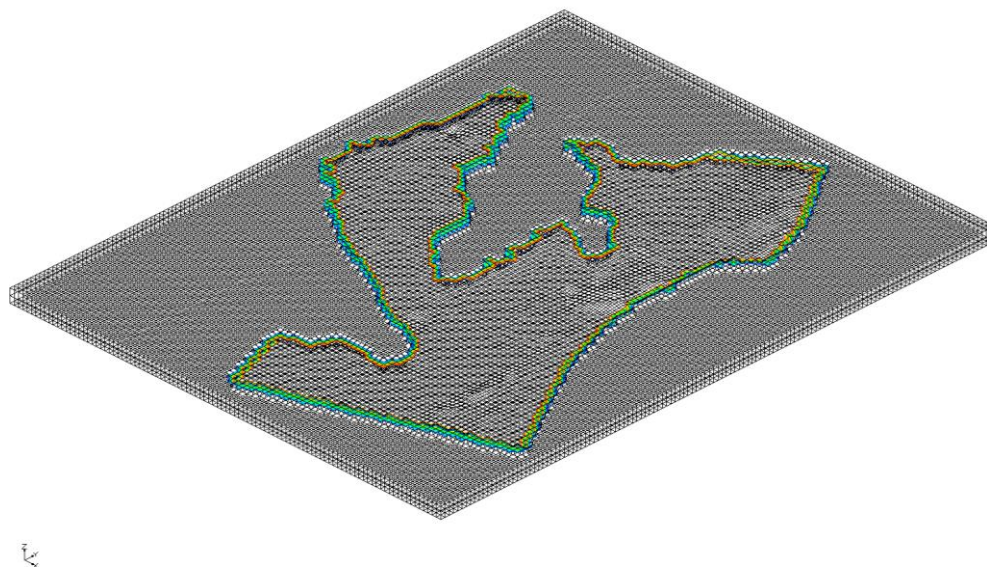


Figura 53. Malla rectangular en GIS

Para las dimensiones en dirección Z de la malla, se definieron las 2 capas definidas por tres superficies, las cuales fueron interpoladas dentro del módulo de MODFLOW en GMS.

Fondo

Debido a que no se cuenta con muestreos estratigráficos en la zona, para el fondo se determinó la profundidad del manto rocoso (toba) en función de la topografía y la distribución de las rocas (INEGI).

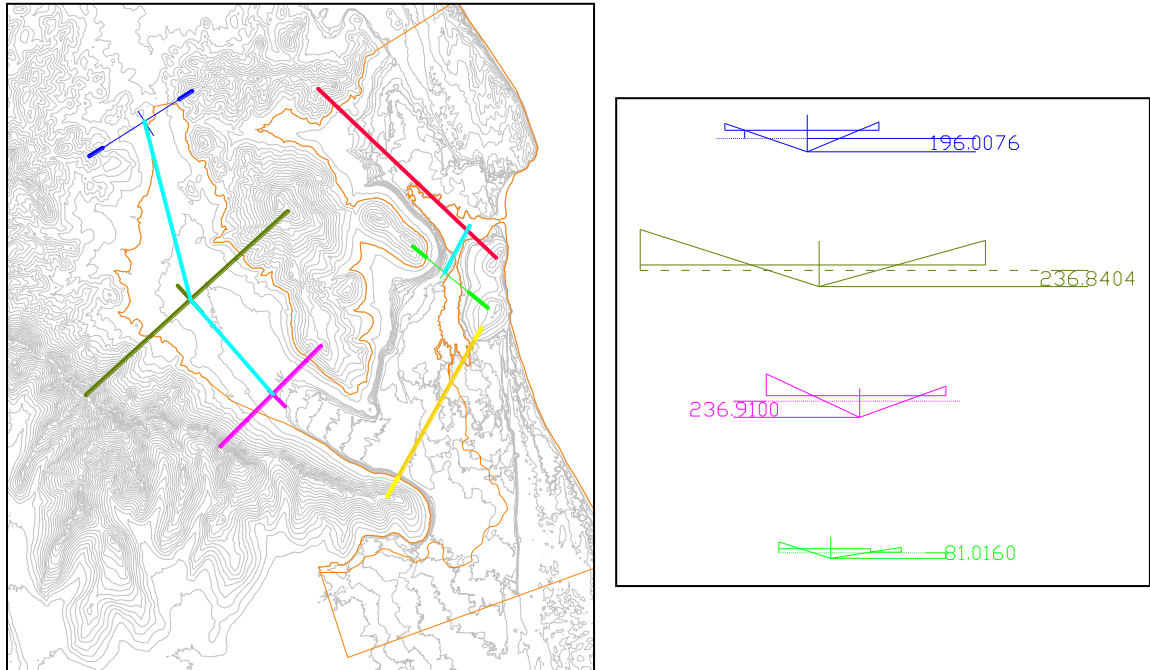


Figura 54. Estimación de la pendiente del manto rocoso

Como se muestra en la Figura 54, se dibujaron transectos siguiendo una línea perpendicular a las curvas de nivel entre las pendientes de la toba, y posteriormente se calcularon las profundidades del punto de intersección de los transectos, siguiendo la zona central del área con tendencia horizontal. Se encontró que la profundidad estimada del manto rocoso va de los 60 m en la zona de la laguna, a 237 m en la zona más profunda. Por ello, en la línea de costa, se asignaron 60 m a la profundidad del manto rocoso.

Intermedia

La superficie intermedia se definió de 30 m por debajo de la superficie topográfica, partiendo de que el nivel estático se ha estimado en un valor medio de 10 m (CONAGUA, 2009). Para el área cubierta por la laguna, se asignaron elevaciones de 10 m por debajo del terreno.

Superficie superior: Topografía

Se utilizaron los datos de topografía LIDAR del INEGI para asignar las elevaciones de la superficie superior de la malla, quedando delimitada por los arcos definidos como se muestra en la Figura 55.

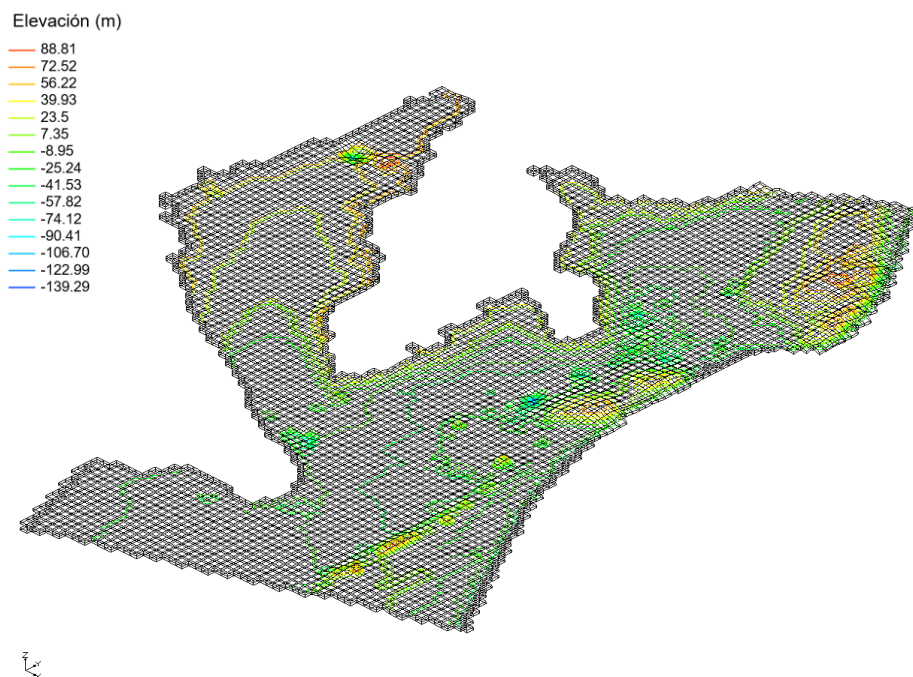


Figura 55. Malla delimitada por las fronteras seleccionadas y la superficie topográfica

Datos de entrada

Superficie de cargas iniciales

La superficie de nivel estático se definió como una superficie 10 m por debajo de la superficie topográfica, dado el nivel estático determinado por CONAGUA, 2009.

Cargas iniciales en los nodos

En función de los datos topográficos y la superficie de cargas iniciales, se determinaron los valores de los nodos (Figura 56):

- A los nodos en la costa y en la descarga del Caño Gallegos hacia la laguna, se les asignó un valor de cero (NMM).
- A los puntos sobre curvas de nivel, se les asignó un valor igual a la cota menos 10 m.
- Al punto más alto del cauce del Caño Gallegos, se le asignó un valor de la cota más 0.50 m, considerando un tirante medio en el caño.

- Los nodos 28151 al 28154 se añadieron al arco A01 para contribuir a que la interpolación de la carga considerara más apropiadamente la variación de la topografía en ese arco.

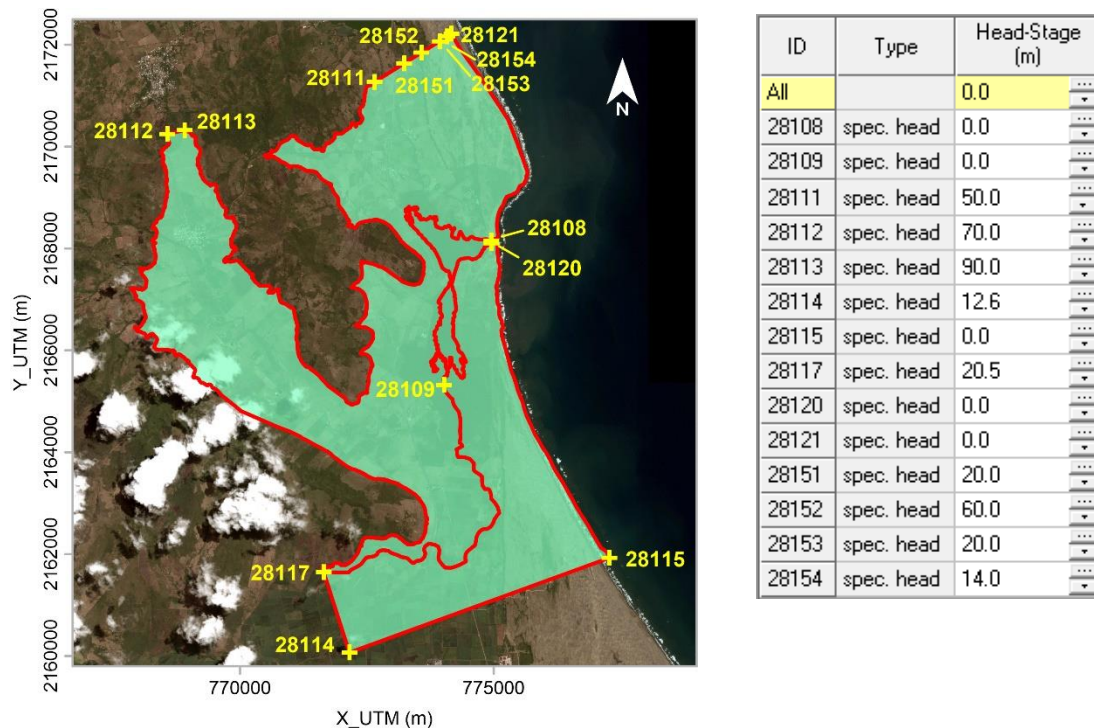


Figura 56. Cargas iniciales en los nodos

Tasa de recarga

La tasa de recarga se calculó como:

$$\text{Área de recarga} = 445.2 \text{ km}^2$$

$$\text{Volumen de recarga media anual} = 400.42 \text{ Mm}^3/\text{año} = 12.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Tasa de recarga} = \text{Volumen de recarga} / \text{área de recarga} = 2.85 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

Malla de conductividad hidráulica

Para asignar los valores de conductividad hidráulica, se emplearon dos valores distintos para cada capa:

- Para la capa superior (1) se determinó un valor alto de 0.01 m/s
- Para la capa inferior (2) se usó un valor bajo de 0.001 m/s

Resultados: elevaciones

El paquete *Block-Centered Flow* (BCF) es uno de los tres paquetes de flujo que se pueden utilizar dentro de MODFLOW en GMS. El paquete BCF calcula la conductancia entre cada una de las celdas de la malla y establece las ecuaciones de las diferencias finitas para el flujo de célula a célula. También calcula los términos que determinan la velocidad de movimiento del agua hacia y desde el almacenamiento.

Para un acuífero libre o no confinado, como es el caso del acuífero Valle de Actopan, para utilizar el paquete BCF se necesita: Elevación del fondo, conductividad hidráulica, salidas y el coeficiente de almacenamiento primario (rendimiento específico).

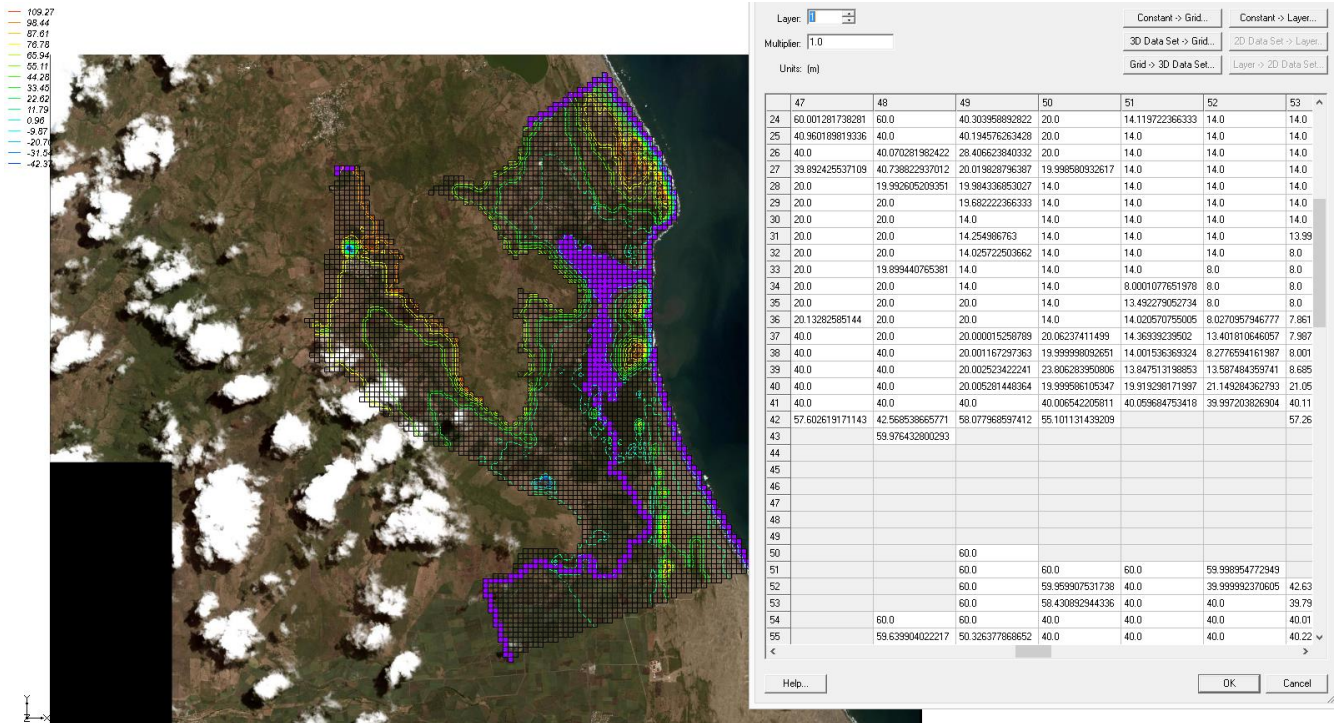


Figura 57. Cargas dentro de la malla

IV.3 CIRCULACIÓN EN LA LAGUNA

Los patrones de circulación de la laguna se calcularon utilizando el modelo H2D (GIOC, 2001), que resuelve las ecuaciones no lineales para aguas someras promediadas en la vertical. Los patrones obtenidos son el resultado de la interacción entre la marea y la corriente Caño Gallegos. Se modelaron dos semanas, del 26 de octubre al 11 de noviembre de 2014. Para la señal de marea que se utilizaría como forzamiento en el modelo, al no contarse con una serie de la longitud necesaria, se emplearon valores obtenidos del programa de pronóstico de Marea MAR 2011 V1.0, desarrollado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). El programa cuenta con dos estaciones cercanas a La Mancha: una a 65 km al sur (Veracruz, Veracruz) y otra 200 km al Norte (Tuxpan, Veracruz). Para determinar la validez de emplear algún conjunto de estos datos, se comparó la señal medida en la boca de la laguna durante el mes de noviembre, contra el pronóstico del CICESE para ambos sitios. Como se observa en la Figura 58, ambas señales del pronóstico se encuentran en fase con la medición, y sólo se observa una disminución en la amplitud en la boca, lo cual se atribuye a que la medición se realizó en la boca de la laguna y no en aguas profundas. Finalmente, se decidió utilizar los niveles de la marea para el Veracruz, Veracruz, por la cercanía a La Mancha. Los datos para las fechas seleccionadas para la modelación se grafican en la Figura 59.

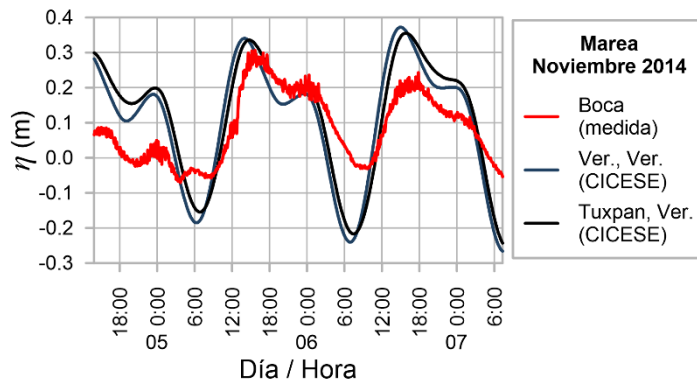


Figura 58. Comparación de datos medidos contra el pronóstico de marea

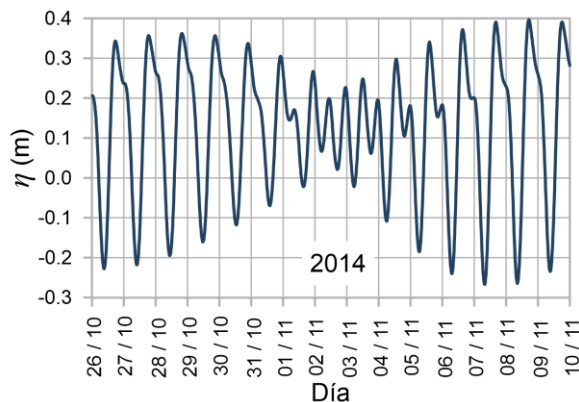


Figura 59. Serie de tiempo de marea utilizada como forzamiento para el modelo

Dado que no hay datos históricos disponibles para las descargas del Caño Gallegos, el valor utilizado para la simulación fue el obtenido durante el trabajo de campo para el punto 3 (humedal). La entrada de la descarga se encuentra en 774391, 2164376 UTM. El dominio numérico fue un cuadrado de 6 km como se muestra en la Figura 60. La malla utilizada fue resultado de una modificación al modelo digital de elevaciones previamente elaborado. Se seleccionaron cuatro puntos de observación (Figura 61) para controlar el nivel del agua, así como los componentes horizontal y vertical de la velocidad promediada en la vertical, y la descarga: el extremo norte del Caño Gallegos (774103, 2165756 UTM), el estrechamiento central (774173, 2167376 UTM), la boca (774913, 2168136 UTM) y el extremo noroeste de la laguna (773453, 2168576 UTM).

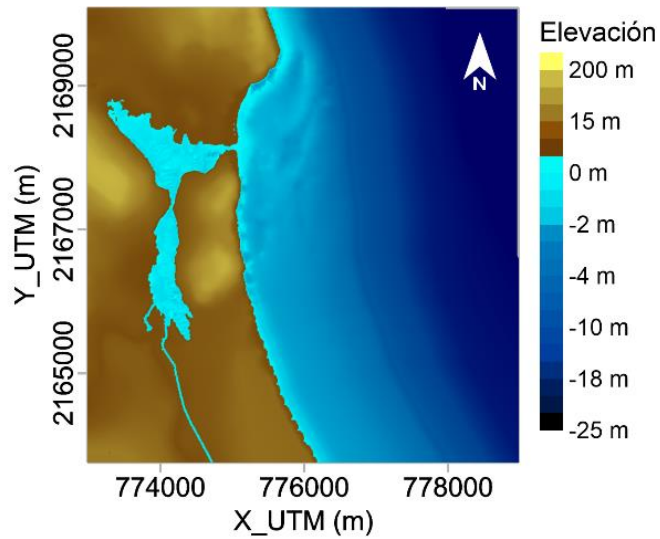


Figura 60. Dominio para la modelación numérica

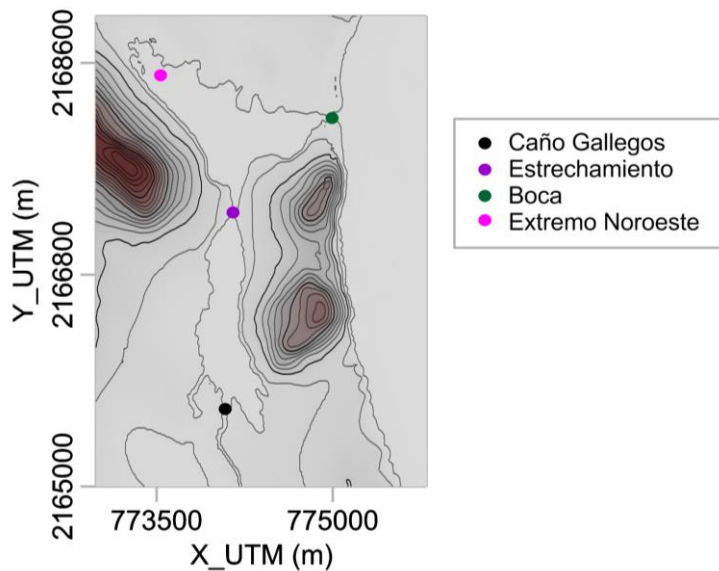


Figura 61. Ubicación de los puntos de observación

Validación

Una comparación entre el nivel de la superficie libre del agua en la boca de la laguna, y los resultados del modelo numérico, se presenta en la Figura 62. Para las 36 horas presentadas, los resultados numéricos representan adecuadamente los cambios de los niveles en la boca.

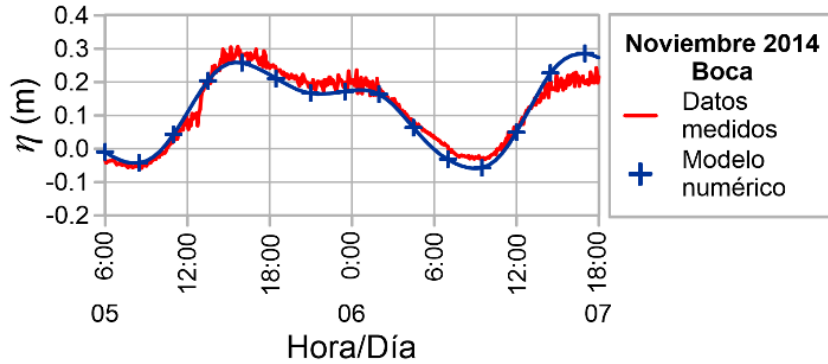


Figura 62. Comparación: modelación numérica y datos medidos

Resultados

La serie temporal de los cuatro puntos de observación se muestra en la Figura 63. En la boca de la laguna, no se observaron retrasos o distorsión significativa de la onda de la marea, en comparación con el forzamiento inicial. Sin embargo, se encontró una reducción de la amplitud de, aproximadamente, 40 % en las mareas vivas y 20 % en mareas muertas. Esto debido a los efectos de contorno del cuerpo de agua y a la deformación que sufre la onda por los efectos de fricción con el fondo.

En el extremo Noroeste y en el estrechamiento de la laguna, la reducción de la amplitud de la onda de marea es de 70 % durante mareas vivas y de 60% durante mareas muertas. El retraso de la fase de la onda es de 4 y 2 horas en las mareas vivas y muertas, respectivamente. También se encontró una distorsión de la oscilación, provocada por el efecto de fricción del fondo y los bordes. En el caso de la desembocadura del Caño Gallegos, la oscilación es menos distorsionada que la observada en los otros puntos, lo que indica un efecto menor de la marea, aunque sí hay un incremento en la amplitud de mareas muertas a vivas.

La variación de las componentes horizontal y vertical de la velocidad (Figura 63) muestran que los valores más altos de velocidad en la dirección X se producen en la boca (eje X coincide con el eje longitudinal de la boca), siendo prácticamente cero para los otros puntos, en que la onda se propaga a lo largo de la laguna, con dirección predominante Norte-Sur/Sur-Norte. Esto está de acuerdo con las velocidades en la dirección Y; en este caso, los valores más altos se encuentran en el estrechamiento central, debido a la reducción significativa de la sección transversal. En la boca, las velocidades de entrada y salida tienen valores similares (aproximadamente 0.40 m/s en las mareas vivas y 0.15 m/s durante las mareas muertas), donde la apertura y cierre de la boca está condicionado por las olas y el viento.

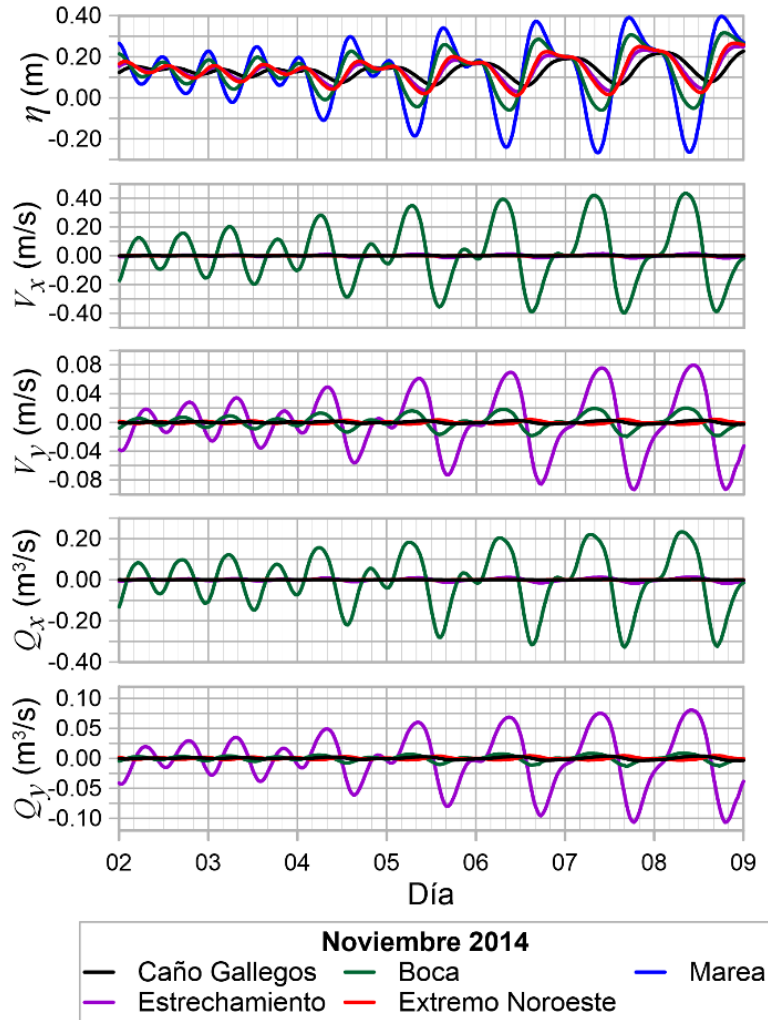


Figura 63. Series de tiempo de la modelación numérica

La variación espacial de los resultados se analizó para cuatro momentos seleccionados de la señal de marea: vaciante, bajamar, llenante y pleamar, en la transición de mareas muertas a mareas vivas (Figura 64).

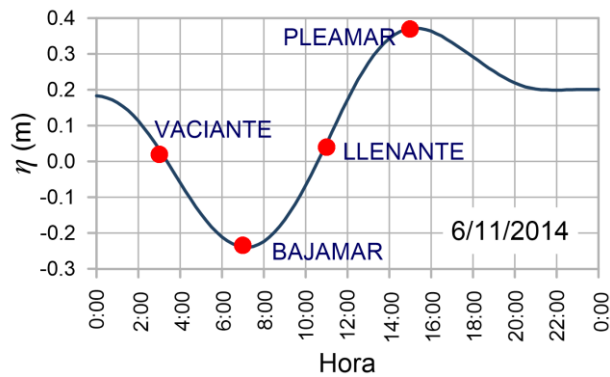


Figura 64. Momentos analizados de la señal de marea para los resultados de la modelación

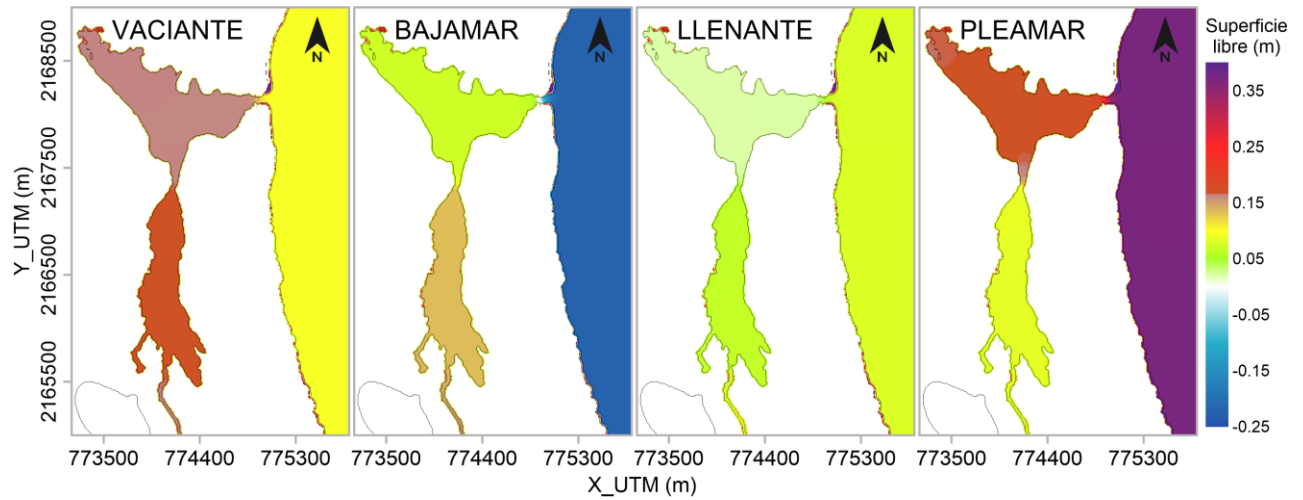


Figura 65. Distribución espacial de la elevación de la superficie libre (coordenadas UTM)

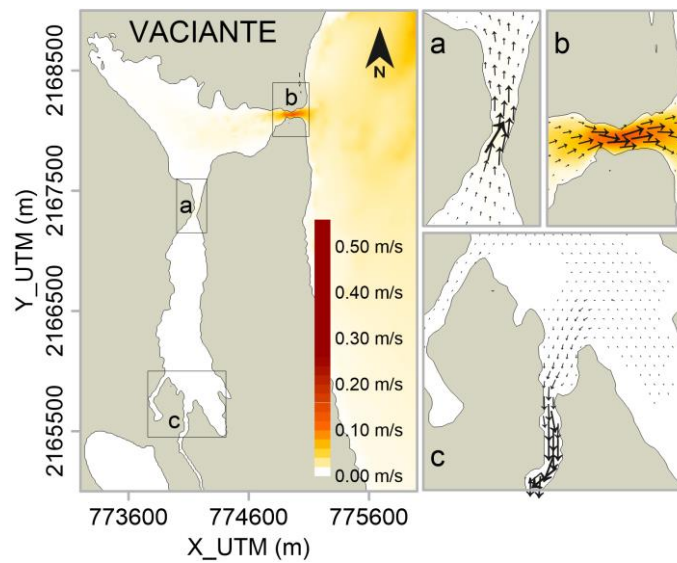


Figura 66. Distribución espacial de la velocidad: Vaciante

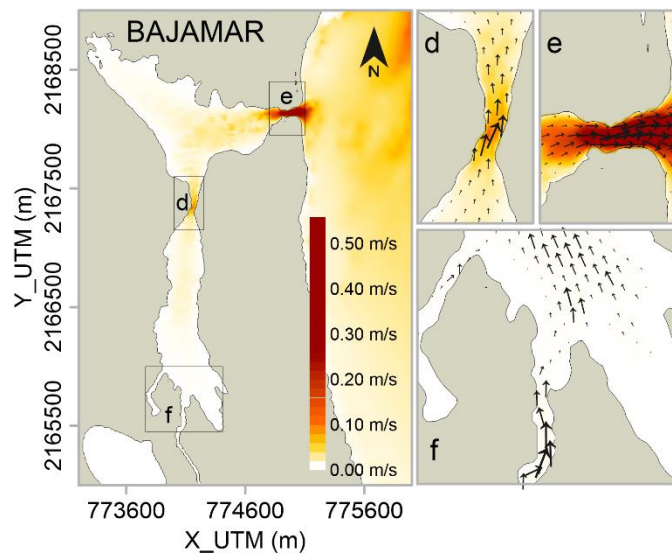


Figura 67. Distribución espacial de la velocidad: Bajamar

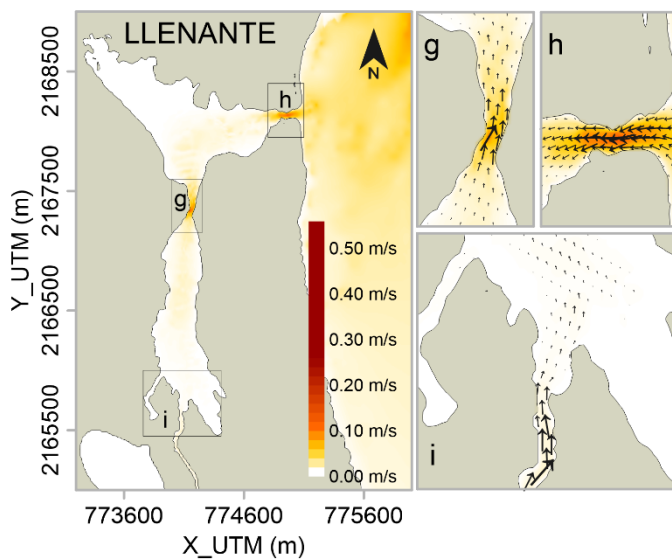


Figura 68. Distribución espacial de la velocidad: Llenante

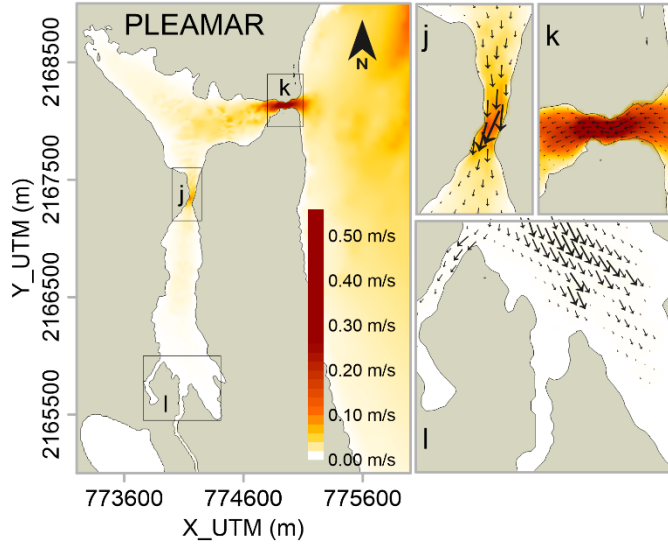


Figura 69. Distribución espacial de la velocidad: Pleamar

En la Figura 66, se muestran las variaciones en el nivel del agua. Los mapas de la magnitud de la velocidad se presentan de la Figura 66 a la Figura 69. En vaciante, las velocidades más altas se encuentran al sur del estrechamiento central, disminuyendo del sector norte hacia la zona marina, pues la marea afecta al sector conectado con el mar. En la bajamar, las velocidades son más bajas en comparación con vaciante, pero siguen la misma tendencia: más alto en el sur de la laguna. Posteriormente, la inundación a través de la boca hace que los niveles de agua aumenten en el norte de la laguna; la dirección de la velocidad en la boca corrobora la inundación. Las velocidades en el Caño Gallegos en llenante indican que el agua está fluyendo hacia la laguna, por lo que este efecto domina sobre la onda de marea. Durante la pleamar, en el sur, los niveles de superficie libre comienzan a aumentar, pero son más pequeños que los del norte, que está directamente expuesto a la marea. La magnitud de la velocidad aumenta y la marea entra en la laguna, como se ve en las direcciones de la velocidad; este efecto se refleja hasta Caño Gallegos, donde el agua está entrando en el cauce. En la transición de pleamar a vaciante, parece que el estrechamiento actúa como un punto de inflexión entre el aumento y disminución de los niveles de agua, entre los sectores Norte y Sur.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Los humedales costeros son sistemas altamente complejos porque en ellos confluye una gran diversidad de flujos (geomorfológicos, hídricos y bióticos), ecosistemas y procesos físicos. Cada uno de ellos proporciona diferentes forzamientos disturbadores, pero a la vez contribuye a su estabilidad. En el marco de este entramado, las actividades humanas enfocadas, principalmente, a la explotación de los servicios ecosistémicos que ofrecen los humedales, terminan por hacer parte de su funcionamiento a la vez que imponen condicionantes (casi siempre rígidas) que pueden impactar positiva o negativamente los equilibrios del humedal.

El caso de estudio de esta tesis, La Mancha, Veracruz, es un cabal ejemplo de lo anterior. Se detectó que la necesidad principal era la de generar conocimiento que permitiera caracterizar el funcionamiento y balances actuales del humedal, a fin de encontrar los fenómenos a los que el humedal es más sensible y determinar tanto sitios como condiciones críticas para su funcionamiento saludable. En lugares como este, es necesario considerar la escala y dimensiones del humedal, puesto que las respuestas del sistema a los cambios en los regímenes de flujos ocurren en muy poco tiempo.

En este sentido, se planteó y ejecutó una base metodológica que puede ser aplicada a cualquier humedal para adquirir los datos y la información necesaria que permitan desarrollar un análisis inicial. Luego, el éxito de las recomendaciones que pudieran derivar de los estudios, dependerá de la realización de un programa de monitoreo permanente que ofrezca flexibilidad y certeza al manejo integrado del humedal, así como atinencia con los balances naturales del mismo. De esta manera, será posible conservar los valores que proveen los ecosistemas a la comunidad y permitir un uso resiliente y adaptativo de las costas.

La metodología que se propuso en el presente estudio, está diseñada para recopilar información que permita el establecimiento de un programa de manejo en torno a la actividad humana que más afecta el funcionamiento del humedal que es la apertura artificial y con base en usos y costumbres, de la boca de la laguna. Esta apertura, si bien, reporta beneficios económicos innegables, es discutible en cuanto al momento y forma en que se realiza.

En todo caso, por lo que toca a la dinámica de la laguna, se encontró que el viento y las olas son los forzamientos dominantes, induciendo su apertura y cierre. Por otro lado, la marea es el factor de control en la parte norte de la laguna, mientras que en el sur, las descargas superficiales modifican la circulación. Varios autores (Contreras, 2003; Martínez et al., 2012; García, 2006) señalan que la apertura de la boca depende de las descargas continentales o del aumento de los

niveles de agua en la laguna. Sin embargo, durante el monitoreo realizado, la apertura fue inducida artificialmente por los pescadores locales, lo cual altera arbitrariamente el sistema.

Se encontró que, con toda claridad, el transporte de sedimentos dominante es en dirección Norte-Sur, y que durante la época de Nortes el volumen transportado es capaz de cerrar la boca de la laguna. En años medio y lluvioso, la boca podría abrirse de manera natural al inicio de la época de lluvias (junio-julio), sin embargo, esta temporalidad no es apropiada para las costumbres de pesca y tiempos de mayores ventas que tienen los pobladores de la región, las cuales coinciden con la temporada vacacional de Semana Santa (abril-mayo). Es por ello deseable que las recomendaciones de manejo del humedal involucren, tanto los ciclos naturales como la explotación de servicios que hace la población. Un ejemplo es la construcción de una pequeña exclusiva que permita hacer una apertura de la boca controlada y gradual a fin de contar con la disponibilidad de individuos para la pesca, sin afectar tan dramáticamente como hoy se hace a los juveniles de agua dulce que mueren cuando ingresa el agua salada. Esta condición lleva de nuevo a reconocer que las respuestas del humedal a cambios físicos son muy rápidas y por ello las políticas de manejo deben ser diseñadas con suficiente precisión.

El modelo hidrodinámico promediado en la vertical ofreció buenos resultados para la descripción de la circulación en la laguna, esta herramienta puede ser fundamental para el diagnóstico y planeación de nuevas acciones, así como para verificar la respuesta del humedal a cambios de largo plazo tanto naturales (p.e. incremento del nivel medio del mar, aumento en el número e intensidad de las tormentas, cambios en la dirección del oleaje); como artificiales (p.e. cambios en la disponibilidad de sedimento, alteraciones en la calidad del agua, construcción de infraestructura dentro o fuera de la laguna).

En general, esta tesis permitió sentar las bases de un estudio global eco-ingenieril del humedal en La Mancha pensado en ofrecer un marco de trabajo para la planeación, manejo integrado y ordenamiento que permitan la conservación del ecosistema en armonía con las actividades turísticas, comerciales y culturales de los pobladores locales.

Futuras líneas de investigación

La metodología propuesta de monitoreo y caracterización de flujos, se espera pueda ser aplicada en otros humedales costeros, en los cuales sea necesario contar con información de detalle para la toma de decisiones.

En todos los casos, los elementos que definen la dinámica de cada sitio deberán ser identificados para ser incluidos en la metodología a seguir, de manera que se adapte apropiadamente.

Además de considerar las variaciones a corto plazo de los flujos en los humedales costeros, deberá añadirse la evaluación de efectos de cambios en el clima a largo plazo, como los cambios

del nivel medio del mar. Por otro lado, los efectos de las actuaciones antrópicas también deberán ser evaluados. Todo ello para determinar la resiliencia del sistema a largo plazo.

REFERENCIAS

Abarca, F.J. (2007). Técnicas de evaluación y monitoreo del estado de humedales y otros ecosistemas acuáticos. En Ó. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, & L. Zambrano, *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*, 113.

Aramburu J., F. M. (1995). Aspectos ecológicos de la malacofauna de la laguna de La Mancha, Veracruz, México. Res. XIII Congreso Nacional de Zoología. Monterrey, N. L.

Barreiro-Güemes, M.T. & Matus, J.C. (1993). Diagnóstico ecológico y de uso de recursos de la laguna de La Mancha, Veracruz: Propuesta para su manejo. V Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar, La Paz, B.C.S, México, pp. 186.

Berlanga Robles, C.A., Ruíz Luna, A., & de la Lanza Espino, G. (2008). Esquema de clasificación de los humedales de México. *Boletín del Instituto de Geografía*, Investigaciones Geográficas, UNAM.

Bird, E.C. (1994). Physical setting and geomorphology of coastal lagoons. En Kjerfve (Ed.), *Coastal Lagoon processes*. Columbia: Elsevier Oceanography Series, 60, 9-37.

Carrera, E. y. (2003). Inventario y clasificación de humedales en México. Parte I. México: Ducks Unlimited de México, A.C.

Cervantes, M. (2007). Conceptos fundamentales sobre ecosistemas. En Ó. Sánchez, M. Herzig, E. Peters, R. Márquez, & L. Zambrano, *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México* (págs. 37-68). México: SEMARNAT.

CICESE. (2011). Pronóstico de MArea MAR V1.0 .

Contreras, E. (2005). Nutrientes y productividad primaria fitoplanctónica en una laguna costera tropical intermitente (La Mancha, Ver.) del Golfo de México. *Hidrobiológica*, Vol. 15, No. 3: 299-310.

Contreras, E. (1993). Ecosistemas costeros mexicanos. México: CONABIO.

Contreras E. (2003). Dinámica espacio-temporal de nutrientes en la laguna de la Mancha, Veracruz, México. Universidad Autónoma Metropolitana.

Díaz, E. E. (1995). Monitoreo Ambiental en Ecosistemas Acuáticos de México. En C. A. (Ed.), Taller norteamericano sobre monitoreo para la evaluación ecológica de ecosistemas terrestres y acuáticos (págs. 264-273). General Technical Report RM-GTR-284.

EPA. (2001). *Functions and Values of Wetlands*. EUA: United States Environmental Protection Agency.

Farreras, S. F. (2006). *Hidrodinámica de lagunas costeras*. Ensenada: CICESE.

García G., G. (2006). El ambiente geomorfológico. En P. Moreno_Casasola (Ed.), *Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha*, Instituto de Ecología, A.C., 544. México.

GIOC. (2001). *Manual de Referencia Modelo Numérico H2DII*. España: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.

Gönenc, I. E., & Wolflin, J. P. (Edits.). (2005). *Coastal Lagoons: Ecosystem Processes and Modeling for Sustainable Use and Development*. CRC Press.

Hernandez T., H. Y. (1998). Cambios a pequeña y gran escala en la cobertura del manglar de La Mancha, Veracruz: un conflicto entre el uso del suelo y el régimen de propiedad. Res. VII Congreso Latinoamericano de Botánica y XIV Congreso Mexicano de Botánica. México, D. F.

Hernández Trejo, H. (2009). Efecto de las perturbaciones naturales y antropogénicas en la estructura del mangal de La Mancha, Veracruz. México: Instituto de Ecología, A.C. Tesis Doctoral.

Hernández Trejo, H., Priego Santander, Á., López Portillo, J., & Isunza Vera, E. (2006). Los paisajes físico-geográficos de los manglares de la laguna de la Mancha, Veracruz, México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 31, 3, 221-219.

Hvorslev, M. J. (1951). Time lag and soil permeability in ground-water observations. *Bulletin 36 Waterways experiments station, Corps of Enigneers, US Army*.

Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (abril de 2015). *Datos de Relieve*. Obtenido de Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, Tipo terreno con resolución de 5m: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/presentacion.aspx>

Kjerfve, B. (1994). Coastal Lagoons. En Kjerfve (Ed.), *Coastal Lagoon processes*. Columbia: Elsevier Oceanography Series, 60, 1-8.

Martínez Gómez, E. (2017). Los manglares, una membrana ecológica en el litoral. Ciudad de México: Tesis de Maestría, Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Martínez, M. L., Vázquez, G., López-Portillo, J., Psuty, N. P., García-Franco, J. G., Silveira, T. M., and Rodríguez-Revelo, N. (2012). Dinámica de un paisaje complejo en la costa de Veracruz. *Investigación Ambiental*, 4(1), 151–160.

Matus P., J. C. (1994). Dinámica sedimentológica en secas, lluvias y nortes en la laguna de la Mancha, Veracruz, México. Res. III Congreso de Ciencias del Mar. La Habana, Cuba.

Matus P., J. L. (1992). Influencia de los factores climáticos sobre las variaciones espacio-temporales de algunos parámetros hidrológicos en la laguna de La Mancha, Ver. Res. IX Congreso Nacional de Oceanografía. Veracruz, Veracruz.

Miller, J. M., Pietrafesa, L. J., & Sith, N. P. (1998). Principles of hydraulic management of coastal lagoons for aquaculture and fisheries. Fisheries Technical Paper(314).

Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2000). The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological economics*, 35(1), 25-33.

Psuty, N. P., Martínez, M. L., López Portillo, J., Silveira, T. M., García Franco, J. G., & Rodríguez, N. A. (2009). Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at Laguna La Mancha, Veracruz, Mexico. *Journal of Coastal Conservation* 13, 77-87.

Ramsar. (1994). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional. Recuperado en 2013, de http://www.ramsar.org/cda/es/ramsar-documents-texts-convention-on/main/ramsar/1-31-38%5E20671_4000_2__

Ramsar. (2018). Lista de Humedales de Importancia Internacional. Recuperado en octubre de 2018, de <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/sitelist.pdf>

Rivera-Guzmán, N. E., Moreno-Casasola, P., Ibarra-Obando, S. E., Sosa, V. J., & Herrera-Silveira, J. (2014). Long term state of coastal lagoons in Veracruz, Mexico: Effects of land use changes in watersheds on seagrasses habitats. *Ocean & coastal management*, 87, 30-39.

Sánchez Úbeda, J. P., Calvache Quesada, M. L., López, C. M., Duque, C., & Martín Rosales, W. (2013). Influencia de las mareas en las medidas de piezometría de la zona de descarga del acuífero costero Mortil-Salobreña (Granada). *Geogaceta*(53), 121-124.

Schuyt, K., & Brander, L. (2004). *The Economic Values of the World's Wetlands*. Amsterdam: WWF.

SEMARNAT (2013). Política Nacional de Humedales. Recuperado en 2018, de <https://agua.org.mx/biblioteca/politica-nacional-humedales/>

Smith, N.P. (1994). Water, Salt and Heat Balance of Coastal Lagoons. En Kjerfve (Ed.), *Coastal Lagoon processes*. Columbia: Elsevier Oceanography Series, 60, 69-101.

The Nature Conservancy. (2014). *Identifying marshes that potentially protect people, property and infrastructure*. Obtenido de Coastal Resilience: www.maps.coastalresilience.org/nyct

Travieso-Bello, A.C., & Moreno-Casasola, P. (2006). El ambiente geomorfológico. In P. Moreno_Casasola (Ed.), *Entornos Veracruzanos: la costa de La Mancha*, Instituto de Ecología, A.C., 544. México.

Wetland (aquatic ecosystem) types, WetlandInfo, Department of Environment and Science, Queensland, <https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/ecology/aquatic-ecosystems-natural/>

Yetter, J. (2004). *Hidrology and geochemistry of freshwater wetlands on the Gulf coast of Veracruz, Mexico*. Canadá: Tesis de Maestría, Universidad de Waterloo.

ANEXO

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLAJE PARA LA ZONA DE ESTUDIO: GRÁFICAS

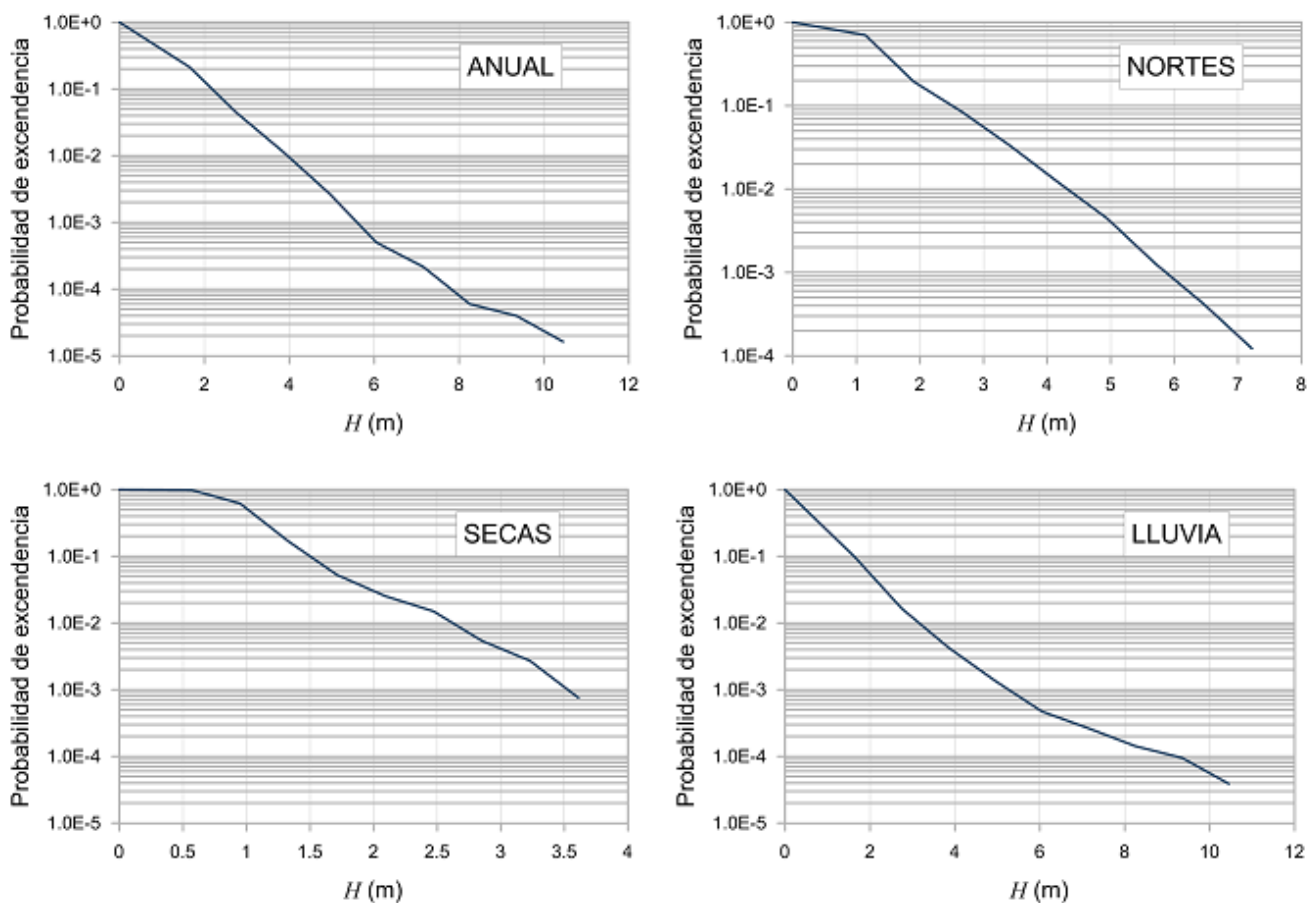


Figura 70. Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa anual y por temporadas para todo el registro

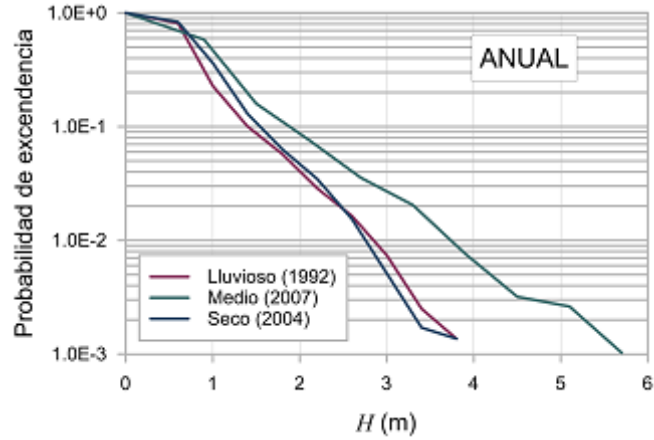


Figura 71. Probabilidad de excedencia de altura de ola significativa anual para años tipo

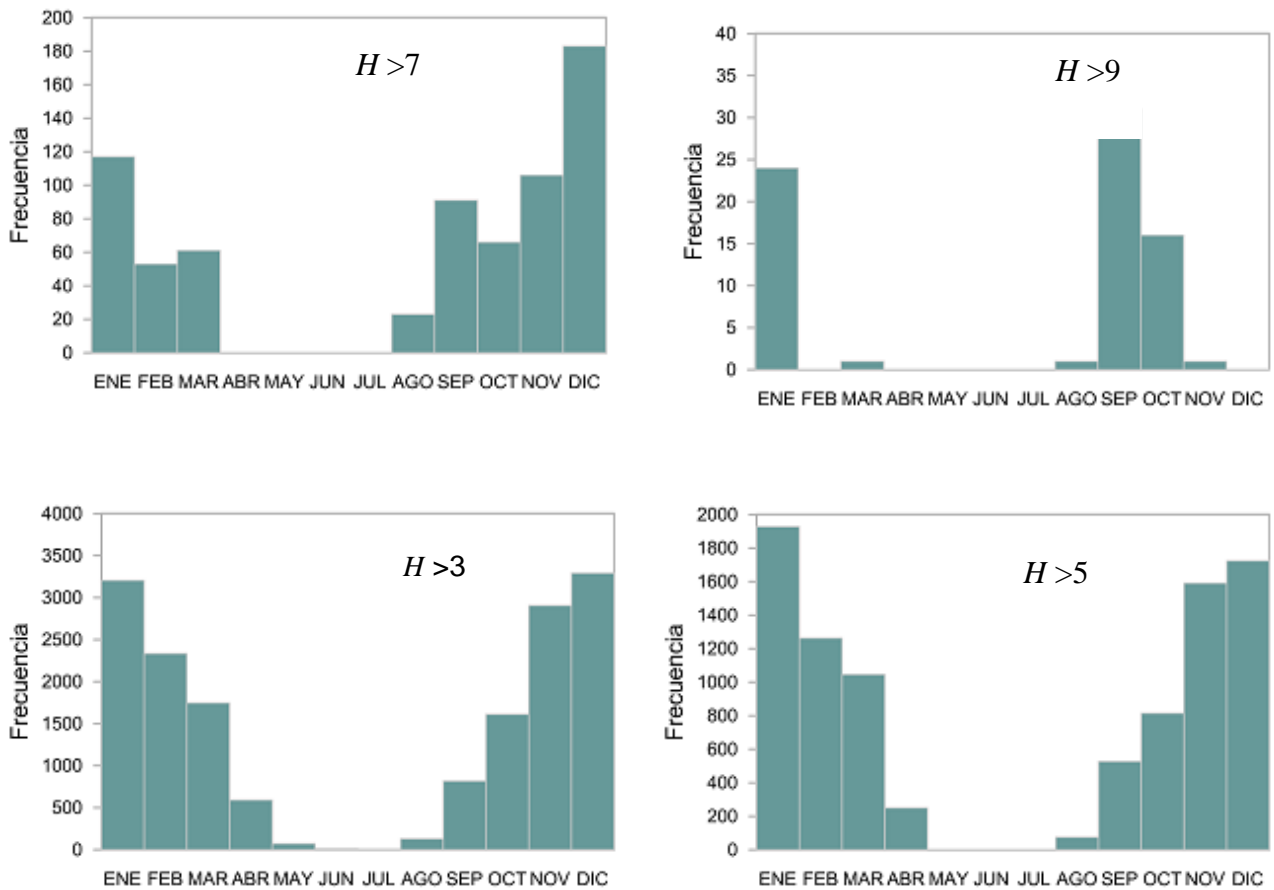


Figura 72. Frecuencia de altura de ola significativa por mes

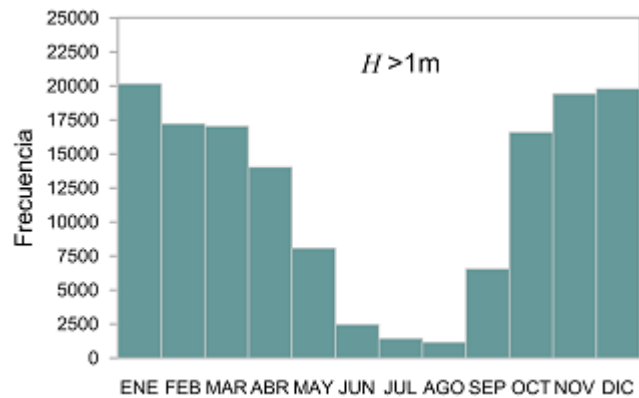


Figura 72 (cont.). Frecuencia de altura de ola significativa por mes

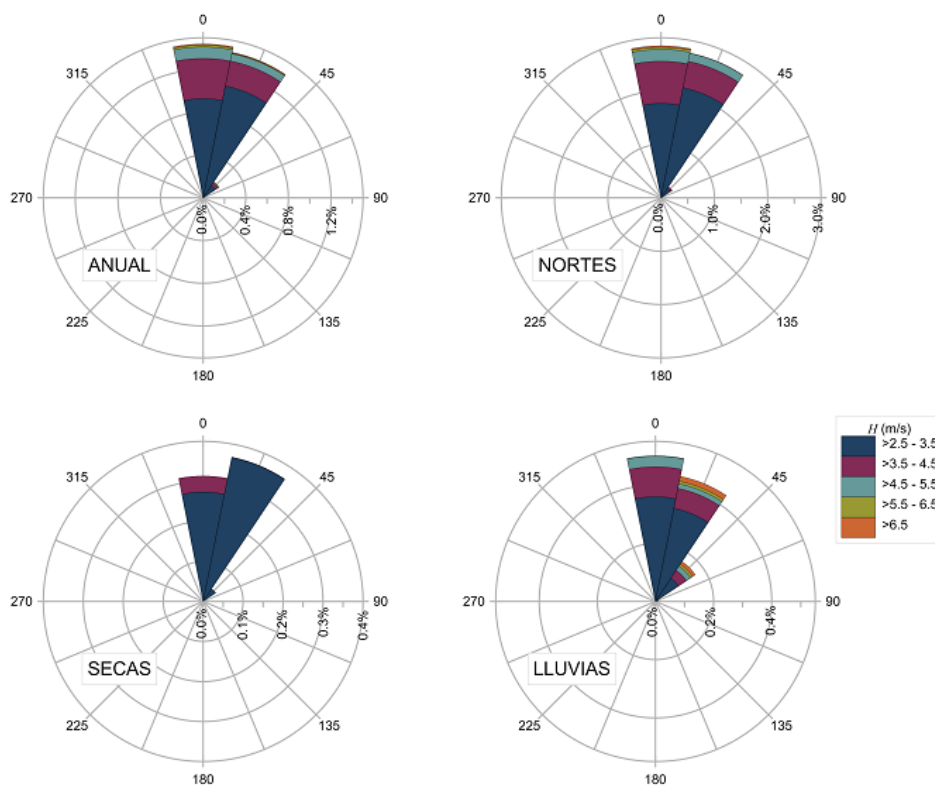


Figura 73. Rosas de oleaje anual y por temporadas ($H > 2.5$ m)

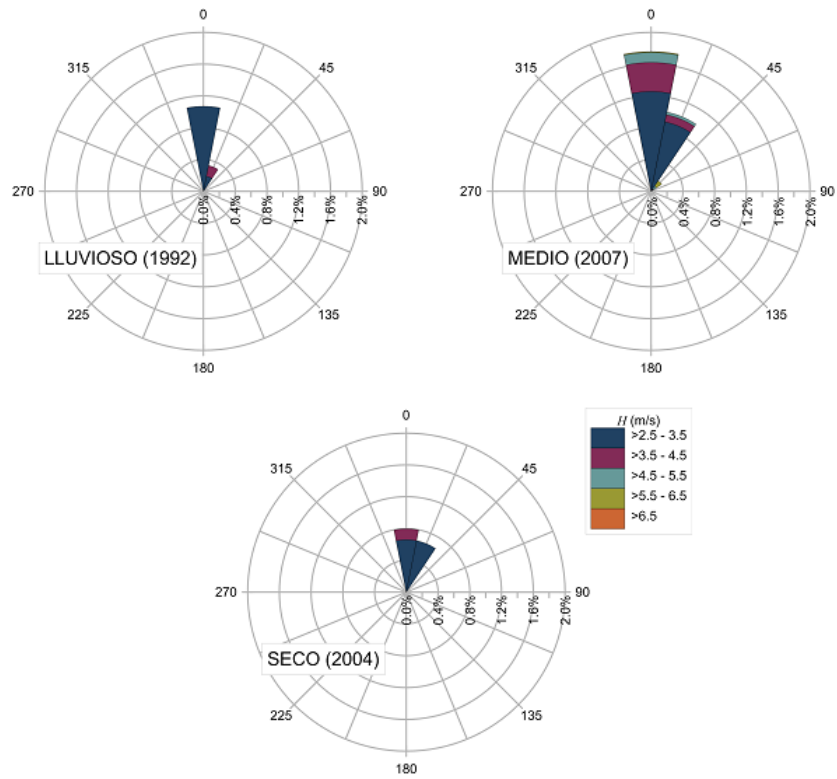


Figura 74. Rosas de oleaje anual para años tipo ($H > 2.5$ m)

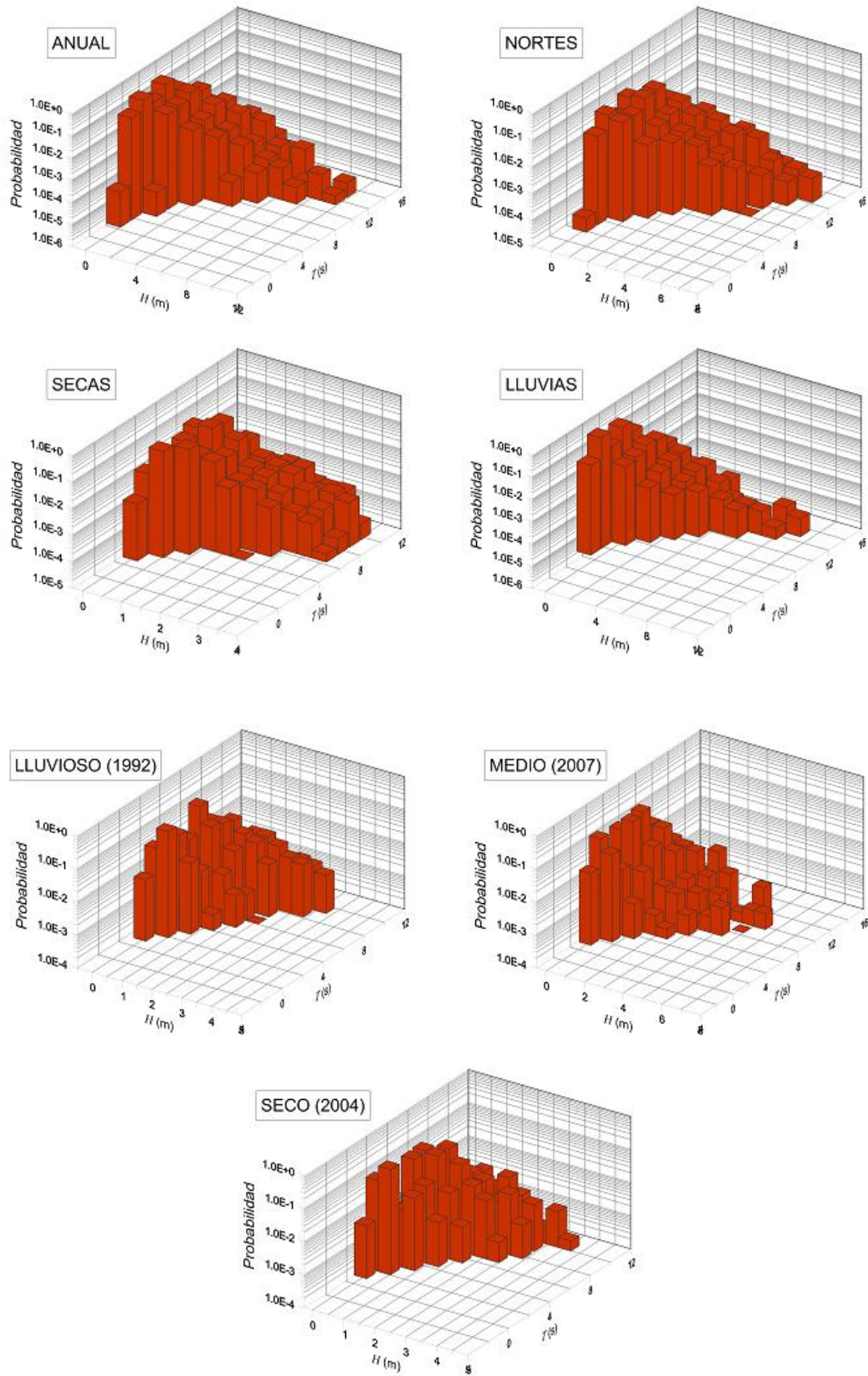


Figura 75. Probabilidad conjunta de altura de ola y periodo

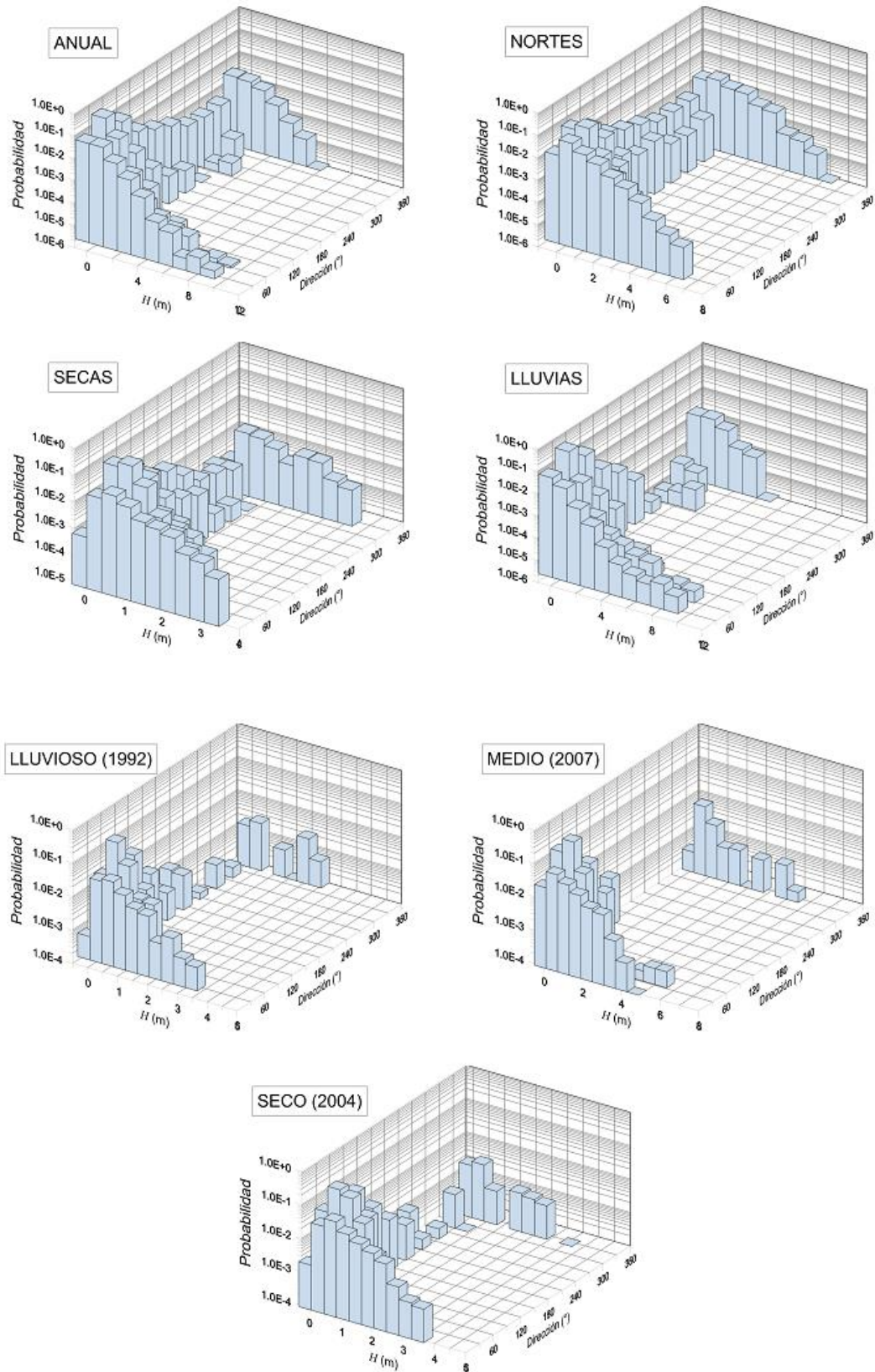


Figura 76. Probabilidad conjunta de altura de ola y dirección de propagación

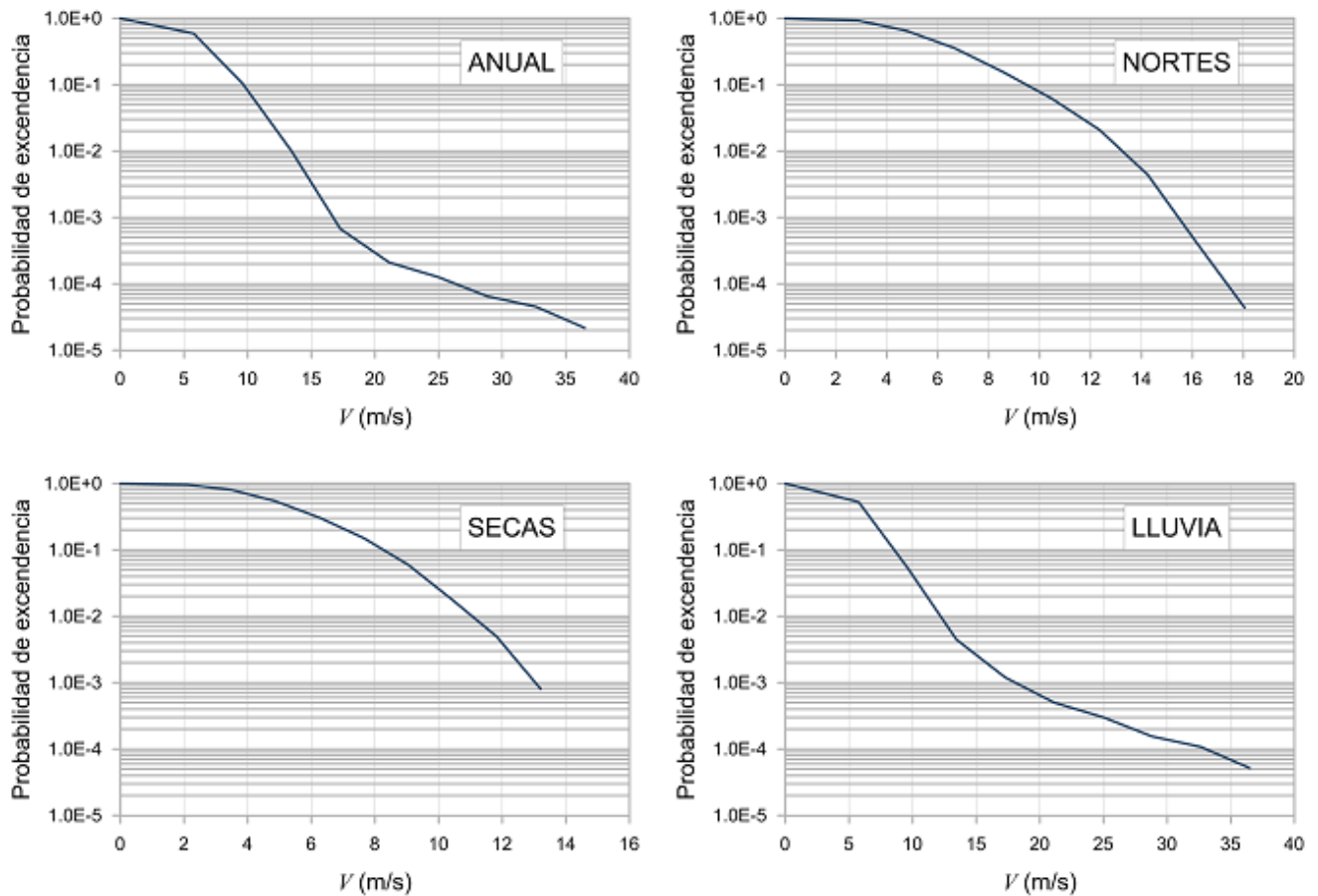


Figura 77. Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos anual y por temporadas para todo el registro

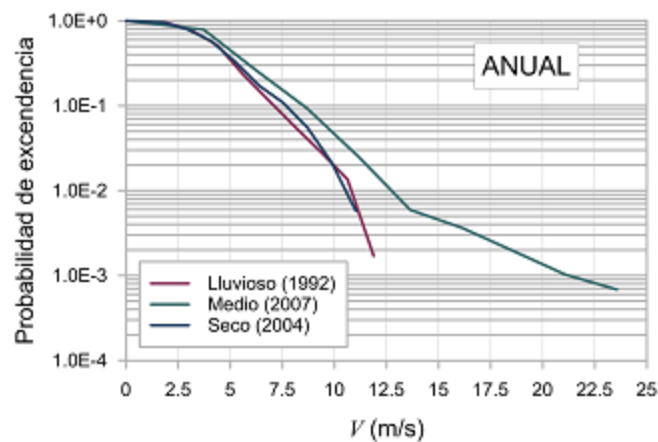


Figura 78. Probabilidad de excedencia de vientos sostenidos anual para años tipo

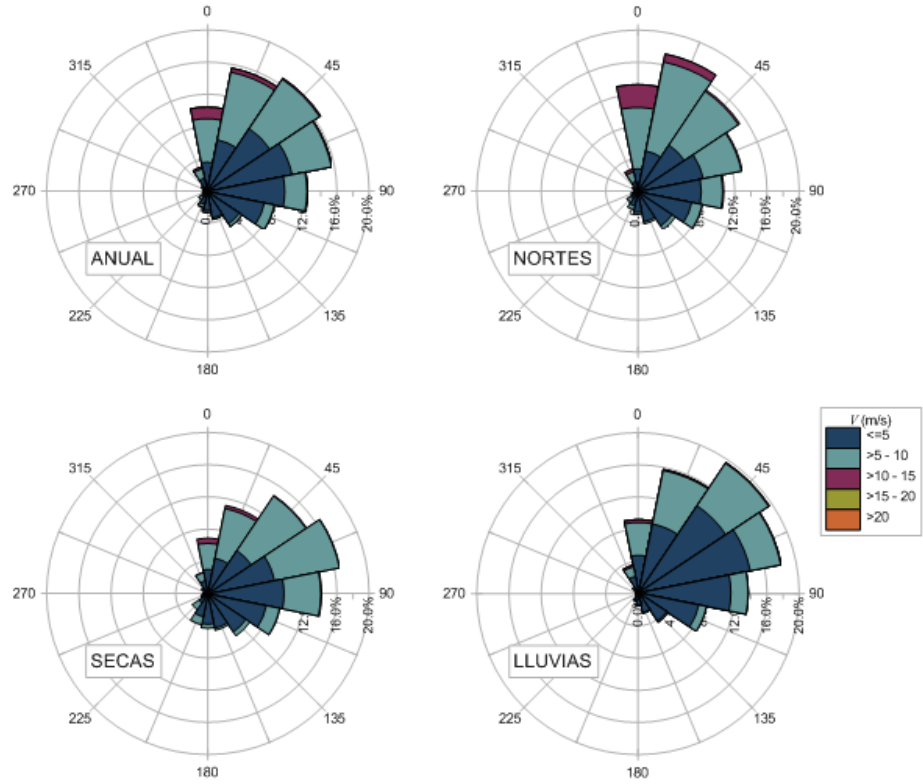


Figura 79. Rosas de viento anual y por temporadas

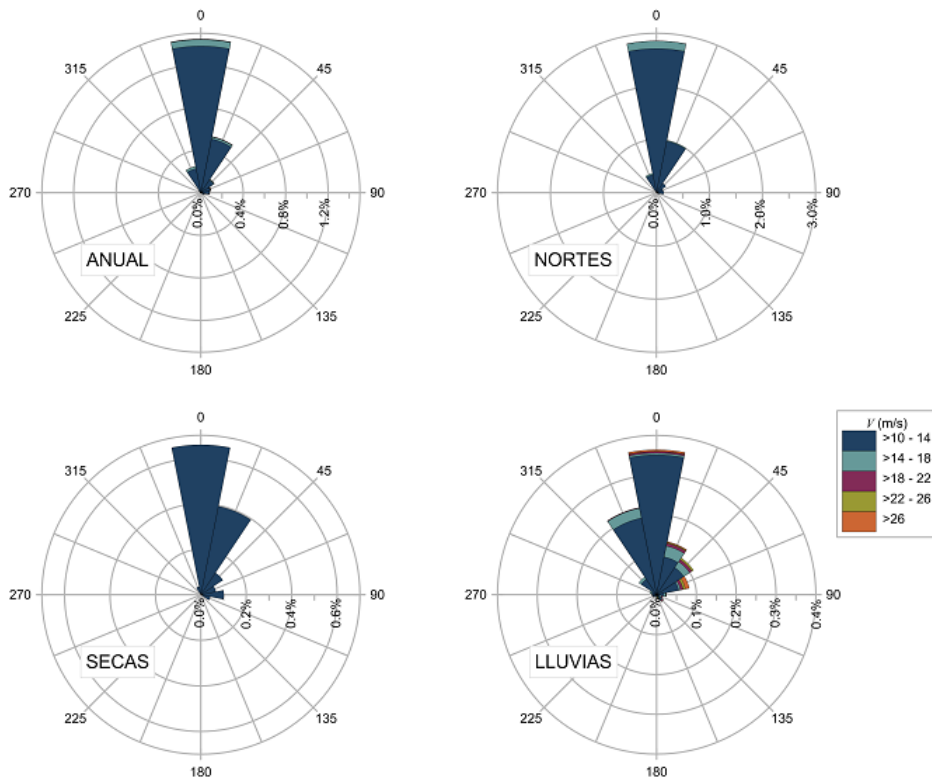


Figura 80. Rosas de viento anual y por temporadas ($V > 10$ m/s)

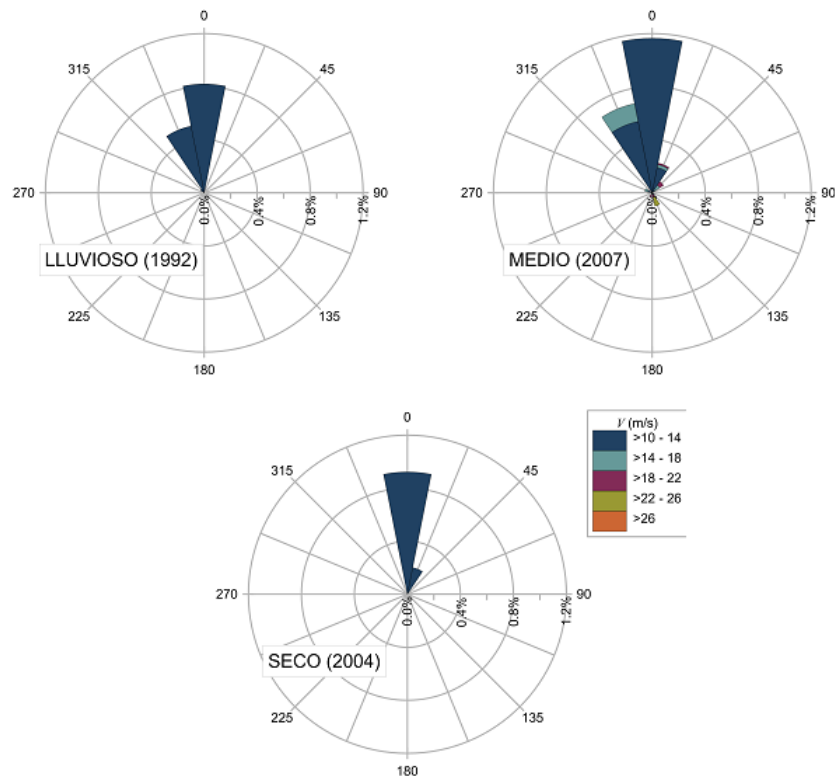


Figura 81. Rosas de viento anual para años tipo ($V > 10$ m/s)

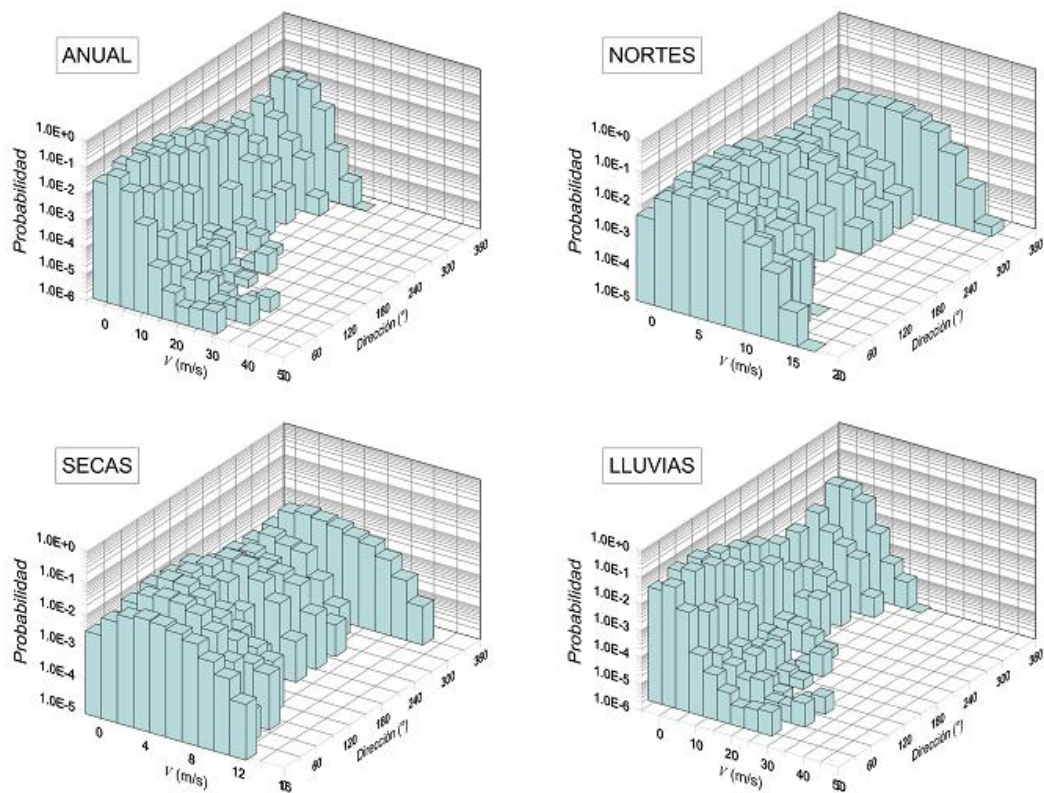


Figura 82. Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia anual y por temporadas

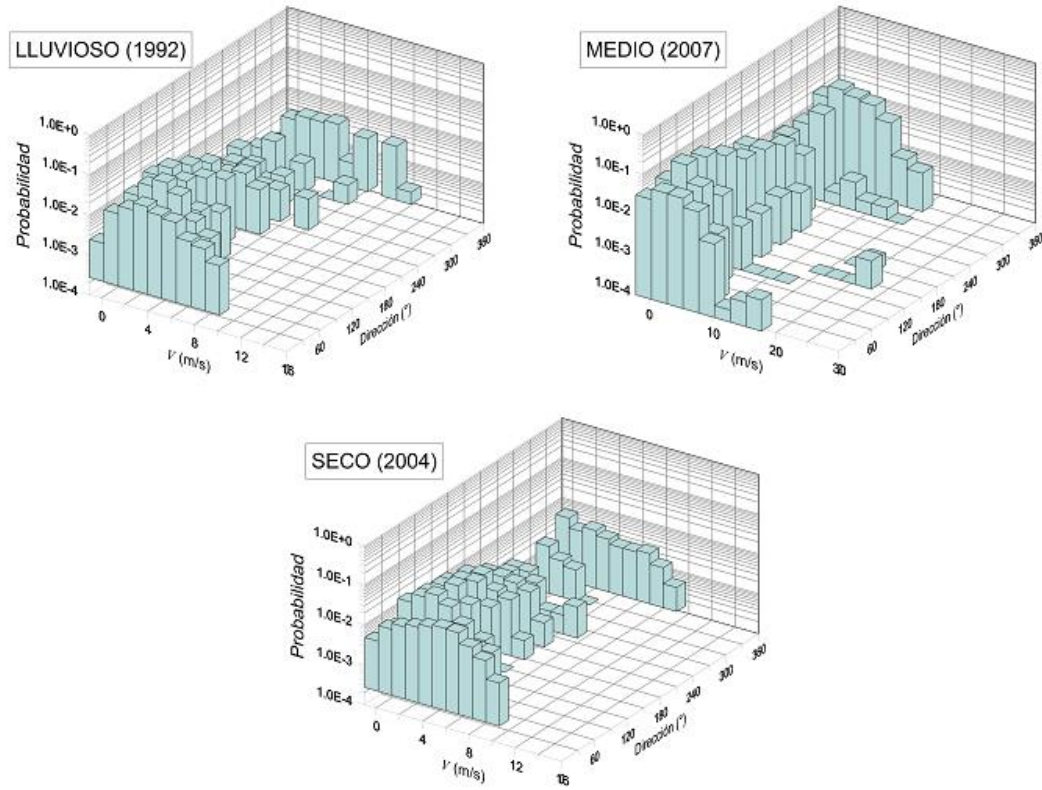


Figura 82 (cont.). Probabilidad conjunta de vientos sostenidos y dirección de incidencia anual y por temporadas