

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA**

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



***“ECO-HIDROLOGÍA DE LA CIÉNEGA DE SANTA CLARA:
ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU VALOR ECOSISTÉMICO”***

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA**

PRESENTA

M.I. MARCELO ANTONIO LOMELI BANDA

DIRECTOR: DR. JORGE RAMÍREZ HERNÁNDEZ

CO-DIRECCIÓN: DRA. ISIS ARLENE DÍAZ CARRIÓN

**MEXICALI BAJA CALIFORNIA MÉXICO
A 7 DE OCTUBRE DEL AÑO 2016**

RESUMEN

La Ciénega de Santa Clara es el humedal remanente de mayor extensión en el Noroeste de México. Debido a su valor ecosistémico es reconocida internacionalmente como sitio Ramsar y se encuentra resguardada por la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. Se abastece principalmente a través del canal Wellton-Mohawk, el cual transporta agua de desecho agrícola proveniente de los campos de cultivo de Arizona, E.U. A pesar de su importancia, este invaluable hábitat de más de 4,500 ha y los servicios ecosistémicos que proporciona, se han visto amenazados por la posible reactivación de la Planta Desaladora de Yuma, esto en consecuencia a la creciente demanda de agua y al incremento de temperatura producto del cambio climático. El objetivo del estudio consiste en evaluar el régimen hidrológico y los servicios ecosistémicos de la Ciénega de Santa Clara bajo un escenario actual, una reducción del afluente principal y un escenario de incremento de temperatura en la región. El escenario de reducción se realizó con la información obtenida durante la prueba piloto del 2010, y en el tercer escenario con los datos del escenario actual en conjunto de modelos climáticos regionales proyectados para los próximos 30 años (1.5°C) y finales del siglo XXI (5°C). El régimen hidrológico se determinó mediante un balance de agua mensual y el comportamiento de las partículas suspendidas en el agua por un balance de masas. Los gastos de entrada se estimaron diariamente incluyendo, flujos subterráneos con una red piezométrica y precipitación con una estación meteorológica instalada dentro del humedal; esta última también utilizada para cuantificar las salidas por evapotranspiración. Los flujos superficiales de salida fueron estimados por diferencia de volúmenes en el balance. Las variaciones en el nivel y profundidad del agua, así como los cambios mensuales de almacenamiento, se obtuvieron por medio de mediciones horarias automatizadas en 8 sitios dentro del cuerpo lagunar referenciados al nivel medio del mar. Los servicios ecosistémicos se identificaron para tres sub-zonas a través de entrevistas semi-estructuradas a profundidad con usuarios e informantes clave, así como observación no participante como estrategia de triangulación. Durante el periodo 2014-2015 ingresaron 144.63 hm³ de agua al sistema lagunar, el 27.86% salió por escurrimientos superficiales y 71.52% por evapotranspiración. Los niveles de agua en las lagunas presentaron un comportamiento similar con tiempos de respuesta distintos, variaron en función a las entradas del Wellton-Mohawk y al crecimiento vegetativo estacional. Se identificaron 17 servicios ecosistémicos dentro y fuera de la marisma, de ellos, los servicios estéticos y recreativos, así como el de soporte a la biodiversidad, son mayormente percibidos por los usuarios. El escenario actual permitió observar que el humedal y sus servicios se encuentran en equilibrio, sin embargo, durante agosto la conectividad superficial con las mareas del Golfo de California fue inexistente y podría alterar la funcionalidad del ecosistema, principalmente en lagunas someras. Esta desconexión también se observó con una reducción del 66% en el caudal de entrada durante el verano del 2010, y reflejó una disminución en el almacenamiento del 42%. Así mismo, se estima que el futuro incremento de temperatura impedirá la conectividad superficial durante 3 a 5 meses, aumentando la salinidad y reduciendo la superficie del humedal. Según lo analizado en este estudio es necesario preservar los procesos ecohidrológicos, ya que de ello deriva la continuidad y funcionalidad de los servicios ecosistémicos que proporciona el humedal.

PALABRAS CLAVE:

Ciénega de Santa Clara, Planta Desaladora de Yuma, Wellton-Mohawk, Ecohidrología, Cambio Climático, Servicios Ecosistémicos, Balance de Agua, Evapotranspiración.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi familia por su infinito cariño y apoyo. A mi madre, María Elena Banda Correa por creer siempre en mí e impulsarme en crecer académicamente. A mi padre, Marcelo Antonio Lomeli Reyna por inculcarme sus buenas enseñanzas y experiencias, además de ser perseverante ante las adversidades que se presentan. A mi hermosa hija y a su madre, por motivarme a lograr retos que parecen inalcanzables. A mi hermana y mis tres lindos sobrinos, así como a toda la familia Banda Correa que siempre me ha estado conmigo durante esta importante parte de mi vida.

También quiero agradecer al Instituto de Ingeniería de la U.A.B.C., por haberme abierto sus puertas en esta etapa de formación académica. Principalmente, a mi director de tesis el Dr. Jorge Ramírez Hernández, por haber creído en mí y brindarme la oportunidad de recurrir en su capacidad y conocimiento científico. Agradezco infinitamente su apoyo y sus enseñanzas, ya que con ello esta investigación no pudo haber tenido mejor desenlace. A mis compañeros y amigos del departamento de Ciencias de la Tierra, quienes con su agrado y amistad, hicieron que este tiempo haya sido el más ameno de todos.

A la facultad de Turismo y Mercadotecnia de la U.A.B.C, campus Tijuana, en especial a la Dra. Isis Arlene Díaz Carrión, por expandir mi perspectiva en la realización de investigaciones, y sobre todo, ofrecerme su amistad durante este proceso de formación.

Al Sonoran Institute y Pronatura Noroeste, que hemos compartido experiencias durante los monitoreos en campo y han facilitado el desarrollo de esta investigación. De igual manera a la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), y; a la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. Así mismo a los habitantes de las comunidades aledañas, Ejido Luis Encinas Johnson, Ejido La Flor del Desierto, Ejido Mesa Rica y Ejido Estación El Doctor.

Al CONACYT por sustentarme económicamente durante la realización del Posgrado y darme la oportunidad de pertenecer al agremiado grupo de becarios (No. de Becario 246972).

A todos en general y a los que se me paso mencionar, muchas gracias. Esta investigación se realizó con el apoyo de todos ustedes y quedará plasmada para la posteridad.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN -----	1
AGRADECIMIENTOS -----	2
TABLA DE CONTENIDO -----	3
ÍNDICE DE TABLAS -----	6
ÍNDICE DE FIGURAS -----	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN -----	8
CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO -----	10
2.1. ZONIFICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO -----	12
2.1.1. ZONA NÚCLEO -----	12
2.1.2. ZONA DE AMORTIGUAMIENTO -----	13
2.1.3. ZONA INTERNACIONAL -----	14
CAPÍTULO 3. OBJETIVOS -----	15
3.1. GENERAL-----	15
3.2. ESPECÍFICOS -----	15
CAPÍTULO 4. ANTECEDENTES -----	16
4.1. DELTA DEL RÍO COLORADO-----	16
4.2. CIÉNEGA DE SANTA CLARA -----	17
4.3. ACTA 242 DE LA CILA -----	18
4.4. PLANTA DESALINIZADORA DE YUMA-----	19
4.4.1. AMENAZAS DE LA PDY -----	19
4.5. CANAL WELLTON-MOHAWK -----	19
4.6. DREN RIÍTO-----	20
CAPÍTULO 5. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL -----	21
5.1. ECOHIDROLOGÍA-----	21
5.2. HUMEDALES -----	21
5.2.1. HUMEDALES COSTEROS-----	22
5.2.2. HUMEDALES Y SU CONSERVACIÓN -----	24
5.3. CAMBIO CLIMÁTICO -----	25
5.3.1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO -----	26
5.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS -----	26
5.4.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES-----	28
5.5. HIDROLOGÍA-----	34
5.5.1. CANAL HIDRÁULICO-----	34
5.5.2. DREN AGRÍCOLA-----	34
5.5.3. FLUJO EN CANALES ABIERTOS Y CAUDAL -----	34
5.5.4. BALANCE HÍDRICO-----	35

5.5.5. ENTRADAS DE AGUA-----	35
5.5.6. SALIDAS DE AGUA-----	36
5.5.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN-----	36
5.5.8. FLUJO SUPERFICIAL-----	37
5.5.9. AGUA SUBTERRÁNEA-----	38
5.6. ENSAYOS DE BOMBEO-----	38
5.6.1. MÉTODO DE HVORSLEV-----	39
5.6.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA-----	39
CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA-----	41
6.1. ENTRADAS DE AGUA-----	42
6.1.1. CANAL WELLTON-MOHAWK-----	42
6.1.2. DREN RIÍTO-----	43
6.1.3. PRECIPITACIÓN-----	46
6.1.4. NIVEL FREÁTICO Y ENTRADAS DE AGUA SUBTERRÁNEA-----	47
6.2. SALIDAS DE AGUA-----	49
6.2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN-----	49
6.2.2. FLUJO SUPERFICIAL-----	50
6.3. DIMENSIONES-----	51
6.3.1. ÁREA-----	51
6.3.2. VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO-----	52
6.4. ELEVACIÓN Y PROFUNDIDAD DEL AGUA-----	53
6.4.1. SITIOS DE MONITOREO – COBERTURA ESPACIAL-----	53
6.4.2. ELEVACIÓN DEL AGUA-----	55
6.4.3. PROFUNDIDAD DEL AGUA-----	56
6.5. BALANCE HÍDRICO-----	58
6.6. BALANCE DE MASA-----	59
6.7. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO-----	60
6.7.1. ESCENARIO #1. REDUCCIÓN EN EL CAUDAL DE ENTRADA-----	60
6.7.2. ESCENARIO #2. INCREMENTO DE TEMPERATURA.-----	61
6.8. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS-----	62
6.8.1. IDENTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS-----	62
6.9. LIMITACIONES DE MONITOREOS-----	63
CAPÍTULO 7. RESULTADOS-----	64
7.1. ENTRADAS DE AGUA-----	64
7.1.1. WELLTON-MOHAWK-----	64
7.1.2. PRECIPITACIÓN-----	67
7.1.3. ENTRADAS SUBTERRÁNEAS-----	71

7.2. VOLÚMENES DE ENTRADA DE AGUA -----	72
7.3. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD) DE ENTRADA -----	74
7.3.1. <i>STD – WELLTON-MOHAWK</i> -----	74
7.3.2. <i>STD – DREN RÍITO</i> -----	74
7.4. SALIDAS DE AGUA -----	75
7.4.1. <i>EVAPOTRANSPIRACIÓN</i> -----	75
7.4.2. <i>FLUJO SUBTERRÁNEO – SUPERFICIAL</i> -----	77
7.4.3. <i>VOLÚMENES DE SALIDA DE AGUA</i> -----	77
7.5. DIMENSIONES -----	78
7.5.1. <i>ÁREA DE LA CIÉNEGA</i> -----	78
7.5.2. <i>VOLUMEN</i> -----	80
7.6. NIVELES DE AGUA -----	81
7.6.1. <i>PROFUNDIDAD EN LAS LAGUNAS</i> -----	85
7.7. BALANCE HÍDRICO -----	86
7.8. BALANCE DE MASA -----	87
7.9. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO -----	89
7.9.1. <i>ESCENARIO ACTUAL</i> -----	89
7.9.2. <i>ESCENARIO #1. REDUCCIÓN EN EL CAUDAL DE ENTRADA</i> -----	89
7.9.3. <i>ESCENARIO #2. INCREMENTO DE TEMPERATURA</i> -----	91
7.10. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS -----	95
7.10.1. <i>ZONA DE AMORTIGUAMIENTO</i> -----	95
7.10.2. <i>ZONA NÚCLEO</i> -----	98
7.10.3. <i>ZONA INTERNACIONAL</i> -----	99
7.11. PANORAMA ACTUAL E IMPORTANCIA DE LOS SE DE LA CIÉNEGA -----	100
7.12. IMPLICACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SE -----	102
CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN -----	104
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES -----	107
REFERENCIAS CONSULTADAS -----	109
FUENTES PRIMARIAS -----	109
FUENTES SECUNDARIAS -----	110
ANEXOS -----	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definiciones históricas de SE de mayor uso. -----	27
Tabla 2. Servicios ecosistémicos en humedales costeros. Tabla modificada de Assessment, (2005). -----	32
Tabla 3. Ejemplo de información obtenida durante el monitoreo en campo.-----	56
Tabla 4. Procesamiento de datos obtenidos en el monitoreo en campo. -----	57
Tabla 5. Datos in-situ tomados en el Dren Riíto.-----	66
Tabla 6. Volúmenes de agua de entrada calculados mensualmente. -----	73
Tabla 7. Volúmenes mensuales de agua que salieron de la Ciénega mediante ET y Q_{SM} . -----	78
Tabla 8. Resultados de las áreas totales (A_{TM}), que incluye áreas de lagunas abiertas y áreas de vegetación. -----	79
Tabla 9. Sitios monitoreados durante el estudio con su respectiva ubicación geográfica (Datum WGS 84 / UTM zona 11N), elevación del nivel y tipo de medición que se realizó. -----	82
Tabla 10. Resultados obtenidos del balance hidrológico.-----	87
Tabla 11. Resultados obtenidos del balance de masa.-----	88
Tabla 12. SE más representativos para los usuarios y/o beneficiarios. -----	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización de la Ciénega de Santa Clara. -----	11
Figura 2. Localización y delimitación del área y zonas de estudio. -----	13
Figura 3. Localización de los ejidos y sus unidades de manejo de la vida silvestre. -----	14
Figura 4. Localización de humedales costeros. Imagen modificada de (EPA. 2015). -----	23
Figura 5. Localización del sitio de aforo en el Dren Riíto. -----	44
Figura 6. Modelo descriptivo de la ecuación de sección media. Modificado de SonTek, (2009). -----	45
Figura 7. Mapa de localización de la estación meteorológica en la Ciénega. En el recuadro derecho se observa una imagen de la estación instalada en el sitio. -----	47
Figura 8. Localización de la red piezométrica. -----	48
Figura 9. Imagen georeferenciada de la Ciénega de Santa Clara y delimitación del área de la marisma. -----	52
Figura 10. Localización de los sitios de monitoreo donde se instalaron los sensores. -----	54
Figura 11. Regleta instalada y sujeta a una solera que es enterrada en el suelo firme; a un costado se observa el tubo donde se introduce el sensor HOBO. -----	58
Figura 12. Volúmenes de agua mensual registrados por la CILA. -----	64
Figura 13. Flujos de entrada por el canal Wellton-Mohawk hacia la Ciénega de Santa Clara durante un ciclo hidrológico comenzando a partir del 1 de octubre del 2014 (CILA. 2014-2015). -----	65
Figura 14. Volúmenes de agua mensual del Dren Riíto. -----	66
Figura 15. Milímetros de precipitación registrados mensualmente por la estación meteorológica instalada dentro de la Ciénega de Santa Clara. -----	67
Figura 16. Volumen de agua que ingresó por precipitación durante el periodo de estudio. -----	68
Figura 17. Niveles subterráneos de agua obtenidos mensualmente en la red piezométrica. -----	69
Figura 18. Perfiles de nivel de agua subterránea por sección piezométrica y nivel de agua superficial en las lagunas, obtenidas durante abril del 2015. -----	70
Figura 19. Elevación del nivel de agua y dirección del flujo subterráneo obtenidos durante abril del 2015. -----	71
Figura 20. Volúmenes de agua que ingresaron de manera subterránea durante el periodo de estudio. -----	72
Figura 21. Volúmenes totales que ingresaron al humedal con su respectivo porcentaje. -----	73
Figura 22. Resultados de las pérdidas diarias de agua por ET. -----	75
Figura 23. Volúmenes de agua mensuales extraídos por evapotranspiración. -----	76
Figura 24. Volúmenes totales de agua que salieron del humedal y su respectivo porcentaje. -----	77
Figura 25. Resultados mensuales de las áreas del humedal y entradas de agua. -----	80
Figura 26. Volumen de almacenamiento y procesos que intervienen en su variabilidad. -----	81
Figura 27. Localización de los sitios monitoreados dentro del humedal. -----	82
Figura 28. Elevación del agua en msnm de todos los sitios donde se instaló un sensor. -----	84
Figura 29. Profundidad media diaria obtenida en los sitios de monitoreados. -----	85
Figura 30. Relación de resultados obtenidos con el balance hídrico durante 2014-2015. -----	89
Figura 31. Relación de resultados obtenidos con el balance hídrico durante 2010 - 2011. -----	90
Figura 33. Escenario hidrológico del sistema lagunar calculado con la temperatura actual. -----	92
Figura 34. Escenario hidrológico calculado con un incremento de temperatura de 1.5°C. -----	93
Figura 35. Escenario hidrológico calculado con un incremento de temperatura de 5°C. -----	94

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La Ciénega de Santa Clara (Ciénega) es el humedal antropogénico de mayor extensión en el Delta del Río Colorado (Delta) que se abastece de agua salobre de desecho agrícola proveniente de Arizona, Estados Unidos (E.U.) (Glenn *et al.* 1992; Glenn *et al.* 1996). Al igual que otros ecosistemas remanentes del Delta, brinda importantes servicios ecosistémicos (SE) (López-Hoffman *et al.* 2009), y para preservarla, es indispensable estudiar y comprender su comportamiento hidrodinámico (Glenn *et al.* 2007).

La Ciénega es el resultado no planeado del cumplimiento del acta 242 entre los gobiernos de E.U. y México (Carrillo-Guerrero *et al.* 2013), en el cual se establece que las concentraciones de sólidos totales disueltos en el agua durante los envíos a México a través del Río Colorado, deberán ser menores a 121 ppm \pm 30 ppm, normas de México; 115 ppm \pm 30 ppm, normas de los E.U. (CILA. 1973). Como parte del acta se aprobó la construcción de una desaladora conocida como la Planta Desalinizadora de Yuma (PDY); así como un canal de concreto, que conduciría la salmuera resultante del proceso de desalación hacia el sureste del Delta. El canal de nombre Rodolfo Sánchez Taboada, también conocido como Wellton-Mohawk (WM), ha conducido el agua desde el Distrito de Riego y Drenaje de los Valles de Wellton y Mohawk, E.U., hacia el Delta desde el año 1977 (Cohen. 2006). Por su parte, la construcción de la PDY finalizó en 1992, sin embargo no operó por completo debido a los posteriores años húmedos.

La Ciénega al igual que otros ecosistemas remanentes del Delta funciona como un reservorio de especies animales endémicas y migratorias, sin embargo, destaca por su extensa superficie conformada por pantanos de tule y extensiones de aguas abiertas (Zamora-Arroyo *et al.* 2001). Debido a las condiciones biológicas que en ella se conciben, ha permitido soportar una gran biodiversidad conformada por especies amenazadas como es ave de nombre Palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*); y especies en peligro de extinción, como es el caso del pez Cachorrillo del Desierto (*Cyprinodon macularius*); así como más de una docena de especies de aves ribereñas y peces (Hinojosa-Huerta *et al.* 2008). Por otro lado, la Ciénega se ubica sobre el Corredor Migratorio del Pacífico, y es utilizada como área de descanso para cientos de miles de aves migratorias terrestres neotropicales (García-Hernández. 2001; Glenn *et al.* 2001). Esta particularidad del humedal le permite brindar apoyo a la biodiversidad, y debido a su importancia ecológica, forma parte de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado e internacionalmente es reconocida como sitio Ramsar (Ramsar. 2001).

El Río Colorado por su parte, es un sistema independiente a la principal fuente de abastecimiento de la Ciénega – el canal WM – sin embargo, antes de la construcción de represas y obras derivadoras aguas arriba, el Delta se extendía hasta la superficie donde hoy en día se encuentra la Ciénega. En la actualidad el Río Colorado abastece a 30 millones de usuarios en 9 estados de 2 países y riega a más de 1.5 millones de hectáreas de tierras agrícolas solamente en el sur de California, E.U. y Norte de México. Sin embargo, la creciente demanda de agua debido al acelerado crecimiento económico y poblacional, ha colocado a la cuenca del Río Colorado bajo estrés hídrico. Autores como Barnett *et al*, (2008) e Hidalgo *et al*, (2009), mencionan que uno de los factores que ha intervenido con los flujos de agua en la cuenca del Río Colorado es el del cambio climático, y ha sido identificado como una amenaza ya que se han observado reducciones hasta del 20% en sus escurrimientos durante el siglo XXI.

Como parte de las estrategias para combatir el estrés hídrico en la cuenca del Río Colorado, el gobierno de los E.U. propuso reutilizar el agua de drenaje agrícola del Distrito de Riego y Drenaje de los Valles de Wellton y Mohawk. Lo que en consecuencia traería la reactivación de la PDY, la generación de aproximadamente 123 hm³ de agua para los usuarios, y un incremento de salmuera en un volumen de agua reducido que pondría en amenaza a la Ciénega (Flessa. 2010). Para el año 2010 la PDY se reactivó a 1/3 de su capacidad – como parte de una prueba piloto – acordada en la Minuta 316, firmada por los gobiernos de México y E.U. En ella la intervención de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), las Organizaciones no gubernamentales y la Academia, jugarían un papel importante mediante la aportación de agua de remplazo hacia el humedal, así como un programa de monitoreo binacional (Flessa. 2012). La prueba piloto permitió a las dependencias educativas y a la CILA observar el comportamiento del humedal durante la operación de la PDY previo al envío de agua de remplazo (Glenn *et al*. 2013). Así mismo, se demostró la importancia de determinar el comportamiento del humedal mediante balances hídricos y de masas, incluyendo el mayor número de mediciones in-situ (Lomeli *et al*. 2015b).

En numerosos países se han llevado a cabo estrategias de conservación de los ecosistemas para garantizar la protección de áreas naturales, por ejemplo, el establecimiento de acuerdos entre el Estado y los propietarios privados, donde se financia a aquellos que mantengan una labor conservacionista en su propiedad, y también; capacitándolos en base a la necesidad de proteger especies y comunidades biológicas (Goeschl & Lin. 2004). En el caso de la Ciénega se han realizado programas de monitoreo con el objetivo atender las necesidades de manejo a corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, es necesario

atender la ausencia de información social para poder manejar adecuadamente la toma de decisiones ante futuras reactivaciones de la PDY y el manejo a largo plazo de este humedal (Peters *et al.* 2009).

El objetivo de esta investigación consiste en comprender detalladamente la hidrología de la Ciénega, la cual, será utilizada para evaluar los posibles impactos ambientales e implicaciones de gestión en futuras condiciones de escasez de agua y bajo escenarios de cambio climático (incremento de temperatura). Además se realizará una caracterización de los SE que brinda la Ciénega a una escala local, regional e internacional. Una vez concretado lo anterior, se generaría información que podría ser utilizada por las instancias decisorias que promuevan la conservación de la biodiversidad, y los SE que provee el humedal.

CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

La Ciénega se ubica dentro de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Reserva) en el Estado de Sonora, México (Figura 1). De noroeste a suroeste se encuentra rodeada por áreas bajas con tierras áridas (5,016 ha) y al sureste por planicies lodosas con aguas poco profundas (9,998 ha). Estas últimas también forman parte de la Ciénega más no se encuentran dentro de la marisma de agua salobre con vegetación emergente dominada por tule (marisma). Al oriente se encuentra delimitada en toda su extensión por una superficie de arena de mayor elevación perteneciente el desierto de Sonora, cabe mencionar que, al sureste de ella se localizan los humedales de El Doctor. La franja poniente de la marisma se encuentra delimitada por planicies lodosas influenciadas por las mareas del alto Golfo de California.

La marisma de la Ciénega forma parte de la región hidrología RH07 del Río Colorado, ya que se encuentra dentro de la subcuenca C. Sánchez-Mejorada perteneciente a la cuenca Bacanora-Mejorada. Esta subcuenca de tipo exorreica desemboca al Golfo de California y cuenta con una pendiente media de 0.57% (INEGI. 2016c). La marisma está conformada por lagunas que cuentan con tiempos de respuesta distintos a las entradas de agua del WM, además, están influenciadas por salidas de agua por evapotranspiración (ET) (Lomeli *et al.* 2011). Este sistema conformado por varias lagunas se encuentra sobre una depresión formada por la falla de Cerro Prieto, en un antiguo brazo del Río Colorado (Glenn *et al.* 1999).

La superficie sobre la cual se encuentra la Ciénega y gran parte de la cuenca Bacanora-Mejorada es un depósito de material aluvial de la era Cenozoica de tipo Q(al) (Arenosol), y según la clasificación de las capas temáticas oficiales de INEGI, (2016a), es altamente permeable. Cuenta con suelos hidromórfos incluso en pendientes mayores a los cinco grados; suelos con poco contenido de carbonatos; suelos arenosos y limosos; así como suelos no consolidados en las márgenes (CONACYT & CONAGUA. 2012).

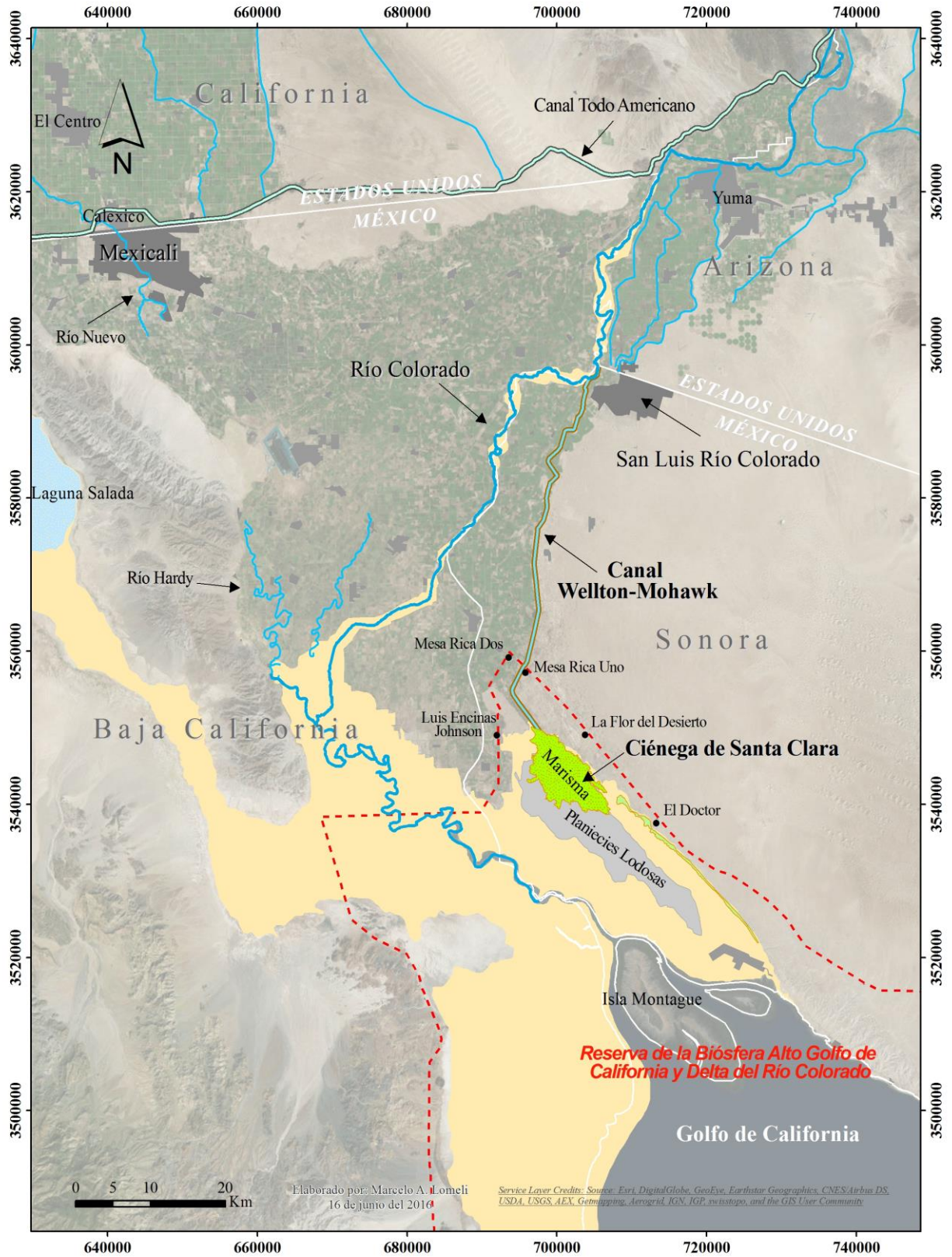


Figura 1. Mapa de localización de la Ciénega de Santa Clara.

La Ciénega se encuentra sobre suelos de textura fina pertenecientes a los grupos Solonchak y Vertisol. Al poniente y al sur fuera de la marisma, el suelo cuenta con una textura fina altamente salino y se presentan suelos del grupo Solonetz, además de los antes mencionados (INEGI. 2016b). La región que delimita la Ciénega de la franja desértica del desierto sonorense hacia el oriente, también se conforma de este tipo de suelos, solo que la textura del material es media fina. Los afloramientos de salinidad son apreciables en algunas zonas localizadas en las márgenes del humedal, principalmente durante el verano.

2.1. ZONIFICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio la Ciénega se subdividió en tres zonas para llevar a cabo la caracterización de los SE que proporciona: zona núcleo, zona de amortiguamiento y zona internacional. Se utilizaron como referencia los polígonos que delimitan a la Reserva presentados en el Programa de Conservación y Manejo de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP. 2007), así como las fronteras fisiográficas en el cuenca del Río Colorado (Figura 2). Cabe mencionar que para generar información de manejo y toma decisiones considerando los elementos ecosistémicos, un criterio consiste en delimitar el área de estudio utilizando como referencia los límites naturales (Taylor & Jennifer. 2008).

2.1.1. ZONA NÚCLEO

El polígono oficial de la zona núcleo delimitado por la CONANP, (2007), se extiende en una superficie de 164,779 ha, y comprende 11 sitios de importancia ecológica incluyendo la mayor parte de la Ciénega (Figura 2). Para este estudio, la zona núcleo se consideró como el área inundable de la Ciénega dentro del polígono de la Reserva, incluyendo las zonas lodosas ubicadas al sureste (Gómez-Sapiens *et al.* 2013), y la región intermareal del suroeste (Nelson *et al.* 2013). La zona núcleo incluye las superficies mayormente conservadas – de mayor prioridad – en las que se llevan a cabo los fenómenos naturales de especial importancia, como sitios de anidación de aves migratorias y procesos ecológicos relevantes como la reproducción de especies amenazadas. Según se menciona en el plan de manejo de la Reserva, en esta zona únicamente se permiten actividades de control de especies nocivas, ecoturismo o turismo de bajo impacto, educación ambiental – con el establecimiento de senderos interpretativos – tránsito de embarcaciones, investigación y monitoreo, actividades de restauración o señalización (CONANP. 2007).

2.1.2. ZONA DE AMORTIGUAMIENTO

El polígono de la zona de amortiguamiento presentado en el plan de manejo de la Reserva, delimita en su totalidad la Reserva de la Biósfera (CONANP. 2007) (Figura 2). Para este estudio se consideró como zona de amortiguamiento a la subzona de aprovechamiento sustentable de los recursos naturales correspondiente a la marisma de la Ciénega y sus alrededores, incluyendo las comunidades aledañas: Luis Encinas Johnson, Mesa Rica, La Flor del Desierto y El Doctor (Figura 2). Así mismo, a la subzona de aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y uso tradicional, ambas ubicadas al norte de la Ciénega.

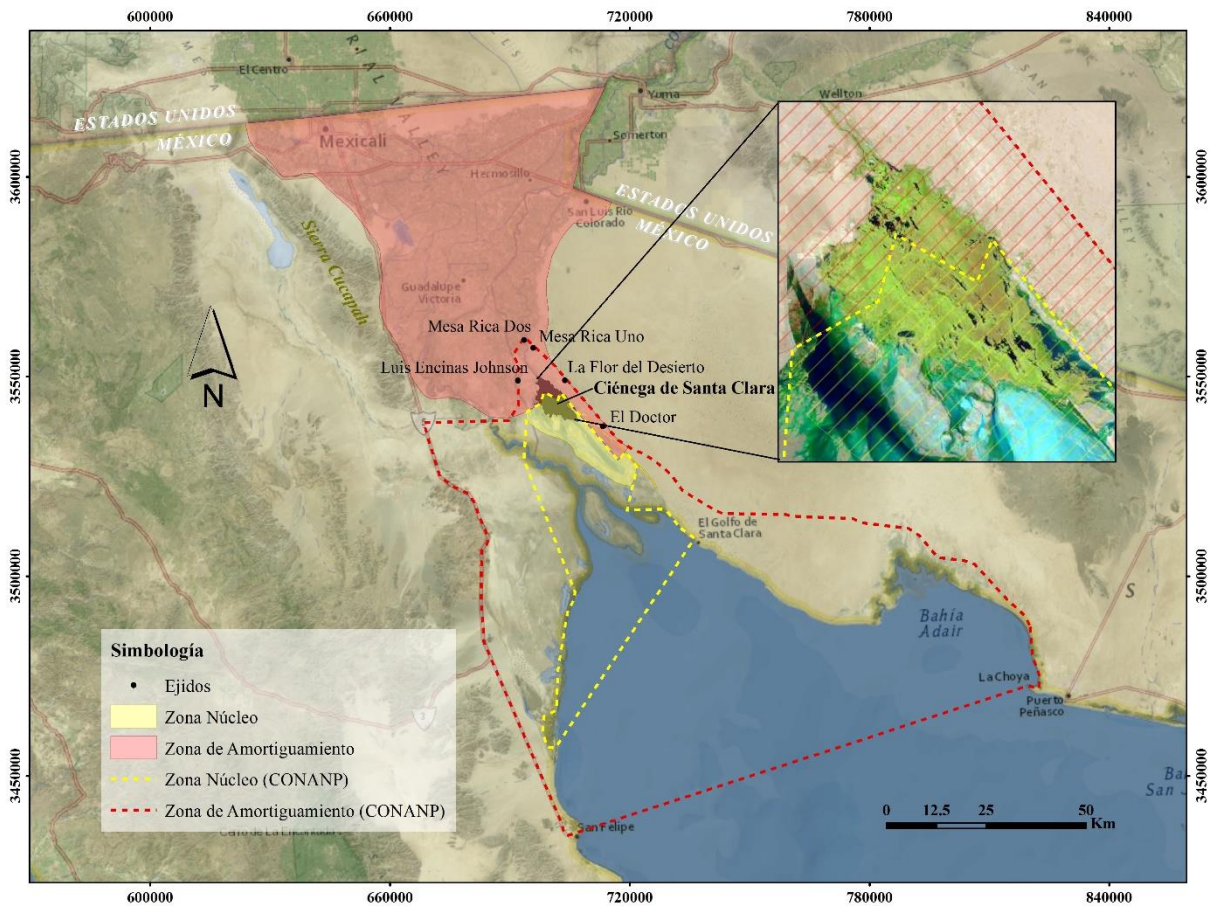


Figura 2. Localización y delimitación del área y zonas de estudio.

La zona de amortiguamiento incluye la desembocadura del bajo Delta del Río Colorado hasta topar al norte con la frontera entre E.U. y México. Geográficamente, al este se encuentra delimitada por el Desierto de Sonora, al sur por la Golfo de California y al oeste con la formación rocosa de la Sierra Cucapah. Según el programa de conservación de la Reserva, dentro de esta zona están permitidas actividades productivas emprendidas por las comunidades que habiten en ella (CONANP. 2007). En la

figura 3 se muestra la localización de los ejidos¹ y las Unidades de Manejo y Conservación de la Vida Silvestre (UMA)² que forman parte de la zona de amortiguamiento. Cada uno de los ejidos cuenta con una UMA, y son consideradas como áreas sujetas a un manejo ecológico y productivo que propicia el aprovechamiento de los recursos faunísticos que, al sumarse a través del territorio nacional, conforman una gran extensión de hábitat y ecosistemas que se renuevan (López *et al.* 2010).

2.1.3. ZONA INTERNACIONAL

Esta zona se extiende a lo largo del continente Americano y pertenece a toda la región que se encuentre fuera de las zonas antes mencionadas. Al norte comienza a partir de la franja fronteriza de E.U. y México, y al sureste, con el resto de México y el continente Americano.

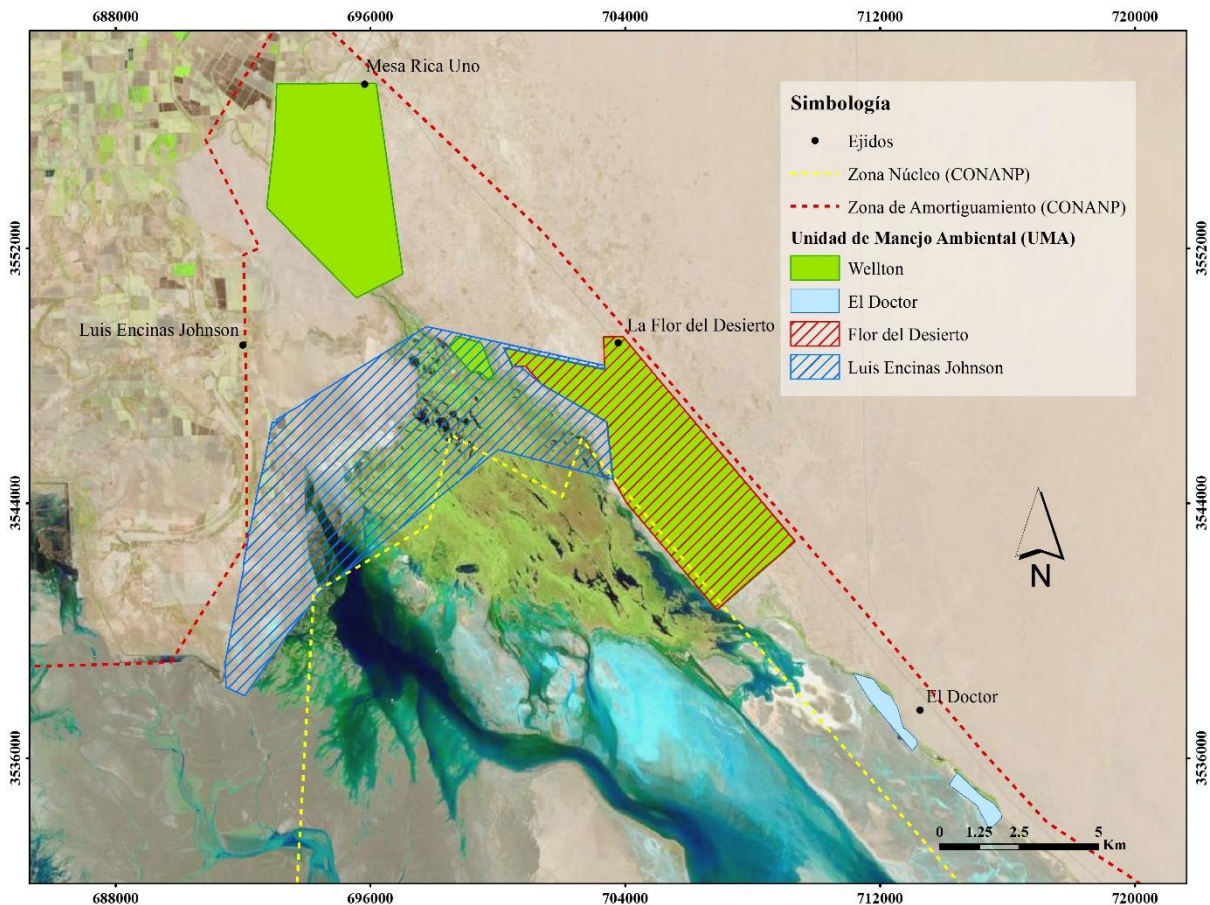


Figura 3. Localización de los ejidos y sus unidades de manejo de la vida silvestre.

¹ Ejido es el término que se le da a una asignación de tierra rural asignada a una grupo comunal Thompson, G.D.; Wilson, P.N. Ejido reforms in Mexico: Conceptual issues and potential outcomes. Land Economics:448-465; 1994.

² Las Unidades de Manejo para la Vida Silvestre (UMA) son espacios de promoción de esquemas alternativos de producción compatibles con la conservación de la vida silvestre. (<http://www.gob.mx/semarnat>, 2016).

CAPÍTULO 3. OBJETIVOS

3.1. GENERAL

Evaluar el régimen hidrológico y los servicios ecosistémicos de la Ciénega de Santa Clara bajo tres diferentes tipos de escenarios: el escenario actual, reducción del afluente principal y un escenario de incremento de temperatura en la región, para contribuir con ello a su conservación y manejo.

3.2. ESPECÍFICOS

1. Evaluar el régimen hidrológico de la Ciénega mediante el análisis de su balance hídrico y de masa mensual durante un año hidrológico, considerando mediciones en los flujos de entrada y salida, aportaciones de aguas subterráneas, salidas por evapotranspiración; y cambios en el volumen de almacenamiento en el sistema lagunar.
2. Modelar la respuesta hidrológica de la Ciénega bajo tres escenarios; considerando su estado actual, la reducción de agua por el aumento en la creciente demanda de agua en la cuenca hidrológica, y el incremento de temperatura ocasionado por el cambio climático.
3. Caracterizar los servicios ecosistémicos que actualmente brinda la Ciénega a usuarios locales, regionales e internacionales; así como los impactos resultantes de los escenarios de reducción de flujos de entrada e incremento de temperatura, con la finalidad coadyuvar en la generación de estrategias de conservación y manejo para una gestión sustentable del ecosistema de humedal.

CAPÍTULO 4. ANTECEDENTES

4.1. DELTA DEL RÍO COLORADO

Antes de la regulación de los flujos de agua del Río Colorado, el Delta funcionaba como un abundante y variado hábitat conformado por más de 200 especies de plantas y más de 350 especies de aves (Ezcurra *et al.* 1988). Llegó a ser abastecido anualmente por billones de metros cúbicos de agua que provenían desde las Montañas Rocallosas del Estado de Colorado, E.U. que, además de alimentar con sus nutrientes a 800,000 ha de humedales (Zamora-Arroyo *et al.* 2005), mantenía a pesquerías de alta productividad del Golfo de California y a especies marinas como la Totoaba (Morales-Abril. 1994) y la Vaquita Marina (Cisneros-Mata *et al.* 1995), mismas que actualmente se encuentran en peligro de extinción.

La reducción del afluente natural del Río Colorado en conjunto con las altas temperaturas de la región, provocaron una disminución superficial de humedales y zonas riparias que, para el año 1996, llegaron comprender 170,000 ha (Glenn *et al.* 2001). Al paso de los años las desviaciones de agua a los usuarios agrícolas y urbanos en E.U. y México fueron deteriorando las condiciones del Delta (All. 2006), incluyendo extensas superficies de humedales que daban soporte a una gran biodiversidad (Leopold. 1949; Sykes. 1937). Solamente en E.U. el Río Colorado se regula por 10 presas de gran capacidad y 80 desviaciones pequeñas, y en México, únicamente la presa derivadora Morelos que se encarga de enviar y distribuir el agua a Mexicali y sus campos agrícolas mediante un red de canales (Cohn. 2004).

La creciente demanda de agua debido al crecimiento económico y poblacional, ha obligado a los países a crear infraestructura necesaria para controlar y distribuir este valioso elemento, sin embargo, en algunas ocasiones no se considera el impacto ecológico que esta podría generar. En el Delta, la construcción de la presa Hoover en el año de 1935 en conjunto con otras obras de almacenamiento en E.U., redujo el afluente natural del Río Colorado, alterando las condiciones del ecosistema aguas abajo (Stockton & Jacoby. 1976).

La actividad humana en el Delta al igual que en otros deltas desérticos como es el del Río Nilo, en Egipto, ha modificado las condiciones naturales y superficiales (Glenn *et al.* 1996). No obstante, los humedales remanentes del Delta se han mantenido por su alta capacidad de resistencia (Zamora-Arroyo *et al.* 2005). Cabe mencionar que algunos de estos ecosistemas como es la Ciénega, son abastecidos con agua proveniente de inundaciones, drenajes agrícolas e infiltraciones de canales, y algunos con descargas superficiales de origen antropogénico (Glenn *et al.* 1996).

4.2. CIÉNEGA DE SANTA CLARA

La Ciénega surge en consecuencia a la solución de la problemática de salinidad en las descargas de agua de la cuenca baja del Río Colorado (Carrillo-Guerrero *et al.* 2013). Antes del envío de agua en 1977 – en la región en donde actualmente se encuentra – el humedal estaba conformado por una superficie de 200 ha provisto por agua de drenaje agrícola del Valle de Mexicali y agua de descarga de flujo subterráneo procedente de manantiales naturales (Glenn *et al.* 1996). Años más tarde, debido a los envíos de agua salobre (3,000 ppm) a través del canal WM (Glenn *et al.* 2006; Zengel & Glenn. 1996), la superficie vegetal y las lagunas abiertas que conforman la marisma de la Ciénega, luego a extenderse hasta 4,477 ha (Glenn *et al.* 2006). Actualmente la mezcla concentrada de aguas de desecho agrícola proveniente de los Valles de Wellton y Mohawk y agua del Río Colorado (García-Hernández *et al.* 2000), dan soporte al humedal antropogénico de mayor extensión del Delta (García-Hernández. 2001).

En sus inicios el humedal de la Ciénega no era considerado como un sitio de importancia ecológica (comunicación-personal)³. Sin embargo, después de las expediciones de investigadores locales e internacionales, se fue adquiriendo conciencia acerca de la importancia de su conservación. Hasta la fecha se han llevado a cabo esfuerzos por Organizaciones no gubernamentales (ONGs), instituciones educativas, gobierno y sociedad para que continúe con sus funciones ecológicas, ya que ha permitido mantener especies endémicas y en peligro de extinción. Es de suma importancia la colaboración entre las autoridades competentes de México y E.U. en el manejo de los recursos hídricos, la cual permita lograr acuerdos que mantengan un equilibrio constante entre la cantidad de agua y las partículas suspendidas que son enviadas al humedal para permitirle subsistir (Cohn. 2004).

De manera exponencial la importancia del Delta se expandió a niveles internacionales. Para 1993 parte de esta región fue declarada como Reserva de la Biosfera, y debido al valor ecosistémico de la Ciénega, una parte del humedal se encuentra en la zona núcleo de mayor prioridad de la Reserva. Así mismo para 1997, los humedales del Delta del Colorado – incluyendo nuevamente a la Ciénega – fueron incorporados dentro de la lista de humedales de importancia internacional ante la convención Ramsar (Ramsar. 2001).

La superficie vegetal de la Ciénega se conforma principalmente por tule (*Typha domingensis*), así como 22 especies de plantas (Zengel *et al.* 1995). La densa vegetación del humedal así como algunas zonas con pastizales son utilizadas como hábitat para una gran variedad y cantidad de aves, incluyendo el

³ Comunicación personal con habitantes de las comunidades aledañas ubicadas en la Zona de Amortiguamiento.

Palmoteador de Yuma, así como otras especies de aves como son: patos, garzas, pelicanos, silbones, entre otras. Además, debido a su ubicación geográfica, la Ciénega es utilizada como sitio de descanso para aves acuáticas que utilizan la Ruta Migratoria del Pacífico (Abarca *et al.* 1993; García-Hernández. 2001).

Dentro del cuerpo lagunar del humedal se ha registrado la presencia de grandes poblaciones de la especie de pez endémico y en peligro de extinción Cachorrito del Desierto (Zengel & Glenn. 1996); además de otras especies de peces como son: carpas, lobinas negras, tilapias, pez gato, entre otras.

4.3. ACTA 242 DE LA CILA

El Acta 242 la cual fue firmada por los gobiernos de E.U. y México, nace como parte de una estrategia para solucionar la problemática de salinidad en el envío de agua del Río Colorado a México. El incremento de salinidad se dio como resultado a las descargas de agua de desecho agrícola de los valles de Wellton y Mohawk, y otros campos de regadío en el Río Colorado aguas arriba del Lindero Internacional Norte (*NIB*, por sus siglas en inglés); antes de cruzar la frontera. Cabe mencionar que durante el trayecto del cauce, el agua naturalmente tomaba las sales de las formaciones de rocas por las cuales fluía.

Los daños que estaba generando el incremento de salinidad en las cosechas aguas abajo del Río Colorado, provocó una gran problemática en los años 60. Por lo tanto, en 1973 el congreso aprobó el Acta 242 en relación al Control de Salinidad de la Cuenca del Río Colorado, estableciendo propuestas que permitieran dar cumplimiento a acta (Luecke *et al.* 1999). Estas propuestas incluyeron lo siguiente:

- a) La aprobación de un presupuesto de \$250,000,000 dólares para la construcción del canal de desvío WM y la construcción de la PDY (Furnish & Ladman. 1975).
- b) De los 1,850 hm³ de agua que serían enviados a México en base al tratado sobre los derechos de agua de 1944, 1,678 hm³ de agua deberán contar con una salinidad promedio menor a 121 ppm ± 30 ppm, normas de México; 115 ppm ± 30 ppm, normas de los E.U., y serían entregadas anualmente por medio del *NIB* (CILA. 1973). El resto del agua sería entregado por el Lindero Internacional Sur (*SIB*, por sus siglas en inglés), en la frontera con el Estado de Sonora, México (Hundley Jr. 1986).

4.4. PLANTA DESALINIZADORA DE YUMA

La PDY fue construida en 1992 por el Buro de Reclamación de E.U. (*BOR*, por sus siglas en inglés), con la finalidad solucionar la problemática en los altos niveles de sal en los envíos de agua a México establecidos en el tratado de 1944 (Cohn. 2004). Una vez concretada su construcción solamente trabajó por 6 meses. Posteriormente en 1993 fue cerrada debido a daños estructurales causados por inundaciones. Otros factores, como los económicos, fueron también motivos para que la PDY no volviera a ser activada.

A pesar de que el agua del Distrito de Riego⁴ 014 no era utilizada por la PDY, los límites de salinidad del agua del Río Colorado se encontraba dentro de los rangos permitidos (Cohn. 2004). No obstante, en el 2004 se autorizó la reactivación de la planta, al igual que en el 2010.

4.4.1. AMENAZAS DE LA PDY

La principal amenaza de la Ciénega se presenta con la disminución de caudal e incremento de salmuera resultante en su afluente principal debido al proceso de desalación de la PDY. Ya que, una vez activada y trabajando al 100% de su capacidad, 1/3 del agua tratada (96 hm³) combinada con salmuera, sería enviada por el canal WM hacia la Ciénega. Esto en consecuencia triplicaría la concentración de salinidad que tolera la vegetación del humedal (Cohen. 2006); la cual se estima que es de 5 g L⁻¹ (Glenn *et al.* 1995).

Una mala calidad del agua en un volumen de agua reducido impactaría directamente en la reducción superficial de la vegetación así como el hábitat que ofrece (Flessa. 2010; Hinojosa-Huerta *et al.* 2004). Otra amenaza es el Selenio en el agua, el cual se disuelve en el humedal de la Ciénega y se introduce en la cadena alimenticia (García-Hernández *et al.* 2000). Sin embargo, no se han presentado reducciones significativas en las especies o en su reproducción en consecuencia a la presencia de este elemento.

4.5. CANAL WELLTON-MOHAWK

El canal WM recorre 56 km desde la frontera en el *SIB* hasta la Ciénega (Cohen. 2006; Valdés-Casillas *et al.* 1998) y es la principal fuente de abastecimiento de la marisma. Tiene una capacidad 10 m³ s⁻¹ y conduce de 120 a 180 hm³ de agua anualmente con una salinidad media de 3 g L⁻¹ (Burnett *et al.* 1993). Inicialmente su función era conducir el agua de desecho agrícola americano hacia la PDY y posteriormente enviarlo hacia México por el *NIB*, esto con la finalidad de que el volumen enviado formara parte del volumen de

⁴ Los distritos de riego son proyectos de irrigación desarrollados por el Gobierno Federal desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación CONAGUA. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua32.html>; 2016.

agua pactado en el tratado de 1944 (Furnish & Ladman. 1975). Posteriormente se construyó una extensión del canal en el lado Mexicano, el cual conduciría la salmuera resultante del proceso de desalación hacia Delta. Cabe mencionar que este volumen de agua no sería incluido dentro del tratado de 1944, sin embargo, la cantidad y calidad de la descarga ha sido monitoreada (Cohen. 2006).

Al paso del tiempo, la descarga de agua del canal WM ha propiciado el crecimiento de una gran variedad de densos tulares, lagunas y planicies lodosas que funcionan como un pulmón para el planeta (Flessa. 2010). Además ha permitido ampliar la extensión superficial del humedal (Zengel *et al.* 1995), transformando esta región del Delta en una zona de gran valor ecológico (Zamora-Arroyo *et al.* 2005).

El canal de concreto WM es conocido por los estadounidenses como el *Main Outlet Drain Extension* (*MODE*, por sus siglas en inglés), y en México como canal General Rodolfo Sánchez Taboada.

4.6. DREN RIÍTO

El Dren Riíto (DR) es un dren de tierra que capta el agua de drenaje agrícola proveniente del Distrito de Riego 014 de San Luis en el Estado de Sonora y la descarga a la Ciénega (Burnett *et al.* 1993). A diferencia del 85% de agua que descarga el WM al humedal, el DR en conjunto con la lluvia, forma parte del 15% del afluente restante (Lomeli *et al.* 2011).

CAPÍTULO 5. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

5.1. ECOHIDROLOGÍA

La ecohidrología hace referencia al entendimiento sobre la interrelación entre la hidrología y la biota en una escala de cuenca, y es fundamental para controlar y restaurar procesos ecológicos que mejorarían la resistencia y la resiliencia de un ecosistema (Zalewski. 2014). También se encuentra definida como la componente clave entre la interacción de los patrones ecológicos y mecanismos hidrológicos (Rodríguez-Iturbe. 2000). Se enfoca principalmente en las características que determinan la disponibilidad de agua en el hábitat y que se transfiere en dimensiones espaciales y temporales (Zhou *et al.* 2016).

La ecohidrología se encarga de cuantificar la interacción entre las plantas y los recursos hídricos, así como los hábitats por medio de patrones de análisis espacial y procesos temporales (Wood *et al.* 2008). Para los humedales existe una subdisciplina de la ecohidrología que se enfoca en la conexión y acoplamiento entre la ecología de las plantas y el hábitat hídrico que generan, y es fundamental para su estudio ya que estos ecosistemas cuentan con la mayor biodiversidad del planeta (Mitsch. 2009). El estudio ecohidrológico de un humedal – como es la Ciénega – es de suma importancia, ya que permite conocer su respuesta ante las variaciones espaciales y temporales de los procesos hidrológicos involucrados en la subsistencia del ecosistema (Zhou *et al.* 2016).

5.2. HUMEDALES

Cuando se habla de humedales se hace referencia a la Convención Sobre los Humedales de Importancia Internacional, o Convención de Ramsar. Consiste en un tratado intergubernamental a nivel mundial en pro de la conservación, protección y uso racional de los humedales al igual que los recursos que brindan. Este tratado considera que los humedales son los ecosistemas más productivos del mundo, cunas de la diversidad biológica y fuentes de agua, así como de productividad primaria que es necesaria para el sustento de especies vegetales y animales (Ramsar. 2006b). Define a estos ecosistemas como las 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 (Ramsar. 2006a).

En México el reglamento de La Ley de Aguas Nacionales de 1994 define a los humedales como zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites

los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos, originadas por la descarga natural de acuíferos (DOF. 1994).

Ambas definiciones anteriormente mencionadas, hacen referencia a todas las tipologías de humedales. No obstante, existen distintas formas en las que han sido clasificados como lo menciona Mitsch, (2009). Por su parte, la convención de Ramsar ha adaptado un sistema de Clasificación Ramsar de humedales, el cual incluye 42 tipos, y que a su vez, están agrupados en tres principales categorías: 1] Humedales continentales; 2] Humedales marinos y costeros; y 3] Humedales artificiales (Ramsar. 2010). Esta clasificación describe los humedales del Delta del Río Colorado en la hoja técnica Ramsar No. 814 (Ramsar. 2001).

5.2.1. HUMEDALES COSTEROS

Según el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, los humedales costeros son ecosistemas en los que entran en contacto – en mayor o menor medida – el agua de origen continental con el agua marina. Suelen presenciar una relación con los flujos de agua subterránea, y frecuentemente son áreas de recarga o descarga de acuíferos. Su relación hidrológica puede ser directa por mareas; o indirecta, mediante la comunicación de flujos de agua subterráneos (Ministerio de Agricultura. 2016).

La Agencia de Protección al Ambiente de los E.U. (*EPA*, por sus siglas en inglés) incluye dentro de la definición de humedales costeros, a aquellos humedales abastecidos ya sea por agua dulce o salada localizados en la costa dentro de la frontera que delimita la cuenca.

En la figura 4 se muestra el esquema de los distintos tipos de humedales costeros según la *EPA*, y donde se define a la Ciénega que se conoce en la actualidad como un humedal de tipo costero de agua dulce con influencia de mareas (línea discontinua roja).

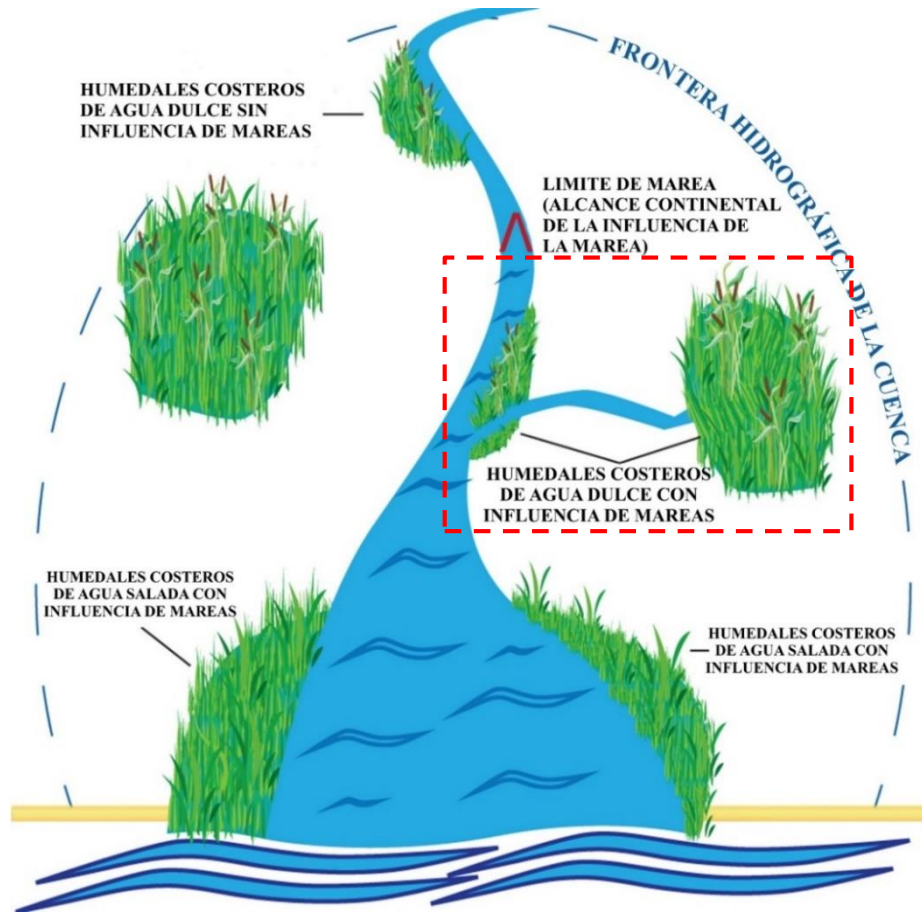


Figura 4. Localización de humedales costeros. Imagen modificada de (EPA. 2015).

La Ciénega es un humedal continental de sistema lacustre según la clasifica el Instituto Nacional del Agua y la Universidad Nacional Autónoma de México (CONACYT & CONAGUA. 2012). Otros autores como Huckelbridge *et al.*, (2010) la definen como un humedal costero e incluso antropogénico (Glenn *et al.* 2013). Sin embargo, originariamente comprendía de 200 ha de marisma continental soportadas por agua de drenaje agrícola mexicano a través del DR, así como por manantiales naturales (Glenn *et al.* 1996). En la actualidad la Ciénega es un humedal natural remanente del Delta que fue extendiéndose en la zona costera gracias al suministro de agua del WM, logrando alcanzar más de 4,500 ha (Zengel *et al.* 1995).

En el 2010 se estimó que el 95% del agua que soporta esta superficie vegetal ingresó a través del WM, el resto por medio del DR, precipitación y entradas subterráneas (Glenn *et al.* 2013; Lomeli *et al.* 2015b). Hoy en día la superficie vegetal que comprende al humedal depende mayoritariamente de los volúmenes de agua proveniente de los valles agrícolas de Wellton y Mohawk, E.U., de no ser bastecida con ellos, esta podría reducirse considerablemente (Gómez-Sapiens *et al.* 2013).

5.2.2. HUMEDALES Y SU CONSERVACIÓN

Los humedales son de suma importancia para el medio ambiente y la sociedad en general. Su función principal consiste en filtrar el agua naturalmente mediante su almacenamiento y liberación a través de los tejidos de la vegetación hidrófila. Por otra parte, las inusuales condiciones que estos ecosistemas presentan dan soporte a especies animales y vegetales generalmente endémicas, entre los que destacan: aves, peces y reptiles. El hábitat de humedal permite la proliferación y el aprovisionamiento de las especies, así como una interacción de hábitats entre los entornos colindantes y externos (Mitsch. 2009).

El valor que se le ha dado a los humedales en la actualidad como ecosistema es mayor. Anteriormente eran considerados como una simple inundación y eran drenados. Los recursos biológicos que estos entornos resguardan, están relacionados al aprovechamiento superficial para el crecimiento urbano. Lo que en su momento, genera la desaparición de las especies endémicas y migratorias que habitan, o en su caso utilizan como zonas de descanso. No obstante, a pesar de la importancia que tienen los humedales de todo el mundo, se encuentran amenazados por la falta de conocimiento y al mal manejo del recurso hídrico.

Debido a su importancia ecológica, más de un millar de humedales en todo el mundo se encuentran protegidos, y para su conservación, es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones.

- a) Debido a que el agua es elemental para el sustento de un humedal, es necesario evitar construir caminos, represas altas, control de inundaciones, disminución del drenaje en el acuífero y sistemas de riego, así como cualquier obra que afecte su suministro. Para el caso de la Ciénega, la reactivación de la PDY en E.U. generaría una disminución en el suministro.
- b) Aprovechar los recursos ecosistémicos que ofrece el humedal para llevar a cabo actividades como son: la agricultura, instalaciones portuarias, proyectos de navegación y acuicultura. Dentro de estas actividades, la más peculiar llevada a cabo en manglares, es la del cultivo de camarón. No obstante las actividades varían dependiendo de las condiciones del sitio, por ejemplo, en los humedales del Delta y en la Ciénega, la extracción de peces es una de las conocidas para autoconsumo y venta.
- c) Realizar proyectos que intervengan en la alteración de condiciones ambientales, por ejemplo, mediante la eliminación de contaminantes en tierras húmedas; evitar la introducción de especies exóticas; evitar actividades que produzcan variaciones físicas, así como precipitaciones de lluvias ácidas o la elevación del nivel del mar.

- d) Utilizar las cuencas hidrográficas en otros proyectos efectuados para solucionar las problemáticas ambientales. El trasvase de agua entre subcuencas del Río Colorado es algo que sucede en el Delta, principalmente en el abastecimiento de agua en la Ciénega ya que el agua proviene de los E.U.

5.3. CAMBIO CLIMÁTICO

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*IPCC*, por sus siglas en inglés) define como cambio climático al cambio del estado del clima identificable en las variaciones de su valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. También, se encuentra definido por la Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (*UNFCCC*, por sus siglas en inglés), en su Artículo 1, como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial, y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. Esta última hace diferencia pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales (Bates *et al.* 2008).

El clima de la tierra está cambiando y se ha observado en las altas temperaturas atmosféricas (Jones *et al.* 2007), la reducción de la nieve y la capa de hielo (Rignot & Kanagaratnam. 2006), así como el incremento en los niveles de agua marinos (Church & White. 2006). Según comentan Amador & Alfaro, (2009), el sistema climático se encuentra en una constante evolución natural relativamente lenta en el tiempo. No obstante, el cambio climático en la actualidad presenta cambios acelerados, intensos y sostenidos de las variables climáticas asociadas principalmente con los aumentos de temperatura y cambios en los patrones de lluvia (Camargo-Bravo & García-Cueto. 2012). Este fenómeno es considerado como el problema ambiental de mayor importancia del siglo XXI por ser una amenaza de los elementos básicos, como son: el acceso al agua, los alimentos, la salud, actividades terrestres, y el medio ambiente (Stern. 2007).

Al paso del tiempo el cambio climático global se ha visto reflejado en el incremento de temperatura, misma que continuará en aumento debido a la acumulación en la atmósfera de los denominados Gases de Efecto Invernadero, menciona el *IPCC* (Bates *et al.* 2008). Esto como resultado a un acelerado consumo de energías fósiles y al desequilibrio entre los sistemas naturales, sociales y de producción, en los que se involucra: el crecimiento poblacional de los últimos cincuenta años; actividades humanas de los dos últimos siglos (industrialización), y; la explotación de los recursos naturales (Wood. 2008).

Se ha demostrado en estudios previos que los humedales del mundo son sistemas neutrales ante el cambio climático, esto es, que a pesar de que emiten a la atmósfera del 20 a 25% de metano, se compensa por el secuestro de carbono en los suelos (Whiting & Chanton. 2001). Cabe mencionar que este tipo de ecosistemas tiene la mejor capacidad de retener carbono a través de los sedimentos (Mitsch. 2009), sin embargo, a pesar de formar parte del cambio climático con el intercambio de gases, son los ecosistemas más vulnerables ya que su degradación y pérdida es más rápida (Domínguez-Beisiegel *et al.* 2013).

5.3.1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los escenarios de cambio climático son simulaciones de la futura respuesta del clima a perturbaciones inducidas por las actividades humanas, y son creados mediante Modelos Globales del Clima (*GCMs*, por sus siglas en inglés), también llamados Modelos de Circulación General acoplados Océano-Atmósfera (Smith *et al.* 2007). Cabe mencionar que para el presente estudio se hace referencia al término “escenario de cambio climático” a la diferencia entre un escenario climático y el clima actual (Bates *et al.* 2008). Por otra parte, a escalas globales y continentales los *GCMs* brindan mayor confianza en simulaciones de temperatura al ser utilizadas diferentes concentraciones de gases de efecto invernadero (Magaña. 2010).

Los diferentes escenarios de emisiones de los gases de efecto invernadero utilizados por el *IPCC* se presentan en el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (Nakicenovic *et al.* 2000), y se relacionan con distintas hipótesis socioeconómicas del estado y crecimiento poblacional, en donde se consideran los principales generadores de emisiones dentro de los próximos 100 años (Feenstra *et al.* 1998). Sin embargo, los resultados de los *GCMs* requieren de la aplicación de distintas técnicas de reducción de escala (*downscaling*), ya que su resolución espacial no permite considerar factores del clima local, topografía y uso de suelo a escalas locales (Camargo-Bravo & García-Cueto. 2012). Por lo tanto, de no ser llevada a cabo la reducción, se generaría una gran incertidumbre así como errores significativos entre los procesos a distintas escalas (Christensen & Lettenmaier. 2006).

5.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

La definición de servicios ecosistémicos (SE) emerge del mundo científico, e intenta forjar en un cimiento teórico bien estructurado en donde el ámbito de gestión sea dirigido sobre los recursos naturales para mantener la salud de los ecosistemas y garantizar la provisión de sus servicios (Assessment. 2005). En la década de 1960 y 1970 surge el concepto de servicios brindados por el ecosistemas, el cual se asociaba a la creciente contaminación y a la incertidumbre entre la vinculación del buen estado de los ecosistemas y

el bienestar humano (Caballero. 2014). En lo que concernió a lo relacionado con los efectos generados por la disminución de la capa de ozono, las intensivas deforestaciones de bosques tropicales y cambios climáticos (van den Belt & Blake. 2014), entre otros. No fue hasta el año de 1977 cuando se realizó la primera formalización científica del término, definiéndolos como los servicios de la naturaleza (Westman. 1977). En la siguiente tabla 1 se presentan las definiciones históricas de mayor uso.

Tabla 1. Definiciones históricas de SE de mayor uso.

Autor	Definición
Westman, (1977)	“Servicios de la naturaleza”, y es considerada como la primera formalización científica.
Daily, (1997)	“Condiciones y procesos por los cuales los ecosistemas naturales y las especies que lo constituyen, sustentan y satisfacen la vida humana”.
Costanza <i>et al</i> , (1997)	“Beneficios que la población humana obtiene de forma directa o indirectamente de los bienes o servicios de los ecosistemas”.
De Groot <i>et al</i> , (2002)	“Capacidad de los ecosistemas para proporcionar de forma directa o indirectamente, bienes y servicios que satisfagan las necesidades humanas”.
Assessment, (2003)	“Beneficios que la población obtiene de los ecosistemas”.
Environmental Protection Agency, U.S., (2004)	“Funciones o procesos ecológicos que contribuyen de manera directa o indirectamente al bienestar humano o tienen la capacidad de realizarlo en el futuro”.
Boyd & Banzhaf, (2007)	“Componentes de la naturaleza, disfrutados, consumidos o directamente usados para generar el beneficio humano”.
Fisher <i>et al</i> , (2009)	“Aspectos activos o pasivos de los ecosistemas para producir bienestar humano”.

La primera de las definiciones propuesta por Westman, (1977), es considerada como la línea base que permite definir a los SE mediante distintas clasificaciones, mismos que coinciden en aspectos generales. Por su parte la definición de Daily, (1997) destaca las condiciones y los procesos que a través de los sistemas naturales, flora y fauna; mantienen y satisfacen las necesidades humanas. Costanza *et al*, (1997) define a los SE como los bienes o servicios de los ecosistemas que se obtienen de manera directa o indirecta de las funciones que proveen los ecosistemas, separando los bienes aprovechables de los procesos intangibles. Esta definición involucra principalmente la importancia de los indicadores ecosistémicos en los humedales continentales, los cuales son considerablemente más valiosos que en los lagos, ríos, bosques y pastizales. La definición propuesta por De Groot *et al*, (2002), considera la capacidad de los ecosistemas para brindar bienes y servicios, ya sea en forma directa o indirectamente. La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (Assessment. 2003), centra su definición en los beneficios obtenidos por los seres humanos, resaltando la dimensión antropocéntrica pero descuidando la distinción entre los procesos y el bienestar humano. La definición de la EPA de los E.U., está enfocada en los beneficios directos o indirectos que se obtienen de los ecosistemas en la actualidad y que tienen potencial

de hacerlo para las futuras generaciones. Por otro lado, los autores Boyd & Banzhaf, (2007), enfatizan a los SE como los bienes y servicios aprovechados de forma directa para el beneficio humano, esta definición permite estimar el valor de los SE sin confusiones. Finalmente, la definición de SE de Fisher *et al.*, (2009) se centra en fenómenos únicamente ecológicos que engloban su estructura, los procesos y las funciones de los ecosistemas, que benefician a los seres humanos de cualquier forma.

Las previas definiciones de SE descritas son el resultado de la investigación realizada en su momento, o bien, al avance en el conocimiento sobre el tema de los servicios que los ecosistemas brindan a los seres humanos. No obstante, para la realización de este estudio se optó por utilizar las definiciones propuestas por Costanza *et al.*, (1997), y la EPA, partiendo del objetivo que, consiste realizar una caracterización de los SE que ofrece la Ciénega ya sea de manera directa o indirecta a nivel local, regional e internacional. Además, los SE que podrían ser conservados para un futuro manejo del humedal y que actualmente podrían ser parte de una línea base de conocimiento sobre los de mayor importancia a diferentes escalas.

La amplia atención que la comunidad científica le ha dado a los SE, ha sido en consecuencia por el creciente interés sobre los beneficios que brindan los ecosistemas naturales y semi-naturales, mismos que son subestimados en la toma de decisiones (Hein *et al.* 2006; Helliwell. 1969).

5.4.1. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE LOS HUMEDALES

Por más de 30 años se han realizado esfuerzos para cuantificar los servicios o comodidades que los humedales brindan a la sociedad (Mitsch. 2009). Algunos investigadores como Wharton, (1970), y Gosselink & Pope, (1974), han sido de los pioneros que han atribuido valores a los humedales por los servicios que proveen. Por su parte, en 1997 Costanza y colaboradores enfocaron su investigación en identificar todos los servicios que proveen los ecosistemas a las funciones públicas.

Los humedales brindan una gran cantidad de SE que favorecen el bienestar de los seres humanos (Clarkson *et al.* 2013; Mitsch *et al.* 2015; Mitsch & Gosselink. 2000). Además son conocidos como los riñones del medio natural (Mitsch & Gosselink. 2000), y considerados como algunos de los ecosistemas de mayor importancia del planeta (Ramsar. 2009c). A inicios de los años 70s fueron de los primeros ecosistemas reconocidos en el occidente como necesarios para dirigir el progreso humano. Algunos grupos de personas, principalmente los que viven en las cercanías de los humedales, son muy dependientes de sus SE, y por lo tanto, también son más susceptibles a la degradación de los mismos.

Históricamente los ecosistemas han brindado beneficios y han sido identificados por los usuarios, sin embargo, en la actualidad son identificados como SE, y han sido categorizados por distintos autores (Mitsch *et al.* 2015). Según la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, los SE que ofrecen los humedales se dividen en cuatro categorías: 1] Aprovechamiento, 2] Regulación, 3] Culturales; y 4] Soporte. Además han sido clasificados por diferentes autores como Costanza *et al.*, (1997), Fisher *et al.*, (2009), y Kumar, (2010), relacionando los beneficios que obtienen los seres humanos de los ecosistemas.

Los SE que proporcionan los humedales se describen a continuación.

1. Servicios de aprovisionamiento

Debido a que dentro de los humedales existe una gran biodiversidad, de ellos se obtienen beneficios mediante la comercialización de productos provenientes de la flora, fauna – principalmente peces – y minerales (Clarkson *et al.* 2013). Pueden brindar comida, agua, madera, fibra o recursos genéticos.

La provisión de alimentos – en su mayor parte arroz – es uno de los servicios que brindan los humedales. Otros productos de autoconsumo son: aceite para cocinar, azúcar, vinagre, alcohol, miel, etc. Los humedales también proveen de forraje para los animales, así como leña, turba hortícola, medicinas tradicionales (plantas), fibras, colorantes y taninos (Clarkson *et al.* 2013). Una diversa variedad de productos pueden ser extraídos de los humedales pero depende del tipo de humedal – continental o costero – del cual se obtenga el servicio de provisión. Por su parte, las pesquerías asociadas a humedales contribuyen en forma importante a las economías nacionales y locales (Assessment. 2005).

La provisión en el abastecimiento de agua dulce para uso humano, es otro de los principales SE, ya que la fuente principal proviene de humedales continentales, tales como lagos, ríos, pantanos y acuíferos poco profundos (Bujnovský. 2015; Liu. 2014; Mueller *et al.* 2016; Zheng *et al.* 2008).

2. Servicios de regulación

Las ciénegas, lagos y pantanos proporcionan una amplia gama de SE de regulación para el mejoramiento de las condiciones hídricas, climáticas y ambientales (Clarkson *et al.* 2013; Greeson *et al.* 1979). Dentro de esta clasificación de SE brindados por los humedales se hace referencia a los relacionados con los procesos ecosistémicos de regulación, como son:

- a) Reguladores climáticos y manejo-retención del carbono. La importancia de los humedales ha sido reconocida debido a la capacidad que tienen para regular el clima y retener grandes cantidades de dióxido de carbono (Frolking & Roulet. 2007). Si los humedales se mantienen, protegen o restauran, podrían funcionar como una red global capaz de mitigar los impactos generados por el cambio climático (Ramsar. 2009h).
- b) Mejoramiento de la calidad del agua. Proceso en el que los nutrientes y otros contaminantes se almacenan en los suelos y vegetación; y los sedimentos quedan atrapados en la marisma (Ramsar. 2009c). En este estudio, se considera a la purificación del agua y detoxificación de desechos como principales SE de regulación. Los humedales son cuerpos de agua que se encargan de eliminar o reducir hasta en un 80% los nitratos y el fosforo que contienen las descargas superficiales y subterráneas de aguas provenientes de la agricultura (Fisher & Acreman. 2004). Sin embargo, depende de la posición en la que se encuentren en la cuenca, es decir, un humedal ubicado en zonas bajas con una gran cantidad de afluentes, tiende ser más eficiente removiendo el nitrógeno, mientras que un humedal localizado en zonas más altas con pequeñas contribuciones de agua, son más eficientes removiendo fosforo (Tanner & Sukias. 2011). Otras funciones que son importantes con respecto al mejoramiento de la calidad del agua, son las de evitar la toxicidad del agua para beber y así como disminuir el riesgo de eutrofización en los ecosistemas aguas abajo (Clarkson *et al.* 2013).
- c) Control contra inundaciones. Los humedales funcionan como barreras naturales de defensa ante eventos climáticos extremos como huracanes. Su función es reducir la velocidad, la altura y la fuerza del agua proveniente de las inundaciones (Ramsar. 2009a; Ramsar. 2009b), así como la magnitud del flujo inundado, actuando como reservorios naturales que pueden captar grandes volúmenes de agua y después liberarlos lentamente (Campbell & Jackson. 2004). Las inundaciones constituyen fenómenos naturales importantes para mantener el funcionamiento ecológico de los humedales y principalmente para mantener en funcionamiento los SE que proporcionan a las personas (Assessment. 2005). Por otro lado, se ha documentado que la vegetación de los humedales tales como los manglares y llanuras de inundación tienen un rol clave como amortiguadores físicos de los impactos del cambio climático (Erwin. 2009), ya que el enlazamiento de sus raíces, puede crear una barrera en la línea costera que impediría la erosión, destrucción de hábitats e incrementos en la salinidad (Assessment. 2005).

3. Servicios Culturales

Los humedales también ofrecen beneficios no materiales, como son los SE: culturales, espirituales, estéticos, valores educativos y de inspiración (Clarkson *et al.* 2013). Así mismo, los humedales resultan atractivos para realizar actividades de recreación y turismo que permiten generar beneficios económicos a las comunidades locales y nacionales (Ramsar. 2009g). Solo en E.U. la pesca deportiva en agua dulce y salada genera de entre 24,000 a 37,000 millones de dólares (Assessment. 2005), y es considerada una importante fuente de ingresos (Kakuru *et al.* 2013).

El valor educativo forma parte de los servicios culturales ya que se da mediante las actividades recreativas que permiten estos entornos, y se ha expandido en todo el mundo mediante una red de centros de educación ambiental (Ramsar. 2009g). Los proyectos de restauración como parte de estas actividades han generado recompensas sociales, educativas y de biodiversidad. En Nueva Zelanda, por ejemplo, existen cuatro centros que forman parte de esta red de educación ambiental y son de gran importancia para los humedales de esa región (Clarkson *et al.* 2013). La educación ambiental permite continuar con el desarrollo de los sistemas de soporte vital del planeta al mismo tiempo que son protegidos y conservados, de esa forma enseña a los habitantes a hacer un aprovechamiento racional del ecosistema (Mazariegos *et al.* 2004).

Algunos humedales han permitido conocer sobre el legado histórico de una región mediante la conservación de restos arqueológicos (Ramsar. 2009f), así como la adaptación de los seres humanos en estos ambientes (Bernick. 2011) . Las condiciones ideales que presentan los humedales como son las bajas temperaturas, encharcamientos en condiciones anóxicas, evitan la descomposición de los materiales orgánicos lo que contribuye a conocer la historia de un sitio (Clarkson *et al.* 2013).

4. Servicios de soporte

Dentro de esta categoría se encuentran los servicios de hábitat que permiten la continuidad de las funciones vitales de los ecosistemas, como son: el mantenimiento del ciclo de vida y la preservación genética de las especies (Clarkson *et al.* 2013). A diferencia de los otros tipos de servicios que tienen impactos directos con la sociedad en cortos periodos de tiempo (1 a 3 años), los impactos que generan los servicios de hábitat sobre las personas y la sociedad son a menudo indirectos y pueden ocurrir a largo plazo (Russi *et al.* 2013). La preservación de la diversidad de vida en los humedales en todo el mundo, es un elemento vital para lograr la prosperidad de la humanidad dentro de un entorno sostenible (Ramsar. 2009d).

La biodiversidad de los humedales de todo el mundo apoya muchas actividades económicas. Los SE de hábitat brindan a su vez servicios de provisión a las personas, ya que pueden ser productos que cosechan y posteriormente comercializan; así como aquellos cuyos medios de subsistencia dependen de las llanuras de inundación utilizadas para el pastoreo y producción pesquera (Assessment. 2005).

En la tabla 2, se muestra la magnitud relativa por unidad de área de los SE de humedales costeros. La escala que maneja es: baja 1, media 2, alta 3 y desconocida = x. Los cuadros en blanco indican que el SE es considerado como no aplicable al tipo de humedal. La información de la tabla representa el trabajo de la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio, que se podría argumentar como el marco científico de mayor éxito en lo que concierne a temas de biodiversidad, funciones de ecosistemas, SE y bienestar humano en sistemas socio-ecológicos (Annan & Unies. 2000). Esta fue fundada por más de 1300 científicos que enfocaron su metodología de tal manera que, vieron a los humedales y otros ecosistemas a través de un marco socio político; los beneficios a la sociedad de los SE generados, y; como las acciones humanas alteran tanto el ecosistema como los servicios (Carpenter *et al.* 2009). Esta referencia ha sido implementada por algunos investigadores como (Aguilera-Taylor *et al.* 2007; Leñero *et al.* 2007), y ha permitido generar estrategias para preservar el bienestar de los ecosistemas y los habitantes. La información de la tabla representa la opinión experta para un patrón global promedio relativo a los humedales, en donde se observaran diferencias locales y regionales en magnitudes relativas.

Tabla 2. Servicios ecosistémicos en humedales costeros. Tabla modificada de Assessment, (2005).

Humedales Costeros									
Servicios Ecosistémicos	Ejemplos	Ríos y arroyos permanentes y temporales	Lagos permanentes y embalses	Lagos Ciénegas y pantanos estacionales, incluyendo llanuras de inundación estacionales.	Humedales, pantanos y Ciénegas forestados, incluyendo llanuras de inundación.	Humedales altiplanos y de tundra	Manantiales y oasis	Humedales Geotérmicos	Humedales subterráneos incluyendo cuevas y sistemas de agua subterráneo.
<u>Aprovisionamiento</u>									
Alimento	Producción de pescado, algas e invertebrados	3	3	1	2	1	2	1	2
Agua dulce	Almacenamiento y retención de agua; provisión de agua para irrigación y uso doméstico	1		1					1
Fibra, madera	Producción de troncos, leña, turba, forraje, combustible aglomerados	3	3	2					

Productos bioquímicos	Extracción de materiales de la biota	1	1			1			1
Materiales genéticos	Medicinas; genes para la resistencia a patógenos de plantas, especies ornamentales.	1	1	1		2			1
Regulación									
Regulación del clima	Regulación de gases de efecto invernadero, temperatura precipitación y otros procesos climáticos; composición química de la atmósfera	2	2	2	1		1	1	2
Regulación biológica	Resistencia a invasiones de especies; regulación de las interacciones entre diferentes niveles tróficos; preservación de la diversidad funcional y las interacciones	2	3	2	1		1		1
Regímenes hidrológicos	Recarga y descarga de agua subterráneas; almacenamiento de agua para agricultura o industria	1		1					
Control de la contaminación y detoxificación	Retención, recuperación y eliminación del exceso de nutrientes y contaminantes	3	3	2		x	1	1	1
Control de la erosión	Retención de suelos	2	3	1				1	1
Desastres naturales	Control de inundaciones, protección contra las tormentas	3	3	1	1	1	2	2	3
Culturales									
Espirituales y de inspiración	Sentimientos y bienestar personal	3	1	2	3	1	1	1	3
Recreativos	Oportunidades para turismo y actividades recreativas	3	1	1	3	1			3
Estéticos	Apreciación de las bellezas naturales	2	1	2	2				3
Educacionales	Oportunidades para la educación formal y no formal y para capacitación	1	1	1	1		1		1
Soporte									
Biodiversidad	Hábitat para especies residentes o transitorias	2	2	1	3	1	3	1	3
Formación de suelos	Retención de sedimentos y acumulación de materia orgánica	2	2	1	1				
Ciclo de los nutrientes	Almacenaje, reciclaje, procesamiento y adquisición de nutrientes	2	2	2	1	1	1		2

La identificación y cuantificación de la extensión y la calidad de los humedales y los servicios que ellos brindan, está siendo ampliamente reconocida como una valiosa herramienta que facilita las decisiones sociales con respecto a la protección de los humedales ante las situaciones de desarrollo (Brander *et al.* 2012; Maes *et al.* 2012). Es por ello que la valoración de los SE ha ido en incremento y distintas técnicas han sido desarrolladas y mejoradas (Brander *et al.* 2006; Camacho-Valdez *et al.* 2013; Daily. 1997; De Groot *et al.* 2002; Georgiou & Turner. 2012).

5.5. HIDROLOGÍA

5.5.1. CANAL HIDRÁULICO

Se definen como canales hidráulicos a aquellas construcciones cuyo objetivo principal es transportar fluidos, pero a diferencia de las tuberías, se encuentran abiertos a la atmósfera. Para efectos de este estudio, la definición de canal hidráulico hace referencia al canal de concreto WM, el cual conduce agua salobre de desecho agrícola y es la principal fuente de abastecimiento de la Ciénega.

5.5.2. DREN AGRÍCOLA

Se conoce como dren agrícola al canal de drenaje agrícola utilizado para recoger, transportar y disponer el agua excedente que se encuentre en superficies saturadas a través de un conducto de salida. Como parte de esta definición, el DR – segundo afluente principal de la Ciénega – capta el agua de los campos agrícolas aledaños regulando la elevación del nivel freático del agua. La elevación topográfica del lecho de estos conductos se encuentra por debajo de la superficie cultivada.

5.5.3. FLUJO EN CANALES ABIERTOS Y CAUDAL

Ambas conducciones de agua WM y DR, son consideradas como de flujo al cielo abierto según la caracterización de Te Chow, (1959). Por lo tanto, para poder determinar su comportamiento, es necesario utilizar metodologías que consideren la variabilidad de la posición de la superficie libre en función al tiempo, al igual que la profundidad del flujo. Durante los monitoreos de este estudio se determinó y relacionó la variabilidad de los componentes hidráulicos en el DR para conocer su comportamiento, ya que en el WM la información fue obtenida por medio de mediciones realizadas y reportadas por los E.U.

Por otro parte, se define como caudal a la cantidad de flujo volumétrico que circula por un área en una unidad de tiempo, y puede ser obtenido mediante la realización de aforos aplicando la siguiente fórmula.

$$Q = A * v \qquad \text{Fórmula 01}$$

Donde

Q Caudal por unidad de tiempo ($m^3 s^{-1}$).

A Área (m^2).

v Velocidad lineal promedio ($m s^{-1}$).

El caudal de entrada es uno de los componentes principales del análisis hidrológico de la Ciénega, por lo tanto, fue indispensable obtenerlo por medio de mediciones in-situ.

5.5.4. BALANCE HÍDRICO

Para la realización de este trabajo se utiliza la ecuación de balance hídrico general, la cual se define como el equilibrio entre los recursos hídricos que ingresan a un sistema, que salen del mismo y los que se almacenan en un tiempo determinado (Fórmula 02). El balance hídrico puede ser obtenido para distintos sistemas: una cuenca hidrográfica, una presa, un lago natural, un país, e incluso un cuerpo humano.

$$Estado_{t+1} = Estado_t + \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^M Salidas_j \quad \text{Fórmula 02}$$

Donde

$Estado_t$	Estado inicial o disponibilidad hídrica de la cuenca. Se refiere a la disponibilidad actual de agua en los distintos estados en los que se pueda encontrar: el volumen de agua circulando en ríos, arroyos, canales; el volumen de agua almacenado en lagos naturales y artificiales (como la Ciénega); la humedad del suelo en los pantanos; el agua almacenada en los seres vivos.
$\sum_{i=1}^N Entradas_i$	Entradas de agua al sistema en un tiempo determinado.
$\sum_{j=1}^M Salidas_j$	Salidas de agua que salen del sistema en un tiempo determinado.

Las variables requeridas en el balance hídrico son numerosas y por lo regular se toman en campo. El análisis de balance hídrico realizado en cualquier sistema es muy complejo de obtener, por lo tanto, es importante identificar cuáles son las variables superficiales y subterráneas de manera independiente.

5.5.5. ENTRADAS DE AGUA

Las entradas de agua en una cuenca hidrográfica pueden presentarse de distintas formas dependiendo del proceso en el cual se encuentren en relación al ciclo hidrológico, o bien, a su ubicación. Algunas entradas se presentan como a continuación se menciona.

- Precipitaciones, ya sean por lluvia (en el caso de la Ciénega), o por nieve, granizo y condensaciones.
- Aguas subterráneas que pueden provenir de cuencas hidrográficas colindantes. En este estudio se hace referencia a los manantiales aledaños al Este de la marisma.
- Traslado de agua desde otras cuencas debido a descargas en centrales hidroeléctricas, en las cuales, es necesario captar el agua en otras cuencas. Así mismo, descarga de agua para uso urbano e industrial, en donde algunas veces no hay agua, o es necesario buscar agua de mejor calidad en lugares más alejados. En el caso de la Ciénega, a diferencia de los otros humedales remanentes del Delta, la construcción del canal WM que descarga el agua de desecho agrícola proveniente de E.U.

5.5.6. SALIDAS DE AGUA

Las salidas de agua de un sistema o cuenca hidrográfica las podemos encontrar en la siguiente manera.

- Evapotranspiración.
- Evaporación en superficies de agua expuestas directamente al sol.
- Infiltraciones profundas que alimentan los acuíferos.
- Derivaciones o trasvases a otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para usos urbanos, agrícolas e industriales.
- En el caso de cuencas exorreicas, salidas de agua hacia el mar.

5.5.7. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La ET es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa en conjunto con las pérdidas de agua debido al proceso de transpiración de la vegetación. Su unidad de medición es en milímetros por unidad de tiempo. En este proceso intervienen diversos factores que varían en tiempo y espacio, y se agrupan en orden climático relativo a la planta, y en factores asociados al suelo (Rojas & Zilay. 1994). La ET puede ser estimada de las siguientes formas.

- ET potencial.
- ET de referencia, dependiendo del cultivo.
- ET real, actual o efectiva.

La ET puede estimarse mediante equipo electrónico automatizado durante periodos de tiempo prolongados, algunos de ellos integrados a estaciones meteorológicas (Davis-Instruments. 2011).

Las metodologías semiempíricas para estimar ET son diversas, sin embargo, una de las más aceptadas por la comunidad científica es la desarrollada por Penman y Monteith, y estandarizada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés). La fórmula estandarizada por la ASCE que se muestra a continuación (Fórmula 03), y las variables requeridas para desarrollarla, son obtenidas mediante la metodología de Allen y colaboradores (2005), y es presentada en el manual del ASCE.

$$ET_{SZ} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad \text{Fórmula 03}$$

Donde

- ET_{SZ} Evapotranspiración estandarizada para un cultivo de referencia (mm h^{-1}).
 - R_n Radiación neta calculada para una superficie de cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$).
 - G Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$).
 - T Temperatura media horaria a una altura de 1.5 a 2.5 m ($^{\circ}\text{C}$).
 - u_2 Velocidad media del aire horaria a una altura de 2 m (m s^{-1}).
 - e_s Presión de vapor saturado a una altura de 1.5 a 2.5 m (kPa).
 - e_a Presión de vapor actual a una altura de 1.5 a 2.5 m (kPa).
 - Δ Pendiente de la curva de presión saturante (presión-temperatura) ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$).
 - γ Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$).
 - C_n Constante numerador dependiente de referencia y tiempo ($\text{K mm s}^3 \text{Mg}^{-1} \text{h}^{-1}$).
 - C_d Constante denominador dependiente de la referencia y tiempo (s m^{-1}).
- Las unidades para el coeficiente 0.408 están en $\text{m}^2 \text{mm MJ}^{-1}$.

5.5.8. FLUJO SUPERFICIAL

El flujo superficial hace referencia al transporte de algún líquido sobre una superficie que cuente con un gradiente hidráulico. Puede entrar o salir de un sistema hídrico en un periodo de tiempo; en este estudio, se hace referencia al flujo superficial de salida. Esta variable puede ser calculada mediante aforos utilizando la fórmula 01, o bien, si se conoce el mayor número de variables hidrológicas del balance hídrico (Fórmula 02), puede ser obtenido por diferencia de volúmenes (m^3) (Fórmula 04).

$$FS_{Salida} = V + (FS_{entrada} + P + GW) - (ET + E) \quad \text{Fórmula 04}$$

Donde

FS_{Salida}	Salidas de agua por flujo superficial.
V	Volumen de agua almacenado en el sistema.
$FS_{entrada}$	Entrada de agua por flujo superficial.
P	Precipitación.
AS	Entradas de agua subterránea.
ET	Evapotranspiración.
E	Evaporación directa.

5.5.9. AGUA SUBTERRÁNEA

En el interior del subsuelo se puede encontrar agua en estado sólido, líquido y gaseoso. Si la presencia del agua es higroscópica o capilar, se encuentra sostenida por fuerzas moleculares en delgadas películas alrededor de las partículas del suelo (UNICEN. 2009). El suelo por su parte, a pesar de también presentarse en diferentes estados, es poco común que la fase sólida se encuentre compactada, por lo que presenta espacios vacíos o poros ocupados por gases y líquidos (UNICEN. 2009), permitiendo la circulación del agua. Una alta permeabilidad así como una resistencia relativamente baja, son necesarias para que el agua se transmita y se almacene en grandes cantidades en un acuífero (Leyva. 2010).

Un acuífero se define como un estrato, formación o unidad geológica porosa y con permeabilidad no nula, capaz de almacenar y transmitir agua por medio de sus poros, grietas o fracturas (Custodio & Llamas. 1976; Freeze & Cherry. 1979). Según las características que presenten los estratos o formaciones geológicas que los conforman, los acuíferos se clasifican de acuerdo a su litología, porosidad y presión hidrostática en la que se encuentre (Leyva. 2010).

5.6. ENSAYOS DE BOMBEO

Un ensayo o prueba de bombeo consiste en analizar la variación de los niveles de aguas subterráneas en los pozos de captación y su relación con el acuífero en el que se encuentran. La información de entrada donde se incluye: la transmisividad, el almacenamiento, grado de comunicación entre la zona acuífera inmediata al pozo y otras más lejanas; son obtenidas directamente del acuífero (Martínez & López. 1984).

Los ensayos de bombeo se pueden realizar de la siguiente manera:

- Ensayo con nivel constante. El procedimiento consiste en introducir dentro de la perforación del pozo un caudal conocido para mantener constantes los niveles subterráneos de agua. Una vez estabilizado el procedimiento en base al caudal utilizado, a una longitud y un diámetro de perforación, se calcula la conductividad hidráulica.
- Ensayo con nivel variable. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario introducir o extraer súbitamente un volumen de agua durante un sondeo. El ensayo se realiza mediante la introducción de un lingote en forma de tubo dentro del pozo, el cual genera un ascenso inmediato del nivel del agua, y un descenso cuando es extraído. Esta metodología también conocida como prueba de barra o lingote (*Slug-Test*), se recomienda utilizarla en pozos de poca profundidad, y es necesario medir el tiempo en el cual asciende y desciende el nivel del agua. La interpretación de los datos obtenidos del tiempo que tardan en abatirse y recuperarse los niveles de agua, puede llevarse a cabo por métodos como el de Hvorslev (Fetter. 2000).

5.6.1. MÉTODO DE HVORSLEV

La metodología consiste en generar un ascenso inicial del agua y se mide la variación de los niveles en función del tiempo (Fetter. 2000). Este método es utilizado en pozos que no atraviesan el acuífero en su totalidad y permite determinar la conductividad hidráulica del terreno.

5.6.2. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Se refiere a la capacidad que tiene un material para permitir que un flujo lo atraviese sin modificar o alterar su composición física. Un material se considera permeable o con alta conductividad hidráulica si a través de él se permite el paso considerable de un fluido en un tiempo dado, por el contrario, si el paso del fluido es escaso, es llamado impermeable.

Los tres factores básicos de los cuales depende la continuidad hidráulica son: la porosidad del material, la presión a la que está sometido el fluido, y la densidad; que a su vez es afectada por su temperatura. No obstante, para ser permeable un material debe ser poroso.

La fórmula para obtener la conductividad hidráulica se describe de la siguiente manera (Fórmula 05).

$$K = \frac{r_{tu}^2 \ln\left(\frac{L}{r_f}\right)}{2 L t_{37}}$$

Fórmula 05

Donde

- K* Conductividad hidráulica.
- r_{tu}* Radio interno del tubo del pozo.
- L* Longitud de la rejilla o parte ranurada de la perforación.
- r_f* Radio de la zona filtrante.
- t₃₇* Tiempo en el que aún perdura el 37% del ascenso instantáneo inicial.

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA

El sistema hidrológico de un humedal se compone de distintas variables que es necesario calcular para conocer detalladamente su comportamiento (Lomeli *et al.* 2015b). La Ciénega en particular es un sistema hídrico compuesto por variables antropogénicas y naturales que no han sido estudiadas en su totalidad (Lomeli *et al.* 2015a). Una de estas variables y de mayor importancia es el canal WM, el cual se ha visto amenazado por la reactivación de la PDY debido a la creciente demanda de agua en la cuenca alta del Río Colorado y al incremento de temperatura. Para determinar los aspectos hidrológicos involucrados en esta investigación se llevó a cabo la metodología descrita en los siguientes epígrafes.

El análisis hidrológico y de masa en la Ciénega se realizó mediante un balance de agua y un balance de salinidad durante un año hidrológico comenzando en noviembre del año 2014. A diferencia de otros estudios en este humedal como el de Glenn *et al.*, (2013), Gómez-Sapiens *et al.*, (2013) y Lomeli *et al.*, (2015b), esta investigación se realizó en condiciones normales, es decir, que el humedal no presentó reducciones en los flujos de entrada por el canal WM – como lo acordado en el Acta 316 (CILA. 2010) – u otros acontecimientos que influyesen en su hidrodinámica.

El balance hidrológico y de masa se realizó mediante la obtención de las siguientes variables durante las campañas de monitoreo.

1. Entradas al sistema lagunar:

- Canal Wellton-Mohawk (agua y salinidad).
- Dren Riíto (agua y salinidad).
- Precipitación.
- Flujo subterráneo (agua).

2. Salidas del sistema lagunar:

- Evapotranspiración.
- Flujo superficial (agua y salinidad).

3. Dimensiones:

- Área de la marisma.
- Volumen de almacenamiento.

4. Niveles de agua y profundidad de cuerpos de agua abiertos.

5. Concentraciones de partículas suspendidas en las lagunas.

6.1. ENTRADAS DE AGUA

6.1.1. CANAL WELLTON-MOHAWK

Para determinar los volúmenes de agua que ingresaron mensualmente de los E.U. hacia la Ciénega por el canal WM se utilizaron los reportes mensuales proporcionados por la CILA de E.U. y el BOR. En ellos se encuentran las mediciones promedio diarias de caudal en pies cúbicos por segundo (CFS, por sus siglas en ingles) y la cantidad de Sólidos Totales Disueltos (STD) que transporta en partes por millón (ppm). Estas mediciones fueron realizadas por la CILA a unos 51 km del punto de descarga de la Ciénega, en un sitio cercano al SIB. Durante este estudio el caudal y las partículas suspendidas del WM no fueron medidas en el lado mexicano, sin embargo, se consideraron que los resultados de las mediciones realizadas por CILA se mantuvieron constantes desde su origen hasta su descarga en el humedal.(Lomeli *et al.* 2015b).

Procedimiento

El volumen mensual de agua que ingresó al humedal por el WM se calculó con las mediciones promedio diarias de caudal realizadas por CILA durante un año hidrológico. Los cálculos se llevaron a cabo utilizando el Sistema Internacional de Unidades, por lo tanto, cada uno de los promedios fue convertido a metros cúbicos por segundo mediante la siguiente relación de conversión.

$$1 \text{ CFS} = 0.028316846592 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Una vez transformadas las unidades en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ se multiplicó por la cantidad de segundos que tiene el día y se obtuvo el volumen diario en metros cúbicos. Los volúmenes de entrada utilizados dentro del balance hidrológico mensual, fue la resultante de la sumatoria de todos los volúmenes diarios en cada mes.

Las partículas suspendidas que ingresaron a través de ese volumen fueron calculadas mediante el siguiente procedimiento.

1. Debido a que 1.0 ppm equivale a 1.0 miligramo sobre litro (mg L^{-1}) los valores se mantuvieron y solamente se modificaron las unidades.
2. Las toneladas (ton) de STD que ingresaron a la Ciénega diariamente se obtuvieron al multiplicar el promedio diario de STD por el volumen diario de agua, y el resultado, fue dividido entre 1,000.

3. Posteriormente, para determinar las toneladas que ingresaron mensualmente al humedal proveniente de los E.U., se sumaron las toneladas diarias de STD en cada uno de los meses.

6.1.2. DREN RIÍTO

A diferencia de los datos de entrada del WM, los volúmenes de agua y salinidad que ingresaron a través del DR se monitorearon manualmente cada mes. Los aforos se llevaron a cabo a 4.3 km del punto de descarga del DR a la Ciénega. El sitio de aforo se encuentra paralelo al canal de concreto WM en las coordenadas WGS 84 / UTM zona 11N: 3551927.05 N y 695077.71 E (Figura 5).

Esta sección del DR cuenta con las condiciones ideales para llevar a cabo las mediciones de flujo superficial, por ejemplo, contar con una longitud transversal al flujo sin curvas que impidan la generación de turbulencias, así como un suelo uniforme con poca vegetación hidrófila.

Las mediciones mensuales resultantes se utilizaron para calcular los volúmenes medios de entrada por el DR. Este proceso se realizó al obtener la media entre una medición mensual y la del mes siguiente. Los valores medios calculados se utilizaron para el periodo al que correspondió cada uno de los aforos.

Las partículas suspendidas o STD que ingresaron a la Ciénega a través del DR se estimaron aplicando la misma metodología que en el canal WM con los datos de la CILA. No obstante, los promedios diarios de STD se obtuvieron con mediciones in-situ utilizando un multiparamétrico de calidad de agua marca HANNA®, Modelo HI991301 (HANNA. 2015) (ver en Anexo 1).

Las mediciones realizadas en el DR son únicas, y de no ser realizadas, no pudiesen haber sido calculadas. Sin embargo, durante este estudio se llevó a cabo únicamente una medición mensual, permitiendo de esa manera conocer su régimen hidrológico estacional.

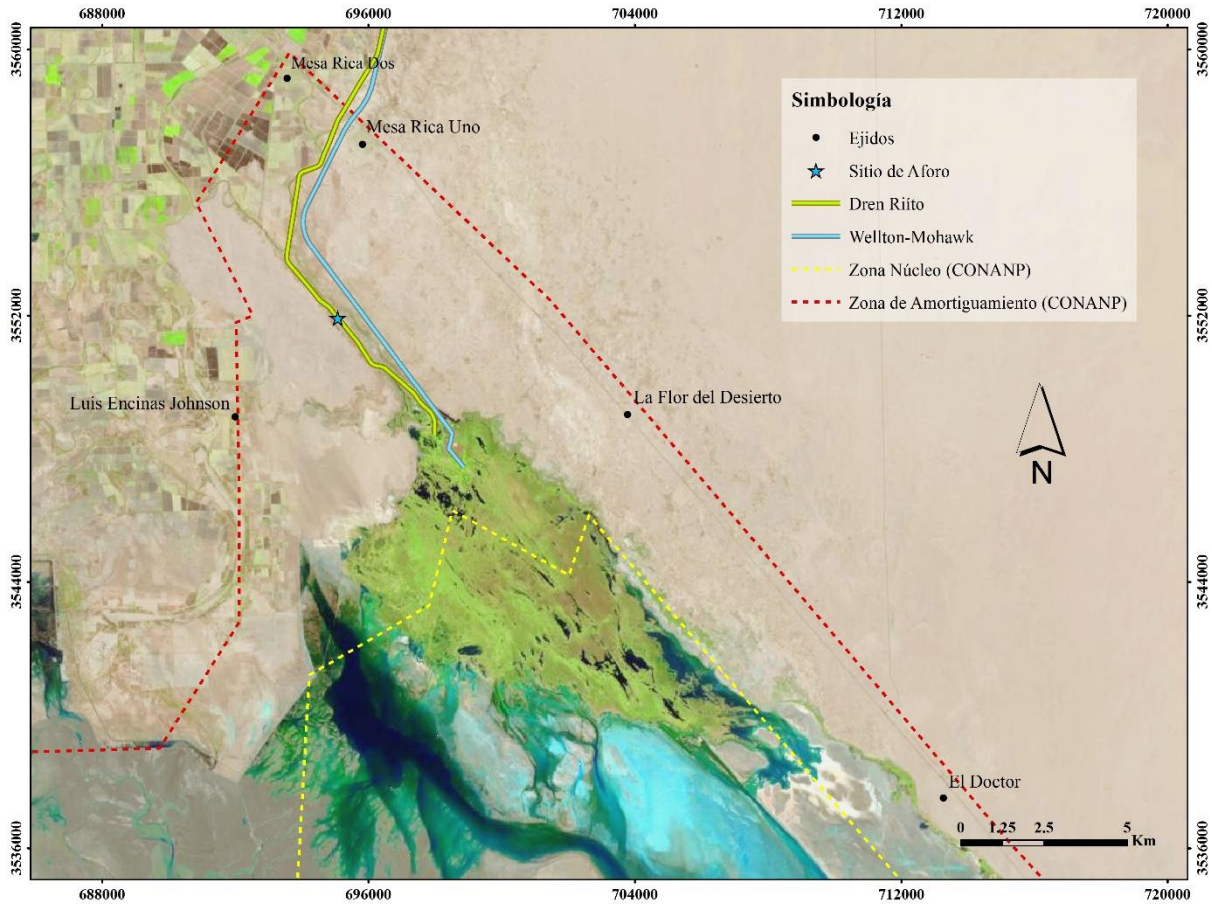


Figura 5. Localización del sitio de aforo en el Dren Riito.

Equipo de Medición

Los flujos superficiales de entrada y salida se midieron manualmente con un Velocímetro Doppler Acústico FlowTracker, desarrollado por la compañía SonTek / YSI (ver en Anexo 2). Este dispositivo maneja un rango de velocidades de $\pm 0.001 \text{ m s}^{-1}$ a 4.0 m s^{-1} y una precisión de velocidad de $\pm 1\%$ de la velocidad medida, convirtiéndolo en uno de los de mayor precisión en el mercado. El FlowTracker es un medidor doppler de un solo punto corriente diseñado para medir velocidades de flujo en campo (SonTek, 2009). Este equipo ha sido probado bajo distintas condiciones por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), y siendo la principal agencia encargada de supervisar la descarga de los ríos en E.U., ha encontrado un buen rendimiento en las mediciones de caudal.

Procedimiento

El sitio de aforo fue dividido en estaciones de manera transversal a la corriente haciendo uso de una cinta graduada. En cada una de las estaciones se registró la ubicación y la profundidad del agua, posteriormente, fueron medidas las velocidades a una o varias profundidades para determinar la velocidad media del flujo. La sonda se mantuvo perpendicular a la sección dividida utilizando solamente uno de sus componentes para el registro de velocidad (SonTek. 2009).

El modo de medición de descarga utilizado en el equipo es el principal fundamento para realizar aforos en ríos o corrientes y depende de las condiciones físicas que presente el flujo, por ejemplo, si cuenta o no con partículas suspendidas, si hay presencia de hielo, entre otros. La metodología con la cual fue configurado el FlowTracker, fue la ecuación de sección media. Los detalles de cómo calcula la descarga en el equipo se muestran en la figura 6 y están descritos en los estándares ISO: 748, (2007) y 9196, (1992).

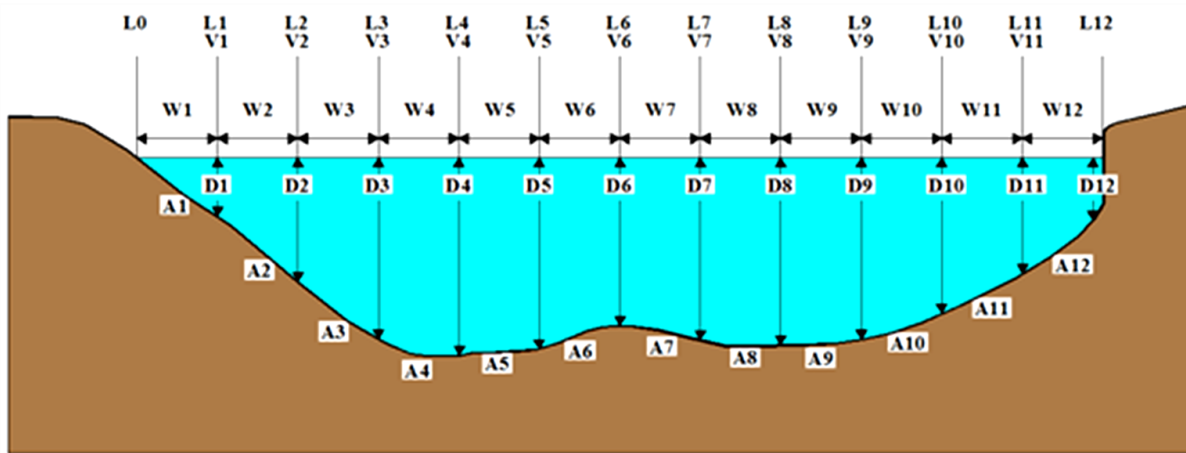


Figura 6. Modelo descriptivo de la ecuación de sección media. Modificado de SonTek, (2009).

Donde

Cálculos de borde

$Q_0 = W_0 = A_0 = 0.0$

$i =$ borde de estación (L_i, D_i)

$W_i = L_i - L_{i-1}$

$A_i = W_i * (D_i + D_{i-1}) / 2$

CF_i

$CF_i * V_{i-1}$

$MV_i = (V_i + V_{i-1}) / 2$

$Q_i = A_i * V_i$

$Q_0 = W_0 = A_0 = 0.0$

Borde final, primer borde de la isla interna.

Ancho de borde.

Área del borde.

Factor de corrección del borde.

Velocidad del borde.

Velocidad media del borde.

Descarga de borde.

Cálculos de agua abierta

$W_i = L_i - L_{i-1}$	Ancho de la estación.
$W_i * (D_i + D_{i-1}) / 2$	Área de la estación.
$MV_i = (V_i + V_{i-1}) / 2$	Velocidad media de la estación.
$Q_i = A_i * MV_i$	Descarga de estación.
Suma (Q_i)	Descarga total.

Una vez finalizadas las mediciones en campo los datos fueron descargados en el software SonTek FlowTracker v2.30 y se generó un reporte detallado del procedimiento realizado en el sitio aforado. Este reporte arroja automáticamente el caudal medido ($m^3 s^{-1}$), la incertidumbre (%) y otros datos del aforo.

6.1.3. PRECIPITACIÓN

Los eventos de lluvia fueron registrados automáticamente en intervalos de 60 minutos con una estación meteorológica modelo Vantage Pro 2 Plus de la compañía Davis Instruments. Los principios de medición de la estación se describen en Davis, (2015). Los datos tomados en tiempo real se obtuvieron dentro del cuerpo lagunar de la Ciénega en una pequeña isla con suelo firme ubicado en las coordenadas WGS 84 / UTM zona 11N: 3543773.02 N y 703469.32 E (Figura 7). La estación se instaló en este sitio con la finalidad de obtener información real de las condiciones climáticas del humedal, así mismo, evitar la afluencia de personas ajenas que pudiesen impedir conservar el equipo durante el periodo de estudio. La información registrada se descargó mensualmente y posteriormente se procesó en una hoja de cálculo.

Los sensores de la estación meteorológica se colocaron a 2.0 m sobre la superficie terrestre y fueron orientados en dirección norte, para cumplir con las especificaciones en la obtención de variables meteorológicas utilizadas en el cálculo de ET de Allen *et al*, (2005); además de manejar los estándares de instalación establecidos en Davis, (2015). La descarga de datos se realizó mensualmente al igual que un servicio de limpieza para remover posibles desperdicios que pudiesen afectar el funcionamiento de la estación meteorológica.

Además de la precipitación, se obtuvieron las siguientes variables atmosféricas: temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento, humedad relativa, presión atmosférica, etc.

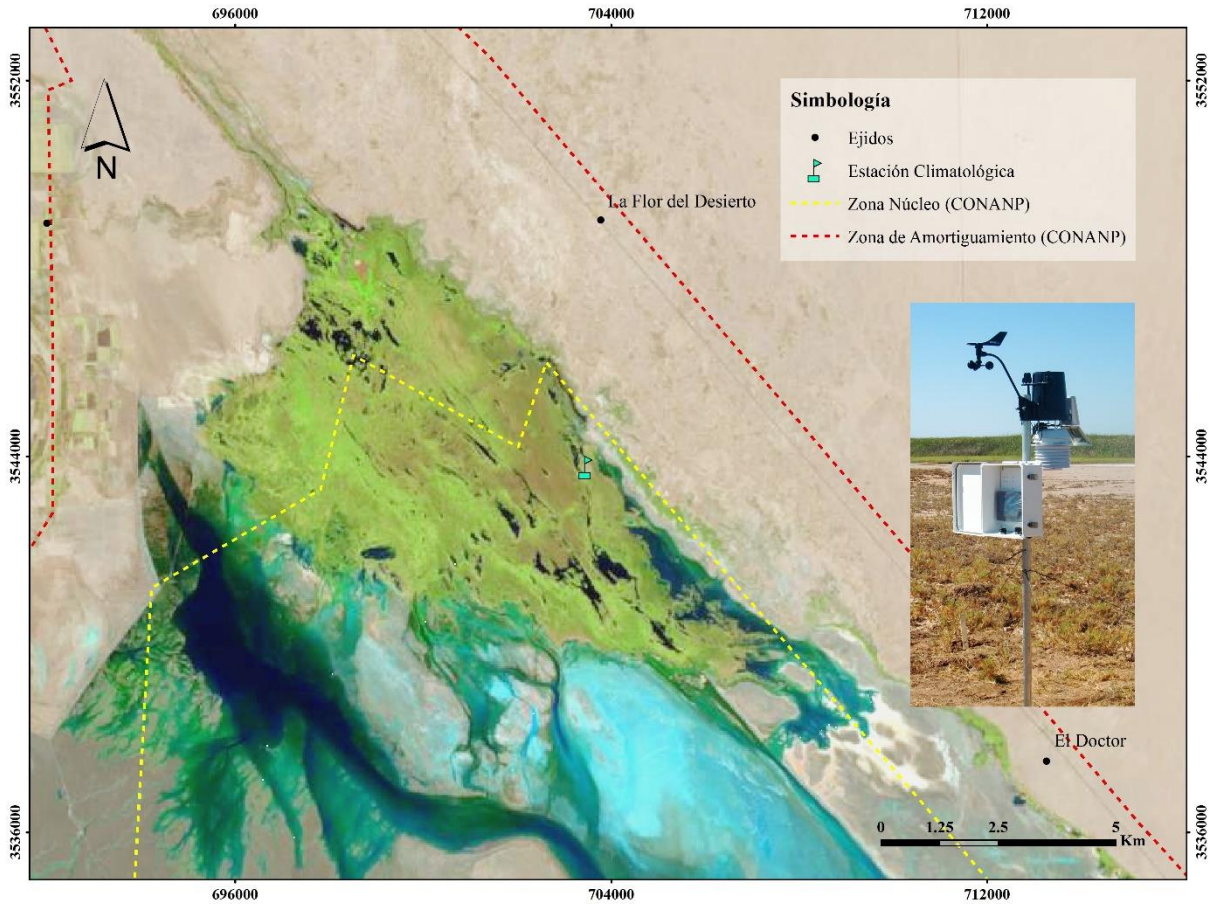


Figura 7. Mapa de localización de la estación meteorológica en la Ciénega. En el recuadro derecho se observa una imagen de la estación instalada en el sitio.

Procedimiento

Las precipitaciones se registraron en milímetros (mm), se sumaron mensualmente y fueron convertidas a metros. Los resultados se multiplicaron por el área total de la Ciénega en cada mes y se estimó el volumen de agua (m³) que ingresó por precipitación pluvial en cada uno de los meses durante el período de estudio.

6.1.4. NIVEL FREÁTICO Y ENTRADAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

Para determinar el nivel freático se construyó una red piezométrica conformada de 6 pozos localizados en 3 secciones; A1-A2, B1-B2 y C1-C2 (Figura 8). Estos fueron construidos fuera de la marisma del humedal y referenciados con GPS al nivel medio del mar con el Datum WGS 84 / UTM zona 11N.

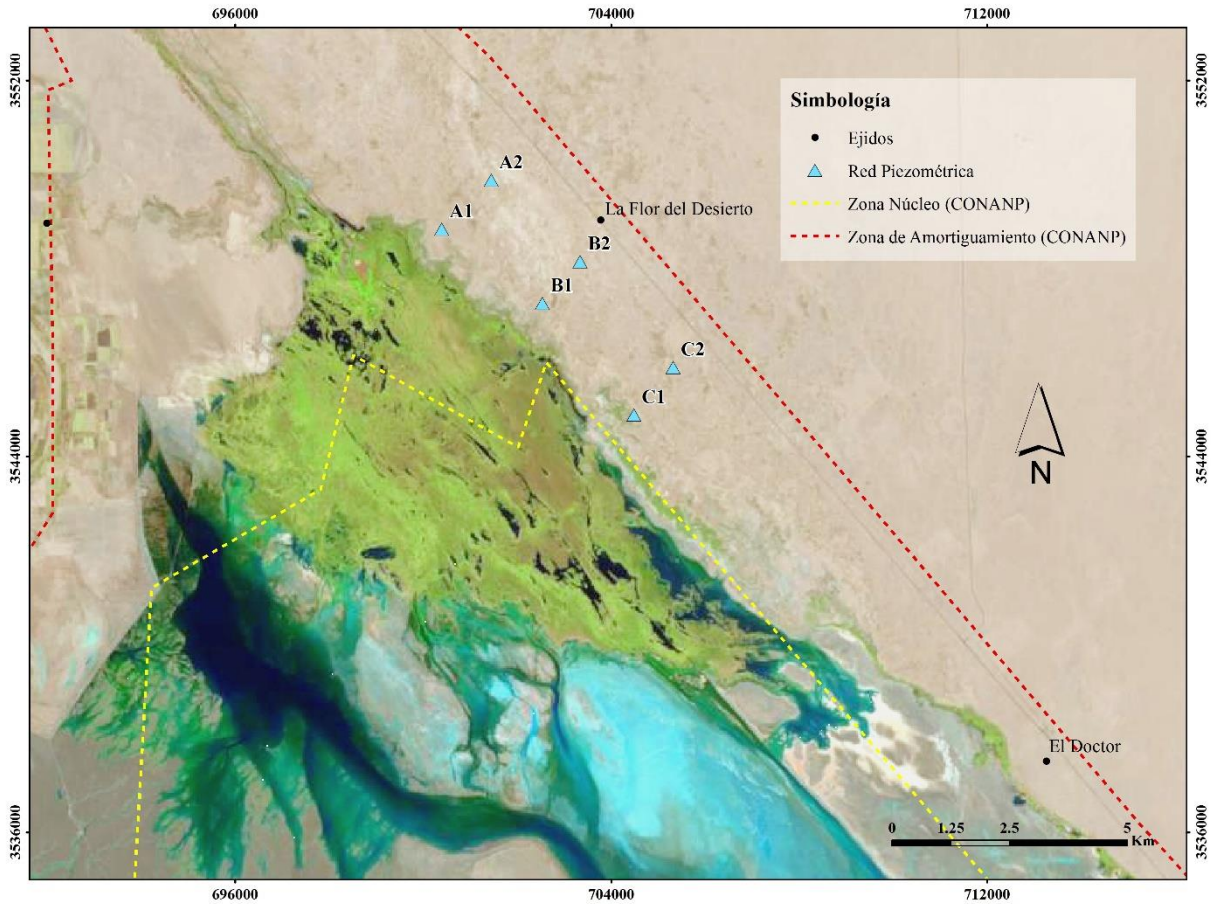


Figura 8. Localización de la red piezométrica.

Procedimiento – Niveles de agua

Los niveles estáticos del acuífero fueron monitoreados con una sonda marca Solinst modelo TLC 107 (Solinst. 2014), y al igual que las otras variables hidrológicas se obtuvieron mensualmente a partir de noviembre del 2014. La elevación del nivel freático de la red de piezómetros fue graficada en una hoja de cálculo y posteriormente representada por medio de isocontornos así como líneas de flujo para determinar la dirección del gradiente hidráulico en el software Surfer® (Golden-Software. 2015).

Procedimiento – Entradas de agua

Para estimar el volumen de agua que ingresó de manera subterránea (Q_{SUB}) fue necesario determinar la conductividad hidráulica en la zona mediante la realización de pruebas de bombeo (*Slug Test*). Estas pruebas fueron realizadas implementando la metodología utilizada por Rodríguez-Burgueño, (2012). Una vez obtenidos los resultados, la conductividad hidráulica se obtuvo con el método de Hvorslev, (1951).

El porcentaje de los volúmenes de agua entrantes calculados, se obtuvo con la siguiente fórmula.

$$\% = \left(\frac{AC}{\Sigma SC} \right) * 100 \quad \text{Fórmula 06}$$

Donde

AC Afluente calculado (m³).

ΣSC Sumatoria de todos los afluentes calculados (m³).

Una vez obtenidos los porcentajes de volúmenes correspondientes para cada una de las entradas: WM, DR, precipitación y Q_{SUB}, fueron representaron gráficamente para identificar de manera más sencilla sus aportaciones al humedal. Además, los volúmenes calculados fueron expresados mediante gráficas para cada una de las entradas y posteriormente utilizados dentro del balance.

6.2. SALIDAS DE AGUA

Según estudios previos existe una relación entre los cambios estacionales de la superficie compuesta por agua-vegetación, y las salidas de agua del sistema por ET y flujo superficial (Q_{SM}) (Lomeli *et al.* 2015b). Es por ello que, para estimar las pérdidas de agua del sistema hidrodinámico del humedal, se utilizaron como base estos componentes, incluyendo las variaciones atmosféricas estacionales y la influencia de las superficies agua-vegetación que conforman la marisma de la Ciénega.

La principal pérdida de agua de la Ciénega es a través del proceso de ET, y es variable en función del tiempo y su relación con la superficie cubierta por agua-vegetación expuesta directamente al Sol (Lomeli. 2013). La variaciones de ambas superficies (agua-vegetación) fueron estimadas mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcMap® Versión 10.1 e imágenes satelitales. Por otro lado, debido a la complejidad del sitio, las salidas superficiales fueron calculadas mediante la ecuación general de balance.

6.2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

La ET se estimó en función del clima local a cada hora con los datos obtenidos de la estación meteorológica en conjunto con la ecuación estandarizada para cultivos altos (> 0.50 m) y ásperos de Penman-Monteith, simplificada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (Fórmula 03) (Allen *et al.* 2005). Una vez calculadas las pérdidas horarias por ET se realizó una sumatoria para obtener las pérdidas diarias y posteriormente las pérdidas de cada mes.

Se eligió la ecuación que el *ASCE* simplifica para estimar ET debido a que utiliza un cultivo de referencia igual o mayor al medio metro de altura, mismo que coincide con la vegetación predominante de la Ciénega (tule). Además, dicha formulación maneja una gran cantidad de variables para calcularla, variables que fueron calculadas haciendo uso de los registros de la estación meteorológica instalada en la marisma.

Procedimiento

La estimación de las salidas de agua por ET se obtuvo mediante el siguiente procedimiento.

1. Se calculó mensualmente el área total de la Ciénega (incluyendo agua y vegetación), utilizando la misma metodología para estimar las dimensiones superficiales de la Ciénega.
2. Posteriormente, el área mensual se multiplicó por la sumatoria de ET calculada en metros durante el mes, y de esa manera se obtuvieron las salidas de agua por este proceso en metros cúbicos.

6.2.2. FLUJO SUPERFICIAL

El volumen de salida de agua del sistema lagunar por Q_{SM} se obtuvo al ser despejado de la fórmula general del balance hídrico. Durante la obtención de las variables de esta fórmula, el Q_{SM} fue la última en ser calculada ya que fue necesario obtener previamente las entradas de agua del WM, DR, precipitación y Q_{SUB} ; así mismo, las salidas por ET y la diferencia de almacenamiento mensual en el humedal (ΔVol).

Al igual que salidas de agua por ET, el Q_{SM} es una de las variables de mayor incertidumbre dentro del balance hidrológico y no ha sido monitoreado directamente en el sitio. Durante este estudio se intentó medir el caudal del Q_{SM} con el FlowTracker, sin embargo, no fue posible debido a la complejidad del sitio.

Procedimiento

Como se mencionó anteriormente, la estimación del Q_{SM} se realizó para cada uno de los meses despejando el flujo superficial de la fórmula de balance hídrico. El resultado obtenido fue considerado como el volumen de agua que sale del humedal de manera superficial. Por otro lado, debido a las dificultades que presentó el área de estudio no fue posible determinar si existen flujos subterráneos de salida, y por lo tanto, se supuso que dentro de las salidas por Q_{SM} serían incluidos los flujos subterráneos de salida.

Una vez obtenidos los volúmenes de agua que salieron del sistema lagunar de la Ciénega, se utilizó la fórmula 06 para convertirlos en porcentajes y de esa manera observar su representatividad con respecto a

las entradas de agua totales. Los volúmenes mensuales del Q_{SM} fueron graficados y posteriormente relacionados con los cambio en las dimensiones – área y volumen – del sistema lagunar del humedal.

6.3. DIMENSIONES

6.3.1. ÁREA

Las áreas mensuales de la Ciénega obtenidas durante el estudio comprenden la marisma del humedal que se encuentra compuesta por lagunas abiertas y vegetación. Esas superficies fueron estimadas con el SIG en conjunto de doce imágenes Landsat-8 Oli (www.earthexplorer.usgs.gov). A diferencia del estudio realizado por Lomeli *et al*, (2015b), se consideró un área compuesta por estas superficies, ya que el 90% de la marisma del humedal está cubierta por vegetación y solo el 10% por cuerpos lagunares abiertos.

Procedimiento

1. Las variaciones temporales de la superficie del humedal fueron delimitadas con polígonos dentro del SIG utilizando como referencia las zonas observadas a través de la composición de colores (*RGB*, por sus siglas en inglés): rojo (banda 7), verde (banda 4) y azul (banda 2) de las imágenes Landsat-8 Oli (Figura 9).
2. Dentro del mismo software se calculó el área total de los polígonos mensualmente obtenidos representando la superficie total de la Ciénega. Este polígono es similar al utilizado por Glenn *et al*, (2010) y Mexicano *et al*, (2013), sin embargo podría variar en función al comportamiento estacional de la vegetación y el volumen de entrada.

Se obtuvo un área por cada imagen satelital y fue utilizada para estimar el volumen de entrada por precipitación, las salidas por ET, y el volumen de almacenamiento así como su ΔVol .

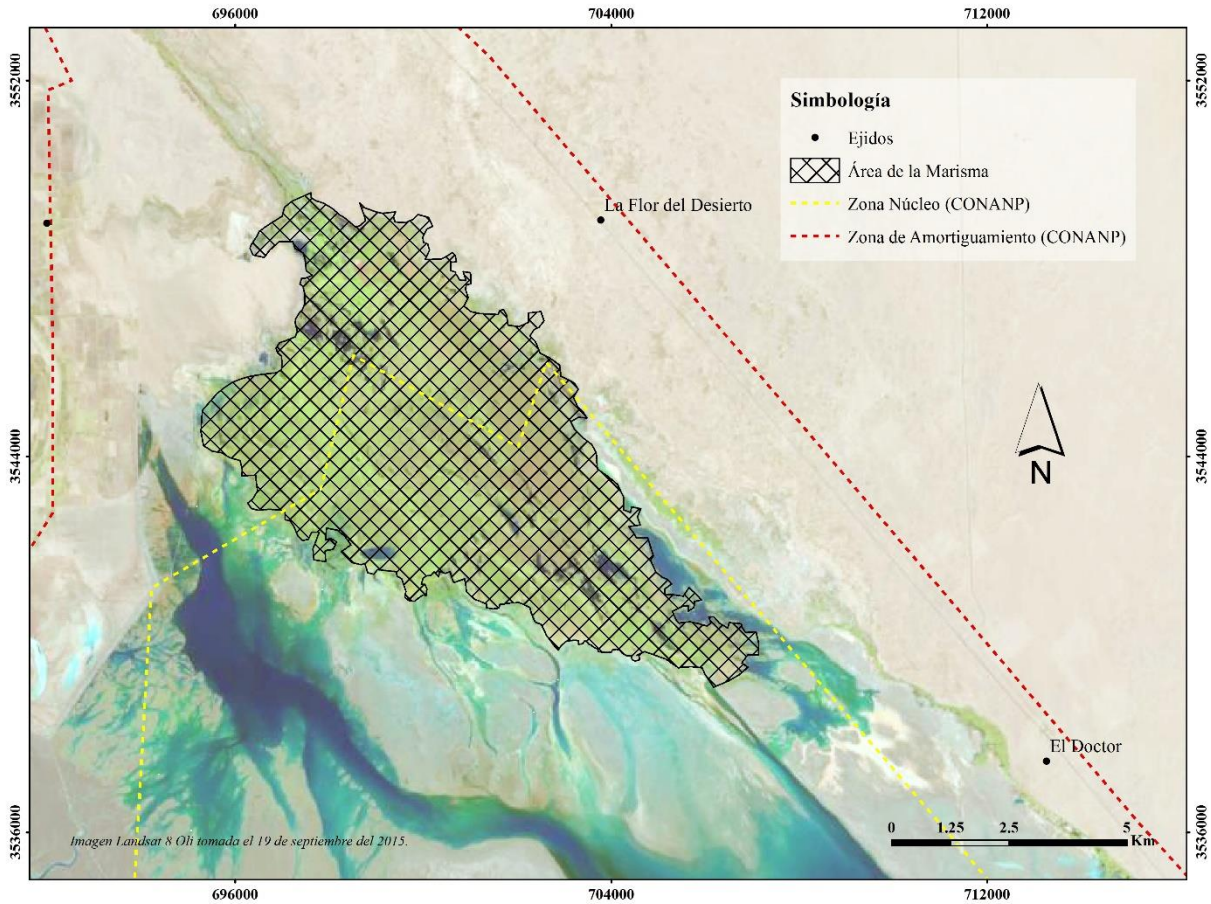


Figura 9. Imagen georeferenciada de la Ciénega de Santa Clara y delimitación del área de la marisma.

6.3.2. VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO

La obtención del volumen de almacenamiento de la Ciénega fue calculado con los datos registrados por los sensores instalados dentro del sistema lagunar del humedal durante el periodo de estudio, los datos topográficos utilizados por Lomeli, (2013), y su respectiva metodología para generar 13 modelos digitales de elevación (MDE); 12 del espejo de agua y 1 del relieve terrestre. Una vez generados los MDE y estimadas las áreas mensuales se utilizó el SIG para calcular el volumen existente entre el área mensual de la marisma – con una elevación de referencia cero – y el MDE. Este procedimiento se realizó mensualmente tanto para el espejo de agua (Vol A) como para el relieve terrestre (Vol T). Posteriormente, el volumen de almacenamiento de la marisma se obtuvo con la diferencia de ambos volúmenes en el SIG. Los resultados se utilizaron para conocer las diferencias mensuales de agua almacenada en el humedal.

La fórmula utilizada para el cálculo de volúmenes se presenta a continuación.

$$\text{Volumen de almacenamiento} = (\text{Vol } A - \text{Vol } T)$$

Fórmula 07

Donde

Vol A Volumen calculado mensualmente a partir del MDE del espejo de agua y su respectiva área de la marisma (m³).

Vol T Volumen calculado mensualmente a partir del MDE del relieve terrestre y su respectiva área de la marisma (m³).

6.4. ELEVACIÓN Y PROFUNDIDAD DEL AGUA

6.4.1. SITIOS DE MONITOREO – COBERTURA ESPACIAL

Para llevar a cabo los cálculos de elevación y profundidad del agua se realizó una previa visita a los sitios donde se instalarían ocho sensores automáticos dentro del sistema lagunar de la Ciénega (Figura 10). La localización de los equipos fueron elegidos tomando en cuenta los siguientes aspectos: 1] Que no fueran vandalizados durante el periodo de estudio por visitantes al sitio; 2] Accesibilidad entre las lagunas y vegetación; y 3] Que estuvieran distribuidos dentro de la marisma con la mayor cobertura espacial posible. Una vez efectuadas estas consideraciones se permitiría mantener una continuidad en la toma de datos de los equipos además de realizar un análisis con un mayor número de registros in-situ.

Mensualmente se realizaron monitoreos con apoyo del equipo de técnicos del Departamento de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, con la finalidad de descargar la información registrada por los sensores. Los monitoreos se efectuaron por etapas ya que no era posible acceder a todos los sitios en un mismo día debido a la lejanía en la que se encontraban unos de otros y a los requerimientos de equipo de traslado para acceder a ellos. No obstante, se obtuvo una continuidad de registros diarios de información en todos los sitios durante el año hidrológico para poder llevar a cabo el presente estudio.

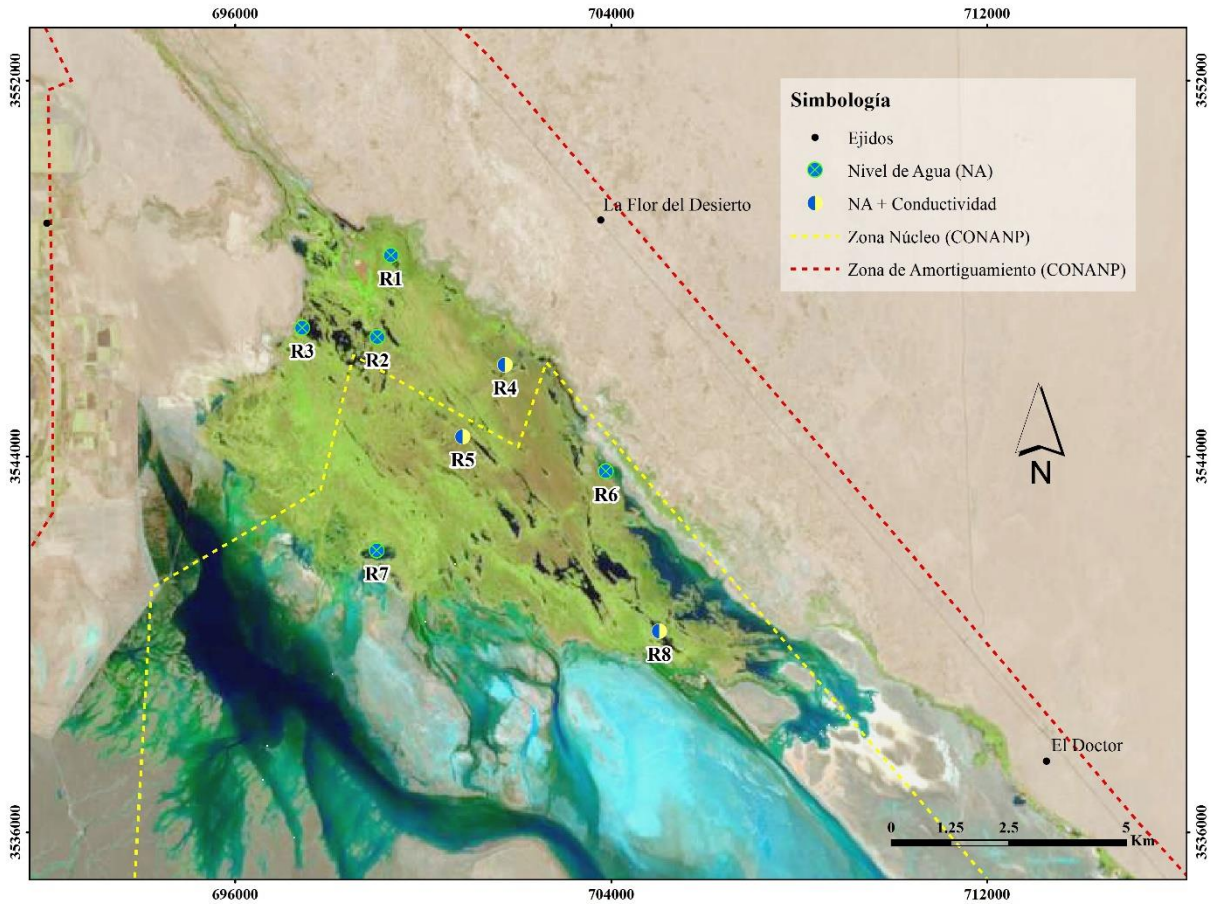


Figura 10. Localización de los sitios de monitoreo donde se instalaron los sensores.

Durante el proceso logístico para la realización del trabajo de campo se consideró instalar un mayor número de sensores dentro del sistema lagunar con el objetivo de obtener una detallada apreciación del comportamiento hidrológico de la Ciénega. No obstante, el difícil acceso y la continua visita de usuarios ajenos al sitio fueron algunas limitantes para hacerlo, ya que implicaría un riesgo para el personal además de un mayor gasto de operación en campo y posibles pérdidas de equipo.

El monitoreo de niveles de agua y profundidad se realizó en un total de 8 sitios dentro de la marisma del humedal y cada uno de los sitios fue numerado para ser identificado (Figura 10).

Procedimiento

La información registrada automáticamente por los sensores a cada hora se utilizó para determinar mensualmente los niveles de agua de las lagunas en metros sobre el nivel del mar (msnm) y la profundidad (m). Los resultados obtenidos fueron graficados para observar su comportamiento durante el estudio.

Instalación de Regletas y Equipos

Las regletas de 1.0 m de longitud instaladas en cada uno de los sitios, fueron colocadas fijamente en suelo firme dentro de las lagunas para evitar su movimiento debido a la presencia de aves y pequeñas embarcaciones. El extremo superior de cada regleta fue referenciado con GPS al nivel medio del mar. Se utilizó como referencia el banco de nivel V262049 perteneciente al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI. 2010), que se ubica en las coordenadas WGS 84 / UTM zona 11N: 3547988.40 N y 704608.77 O; a una altura ortométrica de 16.7452 msnm. La nivelación de las regletas se llevó a cabo con la finalidad de determinar la elevación real (msnm) con la cual se realizarían los cálculos en conjunto con los registros de los sensores.

Los equipos utilizados para calcular los niveles y profundidad del agua fueron los sensores automáticos HOBO modelo U20 (Onset. 2012a). Estos equipos fueron programados para registrar de manera horaria la presión barométrica y la temperatura en el sitio donde se instalaron. Para efectos de llevar a cabo el estudio la presión barométrica se convirtió a hidrostática con los datos de presión atmosférica obtenidos con la estación meteorológica. En cada uno de los sitios de monitoreo de nivel y profundidad de agua previamente definidos, se instaló un HOBO junto a una regleta previamente nivelada. Los datos registrados fueron descargados por medio de una interface hacia una computadora portátil y posteriormente fueron procesados en hojas de cálculo haciendo referencia a la siguiente metodología.

6.4.2. ELEVACIÓN DEL AGUA

El procedimiento consistió en obtener la presión hidrostática mediante la diferencia de presiones obtenidas con los HOBO y la estación meteorológica. El resultado fue multiplicado por el factor de conversión (0.10197) para transformar la presión hidrostática en metros columna de agua (Fórmula 08). Posteriormente el valor obtenido fue corregido con la elevación del tirante de agua que fue calculado con la lectura de agua observada en la regleta y la nivelación de las regletas (Fórmula 09).

$$MCA = (P.BAR - P.ATM) * 0.10197 \quad \text{Fórmula 08}$$

Donde

MCA Metros columna de agua (m).

P.BAR Presión barométrica HOBO (kPa).

P.ATM Presión atmosférica de la estación meteorológica (kPa).

En la tabla 3 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos en campo utilizados para calcular niveles de agua y profundidad. Estos procedimientos se hicieron mensualmente para cada uno de los ocho equipos, permitiendo observar diariamente las variaciones en las lagunas con respecto al tiempo.

Tabla 3. Ejemplo de información obtenida durante el monitoreo en campo.

Datos de elevación, junio 2015 - Sitio R1				
Lectura de agua en regleta (m)	Profundidad del agua con cinta (m)	Elevación de la punta de la regleta con GPS (msnm)	Elevación del agua (msnm)	Sensor + Cuerda (m)
0.54	0.545	5.3	4.84	0.725

$$EA = E.GPS - 1 + LAR$$

Fórmula 09

Donde

- EA* Elevación del agua (msnm).
- E.GPS* Elevación obtenida con GPS de la punta superior de la regleta (msnm).
- LAR* Lectura del agua que se observó en la regleta (m).
- El valor 1 equivale a la longitud de la regleta (m).

6.4.3. PROFUNDIDAD DEL AGUA

Antes de ser determinada la profundidad del agua se calculó la elevación del relieve terrestre mediante los datos del espejo de agua obtenidos previamente. Este procedimiento se realizó en cada sitio donde fue colocado un sensor y una regleta. Una vez concluidas todas las mediciones del espejo de agua observadas en la regleta, así como las profundidades obtenidas con la cinta graduada, se procedió a realizar lo siguiente: 1] Los datos obtenidos de estas mediciones se utilizaron para conocer la diferencia entre los resultados calculados con los sensores y los datos manuales medidos puntualmente en cada sitio; 2] Posteriormente, estas diferencias mensuales fueron promediadas en cada sitio obteniendo la profundidad del agua con respecto a la lectura de la regleta; y finalmente, 3] La elevación del relieve terrestre (msnm) donde se colocó la regleta se obtuvo al corregir la profundidad del agua con el valor obtenido en las nivelaciones de cada regleta (Fórmula 10). De esa forma, la profundidad del agua (m) se calculó con la diferencia de estas dos elevaciones.

$$\text{Elevación del relieve terrestre} = (E.GPS - 1) + (-P.Prof/100) \quad \text{Fórmula 10}$$

Donde

- E.GPS* Elevación obtenida con GPS de la punta superior de la regleta (msnm)
- P. Prof* Promedio de las profundidades monitoreadas del agua obtenidas con una cinta y la lectura de agua en las regletas (cm)
El valor 1 equivale a la longitud de la regleta (m)
La profundidad del agua se refiere a la distancia entre el relieve terrestre con respecto al espejo de agua

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo del procesamiento de datos obtenidos en el sitio R1.

Tabla 4. Procesamiento de datos obtenidos en el monitoreo en campo.

Datos de elevación, junio 2015 - Sitio R1						
Fecha	Hora	Lectura de agua en regleta (m)	Profundidad del agua con cinta (m)	Elevación de la punta de la regleta con GPS (msnm)	Elevación del agua (msnm)	Elevación del relieve terrestre (msnm)
17-jun.-15	08:00	0.54	0.545	5.3	4.84	4.295

Equipo

Las regletas de 1 metro de longitud se aseguraron a bastidores que fueron insertados en el terreno natural a una profundidad aproximada de entre 1.5 y 2.0 metros. Las regletas y su simbología presentada en unidades métricas internacionales fueron fácilmente perceptibles, ya que cuenta con un barniz que las protege de la corrosión y decoloración. (Figura 11).



Figura 11. Regleta instalada y sujeta a una solera que es enterrada en el suelo firme; a un costado se observa el tubo donde se introduce el sensor HOBOT.

Sensores

Los HOBOT modelo U20-001-01 permiten medir la presión barométrica y la temperatura del agua (ver en Anexo 3). Estos equipos fueron seleccionados por la facilidad del manejo que presentan, los parámetros que registra, el rango de profundidades en las que toma los datos – de 0 a 9 m – con respecto a la profundidad en las lagunas, y su tolerancia a los niveles de salinidad en la marisma del humedal. Cuentan con un rango de precisión de $\pm .005$ m y una resolución de $\pm .0021$ m. Los datos de presión que registra son utilizados en conjunto con la presión atmosférica para poder analizar la elevación del agua y/o profundidad como se comentó anteriormente. Además, otro de los aspectos que determinó la elección de estos equipos fue su fácil manejo e instalación en campo, así como su postprocesamiento.

Los sensores HOBOT fueron colocados dentro de tubos PVC de 4” y ABS de 6” de diámetro con una cuerda de nylon. Los tubos se sujetaron a un bastidor junto con una regleta de 1 metro de longitud, y en la parte superior del tubo se colocó un tapón del mismo material para evitar posibles daños debido a las aves, cambios climatológicos e incluso vandalismo.

6.5. BALANCE HÍDRICO

El comportamiento hidrodinámico del sistema lagunar de la Ciénega se calculó mensualmente mediante la ecuación general de balance (Fórmula 11). Esta formulación considera todas las entradas de agua,

salidas y el agua retenida en el sistema lagunar. Sin embargo, durante este estudio los efluentes superficial y subterráneo (Q_{SM}), no fueron monitoreados debido a la dificultad que presenta el área de estudio; resultado de influencia de mareas y vientos provenientes del Golfo de California.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{WM} + Q_{DR} + Q_{sub} + (P * A_{TM}) - Q_{SM} - (ET * A_{VM}) \quad \text{Fórmula 11}$$

Donde

V	Volumen de almacenamiento de agua en el humedal (m^3).
t	Tiempo (meses).
Q_{WM}	Entrada de agua por el canal Wellton-Mohawk (m^3/mes).
Q_{DR}	Entrada de agua por el Dren Riíto (m^3/mes).
Q_{SUB}	Entrada de agua subterránea (m^3/mes).
P	Entrada de agua por precipitación (m/mes).
A_{TM}	Área total de la Ciénega (m^2/mes).
Q_{SM}	Pérdidas de agua por flujo superficial (m^3/mes).
ET	Pérdidas de agua por evapotranspiración (m/mes).

El Q_{SM} fue considerado como un solo elemento dentro del balance y fue calculado mediante el despeje de la formula general de balance. La fórmula obtenida (Formula 12) considera la variación en el volumen de almacenamiento (ΔVol) calculado con la diferencia de volumen de agua calculado de un mes a otro.

$$Q_{SM} = Q_{WM} + Q_{DR} + Q_{SUB} + (P * A_{TM}) - \Delta Vol - (ET * A_{TM}) \quad \text{Fórmula 12}$$

6.6. BALANCE DE MASA

El balance de masa consideró las concentraciones de solidos totales disueltos (STD) que ingresaron, salieron y se encontraron dentro del sistema lagunar. No obstante, los STD que salieron a través del Q_{SM} se estimaron con la diferencia de entradas y concentraciones medidas de STD dentro del humedal una vez concluido el cálculo de balance hídrico. El procedimiento consistió en lo siguiente:

1. Se obtuvieron y sumaron las toneladas diarias de STD que ingresaron a través del canal WM y el DR. Este procedimiento consistió en multiplicar el volumen de agua que ingreso cada día por la

concentración media registrada. El resultado fue dividido entre mil y sumado durante todo el mes para de esa manera obtener las toneladas de STD que ingresaron por esos conductos.

2. Posteriormente, los STD dentro del cuerpo lagunar de la Ciénega se obtuvieron a cada hora y fueron promediados mensualmente para obtener las concentraciones medias de STD del mes (g L^{-1}). Los promedios obtenidos fueron multiplicados por el ΔVol y dividido entre mil, para de esa manera obtener las toneladas (ton) de STD del dentro del humedal.
3. Finalmente, las toneladas de STD que salieron del humedal se obtuvieron multiplicando el Q_{SM} por mil, y posteriormente multiplicados por la diferencia de las entradas de STD y las toneladas que son almacenadas dentro del cuerpo lagunar de la Ciénega.

Equipo

Dentro del sistema lagunar se instaló un sensor marca HOBO modelo U24-001 (ver en Anexo 4), el cual fue utilizado para calcular la salinidad mediante un software que permite convertir y ajustar los datos de conductividad y temperatura que registra (Onset. 2012b). Este equipo de fácil manejo fue colocado en el sitio R5 junto al medidor de nivel.

6.7. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

Además del análisis hidrodinámico del humedal en condiciones normales, en este trabajo de investigación se han propuesto dos posibles escenarios causados por el cambio climático en la cuenca del Río Colorado: 1] Reducción en el caudal del afluente principal; y 2] Incremento de temperatura en la región. A partir de estos escenarios se revisaran los impactos ecohidrológicos generados sobre los SE identificados. Los análisis realizados se llevaron a cabo considerando los siguientes aspectos.

6.7.1. ESCENARIO #1. REDUCCIÓN EN EL CAUDAL DE ENTRADA

Este escenario fue considerado debido a la amenaza que representa la PDY para el humedal, y es que, según lo pactado entre los Estados que conforman la cuenca del Río Colorado, si los niveles de agua almacenados en las presas estadounidenses Glenn y Hoover disminuyen, el volumen de agua otorgado a cada uno de ellos también se vería reducido. En consecuencia, una posible solución a la creciente demanda de agua sería la reactivación de la PDY. Cabe mencionar que dentro de los cálculos realizados en este escenario no consideran las tendencias positivas de temperatura para el Noroeste de México y Suroeste de E.U. (Karoly & Wu. 2005), sin embargo, ésta se relaciona a una mayor evaporación en las presas.

Procedimiento

El análisis hidrológico de la Ciénega considerando el primer escenario, fue llevado a cabo utilizando como base la información recabada en el 2010-2011 por Lomeli *et al.*, (2011). Durante esos años se realizó una prueba piloto de la PDY que consistía en reactivarla a 1/3 de su capacidad y monitorear por parte de ambos países, los efectos que tendría en el ecosistema de humedal de la Ciénega. Este ejercicio permitió observar modificaciones en la hidrodinámica de la Ciénega, ya que se presentaron variaciones en el caudal y en el volumen de agua que ingresó por el WM (Lomeli *et al.* 2015b).

Para llevar a cabo el análisis del primer escenario en el presente estudio, se consideró la disminución del volumen de entrada del durante los meses de abril-agosto, 2010, el cual, fue de 15.04 hm³ a 5.08 hm³ (44%). Además, se realizó un análisis mensual del caudal de entrada del WM con el que se propone un caudal que permita durante los meses de verano mantener la funcionalidad ecohidrológica del humedal.

6.7.2. ESCENARIO #2. INCREMENTO DE TEMPERATURA.

Debido al incremento de temperaturas que se han presentado en los últimos años en la cuenca del Río Colorado y el Mundo, el segundo escenario propuesto en este estudio considera que la temperatura seguirá en aumento. Según mencionan Cavazos & Arriaga-Ramírez, (2012), en el norte de México y el Suroeste de los E.U. la temperatura media anual podría incrementar 1.5°C para los próximos 30 años, y 5°C a finales del siglo XXI. Esta tendencia en la región ha sido identificado también por otros autores como Englehart & Douglas, (2003), Karoly & Wu, (2005) y Magana *et al.*, (2012).

Por otro lado, la ET es uno de los principales procesos de extracción de agua de la Ciénega ya que se lleva a cabo en aproximadamente el 90% de la superficie de la marisma. Durante el verano, más del 100% del agua que ingresa por el WM se extrae de las lagunas por medio de este proceso, y depende del estado de crecimiento del tule y de variables climáticas como es la temperatura (Lomeli *et al.* 2015b). Por lo tanto, el segundo escenario planteado en este estudio, consiste en determinar la ecohidrología del sistema lagunar considerando el incremento de temperatura en la región debido al cambio climático.

Procedimiento

La metodología consistió estimar las salidas de agua por ET del sistema lagunar aumentando la temperatura local considerando los incrementos de temperatura obtenidos de los modelos de cambio climático propuestos por Cavazos & Arriaga-Ramírez, (2012). Se realizó una estimación de ET con el

primer modelo climático donde se calcula un aumento de la temperatura de 1.5°C para los próximos 30 años, además, se realizó una segunda estimación utilizando el modelo donde se proyecta un aumento de temperatura de 5°C para finales del siglo XXI. De manera individual en cada una de las estimaciones de ET fue sumada la de temperatura de cada modelo a los registros de temperatura obtenidos durante el presente estudio (2014-2015), y se analizó el comportamiento hidrodinámico del humedal, así como las implicaciones ecohidrológicas.

6.8. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

6.8.1. IDENTIFICACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Para el cumplimiento del tercer objetivo específico de esta investigación donde se persigue la identificación de los servicios ecosistémicos (SE) que brinda la Ciénega a los usuarios y/o beneficiarios, se recurre a la metodología cualitativa. Se considera que esta metodología es la más adecuada para comprender la dinámica de usos y usuarios desde una perspectiva sociocultural (de Gialdino. 2006).

El contacto con la dinámica sociocultural de la Ciénega se inicia a través de contactos sucesivos y exploratorios, lo que permite la familiarización con el objeto de estudio desde esta perspectiva; de igual forma, se aplican técnicas documentales a 25 artículos en revistas indexadas y reportes de campo, entre los años 1980 a 2015 (ver en Anexo 5). A partir de dicha revisión se identifican los SE establecidos por la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005) pero ya identificados en lo particular para el caso de la Ciénega, y se construye el instrumento de muestreo.

La entrevista en profundidad de tipo semi-estructurada se utiliza como principal herramienta de investigación (Ayres. 2008), también se hace uso de la observación no participante como estrategia de triangulación en la Ciénega (McKechnie. 2008). Para este instrumento también se hace uso de los SE del Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (2005) identificados para la Ciénega.

La población de estudio son los usuarios y/o beneficiarios de los SE de la Ciénega; la muestra de estudio se estratifica para obtener la saturación estructural de las categorías de informantes clave (Valles. 2014). A partir de una revisión de la literatura publicada se identifican las siguientes categorías: 1] Presidente de UMA – Ejidatario; 2] Agente Gubernamental; 3] Miembro de ONG; 4] Investigador; y 5] Usuario turístico. La muestra de investigación se selecciona utilizando un muestreo no probabilístico de tipo bola de nieve (Sampieri *et al.* 2010).

Se realiza un total de 22 entrevistas a profundidad cuyo contenido es posteriormente analizado a través del enfoque narrativo (Ruíz. 2012), teniendo en cuenta las clasificaciones base de los SE brindados por los humedales costeros como principales categorías de estudio. Previa a la aplicación de la entrevista, el instrumento se somete a una prueba de expertos para su validación (Adams & Cox. 2008).

El instrumento de la entrevista constituye un elemento esencial en la vida contemporánea, según lo refiere Cáceres, (1998); es la comunicación primaria que contribuye a la construcción de la realidad, instrumento eficaz de gran precisión en la medida que se fundamenta en la interrelación humana que proporciona un excelente instrumento heurístico para combinar los enfoques prácticos, analíticos e interpretativos implícitos en todo proceso de comunicar (Ruíz Medina. 2011). En este sentido la entrevista a profundidad fue elegida para este estudio por la posibilidad que da para profundizar en temas que posiblemente no hayan sido tomados en cuenta en un diseño rígido de encuesta, así como la de obtener información que no podría conseguirse de otra fuente (Armstrong. 1997; Perks & Thomson. 2015; Reed *et al.* 2009).

Una vez identificados los SE de la Ciénega para cada una de las zonas del área de estudio: núcleo, amortiguamiento e internacional, se llevó a cabo una relación de los efectos del cambio climático, con la permanencia de los SE.

6.9. LIMITACIONES DE MONITOREOS

Es importante destacar la complejidad del acceso a la Ciénega. Esto es, en consecuencia a su ubicación geográfica, al perímetro pantanoso que la rodea compuesto por zonas lodosas (Nelson *et al.* 2013), y a una densa vegetación combinada con lagunas dentro de la marisma (Zengel *et al.* 1995). Por lo tanto, la logística para llevar a cabo este estudio fue indispensable para obtener el mayor número de datos in-situ y en tiempo real; variables hidrológicas dentro y fuera de la marisma.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la investigación, así como su respectivo análisis y discusión.

7.1. ENTRADAS DE AGUA

7.1.1. WELLTON-MOHAWK

Según las mediciones de la CILA, el volumen total de agua que ingresó al humedal durante noviembre 2014 a octubre 2015 fue de 137.81 hm³. En diciembre se registró el volumen de mayor aportación al sistema (12.43 hm³), mientras que en abril se registró el menor con un total de 10.41 hm³ (Figura 12).

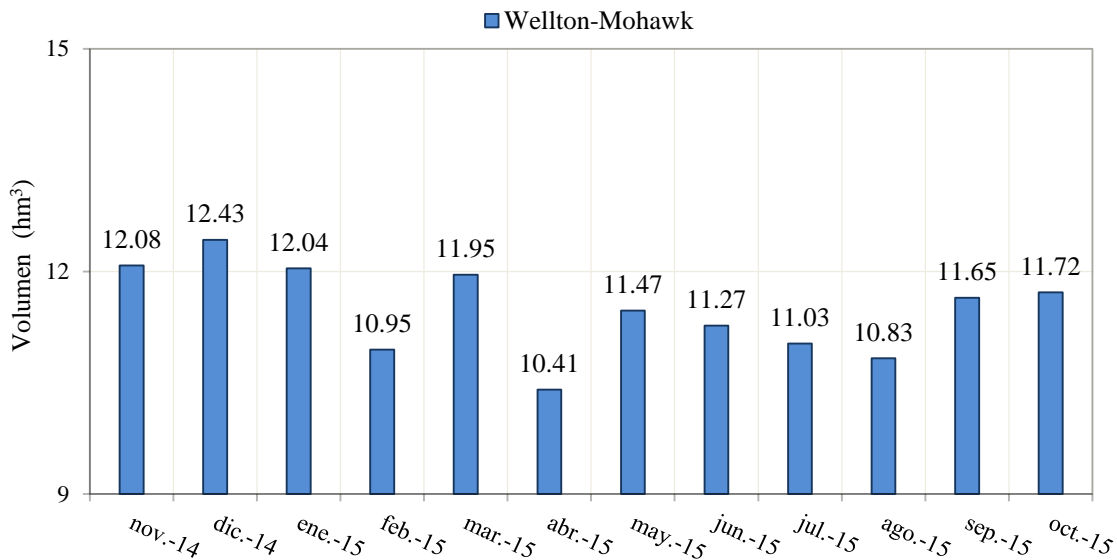


Figura 12. Volúmenes de agua mensual registrados por la CILA.

Como se mencionó anteriormente, el volumen de agua que ingresaría al humedal durante el estudio, no se vería afectado por alguna resolución binacional como lo sucedido en el 2010 por la prueba piloto. Por lo tanto y a diferencia del resto del año, el comportamiento del afluente del WM presentó una notable reducción en el caudal a partir del 5 hasta el 16 de abril del 2015, con un leve incremento durante el mismo periodo. Otras reducciones menores se presentaron en enero, agosto y octubre del 2015. El resto del año el gasto de entrada presentó variaciones pero sin disminuciones significativas (Figura 13).

Se estimó con los registros de CILA que el caudal promedio durante el año de estudio fue de 4.37 m³ s⁻¹, y a diferencia del estudio realizado por Lomeli y colaboradores en el 2010, fue mayor. Presentó una

desviación estándar del 3% con un caudal máximo de $5.24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en diciembre y un caudal mínimo de $3.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en abril, 2015 (Figura 13). Para el cálculo de los volúmenes mensuales de entrada se utilizaron los caudales medidos por la CILA debido a su periodicidad, ya que realizar mediciones en campo mensuales con el FlowTracker, generarían una falta de información de un periodo de monitoreo al otro.

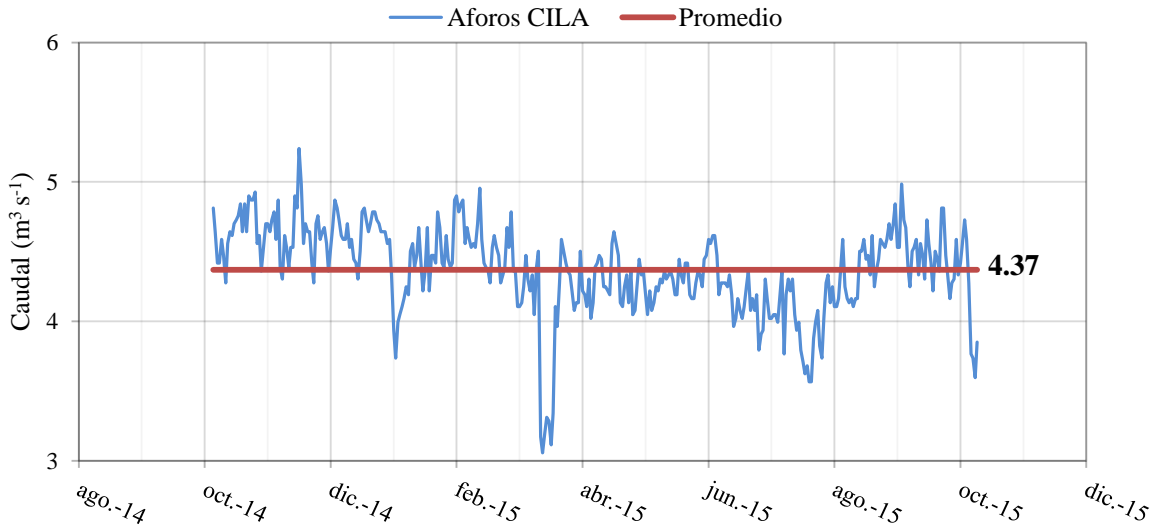


Figura 13. Flujos de entrada por el canal Wellton-Mohawk hacia la Ciénega de Santa Clara durante un ciclo hidrológico comenzando a partir del 1 de octubre del 2014 (CILA. 2014-2015).

Durante los años 2000 al 2010 el caudal promedio registrado por la CILA fue de $4.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el cual se asemeja a los $4.37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ obtenidos durante el año de estudio 2014-2015. Cohen, (2006), mencionó que el promedio anual de agua de entrada a la Ciénega era de 134 hm^3 con un caudal medio de $4.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ambos valores también similares a los obtenidos durante este trabajo (137.81 hm^3 y $4.37 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La reducción del caudal de entrada por el WM debido a envíos anómalos de los E.U., se manifestó en las variaciones de caudal y volumen obtenidos en este trabajo con respecto a los reportados en la literatura. Sin embargo, los valores promedios obtenidos coinciden con los registros históricos de entrada de agua por este afluente.

Dren Riíto

Debido a las condiciones del sitio, el DR fue monitoreado solamente 10 veces durante el periodo de estudio (Tabla 5), sin embargo, una vez calculada la media mensual para los meses no aforados se estimó que el caudal medio anual fue de $0.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Tabla 5. Datos in-situ tomados en el Dren Riíto.

Fecha	Caudal $m^3 s^{-1}$	Incertidumbre	ppt	pH	mS	Temp (°C)
26-nov.-14	0.086	3.80%	2.65	8.4	5.33	16.8
-	-	-	-	-	-	-
12-ene.-15	0.179	2.20%	2.69	8.13	5.36	18.9
20-feb.-15	0.287	2.10%	2.55	8.48	5.12	20.1
-	-	-	-	-	-	-
21-abr.-15	0.312	2.10%	2.65	7.83	5.42	24.9
30-may.-15	0.217	2.00%	2.8	7.84	5.67	26.3
18-jun.-15	0.211	2.20%	2.9	8.28	5.79	28.5
31-jul.-15	0.113	2.50%	2.95	8.1	5.69	27.9
26-ago.-15	0.098	4.80%	2.87	7.81	5.72	27.6
24-sep.-15	0.097	2.40%	3.01	7.96	6.08	27
27-oct.-15	0.083	2.20%	2.96	6.49	5.92	26.22

Los caudales obtenidos durante los monitoreos concuerdan con el régimen e intensidad de riego en el Valle de Mexicali (Carrillo-Guerrero. 2009; Ramírez-Hernández *et al.* 2015). Las mediciones variaron entre 0.083 hasta 0.312 $m^3 s^{-1}$, la primera registrada en el mes de octubre, y la segunda en abril del 2015.

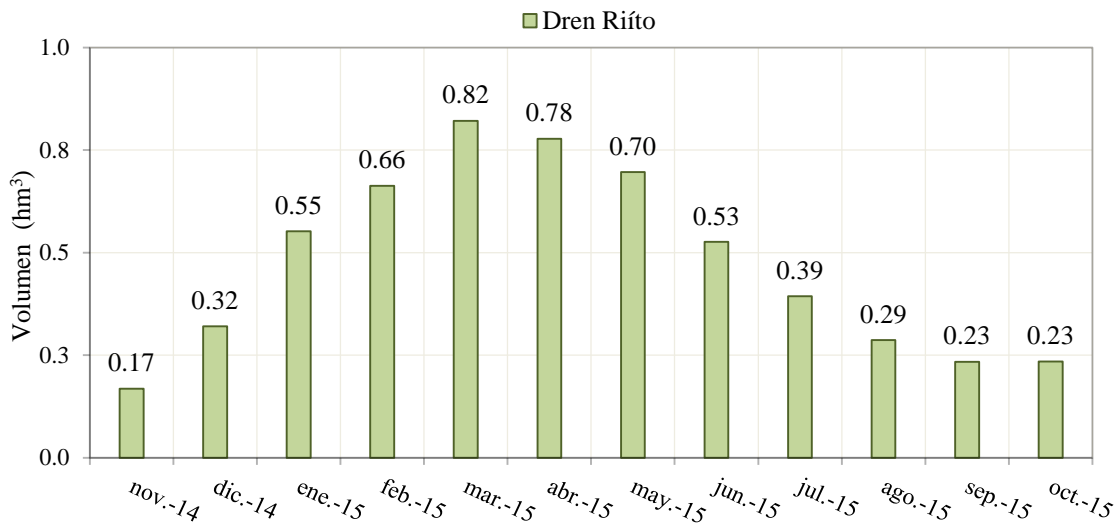


Figura 14. Volúmenes de agua mensual del Dren Riíto.

En total, el volumen de agua que ingresó por el DR fue de 5.67 hm^3 . Siendo el mes de marzo del 2015 el que presentó el mayor aporte (0.82 hm^3), mientras que el mes que registró el menor volumen de agua fue el de noviembre del 2014 con 0.17 hm^3 (Figura 14).

7.1.2. PRECIPITACIÓN

La precipitación total registrada durante la operación de la estación meteorológica fue de 17 mm, y a diferencia de lo registrado en el 2010-2011 (19.45 mm), fue menor (Lomeli *et al.* 2011).

Las precipitaciones registradas durante los meses correspondientes al periodo de estudio se observan en la figura 15. A diferencia del resto del año, durante los meses de noviembre del 2014, así como abril y octubre del 2015, no se registró precipitación alguna.

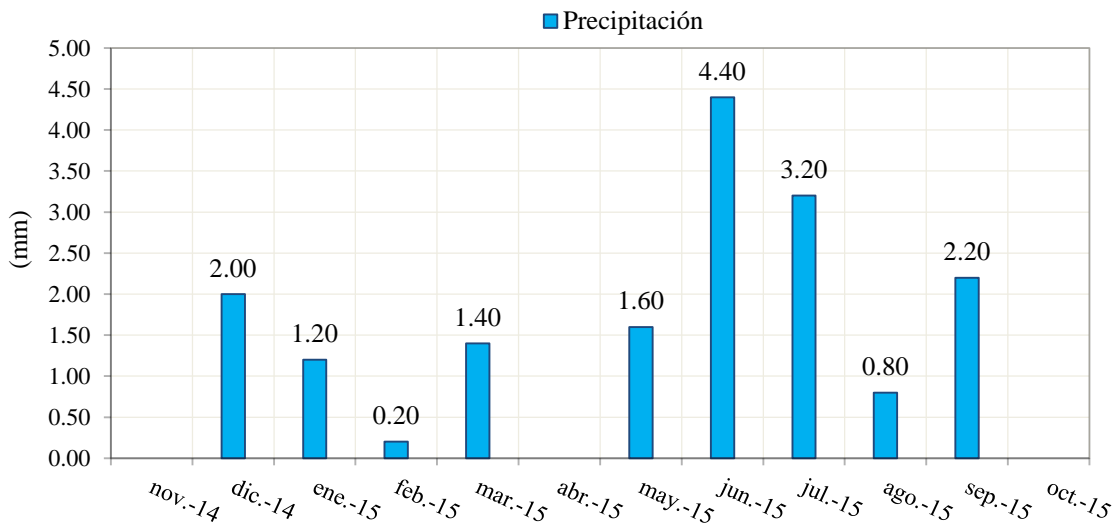


Figura 15. Milímetros de precipitación registrados mensualmente por la estación meteorológica instalada dentro de la Ciénega de Santa Clara.

El volumen total de agua que ingresó al sistema por precipitación durante el período de estudio fue de 0.80 hm³. El mayor volumen de agua que ingresó se registró en junio del 2015 con 0.21 hm³ y el menor volumen se registró en febrero del mismo año con 0.01 hm³.

Durante noviembre 2014 y abril del 2015 no se registraron precipitaciones, por lo tanto, este afluente queda descartado como entrada del balance durante esos meses. En la figura 16 se muestran los ingresos mensuales por precipitación en la Ciénega.

A diferencia de los estudios realizados por Glenn *et al*, (2010) y Huckelbridge *et al*, (2010), en los que se hace referencia a las variaciones atmosféricas registradas en la Universidad de Arizona en Tucson E.U., los registros climatológicos medidos con la estación instalada dentro de la Ciénega permitieron observar el comportamiento atmosférico en el humedal.

La información meteorológica obtenida permitió además registrar el ingreso de agua al cuerpo lagunar por precipitaciones convectivas y eventos locales.

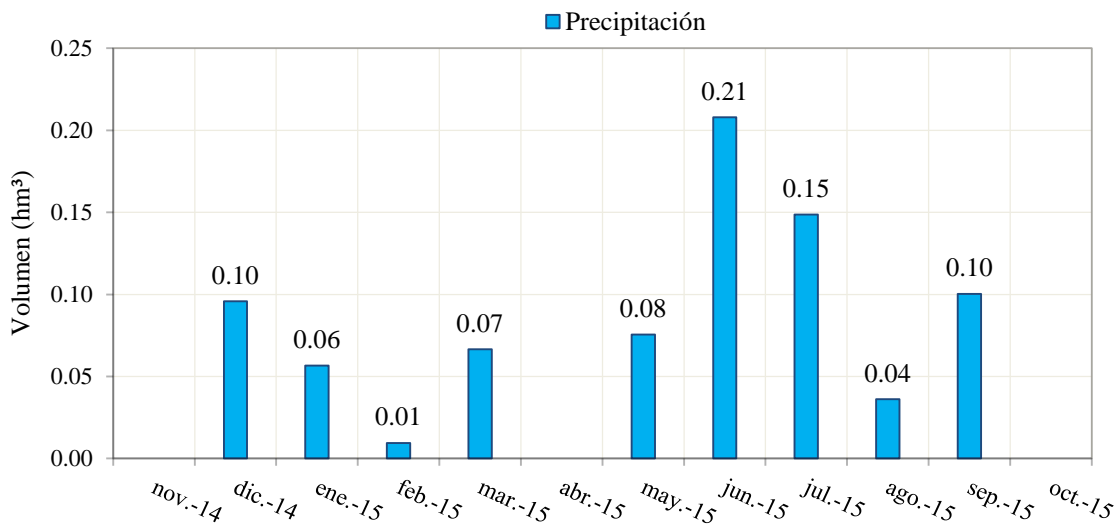


Figura 16. Volumen de agua que ingresó por precipitación durante el periodo de estudio.

Niveles estáticos y dirección del flujo

Los niveles de agua en la red piezométrica se encuentran entre los 7.75 msnm como máximo y 4.5 msnm como mínimo. El primero obtenido durante el monitoreo de abril del 2015 en el piezómetro B2 y el segundo en septiembre del mismo año en el C1 (Figura 17). Durante el periodo de noviembre a marzo del 2015, el sitio B2 no fue monitoreado debido a complicaciones en la instalación del piezómetro. No obstante, fue reconstruido y se reanudo su monitoreo en abril, 2015.

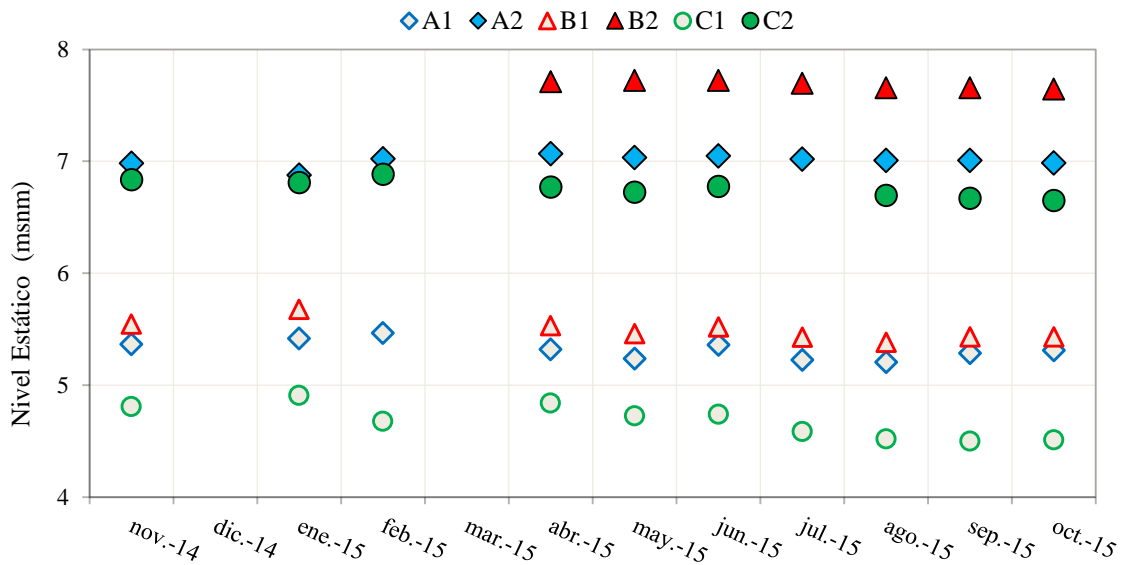


Figura 17. Niveles subterráneos de agua obtenidos mensualmente en la red piezométrica.

Los niveles de agua subterráneos presentaron un comportamiento similar, sin embargo, las variaciones en los piezómetros A1, B1 y C1, fueron mayores que en los piezómetros A2, B2 y C2. Cabe mencionar que los primeros se encontraron más alejados a la marisma que los segundos, por lo tanto, podrían tener una mayor influencia de los procesos ocurridos en el cuerpo lagunar. En la figura 18 se presentan los perfiles de agua subterránea de cada sección y su relación con el nivel de agua dentro de la marisma.

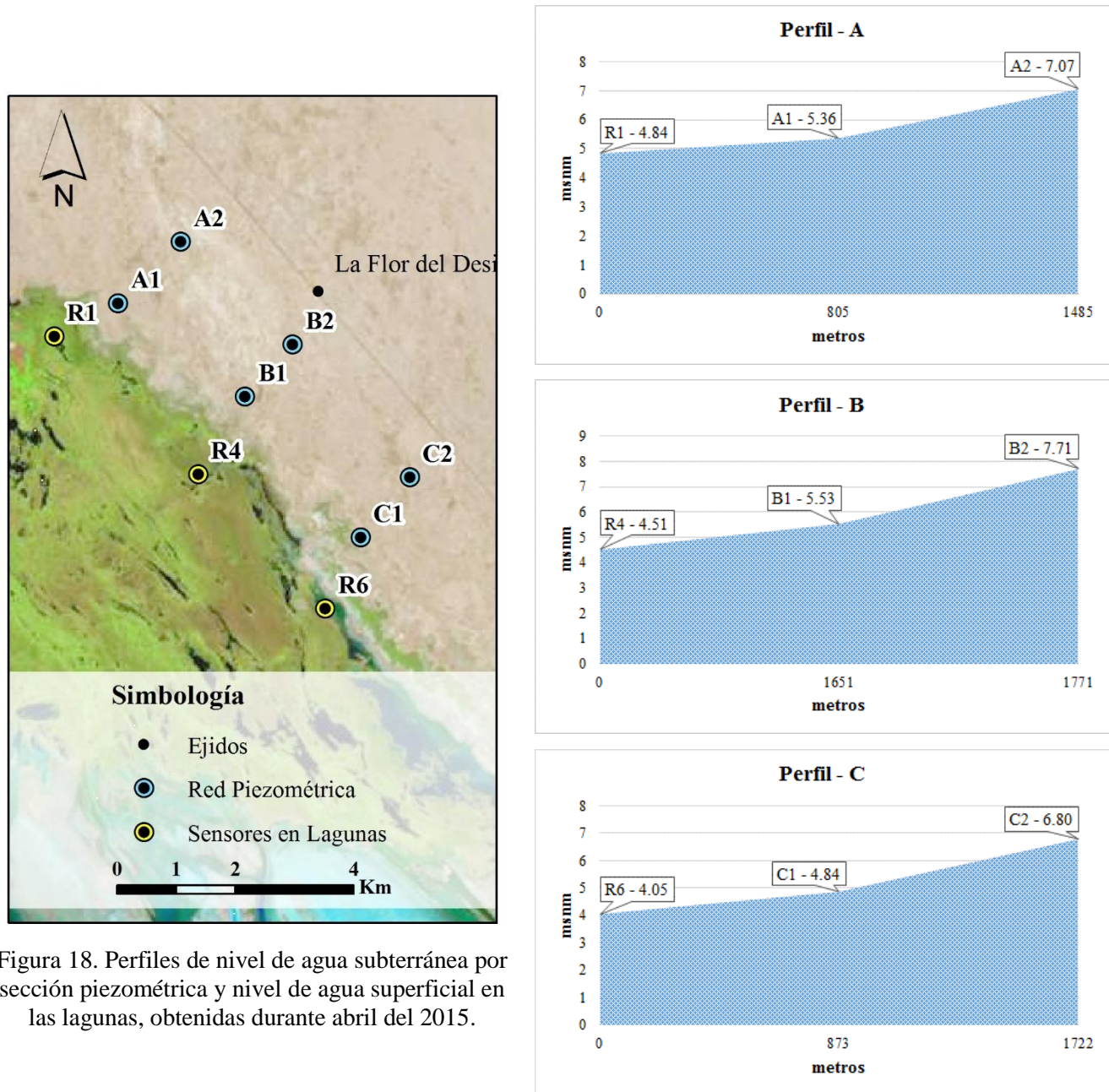


Figura 18. Perfiles de nivel de agua subterránea por sección piezométrica y nivel de agua superficial en las lagunas, obtenidas durante abril del 2015.

De acuerdo a los datos obtenidos, se observó un gradiente hidráulico predominante del Q_{SUB} con dirección Noreste a Suroeste, hacia la marisma de la Ciénega. Además, se observó a una ligera variación con dirección hacia el sur en la sección C, hacia las zonas bajas fuera de la marisma (Figura 19). Se observó el comportamiento del flujo subterráneo, mismo que evidencia la recarga subterránea de la marisma del humedal en toda la extensión de la frontera colindante con el desierto sonorense. Cabe mencionar que humedales como el Doctor, se abastece principalmente de aguas subterráneas, incluso en algunos sitios se observa como aflora el agua durante algunos meses del año (comunicación personal).

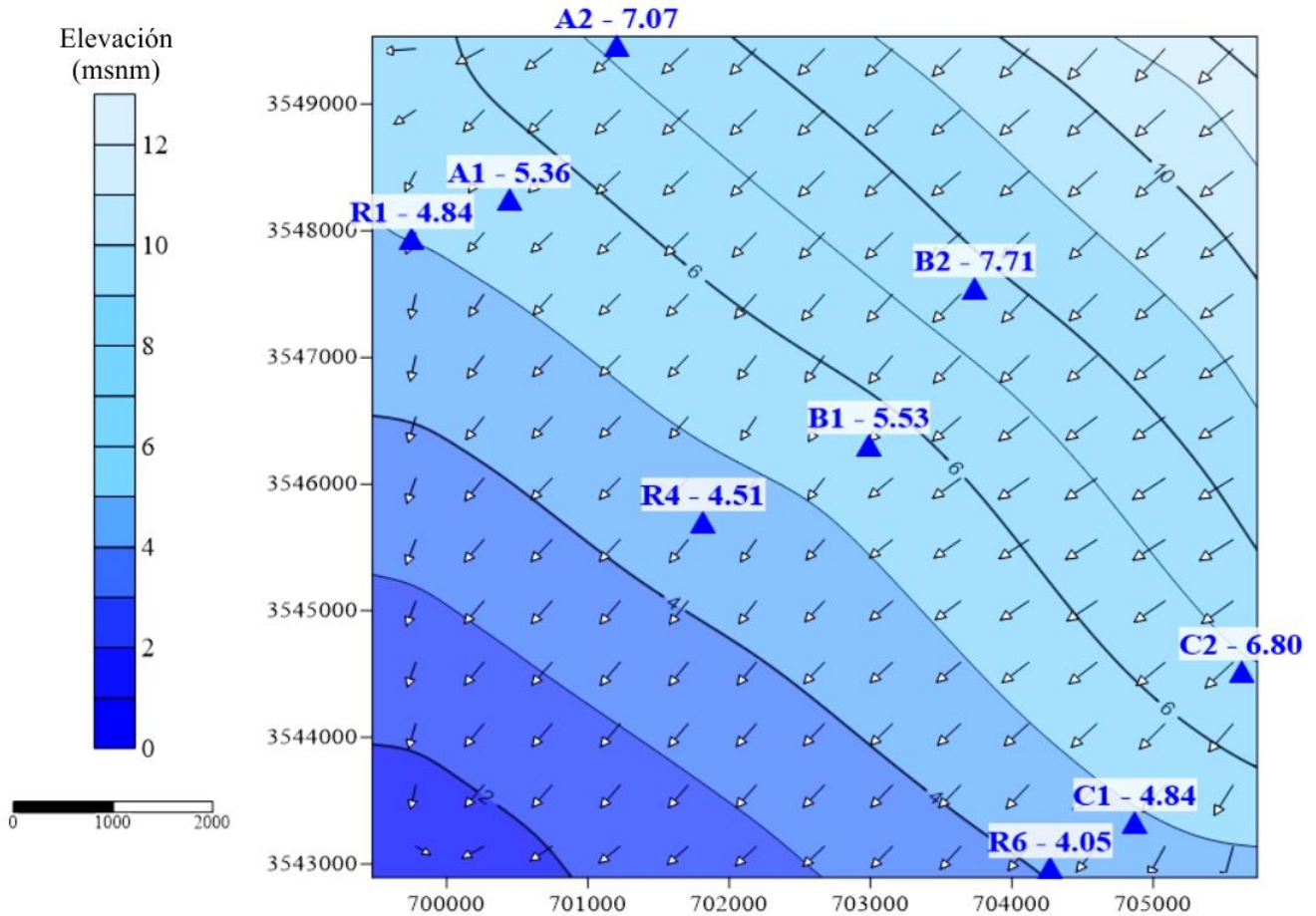


Figura 19. Elevación del nivel de agua y dirección del flujo subterráneo obtenidos durante abril del 2015.

7.1.3. ENTRADAS SUBTERRÁNEAS

Se estimó que el volumen de agua total que ingresó por medio del Q_{SUB} al sistema durante el periodo de estudio fue de 0.36 hm^3 , con un promedio mensual de 0.029 hm^3 . El agua que ingresó de manera subterránea varió de los 0.027 a los 0.03 hm^3 , ingresando el mayor de los volúmenes durante julio y agosto, mientras que durante enero aportó el volumen más bajo. En la figura 20 se observa que las aportaciones del sistema, son menores al resto de las entradas de agua. Sin embargo, por primera vez se realizó una estimación del volumen de agua aportado de manera subterránea.

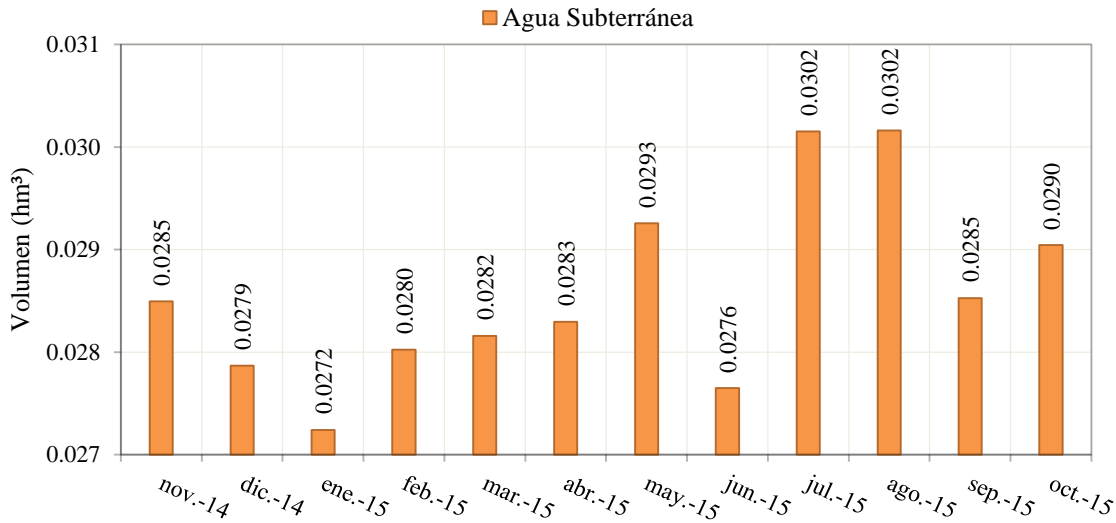


Figura 20. Volúmenes de agua que ingresaron de manera subterránea durante el periodo de estudio.

A diferencia de las entradas de agua por el canal WM que representaron el 95.19% de los ingresos totales de agua al sistema, el Q_{SUB} solo aportó el 0.24%. En la actualidad el volumen de agua que ingresa de manera subterránea no sería capaz de soportar la marisma de más de 5,000 ha. Sin embargo, antes de la construcción del canal WM y sus aportaciones de agua, algunos investigadores como Sykes, (1937), observaron la presencia de vegetación en esta región, misma que se relaciona tanto a las aportaciones provenientes del DR como a las del Q_{SUB} .

Por otra parte fuera del sistema lagunar, la permanencia de los humedales del El Doctor se relaciona con las entradas del Q_{SUB} , ya que se encuentran por encima del nivel de agua de la Ciénega. Cabe mencionar que el ejido que compete a este humedal (Ejido Estación Doctor), al igual que el ejido La Flor del Desierto, se abastecen de agua dulce provenientes de pozos. No obstante, la extracción de agua de estos pozos no fue cuantificada en este estudio, pero se infiere que es muy poca, ya que se lleva a cabo esporádicamente y por periodos cortos (comunicación personal).

7.2. VOLÚMENES DE ENTRADA DE AGUA

Una vez sumadas mensualmente las entradas de agua se obtuvieron los siguientes resultados. Se calculó que el mayor de los volúmenes mensuales de agua se registró en diciembre del 2014 con 12.87 hm^3 mientras que el mes con menor aportación fue el de agosto del 2015 con 11.18 hm^3 (Tabla 6). Este último al igual que lo registrado por Lomeli *et al*, (2011), también presentó el menor volumen de entrada.

Tabla 6. Volúmenes de agua de entrada calculados mensualmente.

Mes	Volumen de entrada (hm ³)				Total
	WM	DR	P	Q _{SUB}	
nov-14	12.08	0.17	0.00	0.0285	12.28
dic-14	12.43	0.32	0.10	0.0279	12.87
ene-15	12.04	0.55	0.06	0.0272	12.68
feb-15	10.95	0.66	0.01	0.0280	11.65
mar-15	11.95	0.82	0.07	0.0282	12.87
abr-15	10.41	0.78	0.00	0.0283	11.21
may-15	11.47	0.70	0.08	0.0293	12.27
jun-15	11.27	0.53	0.21	0.0276	12.03
jul-15	11.03	0.39	0.15	0.0302	11.60
ago-15	10.83	0.29	0.04	0.0302	11.18
sep-15	11.65	0.23	0.10	0.0285	12.01
oct-15	11.72	0.23	0.00	0.0290	11.98
Total	137.81	5.67	0.80	0.34	144.63

Se estimó que el volumen total de agua que ingresó por el WM fue de 137.81 hm³, por el DR 5.67 hm³, por lluvia 0.80 hm³ y de forma subterráneas 0.34 hm³. Siendo el primero de ellos el que aportó el 95.29% del volumen de agua al sistema, la suma del resto de las entradas aportó el 4.71% (Figura 21). En total ingresaron a la Ciénega 144.63 hm³ de agua durante el periodo de estudio.

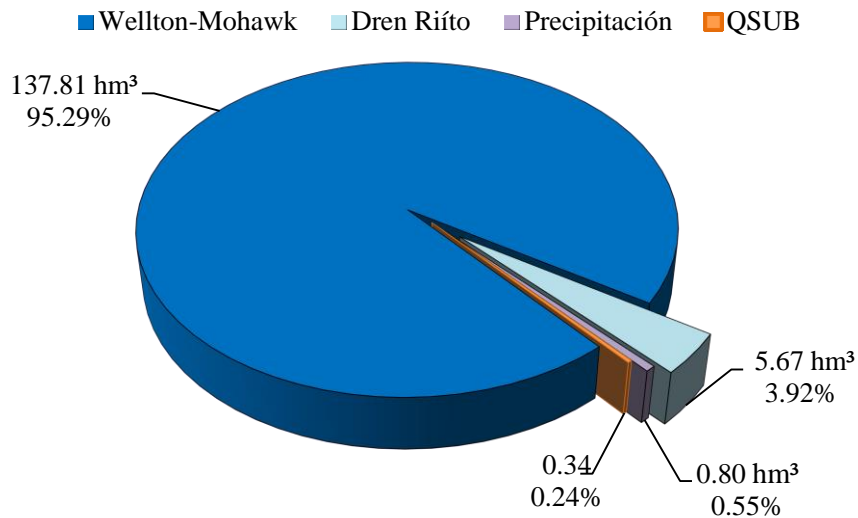


Figura 21. Volúmenes totales que ingresaron al humedal con su respectivo porcentaje.

7.3. SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD) DE ENTRADA

7.3.1. STD – WELLTON-MOHAWK

El canal WM ingresó 377,632 toneladas de sólidos totales disueltos (STD) al humedal durante el periodo de estudio. El mes de mayor ingreso fue marzo del 2015 con un total de 34,156 ton, mientras que el de menor ingreso fue enero del mismo año con un total de 28,026 ton. La concentración media diaria de STD durante el año de estudio fue de 2.74 g L⁻¹ y sus mediciones poseen una desviación estándar del 0.16%. En los meses de junio y julio del año 2015 se registraron las concentraciones más altas (2.91 g L⁻¹). Por otro lado, la concentración más baja del año (2.27 g L⁻¹) se registró durante enero y febrero del 2015.

García y colaboradores (2000) reportaron que la concentración media de STD que se envía a la Ciénega es de 2.8 g L⁻¹, y se encuentra dentro de los límites de tolerancia para la vegetación del humedal. No obstante, esta concentración de STD no presenta ninguna relación a las problemáticas relacionadas con la vida silvestre y su hábitat. Cabe mencionar que la Ciénega podría verse afectada si existiese una continuidad con el ingreso de altas cantidades de STD que varíen entre los 7-10 g L⁻¹ (Glenn *et al.* 1995).

7.3.2. STD – DREN RIÍTO

En total ingresaron al humedal 15,482 toneladas de material suspendido a través del DR, siendo marzo del 2015 el mes que aportó la mayor cantidad de material suspendido (2,153 ton), y noviembre del 2014, el mes que aportó el menor (461 ton). La concentración promedio anual de STD fue de 2.77 g L⁻¹ con una desviación estándar del 0.14%. Al igual que WM, este afluente no presentó variaciones significativas con respecto a la media. Por otra parte, la mayor concentración de STD se registró durante el monitoreo día 24 de septiembre del 2015 con 3.01 g L⁻¹. Por otro lado, la concentración mínima de 2.55 g L⁻¹ se obtuvo para el 20 de febrero del 2015.

A pesar de ser menores los STD que ingresaron por el DR, las concentraciones fueron mayores a las del WM. Cabe mencionar que a diferencia del WM el DR este es un dren agrícola no revestido de concreto y que el incremento de las partículas se encuentra relacionado a la actividad aledaña al sitio de medición.

7.4. SALIDAS DE AGUA

7.4.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN

En base a observaciones propias y registros de otros investigadores (Luecke *et al.*, 1999; Zamora-Arroyo *et al.*, 2001; Flessa, 2010), el tule es considerado como la vegetación predominante del humedal. Debido a su densidad, extrae el mayor volumen de agua mediante el proceso de ET. Tomando en consideración lo antes mencionado, se estimó que la ET extrajo del humedal 2,205.51 mm durante el año de estudio, con un promedio diario de 6.09 mm. En julio del 2015 se estimó el día con mayor ET (11.17 mm/día), mientras que la menor (0.82 mm/día) se estimó para el diciembre del 2014 (Figura 22). Estos valores son consistentes con las temperaturas registradas en la Ciénega y el estado de crecimiento del tule.

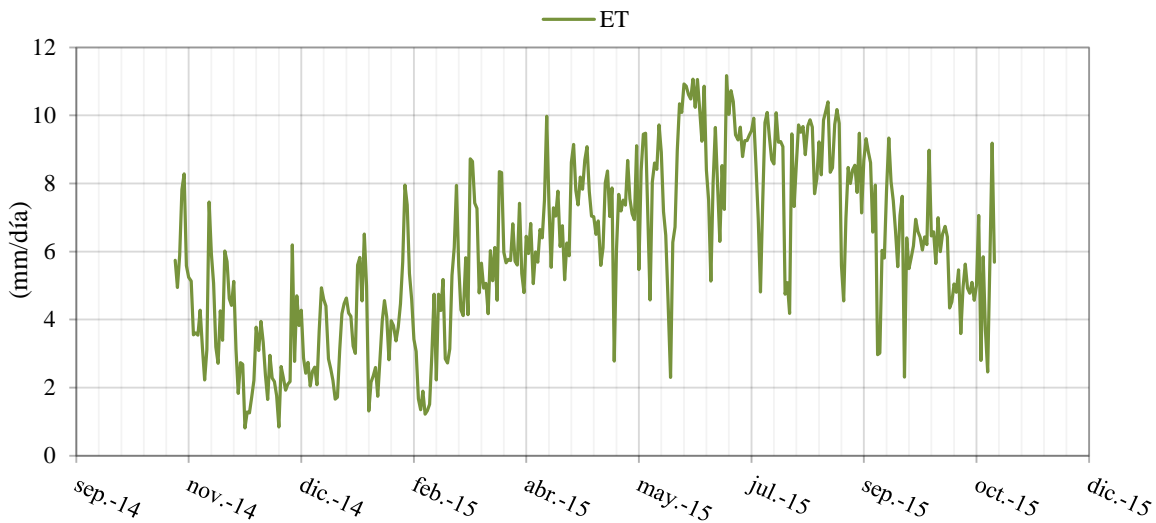


Figura 22. Resultados de las pérdidas diarias de agua por ET.

En la figura 23 se observa que el volumen total de agua evapotranspirada durante el año de estudio fue de 103.44 hm³, lo cual significa que el 71.52% del agua total que ingresó a la Ciénega salió mediante este proceso. Cabe mencionar que este porcentaje considera únicamente las entradas de agua al sistema lagunar y no al agua almacenada. Durante mayo hasta agosto se estimaron volúmenes de ET por arriba de los 10.69 hm³ mismos que fueron los mayores del año. Por otro lado, el menor volumen de salida con 3.89 hm³ se estimó para diciembre del 2014, mes en el cual la vegetación se encontraba en estado durmiente.

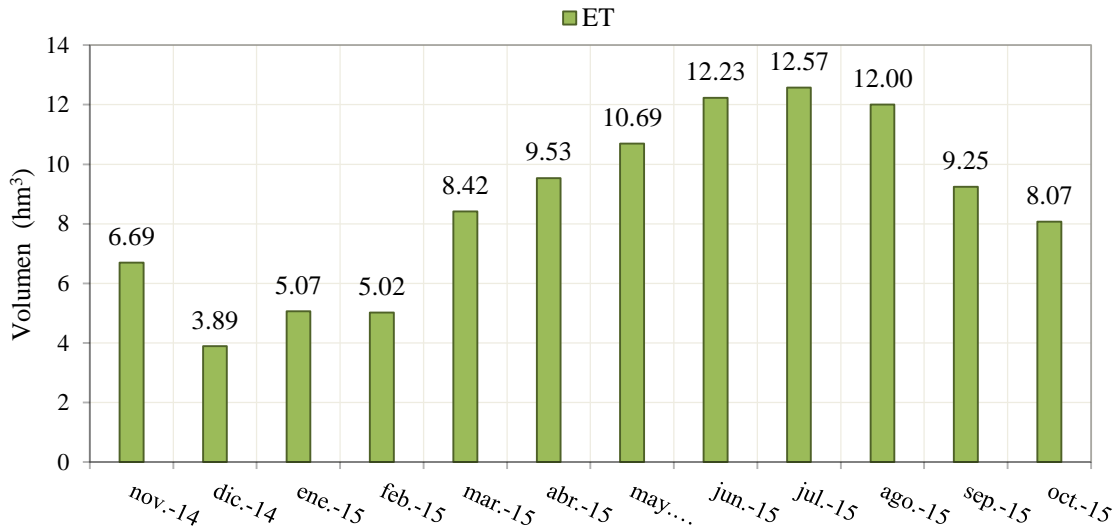


Figura 23. Volúmenes de agua mensuales extraídos por evapotranspiración.

Durante junio, julio y agosto del 2015, el 100% del volumen total de agua que ingresó a la Ciénega se evapotranspiró, así como entre el 2 y el 8% del agua almacenada en las lagunas. Esto en consecuencia al incremento en la tasa de ET debido al estado vegetativo del tule (mayor vigorosidad) e incrementos en la temperatura. Los cambios estacionarios de ET están asociados al crecimiento vegetativo y la temperatura; por lo cual, mientras más vigoroso se encuentra el tule se incrementa el volumen de ET, y viceversa, cuando la planta se encuentra en estado durmiente la ET es menor (Glenn *et al.* 2013; Lomeli *et al.* 2015b).

Otras variables que inciden directamente en la estimación de la ET son la radiación y la velocidad del viento. Por lo cual, la estación meteorológica instalada dentro de la marisma permitió registrar estas y otras variables de manera directa en la zona de estudio, disminuyendo así la incertidumbre de los parámetros. Los registros climáticos obtenidos, a diferencia de los datos adquiridos a más de 50 km de distancia como los reportados por otros investigadores como Glenn *et al.*, (2010) y Huckelbridge *et al.*, (2010), permiten obtener datos únicos incluyendo registros de precipitaciones convectivas y eventos climatológicos locales.

En este estudio no se analizó la relación existente entre la vegetación, la salinidad y la ET, sin embargo, se debe de considerar que mientras el agua circule a través del tule, el gradiente de salinidad es mayor (Burnett *et al.* 1993; Glenn *et al.* 1995; Zengel *et al.* 1995). Esto explica que, entre más intenso es el proceso de ET, más se incrementa la concentración de sales en el agua no evapotranspirada. Por lo tanto, la salinidad es un factor limitante para la distribución y el crecimiento del tule en el humedal, ya que no

tolera salinidades mayores a 6.0 g L^{-1} en tiempos prolongados (Glenn *et al.* 1995). Por su parte, la concentración de selenio en el agua aumenta de igual manera con la ET (García-Hernández *et al.* 2000).

7.4.2. FLUJO SUBTERRÁNEO – SUPERFICIAL

Los volúmenes de agua que salieron de la Ciénega por Q_{SM} calculados a partir de su despeje de la fórmula general de balance, fueron los siguientes. Durante diciembre del 2014 se registró la mayor salida por Q_{SM} del año con más de 9.54 hm^3 . Esto debido a extracciones menores por ET, además de ingresos totales de agua mayores a 12.28 hm^3 durante noviembre hasta enero. Por otro lado, en agosto del 2015 se obtuvo un volumen de Q_{SM} negativo (sin salidas de agua), ya que a diferencia diciembre del 2014, más del 100% del agua que ingresó por el WM fue extraída por ET.

Se estimó que el volumen total de agua extraído por Q_{SM} fue de 40.29 hm^3 , mismo que corresponde al 27.86% del volumen total de agua que ingresó en el año. Dentro de este volumen fueron consideradas las salidas por flujo superficial y subterráneo, ya que las segundas no se pudieron estimar por separado. Sin embargo, se cree que las pérdidas Q_{SM} son mínimas mas no han sido estudiadas aún.

7.4.3. VOLÚMENES DE SALIDA DE AGUA

Se estimó que el volumen de agua extraído durante el estudio por el proceso de ET fue de 103.44 hm^3 , y por Q_{SM} 0.29 hm^3 . Este último extrajo el 27.86% de agua que entró a la Ciénega; mientras que por ET el 71.52% (Figura 24). En total fueron extraídos 143.73 hm^3 de agua mediante estos procesos (Tabla 7).

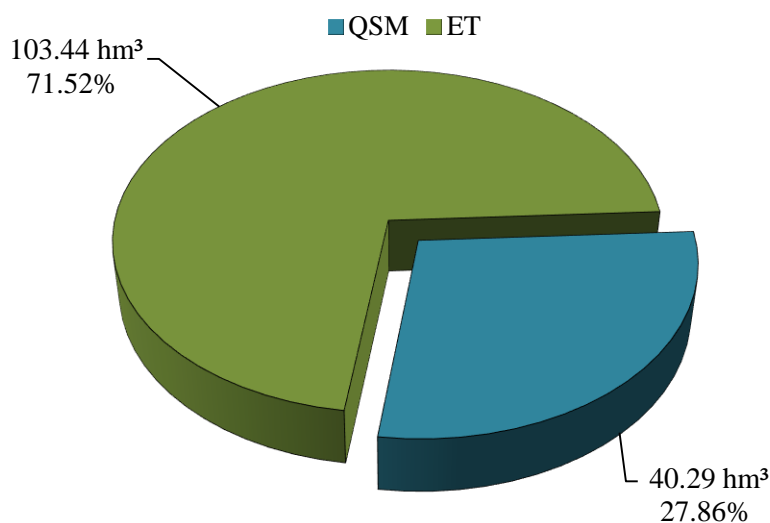


Figura 24. Volúmenes totales de agua que salieron del humedal y su respectivo porcentaje.

Tabla 7. Volúmenes mensuales de agua que salieron de la Ciénega mediante ET y Q_{SM}.

Volumen de salida (hm ³)			
Mes	ET	Q _{SM}	Total
nov-14	6.69	5.58	12.28
dic-14	3.89	9.54	13.43
ene-15	5.07	5.53	10.60
feb-15	5.02	6.15	11.17
mar-15	8.42	4.64	13.06
abr-15	9.53	3.25	12.79
may-15	10.69	2.01	12.71
jun-15	12.23	0.53	12.76
jul-15	12.57	0.26	12.83
ago-15	12.00	-	12.00
sep-15	9.25	1.06	10.31
oct-15	8.07	1.74	9.81
Total	103.44	40.29	143.73

Las pérdidas de agua por ET por unidad de área fueron de 2,205.51 mm/año, y se llevaron a cabo en una superficie de marisma compuesta por 10% de superficies de agua expuesta directamente al sol, y 90% de vegetación hidrófita (Lomeli *et al.* 2015b). A diferencia de otras regiones del Delta, la tasa de ET en la Ciénega es mayor debido a la gran proporción de vegetación emergente (Cohen *et al.* 2001).

La utilización del SIG en conjunto con las imágenes satelitales Landsat-8 Oli y los registros climatológicos in-situ, permitieron estimar las salidas de agua por ET. Los resultados son acordes a los obtenidos por Glenn y colaboradores (2013), por medio del Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI, por sus siglas en ingles). Cabe mencionar que la relación entre la ET y la superficie de marisma en donde se llevan a cabo en la Ciénega es considerable, ya que si existiese un error en la cantidad de área calculada, existiría una gran incertidumbre en la cantidad de agua que sale de la Ciénega por ET.

7.5. DIMENSIONES

7.5.1. ÁREA DE LA CIÉNEGA

La dinámica del crecimiento de la Ciénega a lo largo del tiempo ha provocado que no existiese una frontera que la delimite en su totalidad. Sin embargo, en el 2010 fue delimitada de tal manera que al ser estudiada

incluya las zonas de interés (agua y vegetación hidrófita) mediante el uso de imágenes satelitales y percepción remota (Flessa. 2012; Lomeli. 2013).

El área promedio anual de la Ciénega fue de 4,709 ha ($4.70 \times 10^7 \text{ m}^2$). En noviembre del 2014 se estimó A_{TM} de 4,859 ha ($4.85 \times 10^7 \text{ m}^2$), la cual fue la mayor durante el estudio. Para agosto del 2015 se estimó la menor de las áreas con 4,529 ha ($4.52 \times 10^7 \text{ m}^2$) (Tabla 8).

Tabla 8. Resultados de las áreas totales (A_{TM}), que incluye áreas de lagunas abiertas y áreas de vegetación.

Área Ciénega	
Mes	Hectáreas (ha)
nov-14	4,859
dic-14	4,791
ene-15	4,727
feb-15	4,763
mar-15	4,751
abr-15	4,726
may-15	4,728
jun-15	4,725
jul-15	4,644
ago-15	4,529
sep-15	4,563
oct-15	4,701
Promedio	4,709

La variabilidad superficial del A_{TM} fue imperceptible debido a que el agua del WM se mantuvo constante durante el periodo de estudio. No obstante, se estima que la Ciénega tiene una superficie vegetal aproximada de 4,200 ha, la cual incluye agua y vegetación hidrófita en su mayoría tule, que es una especie que se adapta al agua salobre del sitio Glenn y colaboradores (2006).

Según los resultados obtenidos en este estudio y los de All, (2006), el crecimiento vegetativo de la Ciénega en los meses de verano es mayor al de resto del año, y es de esperarse, ya que durante ese periodo hay más radiación solar. Sin embargo, esto no sucedería si la disponibilidad del agua se viera afectada por la utilización de la PDY. No obstante, durante el desarrollo de esta investigación no existió una reducción de flujo por la reactivación de la PDY, por lo que las dimensiones fueron semejantes. Otros factores como las altas concentraciones de salinidad y selenio influyen en el crecimiento y distribución de la vegetación como lo menciona Glenn (1995). Sin embargo para este estudio únicamente se consideraron los cambios superficiales de la marisma y su relación con las entradas de agua del WM. Con esta consideración, las

dimensiones superficiales obtenidas con las imágenes satelitales variaron acorde a las estaciones del año y al volumen de agua que ingresó al humedal. Sin embargo, se observó un crecimiento superficial de la Ciénega ya que los resultados obtenidos por Cohen (2001) y Flessa (2010) son en promedio de 4,200 ha.

De manera general en la figura 25 se observan las áreas mensuales del humedal de forma gráfica y las entradas de agua por el WM.

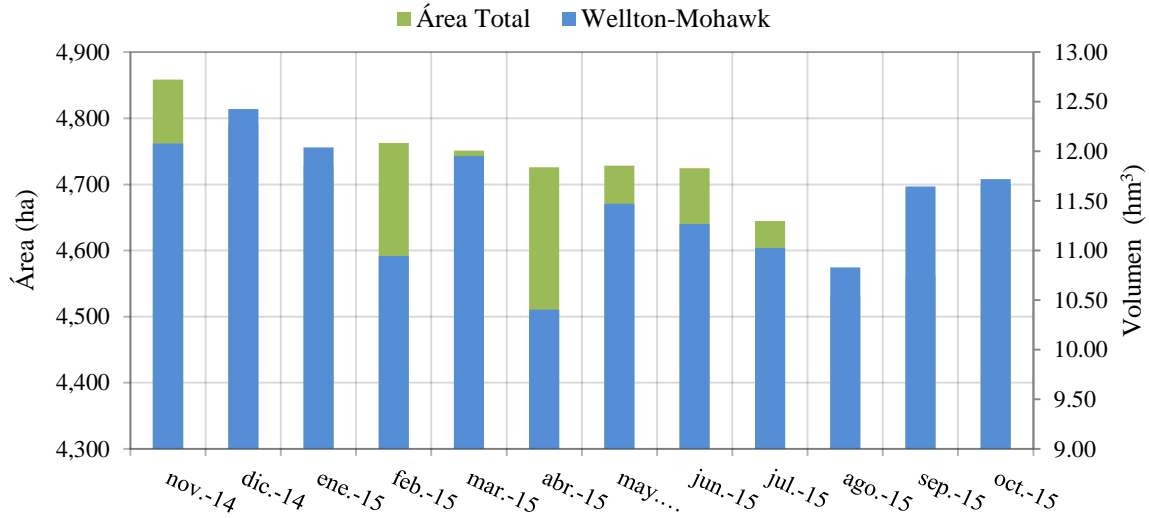


Figura 25. Resultados mensuales de las áreas del humedal y entradas de agua.

7.5.2. VOLUMEN

La capacidad o volumen de almacenamiento de agua que soporta el humedal fue indispensable para realizar el balance hídrico. Esto se debe a que en base al postprocesamiento de los datos topográficos de elevaciones utilizadas en el 2010 por Lomeli y colaboradoras dentro del SIG, y las elevaciones de los sensores en las lagunas, se obtuvo un MDE del relieve terrestre y uno del espejo de agua mensualmente.

El volumen mensual promedio de la Ciénega durante el año de estudio fue de 13.18 hm³. En febrero del 2015 se estimó el mayor de los volúmenes de almacenamiento con 15.32 hm³, mientras que el menor se obtuvo en agosto del mismo año con 10.35 hm³. La variabilidad en el almacenamiento del humedal no se basa simplemente en que si ingresa más agua al humedal aumenta su tamaño y viceversa. Los cambios en el almacenamiento de agua en el humedal se encontraron en función a lo siguiente: los volúmenes de entrada, los volúmenes de salida por ET estacional y los volúmenes de salida por Q_{SM} (Figura 26).

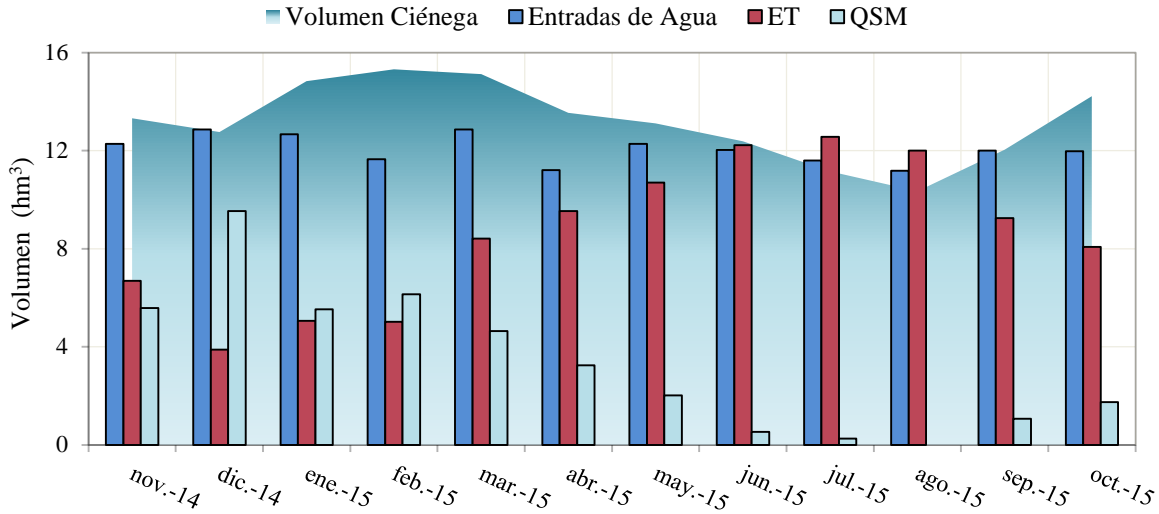


Figura 26. Volumen de almacenamiento y procesos que intervienen en su variabilidad.

Una vez graficados los resultados se observó el comportamiento del almacenamiento en relación a las entradas y salidas de agua durante el año. Estos resultados presentaron un comportamiento estacional con el incremento de ET y decremento en el volumen de almacenamiento, así como por flujo superficial durante los meses de verano. Por otra parte, durante el invierno cuando la ET disminuye, el volumen de almacenamiento incrementa al igual que las salidas superficiales (Figura 26). La diferencia entre el volumen máximo (invierno) y mínimo (verano) estimado fue de 4.97 hm³, y representa el 37.68% de la media mensual de los almacenamientos estimados en el estudio. Estos resultados indican que las pérdidas de agua en verano podrían provocar complicaciones en el ecosistema de la marisma ya que incluso durante junio, julio y agosto, la ET extrajo el 100% del agua que ingresó por el WM y un pequeño porcentaje del agua almacenado en el humedal. A diferencia de estudio realizado en el 2010 por Lomeli y colaboradores, durante este periodo el volumen de entrada del WM no se redujo considerablemente, y se observa que el almacenamiento del agua en la marisma está en función de las salidas de agua por ET.

7.6. NIVELES DE AGUA

Los cambios en las dimensiones de la Ciénega se debieron al volumen de agua que ingresó, y al que salió por ET y Q_{SM}. Sin embargo la hidrodinámica dentro del cuerpo lagunar se observó mediante la instalación de ocho sensores (Figura 27), los cuales se identificaron como se presenta en la tabla 9.

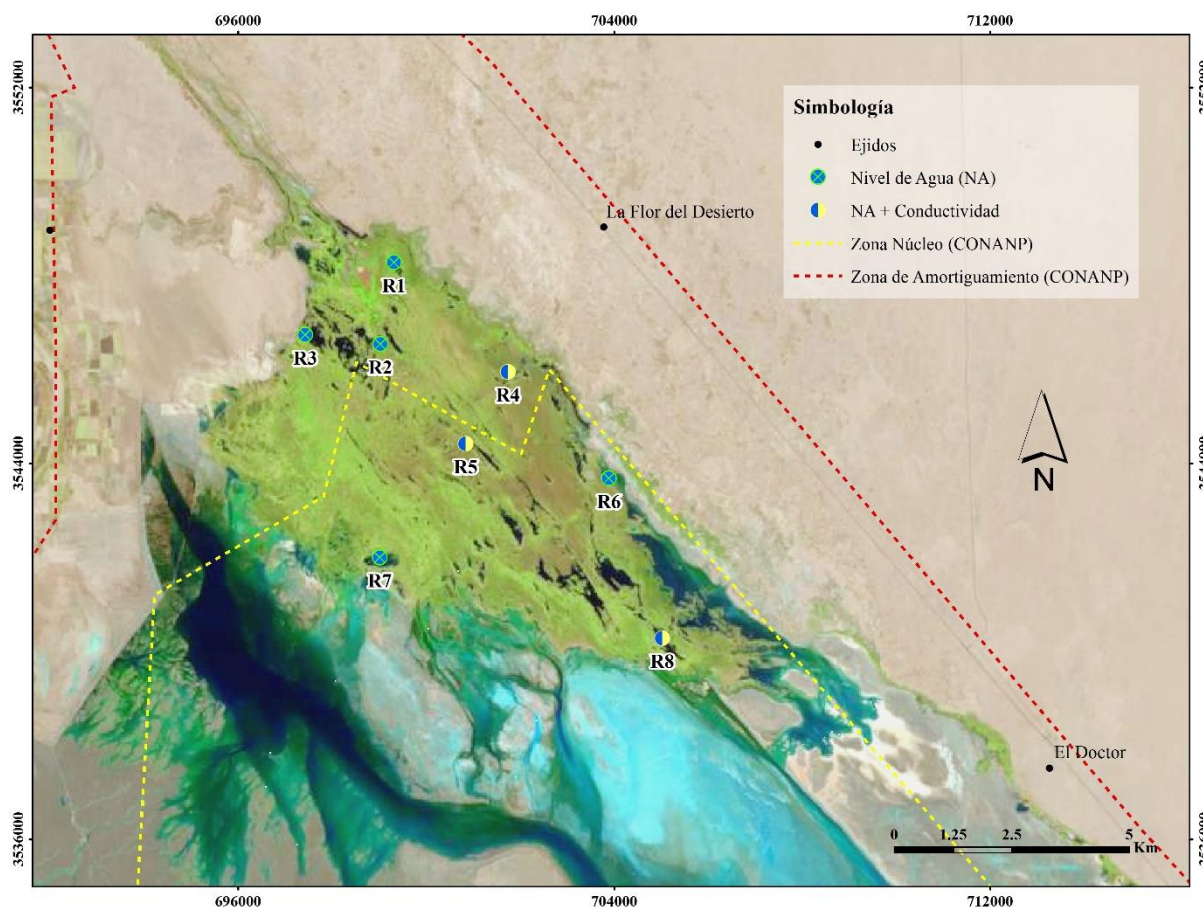


Figura 27. Localización de los sitios monitoreados dentro del humedal.

Tabla 9. Sitios monitoreados durante el estudio con su respectiva ubicación geográfica (Datum WGS 84 / UTM zona 11N), elevación del nivel y tipo de medición que se realizó.

Sitio	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Tipo de Medición
R1	3547969	699474	5.30	NA
R2	3546417	699071	5.47	NA
R3	3546578	697501	5.54	NA
R4	3545687	701674	4.88	NA + Conductividad
R5	3544082	701393	4.91	NA + Conductividad
R6	3542893	704294	4.87	NA
R7	3541933	699135	4.48	NA
R8	3539849	705432	4.42	NA + Conductividad

En relación a las elevaciones del nivel de agua presentadas en la figura 28, se observaron los siguientes aspectos:

1. Las elevaciones del nivel de agua en todos los sitios de monitoreo presentaron variaciones y comportamientos similares, por ejemplo, durante diciembre del 2014; abril, agosto y septiembre del 2015, se observó que el nivel de agua disminuyó; el resto del año, los niveles se mantuvieron constantes. Cabe mencionar que los cambios del nivel de agua en R1 fueron más susceptibles al caudal de entrada del WM y presentaron una mayor variabilidad. Durante enero se registró un incremento de nivel del agua en R5 al igual que en R1, un comportamiento también similar al caudal de entrada del WM. Por otro lado, el sitio R6 registro la mayor disminución en verano, e incluso el 13 de agosto no se registró presencia de agua. Este sitio al igual que R1 se encuentra ubicado en la orilla del humedal, y en verano, presentaron comportamiento similar al caudal de entrada del WM, pero también a las salidas máximas por ET.
2. Los niveles de agua variaron en promedio 0.31 m durante el año de estudio, sin embargo, cada laguna presentó distintos tiempos de retención del agua. En el caso de la laguna donde se localiza R1, se presentó el mayor rango de variación (0.81 m), mientras que el menor rango fue registrado en la laguna del sitio R7 con 0.12 m. Además de lo antes mencionado, en los resultados de la figura 28 se observó que el nivel del agua en los sitios R2 y R3 es similar, sin embargo, esto solo fue identificado durante un corto periodo de tiempo debido a complicaciones técnicas con el sensor. Por otro lado, las lagunas R4 y R5 también presentaron elevaciones similares, solo que en invierno su comportamiento es diferente.

A diferencia la laguna de R1, los cambios en el almacenamiento debido a la variación en los niveles de agua no son tan susceptibles a las entradas de agua y salidas de agua a corto plazo. No obstante, la disminución de almacenamiento de agua debido a la ET en verano fue perceptible en todos los sitios, pero en R6 incluso logró desaparecer el agua en la laguna.

3. La elevación del agua presenta un gradiente hidráulico que comienza en las lagunas aledañas a la descarga del WM y va disminuyendo en su trayecto sobre la falla de Cerro Prieto hasta alcanzar su menor elevación en el sur-sureste del humedal. Este comportamiento se puede observar en la figura 28 donde el nivel de agua es mayor en R1, R2 y R3; disminuye en R4, R5 y R6; y finalmente presenta su nivel más bajo en R7 y R8, sitios aledaños a las salidas superficiales de agua. Cabe mencionar

que en el 2010 este comportamiento lagunar también fue observado, y coincide con la pendiente topográfica que genera la falla de Cerro Prieto con dirección hacia el Golfo de California.

Elevación del Nivel del Agua y Entradas por el WM

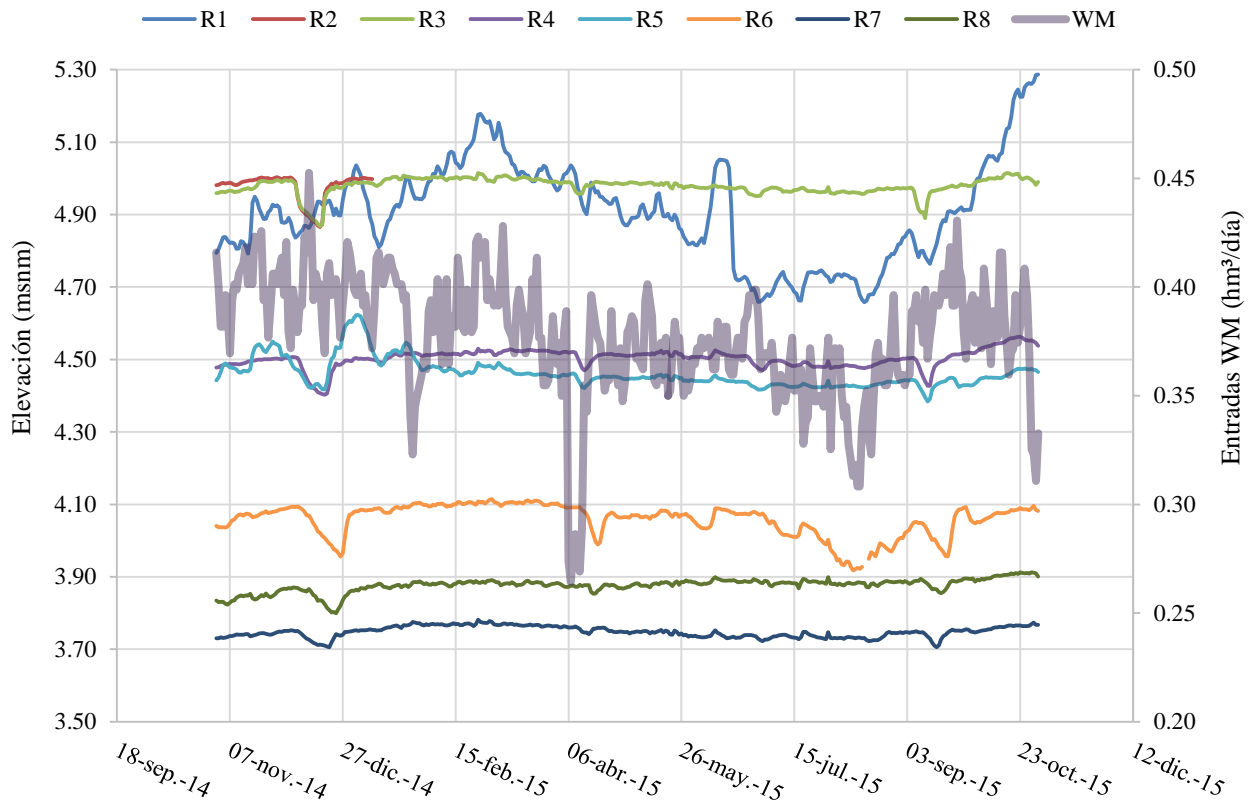


Figura 28. Elevación del agua en msnm de todos los sitios donde se instaló un sensor.

7.6.1. PROFUNDIDAD EN LAS LAGUNAS

Como se mencionó previamente en la metodología, la profundidad de las lagunas se obtuvo también mediante los registros electrónicos de los sensores HOBO realizando su respectivo postprocesamiento. Por lo tanto, las variaciones de profundidad en las lagunas presentan las mismas características que los niveles de agua anteriormente analizados, sin embargo, de la figura 29 se observó lo siguiente.

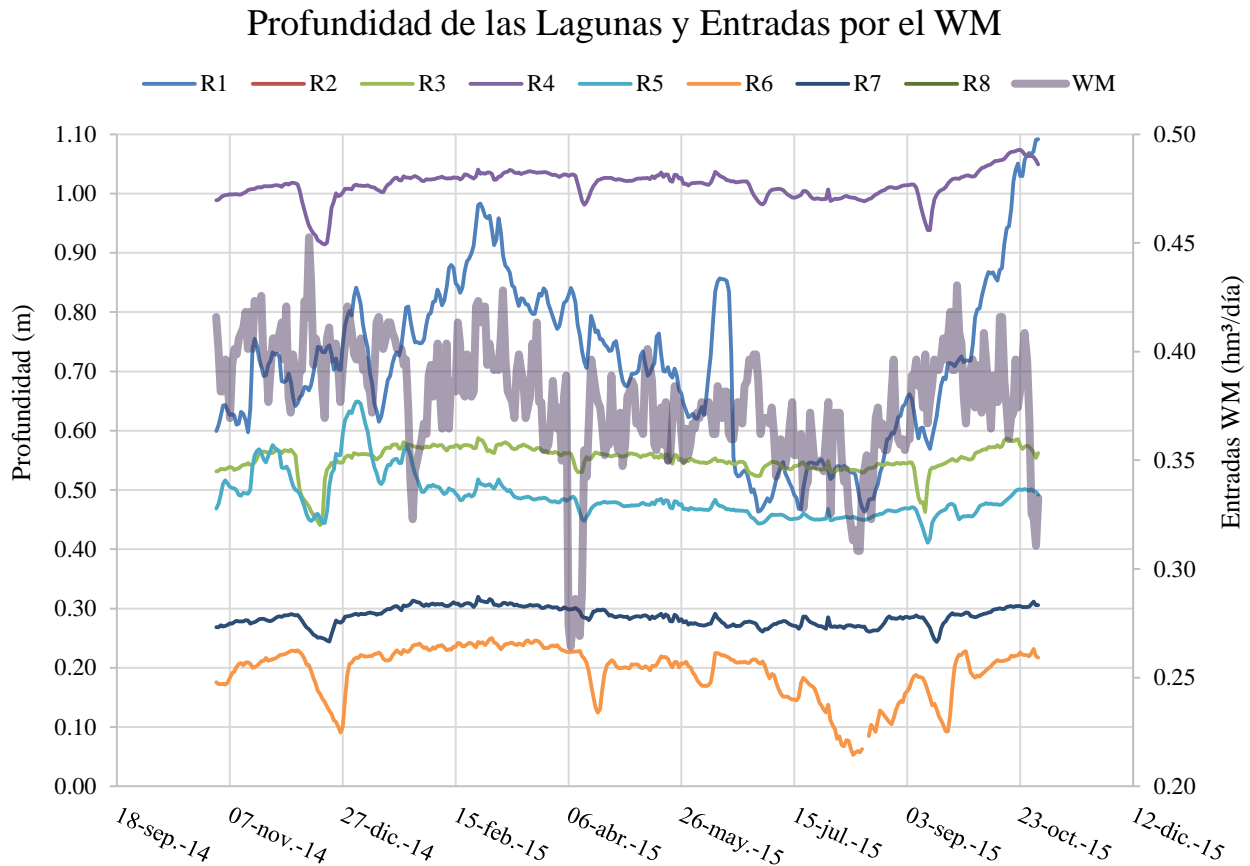


Figura 29. Profundidad media diaria obtenida en los sitios de monitoreados.

La profundidad calculada hace referencia al sitio exacto en donde fue instalado el sensor, por lo tanto, la profundidad de la laguna podría variar en el perímetro aledaño. Durante las campañas de monitoreo se observó que la mayor profundidad del agua se encontraba en sitio R5, sin embargo, en la figura 29 se presentan mayores profundidades en los sitios R1, R3 y R4. Este resultado se debió, ya que por seguridad, los sensores fueron instalados en los márgenes de vegetación de forma oculta y así evitar que fuesen vandalizados. Un ejemplo es el sitio R4, el cual fue instalado dentro de una depresión de mayor profundidad. Por otra parte, la menor profundidad calculada en el sitio R6 coincide con las observaciones

en campo; cabe mencionar que durante el verano el agua en este sitio se redujo hasta desaparecer, y se relaciona con la disminución en el caudal del WM y las salidas máximas de agua por ET. A diferencia de este sitio el resto de las lagunas mantuvieron agua y fueron menormente susceptibles al WM y la ET.

7.7. BALANCE HÍDRICO

Mitsch y Gosselink (2000) mencionaron que de todos los factores que influyen en las características de un humedal, la hidrología es probablemente el más importante. Determina su creación y mantenimiento, así como los procesos que en él se desarrollan. Sin embargo, a pesar de la importancia de la hidrología general de los humedales, no se entiende en su totalidad (Zmolek *et al.* 1997).

En la tabla 10 se presentan los resultados del balance del sistema hidrológico de la Ciénega, y de ella se puede observar lo siguiente:

1. El volumen de entrada del WM se mantuvo por encima de los 10.41 hm³ durante todo el periodo de estudio, lo cual, se consideraría un comportamiento del afluente en condiciones normales al igual que su sistema hidrológico. A diferencia del estudio realizado durante el 2010-2011, el volumen del WM fue reducido por la PDY. Otros eventos de reducción han sucedido desde la construcción del WM, (Carrillo-Guerrero *et al.* 2013), sin embargo, no se llevaron a cabo análisis hidrológicos.
2. Por primera vez se determinó la recarga de agua subterránea de la marisma de la Ciénega, sin embargo, se estimó que esta entrada al sistema lagunar fue la de menor aportación.
3. A diferencia de las entradas de agua por el WM, los volúmenes totales de agua que ingresaron por el DR, P y Q_{SUB}, solo fueron una pequeña aportación al sistema, que incluso, podría ser extraída totalmente por ET. Es por ello que, durante este estudio – y mediante el balance hidrológico – se observó la importancia del WM para el soporte del humedal.
4. Las precipitaciones convectivas a pesar de presentarse durante algunos eventos mensuales, aportó un mayor volumen de agua al sistema que la recarga subterránea.
5. El DR aportó el segundo mayor volumen de agua al sistema lagunar, sin embargo, al observar el volumen de agua que sale del sistema por ET, la Ciénega no sería capaz de subsistir únicamente con esa entrada. Las principales aportaciones del DR fueron en marzo; fechas en que es regada la mayor superficie de cultivos agrícolas, dando como resultando un incremento en el agua drenada.

6. Se estimaron las salidas superficiales de agua del sistema lagunar por medio del balance hidrológico, y se observó que su variabilidad mensual se encontró en función a la ET estacional. Durante el mes de diciembre, por ejemplo, se estimó el menor volumen de agua evapotranspirado y el mayor volumen de agua que salió del sistema superficialmente. Además, se observó que durante el verano el volumen superficial de salida disminuye, e incluso desaparece en agosto.

Cabe señalar que el balance hídrico mensual fue utilizado para determinar el volumen superficial de salida de la Ciénega con la finalidad de obtener todas las variables que intervienen en la hidrodinámica. Sin embargo, dentro de este volumen se consideraron también las salidas subterráneas del sistema lagunar.

Tabla 10. Resultados obtenidos del balance hidrológico.

Mes	Volumen de entrada (hm ³)				Volumen de salida (hm ³)		
	WM	DR	P	Q _{SUB}	ET	Q _{SM}	dV/dt
nov-14	12.08	0.17	0.00	0.0285	6.69	5.58	0.00
dic-14	12.43	0.32	0.10	0.0279	3.89	9.54	-0.56
ene-15	12.04	0.55	0.06	0.0272	5.07	5.53	2.08
feb-15	10.95	0.66	0.01	0.0280	5.02	6.15	0.48
mar-15	11.95	0.82	0.07	0.0282	8.42	4.64	-0.19
abr-15	10.41	0.78	0.00	0.0283	9.53	3.25	-1.58
may-15	11.47	0.70	0.08	0.0293	10.69	2.01	-0.44
jun-15	11.27	0.53	0.21	0.0276	12.23	0.53	-0.73
jul-15	11.03	0.39	0.15	0.0302	12.57	0.26	-1.23
ago-15	10.83	0.29	0.04	0.0302	12.00	-	-0.81
sep-15	11.65	0.23	0.10	0.0285	9.25	1.06	1.70
oct-15	11.72	0.23	0.00	0.0290	8.07	1.74	2.17
Total	137.81	5.67	0.80	0.343	103.44	40.29	

7.8. BALANCE DE MASA

El balance de masa consistió en determinar la cantidad de partículas suspendidas que ingresaron, se retuvieron dentro del sistema lagunar; y que salieron de forma superficial. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11, y de ella se determinaron los siguientes aspectos.

1. Las entradas de STD por el WM son consideradas también como de condición normal, debido a que durante el estudio se observó un ingreso mayor a las 28.03×10^3 ton de partículas suspendidas.
2. Por medio del DR ingresaron 15.48×10^3 ton de STD, y de igual forma a los volúmenes de entrada de agua, estuvieron en función de régimen de riego agrícola aledaño.

3. Se calculó que dentro del sistema lagunar la concentración media de STD fue de 2.84 g L⁻¹ la cual, se encuentra dentro del límite de tolerancia para que la vegetación se mantenga con vida. La media máxima de 3.28 g L⁻¹ se registró en diciembre y se observó un incremento de 2.52 a 3.03 g L⁻¹ durante abril a agosto; este último relacionado al incremento de ET durante ese periodo. Por otro parte, la mayor concentración se registró en diciembre, periodo en el cual la ET fue menor, sin embargo, se estimó que durante ese periodo salió el mayor volumen de agua superficialmente.
4. Con excepción de agosto, el resto de los meses fue extraído material suspendido superficialmente, sin embargo, se observó que durante mayo a octubre las concentraciones de salida estuvieron por encima de los 16.08 g L⁻¹.
5. La concentración de STD del sistema lagunar no estuvo totalmente en función a la cantidad de partículas que ingresaron por el WM y el DR. No obstante las salidas de agua por ET pudieron influir en esta variabilidad mas no presentaron un comportamiento similar.

Tabla 11. Resultados obtenidos del balance de masa.

Mes	STD de entrada (ton)			SDT Ciénega (g L ⁻¹)	STD de salida	
	WM	DR	Total		ton	g L ⁻¹
nov-14	33,435	461	33,896	3.14	33,896	6.07
dic-14	32,620	847	33,467	3.28	35,301	3.70
ene-15	28,026	1,432	29,458	3.02	23,175	4.19
feb-15	29,036	1,717	30,753	2.62	29,501	4.80
mar-15	34,156	2,153	36,309	2.58	36,800	7.93
abr-15	28,539	2,085	30,625	2.52	34,598	10.64
may-15	32,527	1,920	34,447	2.61	35,586	17.66
jun-15	32,644	1,491	34,135	2.75	36,132	68.31
jul-15	31,294	1,143	32,437	2.96	36,071	141.33
ago-15	30,446	844	31,290	3.03	33,745	-
sep-15	32,001	692	32,693	2.95	27,687	26.09
oct-15	32,908	696	33,604	2.60	27,965	16.08
Total	377,632	15,482	393,115	Promedio 2.85	390,457	Promedio 8.88

Según el estudio realizado en el 2010, durante la reducción del caudal de entrada debido la reactivación de la PDY no se observaron incrementos considerables en la concentración del agua del sistema lagunar. Sin embargo, cabe señalar que durante los meses más cálidos, los STD de entrada fueron menores (Lomeli *et al.* 2015b). Considerando lo anterior, las concentraciones de partículas suspendidas en el humedal se encuentran en equilibrio siempre y cuando se disminuyan los STD en volúmenes de agua reducidos.

7.9. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

7.9.1. ESCENARIO ACTUAL

Según los resultados obtenidos la Ciénega es un ecosistema que se encuentra en equilibrio hidrodinámico, y debido a las aportaciones de agua que ingresan por medio del WM, es posible mantener sus SE. Durante este estudio no se presentaron reducciones considerables de volumen dentro del balance hídrico, por lo tanto se considera que en la actualidad el ecosistema y su hidrodinámica se encuentran en equilibrio o en estado normal (Figura 30). Cabe mencionar que la vegetación – uno de los principales componentes de este humedal – se mantiene debido a su tolerancia a la salinidad presente en el cuerpo lagunar. No obstante, el intercambio de entradas y salidas de agua, permitió durante el invierno limpiar el humedal de contaminantes, brindando a su vez hábitat para aves playeras a través de los escurrimientos superficiales.

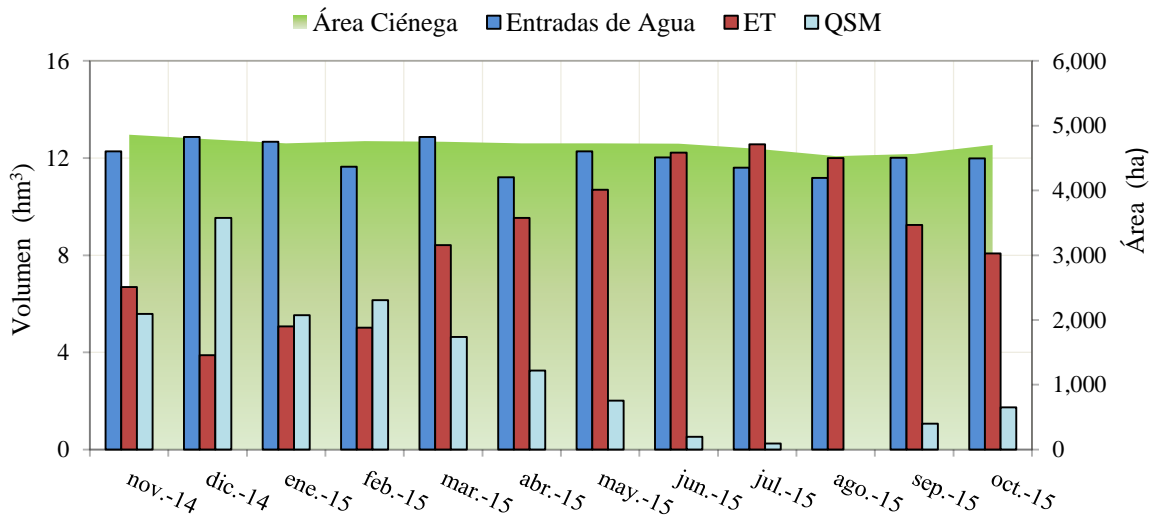


Figura 30. Relación de resultados obtenidos con el balance hídrico durante 2014-2015.

7.9.2. ESCENARIO #1. REDUCCIÓN EN EL CAUDAL DE ENTRADA

Los resultados del primer escenario consideraron la reducción de volumen en el afluente principal WM. Sin embargo, durante el periodo de estudio 2014-2015 no se presentaron disminuciones en el caudal de entrada que permitieran realizar un escenario de reducción de agua en el WM (Figura 30). Por lo tanto, este escenario fue creado a partir de los datos obtenidos durante abril y agosto del 2010 por Lomeli, Ramírez-Hernández, y Zamora-Arroyo (2011); periodo en el cual fue llevada a cabo la prueba piloto de la PDY (2010-2011).

La reducción del WM se presentó de la siguiente manera: inicialmente en abril del 2010 ingresaron al sistema lagunar de la Ciénega 15.04 hm³ de agua, lo que representó un caudal promedio de 5.80 m³ s⁻¹ para ese mes; mientras que en agosto, el volumen de agua se redujo a 5.08 hm³, representando un caudal medio de 1.90 m³ s⁻¹. Durante este periodo el volumen proveniente del WM se redujo 9.95 hm³ (66%) y el caudal disminuyó 3.9 m³ s⁻¹, reflejando una reducción en el volumen de agua almacenado dentro del sistema lagunar de 7.35 hm³ (42%) y una reducción de 5.63 ha (12%) en el área del humedal (Figura 31).

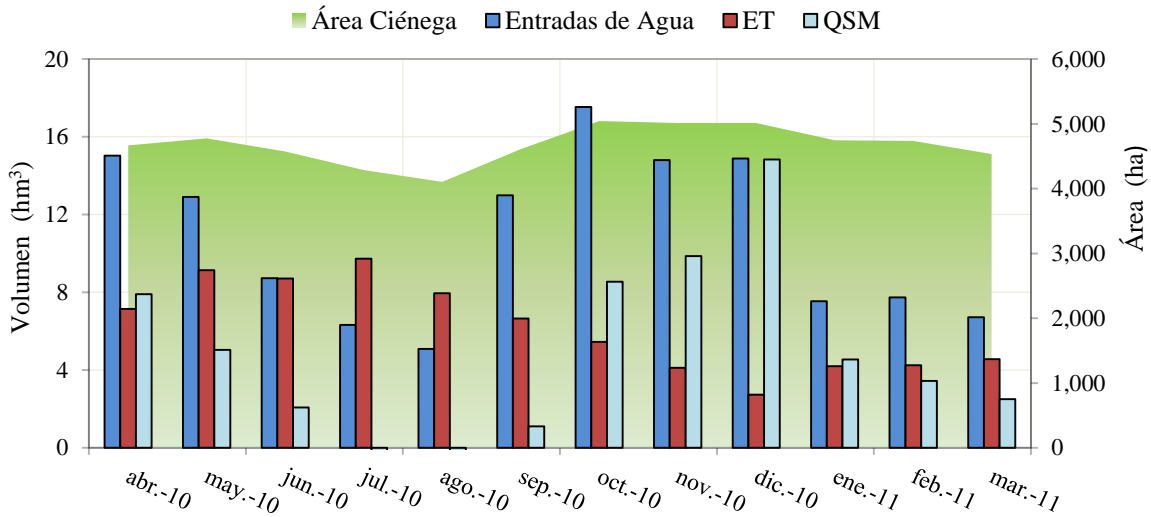


Figura 31. Relación de resultados obtenidos con el balance hídrico durante 2010 - 2011.

A diferencia de agosto la reducción del caudal en julio fue menor, se estimó que en este mes la descarga media fue de 2.36 m³ s⁻¹, sin embargo, de igual forma implicó una disminución en el volumen de almacenamiento del 32%, y una disminución del 8% del área total. Cabe mencionar que en julio y agosto el volumen superficial de salida fue inexistente y se registraron salidas de agua por ET arriba de los 7.96 hm³ mensuales. El intercambio de agua del sistema lagunar del humedal con las mareas altas del Golfo de California no fue observado debido a la disminución del volumen de agua en el afluente principal así como altas tasas de ET, generando alteraciones en la ecohidrología de la marisma.

La disminución tanto de profundidad dentro del cuerpo lagunar así como de su extensión, y la desconexión de las salidas superficiales del sistema, son las principales afectaciones ecohidrológicas por la reducción del gasto del WM y el incremento de ET en verano. Sin embargo, cada laguna que conforma al humedal cuenta con sus propias características; sus niveles de agua responden de manera distinta al caudal de entrada del WM (Figura 28), así como a las salidas estacionales de ET. En algunas lagunas someras el

agua puede desaparecer por completo durante el verano como fue el caso del sitio R6, mientras que en las lagunas de mayor profundidad solamente se presentaron ligeras variaciones (Figura 29).

Según los resultados presentados en este estudio y el realizado durante el 2010, la mayor disminución del área fue obtenida para los meses de agosto y coincide con la inexistente salida de flujo superficial. Por cual, para permitir una conectividad del sistema lagunar con las mareas altas, e impedir alteraciones en la ecohidrología del humedal, se estimó que durante los meses más cálidos – principalmente julio y agosto – es necesario mantener el caudal de entrada del WM por encima de los $5.09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Cabe mencionar que el caudal estimado para mantener la conectividad de la Ciénega se encuentra en función a la temperatura correspondiente al periodo de estudio, pero podría variar posteriormente debido al incremento de temperatura global y en consecuencia al incremento de ET.

La disponibilidad de agua del WM ha permitido mantener y extender la superficie de marisma del humedal por más de 40 años. Sin embargo, una consecuencia secundaria del cambio climático sería la reducción del envío de agua por este afluente, ya que al haber menos precipitación, mayor temperatura en la cuenca y una mayor demanda por el crecimiento de la población y sus actividades, se ejercería presión sobre la utilización del agua del WM y se buscarían usos secundarios de la misma. Cabe mencionar que los ríos están sujetos a la disminución de su caudal por el cambio climático: reducción de lluvia y aumento de la evaporación, pero también, el agua que hasta ahora se ha considerado como de desecho, está siendo considerada (tanto en calidad, cantidad y disponibilidad) para ser utilizada; en su caso el agua del WM.

7.9.3. ESCENARIO #2. INCREMENTO DE TEMPERATURA

Durante este estudio la temperatura media anual calculada con los datos registrados in-situ fue de 21.7°C , presentando temperaturas máximas durante el verano de 44.9°C y de -2.6°C en invierno. No obstante, considerando como base la temperatura máxima mencionada anteriormente en conjunto con los modelos climáticos presentados por Cavazos & Arriaga-Ramírez, (2012), se estimó que para mediados y finales del siglo XXI las temperaturas en la Ciénega podrían alcanzar los 46.4 y los 49.9°C respectivamente.

Los resultados del tercer escenario toman en consideración los incrementos de temperatura antes mencionados, ya que estos modelos se encuentran proyectados en una superficie que incluye a la Ciénega. Estas diferencias a su vez, en conjunto con los registros de temperatura de la estación meteorológica, se utilizaron para determinar ET siendo a su vez incrementada la temperatura registrada durante el periodo

2014-2015. Cabe mencionar que los incrementos en la temperatura implican un aumento potencial en la ET y una considerable reducción en el agua disponible en el noroeste de México (Magana *et al.* 2012). Ya sea en tasa o en magnitud, los cambios en la temperatura podrían afectar de gran manera las condiciones del clima, los ecosistemas y las actividades socioeconómicas (Stern. 2007).

Evapotranspiración y Pérdida de Conectividad Superficial

Durante el periodo de estudio 2014-2015 se observó que el sistema lagunar perdió conectividad superficial únicamente en agosto (Figura 33). La ET extrajo del cuerpo lagunar el 100% del agua que ingreso por el WM (>11.18 hm³) y 0.82 hm³ del agua ya almacenada en el humedal. Por otra parte, los resultados del escenario proyectado para los próximos 50 años presentaron una pérdida de conectividad en junio, julio y agosto. Durante estos meses el agua que ingresó al humedal por el WM fue extraída en su totalidad por la ET, así como 1.01, 1.86 y 1.75 hm³ del cuerpo lagunar, respectivamente. Finalmente, para el escenario de incremento de temperatura para finales del siglo XXI se estima que durante mayo, junio, julio y agosto, el agua que ingresa al humedal es extraída en su totalidad por ET incluyendo: 0.80, 2.83 y 3.82 hm³ (para julio-agosto) de las lagunas. Cabe mencionar que en estos meses incluyendo septiembre la conectividad superficial es nula, y que en este último las extracciones por ET son menores a las entradas del WM.

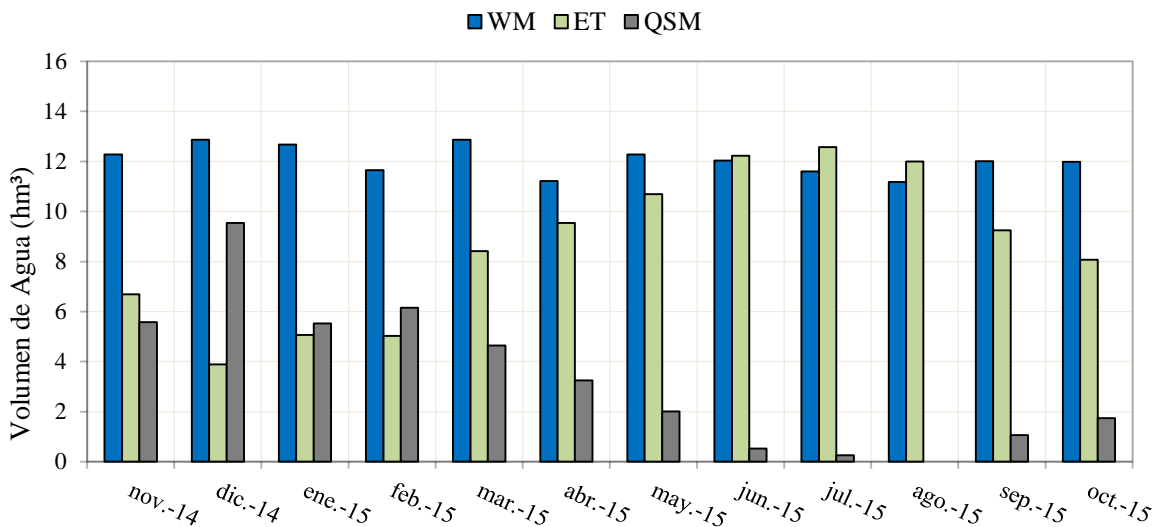


Figura 32. Escenario hidrológico del sistema lagunar calculado con la temperatura actual.

La ET representa una variable de suma importancia en la hidrodinámica del humedal debido a su capacidad de extraer por completo en verano el agua que ingresa por el WM y parte del agua almacenada en el sistema lagunar. Sin embargo, durante este estudio se observó que en junio y julio, a pesar de que la

ET extrajo en su totalidad las entradas por el WM, el agua almacenada durante meses previos permitió la conectividad superficial del complejo lagunar con las mareas altas del golfo (Figura 33). Durante diciembre, se presentó una mayor conectividad y grandes volúmenes de agua extraídos superficialmente.

Tomando en consideración que el volumen que ingresará a la Ciénega por medio del WM mantendrá volúmenes similares a los obtenidos durante el 2014-2015, y que la región tendrá un incremento de temperatura de 1.5°C en los próximos 50 años, la hidrodinámica del humedal será modificada (Figura 34). A partir de junio la ET será mayor al agua que ingrese al humedal y continuara de esa manera hasta agosto. Por otra parte, el resto del año se presentará conectividad con las mareas del Golfo de California, principalmente en diciembre. La falta de conectividad del sistema lagunar durante tres meses, como se presenta en el escenario de los próximos 50 años, generaría severas implicaciones en la superficie vegetal y los niveles de agua en zonas someras.

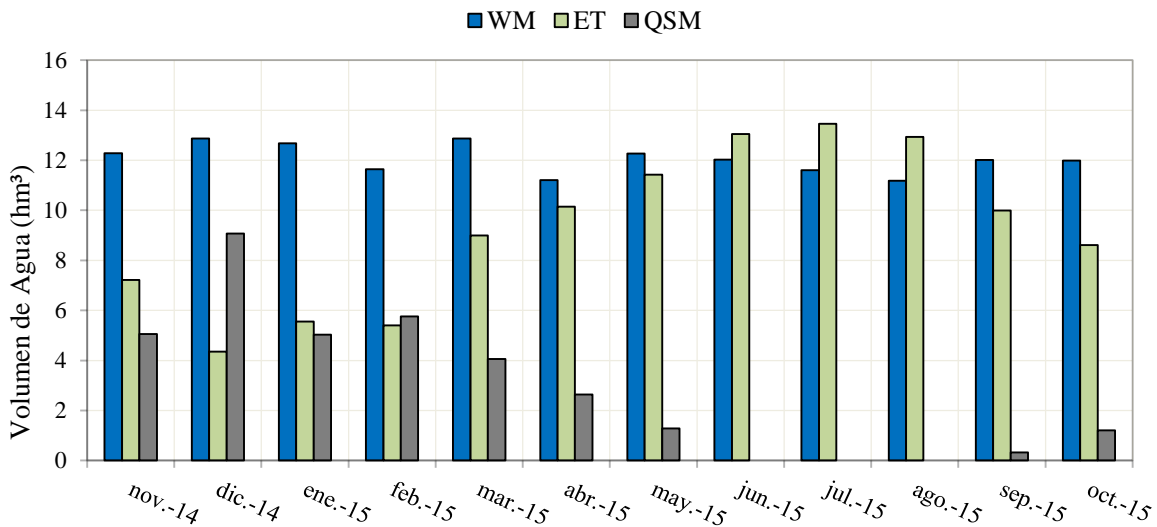


Figura 33. Escenario hidrológico calculado con un incremento de temperatura de 1.5°C.

En relación al escenario climático para finales del siglo XXI en el cual se estima que la temperatura en la región incrementara 5°C, se observan alteraciones hidrodinámicas en el cuerpo lagunar del humedal. Por ejemplo, la conectividad superficial se perdería en su totalidad durante mayo a septiembre, y en octubre, se observan salidas superficiales de agua menores a 0.01 hm³ (Figura 34).

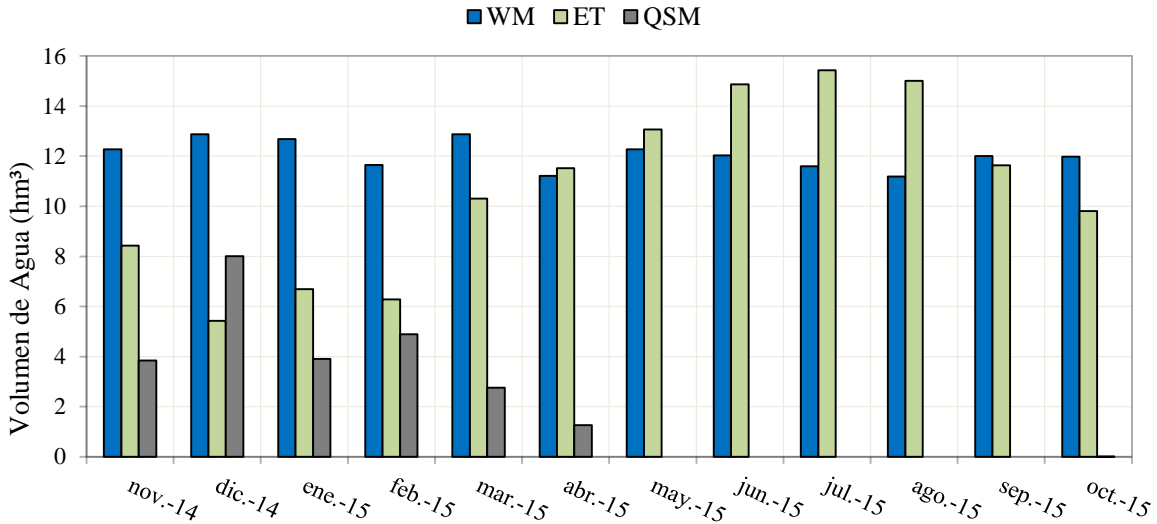


Figura 34. Escenario hidrológico calculado con un incremento de temperatura de 5°C.

En condiciones actuales y en los escenarios climáticos de los próximos 50 y 100 años, se observó la desconexión superficial durante el verano. La extracción de agua por ET llevada a cabo en el 90% de la superficie del humedal durante los meses más cálidos en conjunto con la disminución del afluente principal, es una amenaza para la ecohidrología, ya que además de extraer el agua del sistema lagunar, reduce e incluso desaparece el nivel de agua en las lagunas de menor profundidad localizadas en las orillas.

7.10. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Los resultados que a continuación se presentan incluyen los SE identificados mediante bienes y/o servicios que los usuarios o beneficiarios obtienen de la Ciénega para cada una de las zonas descritas en el capítulo 2. Los SE identificados en cada comunidad aledaña se presentan desglosados en el anexo 6.

7.10.1. ZONA DE AMORTIGUAMIENTO

Según los resultados obtenidos de las entrevistas, la Ciénega brinda diversos SE que en algunos casos son perceptibles principalmente para las comunidades aledañas dentro de la zona de amortiguamiento.

SE de Aprovechamiento

Los SE de aprovechamiento identificados en esta zona consisten en dar soporte al ganado que consumen mediante la provisión de agua dulce y forraje para su alimentación. Las actividades agrícolas por su parte, no se realizan dentro de la marisma del humedal, sin embargo forman parte de la zona de amortiguamiento aledaña a la Ciénega⁵. El aprovechamiento de agua dulce directamente de la marisma fue identificado por los entrevistados como una práctica que actualmente no se realiza ya que el agua es extraída directamente de pozos. En el caso del ejido Mesa Rica esta comunidad cuenta con un suministro de agua proveniente del Distrito de Riego modulo número 3. Por otra parte la extracción de fibras y combustibles también se ha identificado en la zona de amortiguamiento aledaña, por ejemplo, el mezquite es utilizado para construir cercos, y como leña; ya sea para cocinar o para calentarse durante el invierno. El tule es utilizado también para la construcción, y en algunos casos es comercializado con fabricantes de cohetes. El aprovechamiento de materiales genéticos – como son las plantas medicinales – es un SE identificado que incluye distintas especies, entre ellas: la hierba del manso (utilizada para curar inflamaciones); el canutillo (utilizada para el tratamiento de riñones); y cosahui (que regula el azúcar en la sangre). Estos materiales genéticos no se localizan dentro del cuerpo lagunar de la zona de amortiguamiento, pero si en sus márgenes que colindan con la superficie terrestre.

SE de Regulación

Los SE de regulación dentro de la zona de amortiguamiento fueron identificados mediante la percepción de la temperatura con respecto a la de otros sitios alejados a la marisma, así como la calidad del aire.

⁵ Durante las entrevistas se observaron cabezas de ganado en las cercanías de la marisma, pero según comenta el comisariado ejidal de El Doctor, estas no ascienden a más de 100 ejemplares.

Según las entrevistas realizadas, las personas sienten un cambio de temperatura y una mejor calidad del aire (más limpio) cuando están en sitios aledaños a la Ciénega. Debido a la escasa infraestructura y a la cercanía con el Golfo de Santa Clara, las personas entrevistadas consideran que hay una mayor presencia de viento, y es más fresco que en la ciudad. Por otra parte, en los márgenes aledaños a la Ciénega, cada comunidad (con excepción de Mesa Rica) recibe incentivos por servicios ambientales⁶ por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR).

El SE de regulación del régimen hidrológico se lleva a cabo dentro y fuera de la zona de amortiguamiento. En el primero de los casos ha sido percibido desde sus por las comunidades locales de la Ciénega mediante el abastecimiento de agua de desecho agrícola inicios a través del DR y el canal WM. Por otro lado, la recarga del acuífero se observa mediante la extracción de agua de pozos, además de manantiales que abastecen los humedales de El Doctor, mismos que descargan hacia las zonas bajas de la marisma. Como parte de los SE de regulación, la Ciénega funciona como una barrera ante la erosión y los desastres naturales; la vegetación existente permite la retención de los suelos ante la presencia de mareas altas e impide la intrusión del agua de mar en zonas bajas aledañas a las comunidades, cabe señalar que también está relacionado al gradiente topográfico que presenta la marisma (Lomeli. 2013). Los SE de regulación ante desastres naturales han sido identificados durante los eventos de precipitación, ya que se ha observado que los escurrimientos superficiales se dirigen a la marisma evitando con ello inundaciones.

El control de contaminantes y detoxificación ha sido identificado por usuarios de la Ciénega además de investigadores que han monitoreado la marisma. Este SE de regulación se percibe con la diferencia de salinidad de las lagunas centrales y en los márgenes de la marisma (principalmente lagunas someras), ya que en estos últimos la salinidad es mucho mayor, mientras que dentro de las lagunas centrales disminuye. Además, los usuarios comentan que se perciben cambios en el aroma del agua durante la pesca y la caza.

SE Culturales

Los SE culturales en la zona de amortiguamiento se presentan en distintos sitios del humedal y se perciben de la siguiente manera. Dentro de la marisma existen lagunas con extensión-profundidad adecuada que se encuentran delimitadas por el polígono de la UMA Luis Encinas Johnson y que son utilizadas para realizar actividades recreativas como pesca deportiva y ecoturismo (principalmente). Debido a las condiciones del

⁶ El pago por servicios ambientales fue diseñado para proveer incentivos económicos a los dueños de terrenos forestales (ejidos, comunidades y pequeños propietarios), de esa manera apoyar las prácticas de conservación y evitar el cambio de uso del suelo (deforestación) de los bosques.

sitio y su accesibilidad, esta zona es mayormente utilizada por visitantes foráneos (menciona el comisariado ejidal). En la zona de amortiguamiento fuera de la marisma, donde se encuentran las UMAs de cada comunidad, también es común la realización de actividades cinegéticas.

Históricamente el Golfo de California ha sido un sitio productivo y concurrido para actividades como la pesca y el turismo. Comparte algunas mareas altas acompañadas de fuertes vientos con la Ciénega, las cuales arriban a través de una zona intermareal y crean un hábitat muy particular para aves endémicas y migratorias, así como algunas especies de peces. Esto a su vez ha conllevado a realizar actividades de aprovechamiento de manera controlada desde el año de 1993, sin embargo, los pobladores locales comentan que antes de que esta región fuera decretada como parte de la Reserva de la Biósfera, usuarios foráneos la utilizaban ilícitamente para su beneficio generando molestias entre los habitantes aledaños.

Los SE culturales referentes a la educación se presentan en sitios donde además se permiten realizar actividades turísticas, como las lagunas del ejido Johnson y en el Doctor. Por su parte algunas ONGs han llevado a cabo capacitaciones y talleres a usuarios locales, así como eventos informales de educación ambiental a usuarios provenientes de Mexicali (Baja California) y San Luis Río Colorado (Sonora).

El aprovechamiento del humedal para realizar actividades recreativas ha jugado un rol muy importante para que los usuarios desarrollen un sentido de pertenencia del sitio. Sin embargo, el valor paisajístico y su apreciación no eran relevantes, por lo que el interés entre los locatarios era mínimo. La visión de las ONGs para aprovechar y conservar del sitio, ha permitido abrir el panorama entre los beneficiarios (ejidatarios principalmente), y de esa manera fomentar la realización de actividades como el turismo cinegético, ecoturismo, pesca deportiva, entre otras.

La mayor parte de los usuarios que visitan la Ciénega durante el año provienen de la zona de amortiguamiento, sin embargo, durante las temporadas de caza y pesca, el número de usuarios extranjeros provenientes de la zona internacional incrementa y aporta ingresos a las comunidades.

De los servicios que ofrecen los ejidatarios, la función de guía dentro de la marisma es una de las principales, ya que actividades como la cacería, pesca deportiva y recorridos en canoa, requieren de su conocimiento en la zona. Además esto ha permitido controlar las actividades y evitar problemáticas que se puedan presentar. Otros servicios que ofrecen es el de arrendamiento para los equipos de transporte de los usuarios externos, así como la renta de viviendas que permitan una mayor proximidad al humedal.

SE de Soporte

La Ciénega es reconocida internacionalmente por su importancia ecológica. Los SE de soporte a la biodiversidad que brinda incluye su funcionalidad como hábitat para especies residentes, migratorias, en peligro de extinción y amenazadas. Este SE ha sido identificado por todos los usuarios y es considerado como uno SE de mayor relevancia. La flora y fauna localizada dentro y fuera de la marisma ha sido identificada en el Programa de Manejo de la Reserva (CONANP. 2007).

La formación de suelo como parte de los SE de soporte, es identificado por todos los usuarios en el sitio de descarga del agua del WM. Los entrevistados han observado la presencia de sedimentos que, en la actualidad, forman pequeñas islas de sedimento; que desafortunadamente ha contribuido a la acumulación de residuos sólidos. Por otro lado, la acumulación de materia orgánica es perceptible durante el invierno, ya que vegetación como sargazo y tule se compactan y se acumulan en el fondo de las lagunas.

El servicio de soporte a polinizadores fue identificado en la zona de amortiguamiento, dentro y fuera de la marisma; según las entrevistas realizadas se ha reconocido la presencia de abejas, y algunas de estas comunidades incluso las aprovechan para realizar apicultura.

7.10.2. ZONA NÚCLEO

SE de Aprovechamiento

Debido a que dentro de esta zona está prohibido extraer cualquier tipo de especie, este SE debería descartarse. Sin embargo, según la información recopilada durante las entrevistas, algunas veces se han observado cacerías ilegales en esos sitios y extraen a especies para autoconsumo. El resto de los SE de aprovechamiento no fueron identificados en esta zona por ninguno de los usuarios.

SE de Regulación

Al igual que en la zona de amortiguamiento, en la zona núcleo también se presentan temperaturas distintas a sitios alejados a la Ciénega. Según la información recabada en la etapa de campo, en esta zona también se percibe una mejor calidad del aire. Por otra parte, en toda la región de la marisma que se encuentra en contacto con las mareas altas, la vegetación funciona como una protección ante la erosión; sin embargo, las zonas lodosas exteriores sí son susceptibles a estas variaciones.

SE Culturales

Los SE culturales identificados hicieron referencia a los servicios educativos de investigación. Así mismo, el sitio es reconocido por su atractivo estético, este SE es valorado tanto por los usuarios locales, como por aquellos que tienen la oportunidad de recorrer la zona. Al igual que los SE culturales identificados en la zona de amortiguamiento, estos son valorados por todos los usuarios consultados.

SE de Soporte

Debido a los procesos ecosistémicos que se llevan a cabo en la zona núcleo, uno de los principales SE de soporte, refiere a la preservación de la biodiversidad; principalmente a las aves playeras migratorias.

Dentro de esta región descargan los efluentes de la marisma del humedal, los cuales incluyen: agua, sedimentos y materia orgánica. Según lo observado durante los monitoreos hidrológicos en esta zona, se registraron formaciones de suelos con materia orgánica que son modificados durante los intercambios de agua, mismos que se presentan durante los eventos de mareas altas que alcanzan arribar al sitio.

7.10.3. ZONA INTERNACIONAL

Para esta zona únicamente se identifican los SE de soporte a la biodiversidad y los culturales de educación. El SE de soporte se proporciona debido a que la Ciénega se encuentra sobre la Ruta Migratoria del Pacífico y funciona como un sitio de descanso para aves que viajan alrededor del continente. Por otro lado, todas las categorías de entrevistados coinciden en que la investigación realizada en el humedal es reconocida internacionalmente y ha generado interés de los investigadores de otros países para su estudio y su preservación (Glenn *et al.* 2013; Nelson *et al.* 2013).

7.11. PANORAMA ACTUAL E IMPORTANCIA DE LOS SE DE LA CIÉNEGA

El SE identificado como de mayor importancia que ofrece la Ciénega fue el de soporte a la biodiversidad (Tabla 12). Este resultado refleja la importancia de las funciones ecológicas que brinda la Ciénega al ser considerado internacionalmente como un hábitat crítico en la región entre México y los E.U.

A nivel continental o dentro de la zona internacional como es referida en este estudio, la Ciénega es uno de los sitios de mayor importancia para las aves acuáticas migratorias. Además, provee hábitat para especies protegidas, como el Palmoteador de Yuma (75% de la población total), el Ralito Negro, el Rascón Limícola y el Pez Cachorrito del Desierto; identificado como la única especie de pez endémica de agua dulce remanente del Delta del Río Colorado. Debido a su importancia ecosistémica, la Ciénega forma parte de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, y además es considerada como sitio Ramsar (Lomeli *et al.* 2015b).

El resto de los SE también son importantes, sin embargo, se consideran a baja escala por la escasa población de las comunidades aledañas, por ejemplo, el SE de aprovisionamiento (principalmente de alimentos), se deriva de productos obtenidos con la pesca y la caza. No obstante, esta actividad se maneja a baja escala, ya que se le da prioridad a la realización de actividades recreativas y cinegéticas; aportando beneficios económicos a las comunidades y a los pobladores aledaños que brindan el servicio de guía.

Los SE culturales – de recreación – son considerados como los segundos servicios de mayor representatividad (Tabla 12). Son importantes para los habitantes de la zona que se benefician del humedal de diversas formas, lo cual es valioso para su calidad de vida. Sin embargo, los SE culturales son aprovechados a muy baja escala, por ejemplo, en el caso del turismo, se ve limitado en función a la capacidad de carga⁷ del sitio, ya que no cuenta con la infraestructura necesaria para ser aprovechado. Aun así, el desarrollo de actividades recreativas y educativas, brinda, además de reconocimiento y difusión del sitio, un ingreso importante para algunas comunidades que tienen como objetivo su preservación.

Por otro lado, la importancia de los SE de regulación se da principalmente en académicos, investigadores y tomadores de decisiones que conocen sobre el funcionamiento de los ecosistemas de humedal, y no por los usuarios locales. La función de la Ciénega en la mitigación del cambio climático mediante la captura

⁷ Número máximo de visitantes que puede contener un determinado espacio / recurso / destino turístico; en otras palabras el límite más allá del cual la explotación turística de un recurso / destino es insostenible por perjudicial García, M.; De la Calle, M. Capacidad de carga en grandes recursos turístico-culturales. *Anales de Geografía*; 2012.

y retención de gases de efecto invernadero; así como la detoxificación del agua mediante el control de contaminantes y exceso de nutrientes, son SE de regulación que no son perceptibles a simple vista y no se le da la importancia que se merecen.

La belleza paisajística de la Ciénega se percibe por los usuarios y/o beneficiarios de este impresionante ecosistema. A diferencia de SE de regulación, por ejemplo, se le da un mayor valor a lo que se percibe como un SE cultural estético y no a los beneficios que genera a gran escala (retención del carbono), por lo tanto, durante este estudio es identificado como el tercer SE de mayor importancia de la Ciénega.

Tabla 12. SE más representativos para los usuarios y/o beneficiarios.

Servicios Ecosistémicos		ID																						
Categoría	Sub-categoría	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	ñ	o	p	q	r	s	t	u	
Aprovisionamiento	Alimentos	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x			x	x		x	x		x	x	x
	Agua dulce							x				x												
	Fibras y combustibles	x	x	x	x				x	x		x												
	Productos bioquímicos																							
	Materiales genéticos	x	x	x	x				x															
Regulación	Regulación del clima	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x			x	x			x	
	Régimen hidrológicos	x	x	x				x		x	x		x	x	x									
	Control de contaminantes y detoxificación				x		x	x	x	x	x	x	x			x	x							
	Protección ante la erosión	x	x	x	x		x				x						x	x						
	Desastres naturales	x	x	x	x						x						x	x						
Culturales	Espirituales y de inspiración	x	x	x	x		x		x	x	x		x		x	x	x			x				
	Recreativos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Estéticos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Educativos	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x				x			x
Soporte	Biodiversidad	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	Formación de suelos	x	x	x	x			x	x		x		x	x										
	Ciclo de nutrientes						x	x	x		x		x			x								
	Polinización	x	x	x	x			x			x		x				x							

Los SE que son brindados a través de la Ciénega promueven la creación de programas de apoyos económicos que el gobierno otorga a las comunidades locales. Algunos son otorgados por CONAFOR, el Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible (PROCOCODES) de la CONANP, entre otros. Cada comunidad tiene una mesa directiva y un comisariado ejidal que se encarga de obtener estos recursos por medio de estrategias, en la cuales se incita la participación de los pobladores locales.

7.12. IMPLICACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS SE

La vulnerabilidad en la ecohidrología de la Ciénega concierne a la reducción en el volumen de entrada del WM durante los meses de verano, causando reducciones en los niveles de agua del sistema lagunar. En consecuencia los SE de aprovisionamiento en la zona de amortiguamiento se verían afectados, por ejemplo, el ganado que consumen las comunidades de esa zona, perderían la fuente de alimento en los márgenes de la marisma para subsistir (forraje y agua). Esta deducción se presencié durante agosto (2015) en el R6, donde incluso el agua de la laguna desapareció. Otro SE identificado como vulnerable sería el de aprovisionamiento del tule, ya que si la profundidad en las lagunas disminuye se incrementaría la salinidad e impediría la regeneración de esta planta una vez extraída. Así mismo el aprovisionamiento de materiales genéticos – como es el caso de la hierba del manso – también podría verse afectado.

Por su parte, los SE de regulación se encontrarían vulnerables debido a la pérdida de conectividad del sistema lagunar con el intercambio de mareas, ya que la salinidad en la Ciénega incrementaría y se reduciría la superficie vegetal. La reducción de vegetación impactaría a los SE de regulación de temperatura, protección ante la erosión, así como al servicio de control de contaminantes y detoxificación. Cabe mencionar que la vegetación que compone a la Ciénega, da soporte a la existencia de estos servicios, principalmente en la marisma dentro de las zonas núcleo y de amortiguamiento.

La disminución de profundidad en las lagunas – principalmente en la zona de amortiguamiento – donde se llevan a cabo actividades como la pesca deportiva y el ecoturismo, es una amenaza hacia la permanencia de los SE culturales de recreación. Además, actividades como la cacería cinegética se limitarían en pequeñas superficies del cuerpo lagunar, ya que como se comentó previamente, algunos sitios podrían incluso desaparecer. Teniendo consecuencias como la ausencia de usuarios provenientes de la zona internacional. Por su parte, los SE culturales referentes a la educación también serían afectados, ya que se podrían perder los sitios clave para su realización, sin embargo, a su vez esto podría generar un mayor interés para la comunidad científica. La afectación de estos servicios se reflejaría principalmente en las zonas de amortiguamiento e internacional, ya que los impactos en los servicios estéticos, espirituales y de inspiración podrían presenciarse en las tres zonas debido a la degradación del ecosistema.

Ambos escenarios analizados en este estudio generarían graves consecuencias en los SE de soporte. En el caso del hábitat que proporciona el humedal, depende del equilibrio hidrológico del sistema lagunar; de no ser así, se generaría la pérdida del mismo para especies residentes, migratorias, en peligro de extinción

y amenazadas. Por ejemplo, el hábitat del pez Cachorrillo del Desierto podría desaparecer por completo en aguas someras ubicadas en los márgenes de la marisma, lo que lo obligaría a cambiar de sitio para subsistir. Por otro lado, en la zona núcleo (fuera de la marisma), si se pierden las salidas superficiales durante el invierno, las aves playeras y migratorias no podrían utilizar a la Ciénega como área de descanso; lo que impactaría a los SE de soporte internacionales. Por su parte, la retención de sedimentos y la acumulación de materia orgánica incrementarían debido a la inexistencia de estas salidas. De manera general la reducción en el abastecimiento de agua a la Ciénega podría modificar el ciclo de los nutrientes así como las condiciones físico-químicas del ecosistema, y esto a su vez, provocar que las especies emigren a otros sitios o desaparezcan. Por lo tanto, mantener una comunicación superficial entre los flujos de salida superficial y las mareas del Golfo de California permitiría evitar que el humedal se convierta en un cuerpo de agua hipersalino, sin la vegetación actual y sin los SE que actualmente brinda.

Teniendo en consideración que el SE cultural-estético de la Ciénega fue identificado como uno de mayor importancia, el cambio climático podría en un futuro influir en esa deducción. Esto se debe a que la relación ecohidrológica del humedal al no estar en equilibrio deterioraría las condiciones del ecosistema, como es su belleza paisajística. Esto se observó en julio y agosto del 2010 durante la reducción del afluente del WM y la disminución de los niveles de agua en los márgenes del humedal (Figura 35).



Figura 35. Reducción de nivel de agua en el margen oeste de la Ciénega durante el mes de agosto, 2010. Imagen tomada por Zamora-Arroyo, 2010.

CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN

La integración de conceptos como ecohidrología, cambio climático y SE, para comprender las interrelaciones biofísicas existentes en un humedal, enfatiza la importancia que han tomado estos ecosistemas alrededor del mundo para su estudio y preservación. No obstante, su aprovechamiento se encuentra vinculado al equilibrio entre los procesos hidrodinámicos de los cuales depende, y su respuesta ante posibles amenazas derivadas por el cambio climático.

A pesar de que los humedales juegan un papel sumamente importante a nivel mundial por los SE que ofrecen, los cambios en el uso de suelo así como la excesiva extracción de agua, están reduciendo su extensión y el número de especies residentes con mayor rapidez que en otros ecosistemas (Ramsar. 2009d). La Ciénega por su parte cuenta con un abastecimiento constante de agua, así como una protección permanente de la Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, lo que le ha permitido prevalecer y conservar los distintos SE que brinda. El apropiado manejo de la CONANP en apoyo con las organizaciones no gubernamentales y civiles, así como las comunidades locales, ha creado un sentido de pertenencia del humedal por medio de prácticas, servicios e incluso capacitaciones. Por otro lado, la inapropiada delimitación de las UMAs y el abuso de confianza de los usuarios ante los prestadores de servicios, ha generado algunos conflictos entre los locatarios debido a la irregular realización de prácticas cinegéticas en sitios restringidos e incluso, dentro de propiedades ajenas.

Según mencionan Mitsch & Gosselink, (2000), la razón por la cual los humedales son protegidos legalmente tiene que ver con su valor ante la sociedad, no con los procesos ecológicos que en ellos ocurren. Sin embargo, la percepción de estos ecosistemas ante la sociedad, se encuentra relacionado con la preservación de los procesos ecológicos, ya que de ello deriva la continuidad de los SE. Por ejemplo, el valor actual de sus paisajes en conjunto con la vida silvestre que en ellos se desarrolla, es el resultado de una interacción entre las personas y la naturaleza. No obstante, si esta conexión es dañada o destruida, rara vez es posible restaurarla o en su caso recrearla (Clarkson *et al.* 2013).

Como se ha observado durante este estudio, los SE son las contribuciones que una comunidad biológica y su hábitat proporcionan al bienestar físico y mental de la población humana. Sin embargo, algunos de estos servicios son mayormente apreciados como beneficiosos para los seres humanos debido a que son bienes tangibles que reflejan la influencia de estos procesos en la prosperidad de la sociedad (Assessment. 2005). Los beneficios asociados a las funciones de los ecosistemas se concretizan en beneficios reales

una vez que son demandados, usados o disfrutados por la sociedad; es entonces cuando dichas funciones pasan a ser reconceptualizadas dentro de un marco eminentemente antropocentrista (Gómez-Baggethun & de Groot. 2007). Por lo anterior, los SE de regulación son relevantes en la medida en que sus beneficios son constantemente demandados por el ser humano y resultan vitales para su supervivencia.

La importancia de los SE de regulación del clima y la calidad del aire son valiosos aportes para las comunidades aledañas a la Ciénega. Estos procesos en conjunto con los de otros ecosistemas mantienen flujos de materia y energía entre sí; tales flujos afectan directamente la temperatura y las precipitaciones, y en la medida en que existe mayor ET, aumenta la precipitación a escala local. Además, los ecosistemas – principalmente humedales – son sumideros de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que en altas concentraciones afecta la temperatura global (Bates *et al.* 2008). Pese a la importancia internacional que esto conlleva, los SE de soporte a la biodiversidad, y culturales como son recreativos y estéticos, fueron identificados por un mayor número de usuarios durante este estudio. Esto a su vez resalta el sentido de pertenencia y el compromiso de las comunidades aledañas para preservar el hábitat y la continuidad de las actividades que aporten beneficios tangibles. Siendo así, que los SE no percibidos a simple vista o que no brinden algún beneficio directo, son menormente identificados por los usuarios.

Se espera que al ser modificado el ciclo hidrológico debido al cambio climático se aumente la presión sobre el recurso hídrico con adversas repercusiones para los seres humanos y el medio ambiente. Lo que en consecuencia traerá condiciones más extremas de precipitación que se traducirán en excesos (como inundaciones) y/o escasez (como sequías). Además incidirá de manera desfavorable en la calidad del agua impactando subsecuentemente en la salud pública (Gleick. 1993). La asignación del agua destinada a los ecosistemas, principalmente los binacionales como la Ciénega, podría definirse mediante el análisis del costo beneficio que los SE que ofrecen, por ejemplo, el costo que tendría tratar 1.0 m³ de agua de desecho. Sin embargo, en la actualidad el agua designada para el humedal se encuentra asegurada, y otros SE mayormente identificados son percibidos brindándole ese valor ecosistémico binacional.

La adaptación de la Ciénega ante eventos de reducción en el afluente principal como lo sucedido en el 2010, indicó la inminente degradación del ecosistema así como la capacidad de recuperación del mismo. Sin embargo, la subsecuente amenaza de la reactivación de la PDY aunado al incremento de temperatura, podría en un futuro colapsar el equilibrio ecohidrológico del humedal en cuanto al suministro y calidad del agua. Además de amenazar los flujos de agua excedentes de la marisma que permiten sostener los ecosistemas aledaños así como los SE que de ellos emanan (como el hábitat de aves playeras durante el

invierno). Con esto en consideración, el régimen de caudales de entrada y su calidad en cuestión, es determinante en la función de soporte de SE del humedal, y en las zonas lodosas fuera de la marisma.

Por lo observado en este estudio, la determinación de las características del medio físico incluyendo la hidrología, geología, variación climática, topografía y cobertura vegetal, en conjunto con la identificación de los SE, podría permitir coadyuvar con elementos verídicos a las medidas de conservación de un ecosistema. En el caso de la Ciénega, permitir preservar el hábitat de gran importancia que ofrece. Cabe mencionar que siendo el SE de soporte a la biodiversidad uno de los mayormente identificados – además del resto de sus funciones ecológicas – la Ciénega es considerado internacionalmente como un hábitat crítico en la región entre México y los E.U. y su análisis es fundamental para su conservación.

CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES

1. El balance hídrico mensual permitió determinar y cuantificar el régimen hidrológico del humedal, incluyendo las intensidades y tiempos de respuesta de las variables de entrada, salida y los cambios en el almacenamiento, las variaciones en la extensión de la marisma, así como las variaciones en el nivel del agua en las lagunas y el volumen de agua total almacenado.
2. El agua que ingresa por el canal WM es la principal fuente de abastecimiento de la Ciénega aportando el 95.19% del volumen total de agua al humedal. Por su parte, el DR que ingresó el 3.92%, la precipitación el 0.65% y las entradas subterráneas 0.24%, son consideradas como entradas de agua de poca aportación incapaces de soportar el ecosistema de la Ciénega.
3. Los datos reportados mensualmente por la CILA permitieron analizar las entradas superficiales del WM de forma continua evitando crear vacíos de información. De igual forma los registros automatizados de la estación meteorológica permitieron determinar las entradas al sistema hidrológico por precipitación incluyendo eventos locales.
4. Las mediciones automatizadas de profundidad del nivel de agua permitieron determinar que existe una relación directa entre la variabilidad del caudal en el WM y los cambios de volumen en el cuerpo lagunar. Sin embargo, a diferencia de la prueba piloto realizada en el 2010, en este estudio (2014-2015) los cambios fueron casi imperceptibles, lo que permitió observar el sistema hidrodinámico del humedal en condiciones normales y su comportamiento estacional.
5. Las variaciones en los niveles del agua dentro de la Ciénega presentaron una mayor intensidad en las zonas con aguas someras (principalmente en las orillas). Sin embargo, la intensidad y el tiempo de respuesta de cada cuerpo lagunar fue distinto. Los niveles de agua en las lagunas ubicadas en la zona central del humedal alineadas con la falla Cerro Prieto, son más estables que en los bordes este y suroeste, observándose una menor susceptibilidad a las variaciones en el caudal de entrada.
6. Bajo el escenario del estado actual (2014-2015) el ingreso de agua por el canal WM se mantuvo constante y en equilibrio, de tal manera que permitió mantener los niveles de agua con variaciones estacionales. En este estado la respuesta hidrológica permite tener un intercambio de agua con el mar suficiente para que los niveles de salinidad sean propicios para mantener la vegetación (tule).

7. El escenario de reducción de agua debido a la creciente demanda en la cuenca del Río Colorado, fue modelado con la respuesta ecohidrológica del sistema lagunar ante la reactivación de la PDY durante el período 2010-2011. Con ello se observó que una reducción del 66% en el volumen total de entrada podría reducir el volumen de agua almacenado en el humedal hasta en un 32%. En consecuencia, el cuerpo lagunar se desconectaría hidráulicamente impidiendo la salida superficial de agua hacia el Golfo de Santa Clara, incrementando la salinidad por ET. A su vez esto pondría en riesgo la continuidad los SE del humedal, principalmente el de hábitat.
8. El análisis ecohidrológico durante el año hidrológico 2014-2015 permitió observar que la Ciénega se encuentra en equilibrio hidrodinámico. Sin embargo, los incrementos regionales de temperatura para los próximos 50 y 100 podrían amenazarla del mismo modo que con la reactivación de la PDY desconectando superficialmente el cuerpo lagunar con las mareas altas del Golfo de California.
9. Dentro de la zonificación del área estudiada (zona núcleo, zona de amortiguamiento e internacional) se identificaron 17 de los 18 SE reportados en la literatura para humedales costeros. Sin embargo, la capacidad de la Ciénega de seguir brindando SE dentro y fuera de la marisma (principalmente en los márgenes del perímetro mojado) depende del constante abastecimiento de agua del canal WM.
10. Los SE mayormente identificados son el de apoyo a la biodiversidad, y culturales; estéticos y recreativos. Los SE de apoyo a la biodiversidad son identificados y valorados a nivel local, nacional e internacional, ya que son utilizados por especies de aves y peces endémicos y migratorias como hábitat y zona de descanso. Esto a su vez permite llevar a cabo SE culturales mediante la percepción estética del humedal y su consecuente aprovechamiento por medio de actividades de recreación. Por otro lado, siendo los SE de aprovisionamiento bienes tangibles para los residentes aledaños a la Ciénega, son mayormente identificados que los SE no visibles como los de regulación.
11. Este estudio definió la integración funcional de los procesos ecohidrológicos con los escenarios analizados, en conjunto con la identificación de los SE, permitiendo aportar elementos para el estudio, conservación y manejo sustentable de la Ciénega de Santa Clara. Sin embargo, ante una posible reducción en el afluente principal, se recomienda llevar a cabo el análisis de estos componentes a diferentes escalas superficiales e identificar los SE que podría preservarse en un futuro. Además, se recomienda integrar otras variables como el incremento del nivel del mar.

REFERENCIAS CONSULTADAS

FUENTES PRIMARIAS

ID	Persona Entrevistada	Categoría
a	La Flor del Desierto	Presidente de UMA - Ejidatario
b	Luis Encinas Johnson	Presidente de UMA - Ejidatario
c	Estación El Doctor	Presidente de UMA - Ejidatario
d	Mesa Rica	Presidente de UMA - Ejidatario
e	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas - México	Agente Gubernamental
f	Sonoran Institute - E.U.	Miembro de ONG
g	Pronatura Noroeste - México	Miembro de ONG
h	Pronatura Noroeste - México	Miembro de ONG
i	The Nature Conservancy - E.U.	Miembro de ONG
j	Centro Ecológico del Estado de Sonora	Investigador
k	United States Geological Survey - E.U.	Investigador
l	The University of Arizona - Department of Geosciences - E.U.	Investigador
m	Universidad Autónoma de Baja California - Mexicali - México	Investigador
n	Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo - Sonora - México	Investigador
ñ	Universidad Autónoma de Baja California - Ensenada - México	Investigador
o	The University of Arizona - Economic Impact Analyst - E.U.	Investigador
p	The University of Arizona - Soli, Water and Environmental Science - E.U.	Investigador
q	Mexicali - México	Usuario Turístico
r	Mexicali - México	Usuario Turístico
s	San Luis - México	Usuario Turístico
t	San Luis - México	Usuario Turístico
u	Valle de Mexicali - México	Usuario Turístico

FUENTES SECUNDARIAS

- 748, I. Hydrometry: Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or flots. 2007
- 9196, I. Liquid flow measurement in open channels: Flow measurements under ice conditions. 1992
- Abarca, F.; Ingraldi, M.; Varela-Romero, A. Observations on the desert pupfish (*Cyprinodon macularius*), Yuma clapper rail (*Rallus longirostris yumanensis*) and shorebird communities in the Cienega de Santa Clara, Sonora, Mexico. Nongame and Endangered Wildlife Program Technical Report, Arizona Game and Fish Department, Phoenix 20pp; 1993
- Adams, A.; Cox, A.L. Questionnaires, in-depth interviews and focus groups.17–34; 2008
- Aguilera-Taylor, I.; Domínguez, A.C.; Muñoz-Castro, G.; López-Hoffman, L. Servicios ambientales de una palma endémica: su importancia para la población rural. *Gaceta ecológica*:75-84; 2007
- All, J.D. Colorado river floods, droughts, and shrimp fishing in the upper gulf of California, Mexico. *Environmental management*. 37:111-125; 2006
- Allen, R.G.; Walter, I.A.; Elliott, R.L.; Howell, T.A.; Itenfisu, D.; Jensen, M.E.; Snyder, R.L. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation: ASCE Publications; 2005
- Amador, J.A.; Alfaro, E. Métodos de reducción de escala: aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica (REVIBEC)*:39-52; 2009
- Annan, K.A.; Unies, N. We the peoples: the role of the United Nations in the 21st century. United Nations, Department of Public Information New York; 2000
- Armstrong, H. Mapping migrant memories: crossing cultural borders. *Oral History Association of Australia Journal*, The:59; 1997
- Assessment, M.E. Ecosystems and human well-being: Washington, DC: Island Press; 2003
- Assessment, M.E. Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua. Island Press, Washington, DC www.MAweb.org; 2005
- Ayres, L. Semi-Structured Interviews. in: Oaks T., ed. *The Sage Encyclopedia of Qualitative Research Methods (Vol 1&2)*: Sage Publications; 2008
- Barnett, T.P.; Pierce, D.W.; Hidalgo, H.G.; Bonfils, C.; Santer, B.D.; Das, T.; Bala, G.; Wood, A.W.; Nozawa, T.; Mirin, A.A. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *science*. 319:1080-1083; 2008
- Bates, B.; Kundzewicz, Z.W.; Wu, S.; Palutikof, J. Climate change and water. Technical paper of the intergovernmental panel on climate change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp. ISBN 978-92-9169-123-4; 2008
- BenMeadows. Medidor de conductividad marca HOB0 modelo U24-001. 2016
- Bernick, K. Hidden dimensions: The cultural significance of wetland archaeology: UBC Press; 2011
- Boyd, J.; Banzhaf, S. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics*. 63:616-626; 2007

- Brander, L.M.; Bräuer, I.; Gerdes, H.; Ghermandi, A.; Kuik, O.; Markandya, A.; Navrud, S.; Nunes, P.A.; Schaafsma, M.; Vos, H. Using meta-analysis and GIS for value transfer and scaling up: Valuing climate change induced losses of European wetlands. *Environmental and Resource Economics*. 52:395-413; 2012
- Brander, L.M.; Florax, R.J.; Vermaat, J.E. The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature. *Environmental and Resource Economics*. 33:223-250; 2006
- Bujnovský, R. Evaluation of the ecosystem services of inland waters in the Slovak republic-to date findings. *Ekologia*. 34:19-25; 2015
- Burnett, E.; Kandl, E.; Croxen, F. *Ciénega de Santa Clara: geologic and hydrologic comments*. US Bureau of Reclamation, Yuma Projects Office, Yuma, Arizona; 1993
- Caballero, N. Revisión del marco conceptual sobre Servicios Ecosistémicos. *Servicios Ecosistémicos*:3; 2014
- Cáceres, L.J.G. *Técnicas de investigación en sociedad, cultura y comunicación*: Pearson Educación; 1998
- Camacho-Valdez, V.; Ruiz-Luna, A.; Ghermandi, A.; Nunes, P.A. Valuation of ecosystem services provided by coastal wetlands in northwest Mexico. *Ocean & coastal management*. 78:1-11; 2013
- Camargo-Bravo, A.; García-Cueto, O.R. *Escenarios de Cambio Climático y su aplicación en el cultivo de trigo en el valle de Mexicali B.C.* Instituto de Ingeniería: Universidad Autónoma de Baja California; 2012
- Campbell, D.; Jackson, R. *Hydrology of wetlands*. Freshwaters of New Zealand New Zealand Hydrological Society inc and New Zealand Limnological Society inc, Christchurch, New Zealand Pages:20.21-20.14; 2004
- Carpenter, S.R.; Mooney, H.A.; Agard, J.; Capistrano, D.; DeFries, R.S.; Díaz, S.; Dietz, T.; Duraiappah, A.K.; Oteng-Yeboah, A.; Pereira, H.M. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 106:1305-1312; 2009
- Carrillo-Guerrero, Y. *Water Conservation, Wetland Restoration and Agriculture in The Colorado River Delta, Mexico*. Arizona University; 2009
- Carrillo-Guerrero, Y.K.; Flessa, K.; Hinojosa-Huerta, O.; López-Hoffman, L. From accident to management: The Cienega de Santa Clara ecosystem. *Ecological Engineering*. 59:84-92; 2013
- Cavazos, T.; Arriaga-Ramírez, S. Downscaled climate change scenarios for Baja California and the North American monsoon during the twenty-first century. *Journal of Climate*. 25:5904-5915; 2012
- CILA. Acta 242. Solucion permanente y definitiva del problema internacional de la salinidad del Río Colorado. in: Unidos C.I.d.L.y.A.E.M.y.E., ed; 1973
- CILA. Uso del Dren de desvío Wellton Mohawk y de la infraestructura necesaria en Estados Unidos, para la conducción de agua de México y las organizaciones no gubernamentales de ambos países, hacia el Estero de Santa Clara, durante la prueba piloto de la planta desaladora de Yuma. in: Aguas C.I.d.L.y., ed; 2010
- Cisneros-Mata, M.A.; Montemayor-López, G.; Román-Rodríguez, M.J. Life history and conservation of *Totoaba macdonaldi*. *Conservation Biology*. 9:806-814; 1995
- Clarkson, B.R.; Ausseil, A.-G.E.; Gerbeaux, P.; Dymond, J. *Wetland ecosystem services*. Ecosystem services in New Zealand: conditions and trends Manaaki Whenua Press, Lincoln:192-202; 2013
- Cohen, M. Delta's Perennial Drought: Instream Flows for an Over-Allocated River, The. *Pac McGeorge Global Bus & Dev LJ*. 19:115; 2006

- Cohen, M.J.; Henges-Jeck, C.; Castillo-Moreno, G. A preliminary water balance for the Colorado River delta, 1992–1998. *Journal of Arid Environments*. 49:35-48; 2001
- Cohn, J.P. Colorado river delta. *BioScience*. 54:386-391; 2004
- CONACYT; CONAGUA. Estudio interdisciplinario de los humedales de la República Mexicana: desarrollo metodológico para el Inventario Nacional de humedales y su validación a nivel piloto. Ciudad Universitaria; 2012
- CONAGUA. <http://www.conagua.gob.mx/atlas/usosdelagua32.html>; 2016
- CONANP. Programa de conservación y manejo Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. Comisión Nacional de Areas Naturales Protegidas; 2007
- Costanza, R.; d'Arge, R.; De Groot, R.; Faber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neill, R.V.; Paruelo, J. The value of the world's ecosystem services and natural capital. 1997
- Custodio, E.; Llamas, M.R. Hidrología subterránea: ed. Omega; 1976
- Christensen, N.; Lettenmaier, D.P. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 3:3727-3770; 2006
- Church, J.A.; White, N.J. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical research letters*. 33; 2006
- Daily, G. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*: Island Press; 1997
- Davis-Instruments. *Wireless Vantage Pro2™ & Vantage Pro2™ Plus Stations (manual)*. 2011
- Davis. *Vantage Pro2 User Manual*. Davis Instruments; 2015
- de Gialdino, I.V. La investigación cualitativa. 2006), *Estrategias de investigación cualitativa Barcelona: Gedisa:23-64*; 2006
- De Groot, R.S.; Wilson, M.A.; Boumans, R.M. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological economics*. 41:393-408; 2002
- DOF. Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales. in: Hidráulicos S.d.A.y.R., ed. *Diario Oficial de la Federación*; 1994
- Domínguez-Beisiegel, M.; Herrero Isern, J.; Castañeda del Álamo, C. Saline wetlands' fate in inland deserts: an example of 80 years' decline in Monegros, Spain. 2013
- Englehart, P.J.; Douglas, A.V. Urbanization and seasonal temperature trends: observational evidence from a data-sparse part of North America. *International Journal of Climatology*. 23:1253-1263; 2003
- EPA. *Coastal Wetlands*. Environmental Protection Agency; 2015
- Erwin, K.L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world. *Wetlands Ecology and management*. 17:71-84; 2009
- Ezcurra, E.; Felger, R.S.; Russell, A.D.; Equihua, M. Freshwater islands in a desert sand sea: the hydrology, flora and phytogeography of the Gran Desierto oases of northwestern Mexico. *Desert Plants*. 9; 1988

- Feenstra, J.F.; Burton, I.; Smith, J.B.; Tol, R.S. Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies: Version; 1998
- Fetter, C.W. Applied hydrogeology: Prentice hall; 2000
- Fisher, B.; Turner, R.K.; Morling, P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological economics*. 68:643-653; 2009
- Fisher, J.; Acreman, M. Wetland nutrient removal: a review of the evidence. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 8:673-685; 2004
- Flessa, K.W. Video Entrevista: "Hablando Sobre la Ciénega de Santa Clara". CAP Channel Interviews; 2010
- Flessa, K.W. Monitoring program for the Ciénega de Santa Clara. Final Report International Boundary and Water Commission, El Paso, TX <http://www.georizonaedu/cienega>; 2012
- Freeze, A.; Cherry, J. Groundwater: Prentice Hall, Inc.; 1979
- Frolking, S.; Roulet, N.T. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Global Change Biology*. 13:1079-1088; 2007
- Furnish, D.B.; Ladman, J.R. Colorado River Salinity Agreement of 1973 and the Mexicali Valley, The. *Nat Resources J*. 15:83; 1975
- García-Hernández, J. Willow flycatcher (*Empidonax traillii*) surveys in the Colorado River delta: implications for management. *Journal of Arid Environments*. 49:161-169; 2001
- García-Hernández, J.; Glenn, E.P.; Artiola, J.; Baumgartner, D.J. Bioaccumulation of selenium (Se) in the Cienega de Santa Clara wetland, Sonora, Mexico. *Ecotoxicology and environmental safety*. 46:298-304; 2000
- García, M.; De la Calle, M. Capacidad de carga en grandes recursos turístico-culturales. *Anales de Geografía*; 2012
- Georgiou, S.; Turner, R.K. Valuing ecosystem services: the case of multi-functional wetlands: Routledge; 2012
- Gleick, P.H. Water in crisis: a guide to the worlds fresh water resources. 1993
- Glenn, E.; Thompson, T.L.; Frye, R.; Riley, J.; Baumgartner, D. Effects of salinity on growth and evapotranspiration of *Typha domingensis* Pers. *Aquatic Botany*. 52:75-91; 1995
- Glenn, E.P.; Felger, R.S.; Burquez, A.; Turner, D.S. Cienega de Santa Clara: endangered wetland in the Colorado River delta, Sonora, Mexico. *Nat Resources J*. 32:817; 1992
- Glenn, E.P.; Flessa, K.W.; Cohen, M.J.; Nagler, P.L.; Rowell, K.; Zamora-Arroyo, F. Just add water and the Colorado River still reaches the sea. *Environmental management*. 40:1-6; 2007
- Glenn, E.P.; Garcia, J.; Tanner, R.; Congdon, C.; Luecke, D. Status of wetlands supported by agricultural drainage water in the Colorado River Delta, Mexico. *HortScience*. 34:39-45; 1999
- Glenn, E.P.; Lee, C.; Felger, R.; Zengel, S. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology*:1175-1186; 1996
- Glenn, E.P.; Mexicano, L.; Garcia-Hernandez, J.; Nagler, P.L.; Gomez-Sapiens, M.M.; Tang, D.; Lomeli, M.A.; Ramirez-Hernandez, J.; Zamora-Arroyo, F. Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities. *Ecological Engineering*. 59:176-184; 2013

- Glenn, E.P.; Nagler, P.L.; Brusca, R.C.; Hinojosa-Huerta, O. Coastal wetlands of the northern Gulf of California: inventory and conservation status. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 16:5-28; 2006
- Glenn, E.P.; Nagler, P.L.; Huete, A.R. Vegetation Index Methods for Estimating Evapotranspiration by Remote Sensing. *Surveys in Geophysics*. 31:531-555; 2010
- Glenn, E.P.; Zamora-Arroyo, F.; Nagler, P.L.; Briggs, M.; Shaw, W.; Flessa, K. Ecology and conservation biology of the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*. 49:5-15; 2001
- Goeschl, T.; Lin, T. Biodiversity conservation on private lands: information problems and regulatory choices. 2004
- Golden-Software. Surfer. 2015
- Gómez-Baggethun, E.; de Groot, R. Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Revista Ecosistemas*. 16; 2007
- Gómez-Sapiens, M.M.; Tang, D.; Glenn, E.P.; Lomelí, M.A.; Ramírez-Hernández, J.; Pitt, J. Modeling water management scenarios for the Cienega de Santa Clara, an anthropogenic coastal desert wetland system, based on inflow volumes and salinities. *Ecological Engineering*. 59:30-40; 2013
- Gosselink, J.G.; Pope, R. The Value Of The, Tidal Mar~ h. 1974
- Greeson, P.E.; Clark, J.R.; Clark, J.E. Wetland functions and values: the state of our understanding. Technical publication series-American Water Resources Association (USA); 1979
- HANNA. HI 991301 Manual de Instrucciones - Medidor de pH/CE/TDS/Temperatura Portátil. 2015
- Hein, L.; Van Koppen, K.; De Groot, R.S.; Van Ierland, E.C. Spatial scales, stakeholders and the valuation of ecosystem services. *Ecological economics*. 57:209-228; 2006
- Helliwell, D. Valuation of wildlife resources. *Regional studies*. 3:41-47; 1969
- Hidalgo, H.; Das, T.; Dettinger, M.; Cayan, D.; Pierce, D.; Barnett, T.; Bala, G.; Mirin, A.; Wood, A.; Bonfils, C. Detection and attribution of streamflow timing changes to climate change in the western United States. *Journal of Climate*. 22:3838-3855; 2009
- Hinojosa-Huerta, O.; DeStefano, S.; Carrillo-Guerrero, Y.; Shaw, W.; Valdés-Casillas, C. Waterbird communities and associated wetlands of the Colorado River delta, México. *Studies in Avian Biology*. 27:52-60; 2004
- Hinojosa-Huerta, O.; Iturribarría-Rojas, H.; Zamora-Hernandez, E.; Calvo-Fonseca, A. Densities, species richness and habitat relationships of the avian community in the Colorado River, Mexico. 2008
- Huckelbridge, K.H.; Stacey, M.T.; Glenn, E.P.; Dracup, J.A. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland. *Ecological Engineering*. 36:850-861; 2010
- Hundley Jr, N. The West Against Itself: The Colorado River—an Institutional History. *New Courses for the Colorado River*:9-49; 1986
- Hvorslev, M.J. Time lag and soil permeability in ground-water observations. 1951
- INEGI. Marca Geodésica: V262049. 2010
- INEGI. Guía para la interpretación de cartografía (Edafología). Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2016a
-

- INEGI. Mapas de Edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2016b
- INEGI. Simulador de Flujos Hidráulicos de Cuencas Hidrográficas (SIATL). Instituto Nacional de Estadística y Geografía; 2016c
- Jones, P.; Trenberth, K.; Ambenje, P.; Bojariu, R.; Easterling, D.; Klein, T.; Parker, D.; Renwick, J.; Rusticucci, M.; Soden, B. Observations: surface and atmospheric climate change. IPCC, Climate change:235-336; 2007
- Kakuru, W.; Turyahabwe, N.; Mugisha, J. Total economic value of wetlands products and services in Uganda. The Scientific World Journal. 2013; 2013
- Karoly, D.J.; Wu, Q. Detection of regional surface temperature trends. Journal of Climate. 18:4337-4343; 2005
- Kumar, P. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: ecological and economic foundations: UNEP/Earthprint; 2010
- Leñero, L.A.; Nava, M.; Ramos, A.; Espinosa, M.; de Jesús Ordoñez, M.; Jujnovsky, J. Servicios ecosistémicos en la cuenca del río Magdalena, Distrito Federal, México. Gaceta ecológica:53-64; 2007
- Leopold, A. A sand county almanac. New York; 1949
- Leyva, E. Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México; 2010
- Liu, Y. Dynamic evaluation on ecosystem service values of urban rivers and lakes: A case study of Nanchang City, China. Aquatic Ecosystem Health & Management. 17:161-170; 2014
- Lomeli, M.A. Comportamiento hidrodinámico de La Ciénega de Santa Clara durante el ciclo hidrológico 2010-2011. Instituto de Ingeniería: Universidad Autónoma de Baja California; 2013
- Lomeli, M.A.; Ramírez-Hernández, J.; Díaz-Carrión, I.A.; Michelle, H.-A.; Mungaray-Moctezuma, A. Eco-hidrología y aprovechamiento ecosistémico de un humedal antropogénico binacional: caso Ciénega de Santa Clara. XVIII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas; 2015a
- Lomeli, M.A.; Ramírez-Hernández, J.; Glenn, E.P.; Zamora-Arroyo, F.; Flessa, K.W. Monthly Water Balance of an Iconic Coastal Desert Wetland Under Reduced Flows and Increased Salinities; Implications for Management. Wetlands. 35:783-793; 2015b
- Lomeli, M.A.; Ramírez-Hernández, J.; Zamora-Arroyo, F. Comportamiento hidrodinámico de La Ciénega de Santa Clara durante un ciclo hidrológico con fines de conservación. Memorias del XIV Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas: Universidad Autónoma del Estado de Baja California; 2011
- López-Hoffman, L.; Varady, R.G.; Flessa, K.W.; Balvanera, P. Ecosystem services across borders: a framework for transboundary conservation policy. Frontiers in Ecology and the Environment. 8:84-91; 2009
- López, R.R.; González, M.I.C.; Medina, S.M.; Ballesteros, F.G.D.; Flores, F.I.; Rivera, M.M. Unidad de manejo para la conservación de la vida silvestre como alternativa para “los nuevos agronegocios”. Revista Mexicana de Agronegocios. 14:336-346; 2010
- Luecke, D.F.; Pitt, J.; Congdon, C.; Glenn, E.; Valdés-Casillas, C.; Briggs, M.; Fund, E.D. A Delta Once More: Restoring Riparian and Wetland Habitat in the Colorado River Delta; 1999

- Maes, J.; Egoh, B.; Willemen, L.; Liqueste, C.; Vihervaara, P.; Schägner, J.P.; Grizzetti, B.; Drakou, E.G.; La Notte, A.; Zulian, G. Mapping ecosystem services for policy support and decision making in the European Union. *Ecosystem Services*. 1:31-39; 2012
- Magana, V.; Zermeno, D.; Neri, C. Climate change scenarios and potential impacts on water availability in northern Mexico. *Climate Research*. 51:171-184; 2012
- Magaña, V. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México:80; 2010
- Martínez, M.V.; López, A.I. Pozos y acuíferos: técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo; 1984
- Mazariegos, R.M.L.; Hernández, C.T.; De la Presa Pérez, J.C. Educación ambiental: una alternativa para la conservación del manglar: Instituto de Ecología AC; 2004
- McKechnie, L. Observational Research. in: Oaks T., ed. *The Sage Encyclopedia of Qualitative Research Methods* (Vol 1&2): Sage Publications; 2008
- Mexicano, L.; Glenn, E.P.; Hinojosa-Huerta, O.; Garcia-Hernandez, J.; Flessa, K.; Hinojosa-Corona, A. Long-term sustainability of the hydrology and vegetation of Ciénega de Santa Clara, an anthropogenic wetland created by disposal of agricultural drain water in the delta of the Colorado River, Mexico. *Ecological Engineering*. 59:111-120; 2013
- Ministerio de Agricultura, A.y.M.A.; 2016
- Mitsch, W.J. *Wetland ecosystems*: John Wiley & Sons; 2009
- Mitsch, W.J.; Bernal, B.; Hernandez, M.E. Ecosystem services of wetlands. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*. 11:1-4; 2015
- Mitsch, W.J.; Gosselink, J.G. The values of wetlands: Landscapes and institutional perspectives. *Ecological Economics*. 35:5; 2000
- Morales-Abril, G. Reserva de la biosfera alto golfo de California y delta del Rio Colorado. *Ecologica*. 3:26-27; 1994
- Mueller, H.; Hamilton, D.P.; Doole, G.J. Evaluating services and damage costs of degradation of a major lake ecosystem. *Ecosystem Services*; 2016
- Nakicenovic, N.; Alcamo, J.; Davis, G.; de Vries, B.; Fenhann, J.; Gaffin, S.; Gregory, K.; Grubler, A.; Jung, T.Y.; Kram, T. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US); 2000
- Nelson, S.M.; Fielding, E.J.; Zamora-Arroyo, F.; Flessa, K. Delta dynamics: Effects of a major earthquake, tides, and river flows on Ciénega de Santa Clara and the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering*. 59:144-156; 2013
- Onset. HOB0® U20 Water Level Logger (U20-001-0x and U20-001-0x-Ti) Manual 2012a
- Onset. HOB0® U24 Conductivity Logger (U24-00x) Manual 2012b
- Perks, R.; Thomson, A. *The oral history reader*: Routledge; 2015

- Peters, E.; Campo, J.; Flessa, K.W. Ciénega de Santa Clara Comprehensive Monitoring Program. Publicacion especial del Instituto Nacional de Ecologia, Mexico; 2009
- Ramírez-Hernández, J.; Rodríguez-Burgueño, J.E.; Zamora-Arroyo, F.; Carreón-Diazconti, C.; Pérez-González, D. Mimic pulse-base flows and groundwater in a regulated river in semiarid land: Riparian restoration issues. *Ecological Engineering*. 83:239-248; 2015
- Ramsar. Humedales del Delta del Río Colorado. Ficha Informatica de los Humedales de Ramsar (#814); 2001
- Ramsar. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a. edición. in: Ramsar S.d.l.C.d., ed. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención de Ramsar; 2006a
- Ramsar. The Ramsar Manual 4th edition. 114 páginas; 2006b
- Ramsar. Factsheet 1: Flood control. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009a
- Ramsar. Factsheet 3: Shoreline stabilisation and storm protection. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009b
- Ramsar. Factsheet 5: Water Purification. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009c
- Ramsar. Factsheet 6: Reservoirs of biodiversity. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009d
- Ramsar. Factsheet 8: Cultural values. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009f
- Ramsar. Factsheet 9: Recreation & Tourism. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009g
- Ramsar. Factsheet 10: Climate change mitigation & adaptation. Gland, Switzerland, Ramsar Convention Secretariat; 2009h
- Ramsar. Designación de sitios Ramsar: Marco estratégico y lineamientos para el desarrollo futuro de la Lista de Humedales de Importancia Internacional. in: Ramsar S.d.l.C.d., ed. Gland (Suiza); 2010
- Reed, M.S.; Graves, A.; Dandy, N.; Posthumus, H.; Hubacek, K.; Morris, J.; Prell, C.; Quinn, C.H.; Stringer, L.C. Who's in and why? A typology of stakeholder analysis methods for natural resource management. *Journal of environmental management*. 90:1933-1949; 2009
- Rignot, E.; Kanagaratnam, P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet. *Science*. 311:986-990; 2006
- Rodríguez-Burgueño, J.E. Modelación geohidrológica transitoria de la relación acuífero-río de la zona FFCC - vado Carranza del Río Colorado con propósito de manejo de la zona riparia. Instituto de Ingeniería - Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente: Universidad Autónoma de Baja California; 2012
- Rodriguez-Iturbe, I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*. 36:3-9; 2000
- Rojas, C.; Zilay, N. Determinacion de la evapotranspiracion de Pinus radiata D. Don en vivero, mediante lisimetro de drenaje. 1994
- Ruíz, J.I. Metodología de la investigación cualitativa: Universidad de Deusto; 2012
- Ruíz Medina, M.I. Políticas públicas en salud y su impacto en el seguro popular en Culiacán, Sinaloa, México. Facultad de Contaduría y Administración Division de Estudios de Posgrado: Universidad Autónoma de Sinaloa; 2011

- Russi, D.; ten Brink, P.; Farmer, A.; Badura, T.; Coates, D.; Förster, J.; Kumar, R.; Davidson, N. The economics of ecosystems and biodiversity for water and wetlands. IEEP, London and Brussels; 2013
- Sampieri, R.H.; Collado, C.F.; Lucio, P.B. Metodología de la investigación. Edición McGraw-Hill; 2010
- Smith, D.M.; Cusack, S.; Colman, A.W.; Folland, C.K.; Harris, G.R.; Murphy, J.M. Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model. *science*. 317:796-799; 2007
- Solinst. TLC Meter Operating Instructions. 2014
- SonTek. FlowTracker® Handheld ADV® Technical Manual. 2009
- Stern, N.H. The economics of climate change: the Stern review: cambridge University press; 2007
- Stockton, C.W.; Jacoby, G. Long-term surface-water supply and streamflow trends in the Upper Colorado River Basin. Available from the National Technical Information Service, Springfield VA 22161 as PB-264 533, Price codes: A 05 in paper copy, A 01 in microfiche Lake Powell Research Project Bulletin; 1976
- Sykes, G.G. Colorado delta. 1937
- Tanner, C.C.; Sukias, J.P. Multiyear nutrient removal performance of three constructed wetlands intercepting tile drain flows from grazed pastures. *Journal of environmental quality*. 40:620-633; 2011
- Taylor, P.H.; Jennifer, A. Seascapes: Getting to Know the Sea Around Us. A Guide to Characterizing Marine and Coastal Areas. Quebec-Labrador Foundation, Inc; 2008
- Te Chow, V. Open channel hydraulics. 1959
- Thompson, G.D.; Wilson, P.N. Ejido reforms in Mexico: Conceptual issues and potential outcomes. *Land Economics*:448-465; 1994
- UNICEN. Apuntes. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Área de Ciencias de la Tierra.; 2009
- Valdés-Casillas, C.; Hinojosa-Huerta, O.; Muñoz-Viveros, M.; Zamora-Arroyo, F.; Carrillo-Guerrero, Y.; Delgado-García, S.; López-Camacho, M.; Glenn, E.; García, J.; Riley, J. Information database and local outreach program for the restoration of the Hardy River wetlands, lower Colorado River delta, Baja California and Sonora, Mexico. *Campus Guaymas*. 102; 1998
- Valles, M.S. Entrevistas cualitativas: CIS-Centro de Investigaciones Sociológicas; 2014
- van den Belt, M.; Blake, D. Ecosystem services in New Zealand agro-ecosystems: A literature review. *Ecosystem Services*. 9:115-132; 2014
- Westman, W.E. How much are nature's services worth? *Science*. 197:960-964; 1977
- Wharton, C.H. The Southern River Swamp--a Multiple-use Environment: Bureau of Business and Economic Research, School of Business Administration, Georgia State University; 1970
- Whiting, G.J.; Chanton, J.P. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*. 53:521-528; 2001
- Wood, G.D.A. Eco-historicism. *Journal for Early Modern Cultural Studies*. 8:1-7; 2008

- Wood, P.J.; Hannah, D.M.; Sadler, J.P. Hydroecology and ecohydrology: past, present and future: Wiley Online Library; 2008
- Zalewski, M. Ecohydrology and hydrologic engineering: Regulation of hydrology-biota interactions for sustainability. *Journal of Hydrologic Engineering*. 20:A4014012; 2014
- Zamora-Arroyo, F.; Hinojosa-Huerta, O.; Glenn, E.; Briggs, M. Vegetation trends in response to instream flows in the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*. 49:49-64; 2001
- Zamora-Arroyo, F.; Pitt, J.; Cornelius, S.; Glenn, E.; Hinojosa-Huerta, O.; Moreno, M.; Garcia, J.; Nagler, P.; De la Garza, M.; Parra, I. Conservation priorities in the Colorado River delta: Mexico and the United States, report, 103 pp., Sonoran Inst., Tucson, Ariz. 2005
- Zengel, S.A.; Glenn, E.P. Presence of the endangered desert pupfish (*Cyprinodon macularius*, Cyprinodontidae) in Cienega de Santa Clara, Mexico, following an extensive marsh dry-down. *The Southwestern Naturalist*. 41:73-78; 1996
- Zengel, S.A.; Meretsky, V.J.; Glenn, E.P.; Felger, R.S.; Ortiz, D. Cienega de Santa Clara, a remnant wetland in the Rio Colorado delta (Mexico): vegetation distribution and the effects of water flow reduction. *Ecological Engineering*. 4:19-36; 1995
- Zheng, B.; Duan, J.; Jia, J.; Liu, F.; Yan, Y. Assessment of ecosystem services of Lugu Lake watershed. *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology*. 15:62-70; 2008
- Zhou, D.; Zhang, H.; Liu, C. Wetland ecohydrology and its challenges. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 16:26-32; 2016
- Zmolek, C.; Baker, J.L.; Crumpton, W.G.; Kanwar, R.S. Hydrology of Constructed Wetlands. Paper No 972036. Paper No. 972036; 1997

ANEXOS

Anexo 1. Mutiparamétrico de calidad de agua HANNA, modelo HI991301 (Imagen tomada de www.hannainst.com).



Anexo 2. Velocímetro Doppler Acústico FlowTracker (Imagen tomada de www.hoskin.ca).



Anexo 3. Medidor HOBO U20-001-01. Imagen tomada de Onset, (2012a).



Anexo 4. Medidor de conductividad marca HOBO modelo U24-001. Imagen tomada de BenMeadows, (2016).



Anexo 5. Servicios Ecosistémicos identificados de 25 referencias bibliográficas publicadas durante el periodo de 1980 a 2015. La letra “x” representa la mención del SE identificado para cada una de las citas.

Servicios Ecosistémicos		Bureau, 1980	Eddleman, 1989	Hendrickson y Romero, 1989	Payne et al., 1992	Glenn et al., 1992	Abarca et al., 1993	Zengel et al., 1995	Zengel y Glenn, 1996	Glenn et al., 1996	Glenn et al., 1999	García-Hernández et al., 2000	García-Hernández, 2001	Varela-Romero et al., 2002	Carrillo-Guerrero, 2005	Zamora-Arroyo et al., 2005	CONANP, 2007	Flessa, 2007	Judkins y Larson, 2010	CONACYT y CONAGUA, 2012	Carrillo-Guerrero et al., 2013	Glenn et al., 2013	Gómez-Sapiens et al., 2013	Hinojosa-Huerta et al., 2013	Mexicano et al., 2013	Lomeli et al., 2015	
Aprovisionamiento	Alimentos					x		x	x	x	x		x	x	x	x	x				x			x		x	
	Agua dulce									x											x			x			
	Fibras y combustibles										x										x			x			
	Productos bioquímicos																				x						
	Materiales genéticos																				x						
Regulación	Regulación del clima					x																					
	Régimen hidrológico	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Control de contaminantes y detoxificación																										
	Protección ante la erosión																										
Culturales	Desastres naturales										x																
	Espirituales y de inspiración																										
	Recreativos																										
	Estéticos																										
	Educativos																										
SopORTE	Biodiversidad	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Formación de suelos																										
	Ciclo de nutrientes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Polinización																											

Anexo 6. SE identificados durante las entrevistas para cada ejido.

Servicios Ecosistémicos		Descripción	ID				
Categoría	Sub-categoría		a	b	c	d	
Aprovisionamiento	Alimentos	Aves	Patos	x	x	x	
			Canzos	x	x	x	
			Codornices			x	x
			Gallito del monte				x
			Paloma				x
		Peces	Truchas		x	x	x
			Conejo				x
			Liebre				x
		Mamíferos					
	Ganado			x		x	
				x		x	
						x	
						x	
	Frutas						
Cereales							
Plantas halófitas							
Agua dulce							
Fibras y combustibles							
Productos bioquímicos							
Materiales genéticos							

Regulación	Regulación del clima	Servicios ambientales	x	x	x	x
	Régimen hidrológicos	Temperatura		x	x	x
		Almacenamiento de agua de desecho agrícola DR		x	x	x
		Almacenamiento de agua de desecho agrícola WM		x	x	x
	Control de contaminantes y de toxificación	Recarga de la Ciénega (manantiales)				x
Mejoramiento de la calidad del agua (olor y color)					x	
Retención del suelo y prevención de cambios estructurales			x	x	x	
Control de inundaciones por precipitación			x	x	x	
Protección ante la erosión	Almacenamiento de intrusión marina (mareas altas)		x	x	x	
	Desastres naturales		x	x	x	
Culturales	Espirituales y de inspiración	Sentimiento y bienestar personal		x	x	x
		Sitio espiritual		x	x	x
	Recreativos	Ecoturismo	Observación de flora y fauna	x	x	x
		Natación en lagunas	Paseos en lancha y/o canoa		x	x
		Picnic				x
		Cacería cinegética		x	x	x
		Pesca	Deportiva		x	
			Recreativa			x
	Estéticos	Ciclismo (terracería)				x
		Deporte extremo (atravesar lodazales)				x
		Senderismo	Acuático		x	
			Terrestre		x	
	Educativos	Apreciación de las características naturales	Sitios históricos		x	
				x	x	x
		Capacitación		x	x	x
Biodiversidad	Hábitad de especies endémicas, residentes y migratorias			x	x	
		Retención de sedimentos (WM)		x	x	
	Formación de suelos	A acumulación de materia orgánica durante el invierno		x	x	
				x	x	
Soporte	Ciclo de nutrientes	NO IDENTIFICADO POR LOS USUARIOS				
		Abejas		x	x	x
		Polillas		x		x
		Murciélagos				x
		Cigarras				x