

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



***“Comportamiento hidrodinámico de La Ciénega de Santa Clara
durante el ciclo hidrológico 2010-2011”***

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta

Marcelo Antonio Lomeli Banda

Director: Dr. Jorge Ramírez Hernández

Mexicali Baja California México a 14 de enero del año 2013

Resumen

La Ciénega de Santa Clara ubicada en la reserva de la biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado desempeña funciones ecológicas vitales. Se abastece principalmente por agua “salobre” procedente del Estado de Arizona mediante el canal revestido de concreto General Rodolfo Sánchez Taboada conocido también como Wellton-Mohawk, además de otras fuentes de menor importe. El objetivo del presente trabajo de investigación consiste, en determinar el régimen hidrológico de la ciénega durante un periodo de estudio de 365 días iniciando el 24 de marzo del 2010, periodo dentro del cual se llevó a cabo la prueba piloto de la planta desalinizadora de Yuma. Se estimaron diariamente los gastos de entrada y fue instalada una estación climatológica dentro de la ciénega para cuantificar las salidas por evaporación y evapotranspiración. Los flujos superficiales de salida fueron estimados por diferencia de volúmenes en el balance de agua y las partículas suspendidas en el agua mediante un balance de masa. Las variaciones en el almacenamiento hídrico se midieron automáticamente cada 30 minutos y manualmente cada mes en 11 puntos distribuidos en el área de estudio. Todas las mediciones se realizaron durante 365 días y se estimaron resultados mensuales para determinar los cambios en el almacenamiento. La elevación del tirante se referenció al nivel medio del mar mediante la determinación de su cota de elevación con un sistema de posicionamiento global de doble frecuencia y el postprocesado de los datos obtenidos. Durante el estudio, ingresaron a la ciénega 127.20 hm³ de agua de los cuales el 45% salió por flujo superficial y el 55% mediante los procesos conjuntos de evaporación y evapotranspiración. Los niveles del agua variaron entre los 4.28 a 5.13 msnm en las zonas más someras, sin embargo, en las lagunas alineadas a la falla del Cerro Prieto fueron de 4.91 a 5.04 msnm observándose tiempos de respuesta distintos. Las variaciones en los niveles del agua y en el área vegetal de la ciénega compuesta en su mayoría por Tule (3,733 a 4,570 ha), se asociaron a factores como la transición de las estaciones verano-invierno y a la reducción del flujo por la prueba piloto de la planta desalinizadora que sirvan como elemento en su impacto al ecosistema.

Palabras clave:

Ciénega de Santa Clara, Balance de Agua, Desalinizadora de Yuma, Wellton-Mohawk, Evapotranspiración.

Agradecimientos

A mi Madre, María Elena Banda Correa por apoyarme siempre en crecer académicamente y a mi Padre Marcelo Antonio Lomeli Reyna por compartirme toda su experiencia y su cariño.

A Mónica mi novia, por el gran apoyo que ha sido en todos los sentidos desde antes de comenzar este recorrido de grandes experiencias y conocimientos.

A mi hermana Diany y mis sobrinos los Yiyos, así como toda la familia Banda Correa que siempre me ha motivado en seguir adelante.

Al Dr. Jorge Ramírez Hernández que gracias a su insuperable apoyo y amistad, esta investigación no pudo haber tenido mejor final. Gracias por ser un padre putativo para mí.

A mis compañeros y amigos del Instituto de Ingeniería así como al personal que labora en el, quienes con su agrado y compañía hicieron que este tiempo se haya pasado rápidamente de la mejor manera.

Al Dr. Francisco Zamora y a todo el equipo del *Sonoran Institute* que gracias a su capacidad logística para la realización de proyectos medio ambientales, permitieron que este trabajo fuese cumplido en tiempo y orden.

A los doctores Karl Flessa y Ed Glenn de la Universidad de Arizona E.U., por el soporte académico y la confianza en la realización del estudio en este bello humedal La Ciénega de Santa Clara.

Al CONACYT por sustentarme económicamente durante la realización del Posgrado.

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 para la posteridad.

Índice

Introducción	1
Localización de la zona de estudio	3
Planteamiento del problema	4
Hipótesis	5
General	5
Investigación	5
Objetivos.....	5
General	5
Específicos	5
Antecedentes	6
El Delta del Río Colorado	6
Canal Wellton - Mohawk.....	7
Dren Riño.....	9
La Ciénega de Santa Clara	9
Planta Desalinizadora de Yuma	10
Balances Hídricos	11
Marco teórico	14
Humedales.....	14
Funciones de un humedal	15
Clasificación de humedales.....	16
Conservación de humedales	16
Canal hidráulico	17
Dren agrícola	18
Flujo en canales abiertos.....	19
Caudal	20
Estación de aforo	20
Balance Hídrico	21
Evapotranspiración (ET).....	22
Formula de Penman y Monteith para estimar la ET, estandarizada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en ingles, 2005).	23
Evaporación (E).....	27
Flujo Superficial (FS).....	28
Materiales y Métodos	29
Entradas de agua.....	30
Canal Wellton-Mohawk.....	30
Dren Riño	32
Precipitación	35

Salidas de agua	36
Evaporación	37
Evapotranspiración	38
Flujo Superficial	40
Topografía y batimetría.....	41
Dimensiones	43
Área	43
Volumen	46
Elevación y profundidad real del agua.....	47
Sitios de Monitoreo (Cobertura Espacial).....	47
Elevación del agua.....	50
Profundidad del agua	51
Balance Hídrico	54
Balance de masa	55
Resultados y Discusiones.....	56
Entradas de Agua	56
Wellton-Mohawk.....	56
Dren Riito	58
Precipitación	59
Volúmenes de entrada de agua	61
Sólidos Totales Disueltos (STD) de entrada.....	62
STD-WM.....	62
STD-DR.....	63
Salidas de Agua	63
Evaporación	63
Flujo Subterráneo-Superficial.....	67
Sólidos Totales Disueltos (STD) de salida	68
Volúmenes de salida de agua.....	69
Topografía y batimetría.....	70
Perfiles Topográficos.....	73
Dimensiones de la CSC	76
Área de la CSC	76
Vegetación.....	78
Volumen	82
Niveles de Agua y Profundidad.....	85
Concentración de STD en el humedal	89
Balance Hídrico	90
Balance de Masa	92
Conclusiones.....	94
Anexos.....	97
Citas y referencias	101

Índice de Abreviaciones

- Ciénega de Santa Clara - CSC
- Canal Wellton-Mohawk - WM
- Planta Desalinizadora de Yuma - PDY
- Evapotranspiración - ET
- Evaporación - E
- Sistema de Posicionamiento Global - *GPS* por sus siglas en inglés
- Distrito de Riego de los Valles de Wellton y Mohawk - DDRWM
- Delta del Río Colorado - Delta
- *Main Outlet Drain Extension* - *MODE*
- Lindero Internacional Norte - *NIB* por sus siglas en inglés
- Lindero Internacional Sur - *SIB* por sus siglas en inglés
- Hectómetros Cúbicos - hm^3
- Hectáreas - ha
- Metros cúbicos por segundo - $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
- Buro de Reclamación de los Estados Unidos - *BOR* por sus siglas en inglés
- Penman y Monteith - PM
- Milímetros - mm
- Partes por millón - ppm
- Comisión Internacional de Límites y Aguas - CILA
- Pies Cúbicos por Segundo - *CFS* por sus siglas en inglés
- Sólidos Totales Disueltos - STD
- Miligramos por Litro - mg L^{-1}
- Gramos por Litro - g L^{-1}
- Velocímetro Doppler Acústico, FlowTracker - *FT*
- Servicio Geológico de los Estados Unidos - *USGS* por sus siglas en inglés
- Metros - m
- Sistema de Información Geográfica - SIG
- *American Society of Civil Engineers* - *ASCE*
- Flujo Superficial de Salida - Q_{SM}
- *Real Time Kinematic Method* - *RTK*
- Modelo Digital de Elevación - *DEM* por sus siglas en inglés
- Bandas de Color Rojo, Verde y Azul - *RGB* por sus siglas en inglés
- Área dentro del perímetro mojado - A_{PM}
- Área total del humedal - A_{TM}
- Área total de cobertura vegetal - A_{VM}
- Área total de las lagunas de aguas abiertas - A_{LM}
- Interpolación Distancia Inversa Ponderada - *IDW* por sus siglas en inglés
- Metros Sobre el Nivel del Mar - msnm
- Toneladas - ton
- Promedio - *Avg.* por sus siglas en inglés
- *Yellow Springs Instrument* - YSI
- Kilómetros - km

Índice de Tablas

Tabla 1. Ejemplo de información obtenida durante el monitoreo en campo	50
Tabla 2. Procesamiento de datos obtenidos en el monitoreo en campo.....	51
Tabla 3. Caudales obtenidos con el FT en la CSC y el DR.	59
Tabla 4. Eventos de precipitación registrados en la CSC durante el estudio.....	60
Tabla 5. Volúmenes de agua de entrada calculados mensualmente	61
Tabla 6. Resultados de ET mensual utilizando albedos variables (a).....	66
Tabla 7. Volúmenes mensuales de agua que salió de la CSC mediante E, ET y Q_{SM}	69
Tabla 8. Nombre y localización geográfica de los bancos de nivel	71
Tabla 9. Resultados de las áreas totales.....	77
Tabla 10. Áreas mensuales de las tres clasificaciones de vegetación y su respectivo porcentaje.....	80
Tabla 11. Sitios monitoreados durante el estudio con su respectiva ubicación geográfica	85
Tabla 12. Resultados finales y datos utilizados para la realización del balance hídrico.....	91
Tabla 13. Resultados finales y datos utilizados para la realización del balance de masa	93

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa de localización de la CSC.....	3
Figura 2. Canal Wellton-Mohawk	18
Figura 3. Dren Ríoito	19
Figura 4. Resumen de actividades realizadas durante el estudio	29
Figura 5. Localización de los sitios de aforo manual en México	32
Figura 6. Velocímetro FlowTracker para medir caudales.....	33
Figura 7. Modelo descriptivo de la ecuación de sección media.....	35
Figura 8. Mapa de localización de la estación climatológica en la CSC.....	35
Figura 9. Equipo GPS instalado y utilización del aerobote de CILA.....	41
Figura 10. Imagen satelital de la Ciénega de Santa Clara tomada el 25 de abril del 2009.....	44
Figura 11. Localización de los sitios de monitoreo donde se instalaron los sensores	48
Figura 12. Regleta instalada y sujeta a una solera que es enterrada.....	52
Figura 13. Sensor YSI modelo 600 LS	53
Figura 14. Medidor HOBO U20-001-01.....	53
Figura 15. Procesos de los que depende el balance hídrico	55
Figura 16. Volúmenes de agua mensual registrados por la CILA.....	56
Figura 17. Flujos de entrada por el canal Wellton-Mohawk hacia la Ciénega de Santa Clara	57
Figura 18. Entradas de agua hacia la Ciénega de Santa Clara	60
Figura 19. Volúmenes totales que ingresaron al humedal con su respectivo porcentaje	62
Figura 20. Resultados de las pérdidas diarias de agua por evaporación (E)	64
Figura 21. Resultados de las pérdidas diarias de agua por ET utilizando un albedo de 0.22% variable.....	65
Figura 22. Volúmenes totales de agua que salieron del humedal y su respectivo porcentaje	70
Figura 23. Localización de bancos de nivel utilizados en los levantamientos	71
Figura 24. Localización de puntos obtenidos en base al levantamiento del relieve topográfico.....	72
Figura 25. Contornos generados con los puntos topográficos de elevación.....	73
Figura 26. Perfiles topográficos 1 y 2	74
Figura 27. Perfil topográfico 3.....	74
Figura 28. Perfil topográfico 4.....	75
Figura 29. Ubicación de puntos obtenidos en base al levantamiento del espejo de agua.....	76
Figura 30. Resultados mensuales de las superficies que compusieron al humedal.....	81
Figura 31. Localización de las superficies con vegetación y aguas abiertas.....	81
Figura 32. Modelo digital de elevación del relieve terrestre	82
Figura 33. Modelo digital de elevación del espejo de agua	83
Figura 34. Volúmenes de almacenamiento y procesos que intervienen en su variabilidad	85
Figura 35. Elevación del agua en msnm de todos los sitios donde se instaló un sensor	86
Figura 36. Profundidad del agua en los sitios de muestreo dentro de la CSC.....	87
Figura 37. Elevación del agua en los sitios de muestreo dentro de la CSC	89
Figura 38. Relación de entradas y salidas de agua, reflejadas en el área del humedal.....	92

Introducción

A partir del año 1977 el agua salobre de drenaje agrícola proveniente del Distrito de Riego de los valles de Wellton y Mohawk (DDRWM) en Yuma Arizona, Estados Unidos (E.U.), ha sido enviada hacia el Delta del Río Colorado (Delta) a través del canal Wellton-Mohawk (WM) (Glenn et al., 2001; Cohen, 2006) dándole vida a un humedal que cuenta con una extensión de 20,000 ha de superficie (Cohen, 2006), de las cuales 4,200 ha son dominadas por vegetación (Luecke et al., 1999; Zamora-Arroyo et al., 2001) en su mayoría Tule (*Typha domengensis*) (Flessa, 2010). Este sitio se conoce como la Ciénega de Santa Clara (CSC) y es de suma importancia por el impacto ecológico que genera (Huckelbridge et al., 2010). Se caracteriza por ser el humedal de Tule más extenso de la región baja del Río Colorado (RC) albergando a la más grande población restante (> 6,000) de una especie de ave endémica en peligro de extinción conocida como el Palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*) (Hinojosa-Huerta et al., 2001), listada como una de las especies en peligro de extinción por los E.U. Asimismo se encuentra en el humedal, la especie de pez con nombre común Cachorrillo del Desierto (*Cyprinodon macularius*), también en peligro de extinción; aunado a una numerosa cantidad de especies acuáticas, aves migratorias y residentes (Zengel y Glenn, 1996; Glenn et al., 2001).

La CSC provee de hábitat a una gran cantidad de aves, forma parte de una larga ruta de migración debido a su extensión, ubicación y los cuerpos de agua abiertos. Por ejemplo, el Mosquero Saucero (*Empidonax traillii*) que viaja a lo largo de la costa de Sonora para llegar a la parte baja del RC; proviniendo del Sur de México y América Central, (Glenn et al., 2001; García-Hernández et al., 2001). Sin embargo, a pesar de su importancia ecológica el humedal se ha visto amenazado por la reactivación de la Planta Desalinizadora de Yuma (PDY) (Zengel et al., 1995). Esta planta fue construida por el Buro de Reclamación (BOR por sus siglas en ingles) del gobierno estadounidense con el objetivo de cumplir los acuerdos de regularización de salinidad en el agua que es enviada a México por el RC (CILA, 1973); asignadas en virtud del Tratado de Aguas de 1944 (CILA, 2010).

La importancia ecológica de la CSC se desconocía antes de 1992 cuando la operación de la PDY pretendía utilizar el volumen de agua vertido a la CSC y con ello desaparecer el humedal, ya que se decía que el humedal estaba a punto de someterse a modificaciones

importantes en el flujo y la salinidad (Glenn, 1992; Zengel et al., 1995). Generando dudas y preocupación en el impacto que puede tener con la vegetación así como las consecuencias hacia la población de aves (Flessa, 2010).

Se sabe que si la PDY se pone en funcionamiento, utilizará el agua del canal WM y provocará una reducción de la misma hacia la CSC. Además de la reducción del caudal, la salmuera de rechazo que se produzca con la desalación será devuelta nuevamente al WM y como consecuencia, el agua que llegue hacia el humedal triplicara su contenido salino (9,000 ppm) lo que significa, menos agua y más salinidad (Flessa, 2010).

Zengel y colaboradores (1995) reportaron que la interrupción total de flujo durante 8 meses debido a las reparaciones del canal WM, contribuyó a la mortalidad del 60 al 70% del follaje del humedal, trayendo como consecuencia la disminución del tamaño de la CSC.

Existen varios estudios sobre el hábitat y los servicios ambientales que proporciona la CSC pero la falta de un estudio científico sobre su hidrodinámica ha impedido que se puedan establecer los efectos de cambios en el flujo de entrada. Se sabe que si las condiciones actuales se mantienen, el humedal debe mantener su tamaño y cobertura de la vegetación con cambios estacionales pero sin modificaciones permanentes, ya que se puede decir que actualmente está en equilibrio dinámico. Es necesario seguir haciendo investigación ya que este tipo de estudios no se han abordado en su totalidad (Glenn, 1992).

Esta tesis forma parte de otras investigaciones para la conservación del ecosistema generado por la CSC como son la de Glenn y colaboradores (2012), así como la de Mexicano y colaboradores (2012), entre otras. Constituye un reto por la gran importancia que tiene para la conservación del agua en el norte de México, su multifuncionalidad ecológica y el sustento tanto ambiental como económico (ecoturismo, pesca y cacería deportiva) que en ella se genera. Por consiguiente en este estudio se tiene como objetivo determinar el comportamiento hidrológico de la CSC durante un año o ciclo hidrológico que incluye tres etapas: antes de la reducción del flujo, durante la reducción o por la prueba piloto de la PDY y posterior a la prueba piloto.

Localización de la zona de estudio

La CSC se ubica dentro de la Reserva de la Biosfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (Figura 1) en el Estado de Sonora, México; geológicamente se encuentra en una depresión formada por la falla de Cerro Prieto, en un antiguo brazo del RC (Glenn et al., 1999). Geográficamente se localiza en las coordenadas:

WGS84: 32° 01' 39'' N y 114° 52' 55'' W

De noroeste a suroeste el humedal se encuentra rodeado por áreas bajas con tierras áridas (5,016 ha) y al sureste por planicies lodosas con aguas poco profundas (9,998 ha). Estas superficies forman parte de la CSC más no se encuentran dentro del marisma de agua salobre con vegetación emergente dominada por Tule en donde se realizó este estudio.

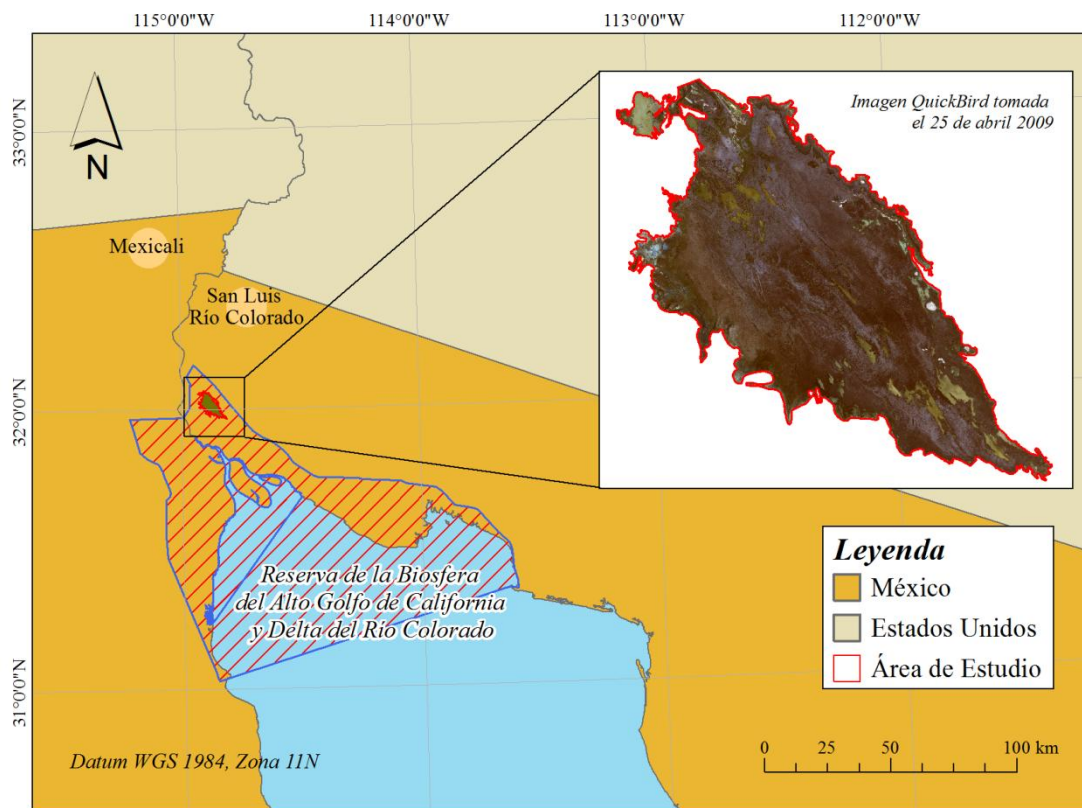


Figura 1. Mapa de localización de la CSC.

Otros humedales como El Doctor y El Indio se localizan cerca de la CSC (7 y 10 km respectivamente), el primero al este y el segundo al oeste.

Planteamiento del problema

Con la reciente reactivación de la PDY se ha provocado una reducción en la cantidad de agua que es enviada a la CSC, por lo que aunado a las pérdidas por evapotranspiración (ET), el ecosistema del humedal se verá fuertemente afectado. Debido a ello, el problema se presenta con la cantidad de agua que es enviada a la CSC por el canal WM proveniente del DDRWM en Arizona, E.U. Por ello, es necesario medir la principal fuente de abastecimiento que es este canal, del cual dependen las especies vegetales y animales que utilizan la CSC como área de refugio y descanso. También, es necesario conocer el balance hídrico del humedal, midiendo y calculando todas las variables involucradas, ya que el análisis del balance hídrico se basa en la cuantificación de las diversas entradas, salidas y cambios en el almacenamiento; siendo auxiliado con el balance de masa sin incluir la calidad que el agua presenta por el contenido de los iones mayoritarios o metales pesados.

Hipótesis

General

- ✓ La CSC mantiene un equilibrio hidrológico estacional y anual que soporta el ecosistema existente, sus principales elementos son: los flujos de entrada por el WM y el Dren Riíto (DR), las pérdidas de agua están asociadas a la evaporación (E) y la ET de la vegetación; además de flujos de salida superficiales y subterráneos.

Investigación

- ✓ El balance hídrico es un método viable para la obtención del régimen hidrológico de un humedal y hay una relación entre los tirantes de agua en distintas zonas del humedal y flujo de agua entrante con el balance de masa.

Objetivos

General

- ✓ Determinar el régimen hidrológico de la CSC a través de la relación que existe entre las mediciones del flujo entrante que la abastece, las salidas por ET y las variaciones en el nivel del espejo de agua debido a las diferencias en los volúmenes de entradas, de salida y el balance de masa, durante un ciclo hidrológico.

Específicos

- ✓ Estimar el balance hídrico de la CSC.
- ✓ Evaluar periódicamente las variaciones del nivel del espejo de agua en distintas zonas de la CSC utilizando como referencia el nivel medio del mar.
- ✓ Determinar el origen y evaluar la cantidad de los flujos de entrada y salida del sistema hidrológico CSC durante 365 días utilizando equipo de alta precisión.

Antecedentes

El Delta del Río Colorado

El Delta alguna vez fue abastecido por una gran extensión de cuenca, billones de metros cúbicos de agua fluían anualmente desde el interior de las Montañas Rocallosas en el Estado de Colorado, E.U., hasta el Golfo de California. Sin embargo, desde las expediciones de Leopold (1949) y Skyes (1937), las condiciones del ecosistema del Delta han ido rápidamente disminuyendo a medida que el agua en la parte alta del RC se ha desviado a los usuarios agrícolas y urbanos (All, 2006). En total son 10 presas de gran capacidad y 80 desviaciones pequeñas en E.U., y en México, la presa derivadora Morelos (Cohn, 2004) que envía el agua a Mexicali y su valle a través de una extensa red de canales.

A pesar de que el RC alimentaba a casi 800,000 ha de humedales y pesquerías de alta productividad con nutrientes, en la actualidad, el Delta se ha mantenido gracias a su gran capacidad de resistencia (Zamora et al., 2005).

Antes de la construcción de la presa Hoover en 1935 y otras desviaciones del lado americano, el Delta recibía desde 16 hasta 18 billones de metros cúbicos anuales de agua (Stockton, 1976), y como resultado, la mayor parte de ella estaba conformada de una vegetación exuberante de 200 a 400 especies (Ezcurra et al., 1988) que funcionaba como un hábitat para más de 350 especies de aves, algunas de ellas en peligro de extinción como el Palmoteador de Yuma y el Mosquero Saucero (Zamora et al., 2005); en la porción marina o estuarina, el Delta también brindaba soporte a otras especies animales en peligro de extinción como la Vaquita Marina (Cisneros-Mata, 1995) y la Totoaba (Morales-Abril, 1994). No obstante desde que se finalizaron los proyectos aguas arriba, muy poca agua llegaba al Delta y las especies que dependían de este ecosistema se encontraban en riesgo.

Históricamente, el Delta ocupaba dos depresiones por debajo del nivel del mar; el *Salton Sea* (E.U.) y la Laguna Salada (Sykes, 1937). Pero para el año 1996 la superficie de áreas naturales incluyendo humedales y zonas riparias que abarcaba el Delta disminuyó a 170,000 ha (Glenn, 2001). Lo mismo ha sucedido con otros deltas desérticos como el del Río Nilo y el Indo (Glenn et al, 1996), los cuales han sido alterados de gran forma por la actividad humana. Las aguas que fluyen por el RC han sido utilizadas hasta hoy en día para

satisfacer las necesidades socioeconómicas (la agricultura, la industria y zonas urbanas). Sin embargo, el área de estudio de esta tesis que es la CSC se excluye de ese suministro, ya que forma parte de una zona de humedales alimentados por agua proveniente de inundaciones, drenajes agrícolas e infiltraciones de canales alejados del RC (Glenn, 1996).

Canal Wellton-Mohawk

En la década de los años 70's el agua proveniente del drenaje agrícola circulaba por el DR brindando soporte a una pequeña superficie de humedales de aproximadamente 200 ha, sitio donde actualmente se localiza la CSC. Hoy en día este flujo sigue abasteciendo al humedal, sin embargo, a partir del año 1977 otra fuente de agua proveniente de los E.U., también comenzó a proveerla, fluyendo a lo largo oriente del Delta. Este afluente estadounidense es conocido como el canal WM y ha revivido al humedal que actualmente se conoce, ampliando su extensión hasta alcanzar alrededor de las 20,000 ha (Glenn et al., 1992; Zengel et al., 1995) propiciando el crecimiento de una gran variedad de densos tulares, lagunas y planicies lodosas; transformando una parte del viejo Delta en una zona ecológica que funciona como un pulmón para el planeta (Flessa, 2010). No obstante el origen de esta agua es salobre y se ha extraído del subsuelo hasta la fecha. Proviene del DDRWM al sur de Arizona, E.U., y fluye inicialmente por un canal de concreto de 100 km de largo (el *Main Outlet Drain Extension* o canal *MODE*) hasta llegar al Lindero Internacional Sur (*SIB* por sus siglas en inglés) en la frontera entre los dos países. Al cruzar hacia el lado mexicano se le conoce como General Rodolfo Sánchez Taboada y recorre 56 km hasta la CSC (Valdés-Casillas et al., 1998; Cohen, 2006).

Antes de la existencia del WM el agua era entregada a México a través del RC (1,850 hm³) en base al tratado que se realizó en 1944 sobre los derechos del agua. Sin embargo al inicio de los años 60 se presentó una problemática con la alta concentración de sal que se estaba teniendo en aguas del RC la cual perjudicaba a las cosechas que de él dependían. Este problema se debía a las descargas de agua de desecho agrícola que se hacían antes de llegar al Lindero Internacional Norte (*NIB* por sus siglas en inglés) dentro del RC; agua que era extraída de los campos del DDRWM. Además de que el RC y otros ríos occidentales naturalmente tomaban las sales de formaciones de roca por las que circulaba y también de las aguas de retorno de los campos de regadío (6,000 ppm). A raíz de ello los dos países

negociaron la minuta 242 donde se estableció que anualmente $1,678 \text{ hm}^3$ de agua serían entregadas a México a través del *NIB* los cuales no podrían tener una salinidad promedio mayor a 115 ppm (± 30 ppm) que el agua del río en la Presa Imperial; además el resto del agua (172 hm^3) que será enviada por el *SIB* hacia México cerca de San Luis en el Estado de Sonora, deberá tener una salinidad considerablemente similar a la del agua que habitualmente se ha enviado por ahí (Hundley, 1986).

Para llevar a cabo la minuta 242 firmada por los gobiernos de México y E.U., el 30 de agosto de 1973, el congreso aprobó el acta de 1973 sobre el Control de Salinidad de la Cuenca del RC donde serían propuestas las medidas que permitieran el cumplimiento de la minuta (Luecke et al., 1999). Dentro de estas medidas, se aprobó un presupuesto de \$250 millones de dólares para la realización de la PDY así como la construcción del canal *MODE*, los cuales inicialmente tenían como objetivo conducir el agua salobre de desecho de los campos agrícolas hacia la PDY y una vez desalinizada, regresarla al RC para que formara parte del agua del tratado de 1944 (Furnish y Ladman, 1975). Otra de las obras construidas por medio de la minuta 242 fue la extensión del canal *MODE* en México, el canal General Rodolfo Sánchez Taboada o WM, mismo que tendría la capacidad de conducir hasta $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua salobre, y que de forma anual enviaría los 172 hm^3 provenientes del DDRWM hacia la CSC.

Desde el año 1977 el canal WM ha conducido de 120 a 180 hm^3 anuales, con una salinidad media de 3,000 ppm (Burnett et al., 1993). Sin embargo, ese afluente principal a la CSC va a necesitar protección para asegurar que la calidad y la cantidad de agua no disminuyan (Cohen, 2006). No obstante el volumen enviado de esta agua salobre no se encuentra incluido dentro del tratado de aguas de 1944.

Los DDRWM en los E.U., son los responsables de proveer el 85% del agua que recibe la CSC. El otro 15% es proveniente de los flujos agrícolas de riego localizados del lado mexicano, a través del DR, el cual a diferencia del WM, no está revestido de concreto.

En la actualidad, a pesar de que el agua que alimenta este humedal ha sido manejada por el ser humano, sigue siendo favorable para el sustento de las especies endémicas o que simplemente realizan una escala para pasar el invierno. Esta atracción de la fauna hacia la

CSC ha traído como consecuencia actividades que generan ingresos a las comunidades aledañas a ella brindando sus servicios como guías; ecoturismo, caza y pesca deportiva.

Dren Riíto

El DR es el segundo afluente más importante que abastece a la CSC, por el cual, han fluido en promedio 25 hm³ anuales con una concentración de 4,000 ppm. El agua proviene del distrito de riego de San Luis en el Estado de Sonora y se localiza muy cerca del punto de descarga del canal WM (Burnett et al., 1993).

La Ciénega de Santa Clara

La CSC de hoy en día es un humedal de origen antropogénico que se estableció en el lado este del Delta en 1977 cuando desde los E.U. se comenzó a bombear agua salobre del subsuelo (3,000 ppm) proveniente del DDRMW en el Estado de Arizona a través del canal *MODE* (Glenn et al., 1992, 1996; Zengel et al., 1995; Zengel y Glenn, 1996; Glenn, 2006).

El DDRWM, se localiza en el valle del Río Gila, pero el agua de riego que utiliza es desviada desde el Río Colorado a la Presa Imperial (U.S. Bureau of Reclamation, 1984). Es por ello que el agua del *MODE* que posteriormente es enviada al WM, es una mezcla concentrada de las aguas del Río Gila y aguas del Río Colorado que son bombeadas desde debajo de los campos de cultivo (García-Hernández et al, 2000).

En el año 1973 la superficie de la CSC era de 200 ha y era alimentada por agua de drenaje agrícola del DR y manantiales artesianos (Glenn, 1996), sin embargo desde que se le comenzó a enviar agua por el WM ha crecido hasta convertirse en el humedal más extenso del Delta con una superficie aproximadamente de 6,000 ha (García-Hernández et al., 2001), 4,200 ha (Glenn, 2001), 4,477 ha (Glenn, 2006); conformada de lagunas y vegetación de marisma. Parte de la CSC se ubica dentro de la zona núcleo de la Reserva de la Biosfera del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado (decretada en junio de 1993 en el Diario Oficial de la Federación) a un costado donde llega a fluir el RC hacia el Golfo de California en México, y el resto, se encuentra dentro de su zona de amortiguamiento; geográficamente se localiza en las coordenadas WGS84: 32° 01' 39'' N y 114° 52' 55'' W.

En total existen 22 especies de plantas a lo largo de la CSC (Zengel et al., 1995), sin embargo la vegetación que la conforma en grandes cantidades es Tule (*Typha domengensis*) así como algunas zonas con pastizales. Esta vegetación permite utilizar el humedal como un hábitat para las especies protegidas como el Palmoteador de Yuma. Además de otras especies de aves como silbones, cormoranes, golondrinas de mar, pelicanos y garzas. La CSC es una importante área de descanso para las aves acuáticas que utilizan la ruta migratoria del Pacífico (Eddleman, 1989; Abarca et al., 1993; García-Hernández et al., 2001). Por ende, este sitio es de suma importancia para las aves y la vegetación de la cual ellas dependen, y que a su vez, depende del agua que se le envía.

Las aguas someras del humedal permiten el alojamiento de las especies Tilapias, pez Gato, Carpas, Lobinas negras así como el pez Cachorrito del desierto, otra especie en peligro de extinción que se han encontrado en grandes poblaciones más de una vez en el humedal (Zengel y Glenn, 1996). Sin embargo, para que esta agua pueda seguir circulando y permita la existencia de estas especies, va a depender en gran parte en la resolución de temas complejos sobre el agua en ambos países, México-E.U. (Cohn, 2004).

Planta Desalinizadora de Yuma

La PDY fue construida por el Buro de Reclamación de E.U. (BOR por sus siglas en ingles) con el objetivo de resolver las quejas del lado mexicano sobre los altos niveles de sal en el agua que se envía desde los E.U. por el tratado de 1944 (Cohn, 2004). Su función es tratar el agua residual salobre utilizada en el DDRWM, reenviar aproximadamente 2/3 partes de agua al RC y el agua con salmuera restante (96 hm³) sería descargada hacia la CSC por el canal WM; en caso de que trabajara al 100% de su capacidad. En el año 1972 los E.U. prometieron reducir el contenido de sal a casi el nivel que contiene el agua en el río de la presa Imperial al norte de Yuma, Arizona. Sin embargo la planta no estuvo construida hasta el año 1992 y cuando finalmente lo estuvo solo trabajo durante 6 meses, posteriormente fue cerrada después del año 1993 a causa de las inundaciones en el Río Gila, el cual se une al Río Colorado al norte de Yuma; dañando al canal *MODE* que conduce el agua hacia la planta. La PDY no se volvió a abrir ya que la desalación era costosa, y a pesar de que no se estaba utilizando el agua proveniente del DDRWM, el agua

del Río Colorado se encontraba dentro de los límites de salinidad (Cohn, 2004). En el año 2004 el congreso autorizó al *BOR* en considerar la reactivación de la planta.

La completa operación de la planta disminuiría a dos terceras partes el volumen de agua que fluye hacia la CSC y podría triplicar la salinidad del agua mucho más allá de la tolerancia que soporta la vegetación que actualmente comprende el humedal (Cohen, 2006). Se calcula que la máxima salinidad que tolera la CSC es de 5,000 ppm (Glenn et al., 1995).

La descarga de agua salobre posteriormente de ser procesada por la PDY tendría una calidad muy baja la cual podría rápidamente disminuir la superficie vegetal de Tule en el humedal. Como consecuencia destruiría el hábitat de una gran cantidad de especies en peligro de extinción, una de ellas el Palmoteador de Yuma (Hinojosa-Huerta, 2004).

Existe la posibilidad de que se pueda reducir la cantidad de agua que entra en la CSC para que se siga conservando, simplemente lo que hay que mejorar es su calidad. Sin embargo existen otros problemas aparte de la salinidad como es el Selenio, el cual se introduce en la cadena alimenticia cuando se disuelve en la CSC. A pesar de estos problemas no se ha provocado alguna reducción significativa en la especie o en su reproducción, es necesario seguirla estudiando para evaluar la calidad que presenta el agua.

Balances Hídricos

Durante los años 1992-1998 Cohen y colaboradores (2001) realizaron de forma general un balance preliminar en el Delta, en donde el área de estudio se dividió en 3 subsistemas hidrológicos; uno de ellos la CSC. Este balance contribuyó para determinar cuánta agua consumieron los cuerpos de agua proveniente de los E.U.; incluyendo cálculos para estimar las pérdidas por flujo superficial-subterráneo, E y ET mediante reportes de una estación climatológica. Para ser un balance general del Delta permitió determinar el comportamiento del agua durante este periodo en el cual existieron años de descargas de agua muy grandes (1993, 1997 y 1998) y años sin flujo de agua; hacia la presa Morelos. En el balance de Cohen y colaboradores (1992-1998) se hizo uso del balance de masa para obtener un resultado estimado mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{ds} = Q_{us} + Q_{rf} + P + T_r - E - ET - \Delta S_a - Q_{sb} \quad \underline{01}$$

Donde

Q_{ds}	Flujo aguas debajo de la frontera
Q_{us}	Flujo aguas arriba de la frontera
Q_{rf}	Aguas de retorno al Río Colorado (drenaje agrícola y municipal)
P	Precipitación (en superficies de aguas abiertas)
T_r	Flujo tributario
E	Evaporación en superficies de aguas abiertas
ET	Evapotranspiración
ΔS_a	Cambio en el almacenamiento del acuífero aluvial
Q_{sb}	Flujo en la sub-cuenca

Este balance en comparación al realizado en esta tesis es similar, considerando varios factores como son: la ubicación del humedal (Delta), la utilización de reportes de la CILA y algunos elementos que componen la fórmula 01 del balance hídrico. No obstante, existen discrepancias en el área de estudio así como el periodo en el que se llevó a cabo el estudio de Cohen ya que son muy extensos y no acotan el comportamiento del humedal en específico, además que las condiciones durante el periodo estudiado por Cohen (2001) y colaboradores, son distintas a las que fue sometido el humedal durante el 2010-2011.

Por otro lado, en el humedal de Talladega ubicado en el Estado de Alabama (*West Central*), E.U., se llevo a cabo un balance durante los años 1994 y 1995 en el cual la metodología utilizada por Chaubey y colaboradores (2006) hace uso de bases de datos obtenidas con estaciones climatológicas localizadas dentro de la zona de estudio, y con los datos registrados desarrollaron las ecuaciones que permiten estimar las pérdidas por ET; aplicando la ecuación de Penman y Monteith (PM). Durante el estudio se calcularon flujos subterráneos de entrada y salida, los cuales, permitieron un afinamiento a su resultado. La fórmula que manejo para su cálculo es la siguiente:

$$\frac{dV}{dt} = P_n + S_i + G_i - S_o - G_o - ET \quad \underline{02}$$

Donde

V	Volumen de agua almacenada en el humedal
t	Tiempo
P_n	Precipitación neta
S_i	Entradas de flujo superficial
G_i	Entradas de flujo subterráneo

S_o	Salidas de flujo superficial
G_o	Salidas de flujo subterráneo
ET	Evapotranspiración

La metodología utilizada por Chaubey para conocer el comportamiento hidrológico del humedal Talladega podría ser utilizada en otros tipos de humedales riparios y antropogénicos. Sin embargo, es necesario no olvidar las condiciones del sitio, la localización y la continuidad de los registros obtenidos en campo.

En el caso de la CSC, Huckelbridge y colaboradores (2010) propusieron un modelo para evaluar la hidrología, la hidrodinámica, la salinidad y la cobertura vegetal del humedal. En donde para calibrar su modelo utiliza una serie de datos como las variaciones de cobertura vegetal y tasas de ET; durante un periodo que abarca desde el año 1993 hasta el 2007. Los resultados de este modelo ofrecieron 9 hipotéticos escenarios que representan los rangos de calidad y cantidad de aguas entrantes al sistema, además de concluir que el ecosistema de la CSC es más sensible a las variaciones de salinidad que en las variaciones de cantidad en el flujo entrante.

Para poder llevar a cabo el balance consideraron dividirlo en cuatro módulos:

1. Módulo de ET que es determinada con la fórmula de PM.
2. Módulo de balance de agua, donde calcula la profundidad del humedal mediante las entradas y salidas de agua del sistema.
3. Módulo de mezcla, donde describe cuanta sal está distribuida en la CSC.
4. Módulo de vegetación, en el cual calcula que fracción de cobertura vegetal tienen las celdas en las que dividió al humedal, en base a las concentraciones de salinidad y la profundidad del agua.

El desarrollo de este modelo es muy complejo y fue necesario manejar el software MATLAB[®] en conjunto con una técnica escalonada paso a paso. Sin embargo este modelo maneja mucha incertidumbre con respecto a los rangos de tolerancia de sal en la vegetación del humedal así como las salidas de agua las cuales son difíciles de estimar. No obstante, puede ser utilizado como una herramienta para predecir los cambios de la CSC a través de escalas temporales o anuales según Huckelbridge.

Marco teórico

Humedales

Cuando hablamos de las ciénegas, humedales o marismas, es indispensable mencionar La Convención Sobre los Humedales de Importancia Internacional, conocida también como Convención de Ramsar, llevada a cabo en Irán en el año 1971, el cual es un tratado intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional en pro de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos.

La importancia que la Convención de Ramsar tiene, es ser el único tratado global involucrado en la recuperación ambiental que principalmente se enfoca en un tipo de ecosistema en particular, los humedales. Además de que tiene una gran amplitud ya que los países que conforman Ramsar abarcan las regiones geográficas del planeta en su totalidad.

Esta convención proporciona una seguridad ecológica global al promover y actuar por la conservación y el manejo racional de los humedales. Utilizando una plataforma local y nacional, siendo respaldada gracias a la cooperación internacional para contribuir al logro de un desarrollo sostenible mundial. Contribución la cual es generada en los humedales por ser los medios más lucrativos del mundo, ya que son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua, así como productividad primaria que es necesaria para el sustento de especies vegetales y animales (Ramsar, 2006).

Por las características que presenta la CSC según Ramsar, es considerada como una de las diversas zonas biológicas conocidas como humedal. El cual se presenta en zonas de tierras generalmente planas, donde la superficie se puede inundar permanente o intermitentemente, entonces al momento en que su respectivo suelo se satura, queda ausente de oxígeno y da lugar a un ecosistema híbrido entre los organismos únicamente acuáticos y los terrestres.

Definición de humedal o *wetlands* (en inglés) según Ramsar 1971:

- ✓ Un humedal es una zona de la superficie terrestre que está temporal ó permanentemente inundada, regulada por factores climáticos y en constante interrelación con los seres vivos que la habitan.

Según el artículo 1 del párrafo 1, se consideran humedales,

- ✓ A 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.

Así mismo, contenido en el artículo 2 del párrafo 1, se estipula que,

- ✓ Podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal.

Funciones de un humedal

La poca profundidad del nivel freático con la constante alteración del régimen del suelo, es un carácter distintivo de los humedales. Al querer nombrar el tipo de vegetación que en estos se encuentra, nos basamos en la localización en donde se ubica, por ejemplo.

- ✓ Si la vegetación se encuentra sobre zonas inundadas de agua se denomina hidrófila.
- ✓ Freatófitas cuando estas se localizan sobre zonas de agua oculta (criptohumedales).

Por las propiedades poco usuales y que sólo se presentan en estos lugares, las especies animales y vegetales son generalmente endémicas a diferencia de las que se exhiben en el entorno colindante a este. Especies animales como las aves, peces y los reptiles cuentan con las capacidades para poder adaptarse a este tipo de entornos, utilizándolos para diversificar su especie, descansar y así como proveerse de alimento.

La función principal del humedal, aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos, es que actúan como filtradores naturales de agua, esto se debe a que sus plantas hidrófilas, gracias a sus tejidos, almacenan y liberan agua, y de esta forma hacen un proceso de filtración. Antiguamente los humedales eran drenados por ser considerados una simple inundación de los terrenos, pero hoy en día se sabe que los humedales representan un gran ecosistema y se les valora más.

Hay que considerar los roles que se desarrollan en las tierras húmedas y que no se desenvuelven de forma unilateral, por lo que las especies animales como son los peces y las aves de otras regiones o fronteras nacionales pueden migrar distancias extensas y en su transcurso hacer uso de estas zonas.

La conservación de los humedales o su destrucción repercute en los impactos que envuelven a los recursos biológicos. Esto es, si por ejemplo, en una nación se van degradando estas superficies y obligan a que las especies que utilizan estos sitios desaparezcan poco a poco y provoquen cambios en el ecosistema. Los humedales son de suma importancia para el medio ambiente, el ecosistema y la sociedad en general. Sin embargo todas estas tierras húmedas alrededor del planeta se encuentran amenazadas por una gran cantidad de peligros, pero que a su vez también dan sustento. Estos peligros latentes, se generan por la falta de conocimiento y mal uso que se le da al recurso hídrico, por ejemplo la explotación excesiva para usos agrícolas, desarrollo industrial, entre otras.

Clasificación de humedales

La manera en que se clasifican los humedales depende de los objetivos que se pretendan alcanzar, o también en los tipos de estudios en que se fundamenta. Por ejemplo algunos criterios son: el hidrogenético, que depende según el origen y usos del agua, para demandas de agua; el morfológico, que es principalmente de divulgación; el de criterio funcional, que se fija en lo ecológico según su hábitat para la conservación del medio ambiente; y como último está el estructural desde el punto de vista de gestión.

Existen más de treinta tipos de humedales naturales y nueve artificiales, sin embargo todos estos se engloban en cinco para poder ser identificados: los humedales marinos, los ribereños, estuarinos, los palustres y los lacustres.

Conservación de humedales

Hasta hace poco tiempo, los humedales no contaban con una buena disponibilidad para poder ser habitados y por consecuencia un crecimiento de los mismos. La biodiversidad de estas superficies las convierte en un recurso ecológico primordial para el planeta, pero los riesgos radican en los cambios que se generan por causas sociales.

El documento de política más importante es la Directiva Operacional 4, Anexo D: “*Wildlands: Their Protection and Management*”, que considera a los humedales como tierras silvestres de particular importancia.

En el año 1971 la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (*IUCN* por sus siglas en inglés) formuló un listado de humedales de protección recomendada en la primera convención Ramsar. Más de un millar de humedales en todo el mundo se encuentran protegidos actualmente.

Las recomendaciones para la conservación de los humedales son las siguientes:

1. El abastecimiento de agua de un humedal es primordial para su sustento, por lo tanto se evitara construir caminos, represas altas, control de inundaciones, la disminución del drenaje en el acuífero y sistemas de riego, así como cualquier tipo de obra que afecten el desempeño del mismo.
2. Dirigir el futuro del humedal realizando una conversión directa del mismo para la agricultura, instalaciones portuarias, proyectos de navegación y acuicultura. Dentro de estas la más particular es para el cultivo del camarón desarrollada en manglares.
3. Algunos proyectos para intervenir en la alteración de condiciones ambientales, mediante la eliminación de contaminantes en tierras húmedas, en los que observamos la amenaza de la introducción de especies exóticas (acuicultura), si producen una variación física por las actividades humanas, y si estos contribuyen también a la precipitación de lluvia ácida o a la elevación del nivel del mar.
4. La utilización de las cuencas hidráulicas en otros proyectos efectuados para soluciones al problema ambiental.

Canal hidráulico

Un canal es una construcción que tiene como objetivo el transporte de fluidos, generalmente agua, y a diferencia de los conductos por tuberías, el canal se encuentra abierto a la atmosfera. Estos también son utilizados como vías de navegación artificial.

La hidráulica es la encargada de describir el comportamiento hidráulico en ellos, sin embargo el encargado del diseño cae en hombros de la ingeniería hidráulica, una de las especialidades de la Ingeniería Civil.

Los canales se clasifican de la siguiente manera: los de origen natural que se forman por la misma naturaleza de la corteza terrestre; los de navegación, que funcionan como una vía que conecta lagos, ríos u océanos y finalmente los canales de riego, que se construyen para conducir el agua, en nuestro caso el canal WM que se observa en la Figura 2.

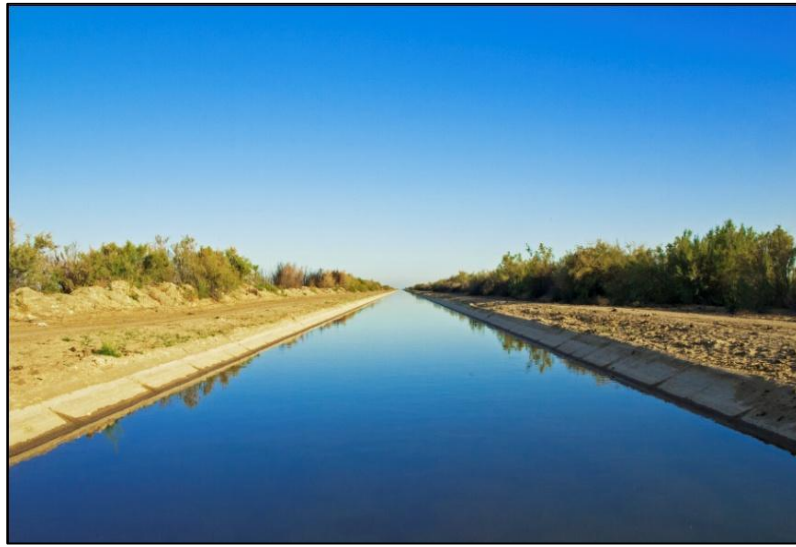


Figura 2. Canal Wellton-Mohawk (Imagen, 2010).

Dren agrícola

Es un sistema por el cual al nivel del suelo controla el agua para aumentar la producción de cultivos agrícolas, o también para extraer los excedentes de flujo que existan en superficies saturadas de agua (Figura 3).

La función del sistema de drenaje de las parcelas es de controlar el nivel freático, mientras que la función del sistema de drenaje principal es recoger, transportar y disponer del agua a través de un conducto de salida.



Figura 3. Dren Riíto (Imagen, 2010).

Los drenes se clasifican como superficiales, subterráneos, drenaje principal y sistema principal de evacuación de salida.

Flujo en canales abiertos

Los canales Wellton-Mohawk así como el Dren Riíto son considerados como de flujo a cielo abierto y es necesario aplicar las teorías que se manejen en estas condiciones. El comportamiento del escurrimiento en los canales a cielo abierto es complicado debido a que la posición de la superficie libre es variable en función al tiempo, de igual manera la profundidad del escurrimiento. Esto significa que los componentes del canal son variables y es necesario tener el conocimiento de ellos ya que son interdependientes entre sí. En canales abiertos la superficie por la cual circula el agua varia, la rugosidad que presenta es variable a irregular, por ello es necesario seleccionar coeficientes de fricción que engloben las características donde será analizado. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

Clasificación de flujo en canales abiertos

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras, en este trabajo usaremos la clasificación de Ven Te Chow (1982), la cual se resume de la siguiente manera.

- ✓ Flujo permanente
- ✓ Flujo uniforme
- ✓ Flujo variado:
 - a) Gradualmente variado
 - b) Rápidamente variado

Caudal

Caudal es la cantidad de fluido, flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en una unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica como el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

En física e ingeniería, caudal es la cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en un determinado sistema o elemento. Se expresa en la unidad de volumen dividida por la unidad de tiempo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Para el caso de cuencas, ríos o arroyos, los caudales generalmente se expresan en miles de metros cúbicos por segundo. Son variables en tiempo y en el espacio, y esta evolución se puede representar con los denominados hidrogramas.

El caudal de un río puede calcularse a través de la siguiente fórmula:

$$Q = A * v \quad \quad \quad \underline{03}$$

Donde

Q	Caudal por unidad de tiempo ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
A	Área (m^2)
v	Velocidad lineal promedio (m s^{-1})

Estación de aforo

Se le llama al punto en el que se miden y registran los volúmenes del caudal de los recursos hidráulicos. En este proyecto tenemos contemplados dos:

- ✓ El puente del canal Wellton-Mohawk, localizado aproximadamente a 300 m de la desembocadura hacia la CSC.
- ✓ Alcantarilla del Dren Riíto rumbo al Ejido Luis Encinas Johnson.

Balance Hídrico

El concepto de balance hídrico se deriva del concepto de balance en contabilidad, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan al sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado. Sintéticamente puede expresarse de la siguiente manera.

$$Estado_{t+1} = Estado_t + \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^M Salidas_j \quad 04$$

El estado inicial (en el instante t) de la cuenca o parte de esta, para efecto del balance hídrico, puede definirse como, la disponibilidad actual de agua en las varias posiciones que esta puede asumir, como por ejemplo: volumen de agua circulando en los ríos, arroyos y canales; volumen de agua almacenado en lagos, naturales y artificiales; en pantanos; humedad del suelo; agua contenida en los tejidos de los seres vivos; todo lo cual puede definirse también como la disponibilidad hídrica de la cuenca.

Para la determinación del balance hídrico se debe hacer referencia al sistema analizado. Estos sistemas pueden ser, entre otros; una cuenca hidrográfica, un embalse, un lago natural, un país e incluso un cuerpo humano.

Las entradas de agua a la cuenca hidrográfica pueden darse de las siguientes formas:

- ✓ Precipitaciones: lluvia; nieve; granizo; condensaciones
- ✓ Aporte de aguas subterráneas desde cuencas hidrográficas colindantes, en efecto, los límites de los acuíferos subterráneos no siempre coinciden con los límites de los partidores de aguas que separan las cuencas hidrográficas
- ✓ Trasvase de agua desde otras cuencas, estas pueden estar asociadas a:
 - a) Descargas de centrales hidroeléctricas cuya captación se sitúa en otra cuenca, esta situación es frecuente en zonas con varios valles paralelos, donde se construyen presas en varios de ellos, y se interconectan por medio de canales o túneles, para utilizar el agua en una única central hidroeléctrica.
 - b) Descarga de aguas servidas de ciudades situadas en la cuenca y cuya captación de agua para uso humano e industrial se encuentra fuera de la cuenca, esta situación

es cada vez más frecuente, al crecer las ciudades, el agua limpia debe irse a buscar cada vez más lejos, con mucha frecuencia en otras cuencas.

Las salidas de agua pueden darse de las siguientes formas:

- Evapotranspiración: de bosques y áreas cultivadas con o sin riego.
- Evaporación desde superficies líquidas, como lagos, estanques, pantanos, etc.
- Infiltraciones profundas que van a alimentar acuíferos.
- Derivaciones hacia otras cuencas hidrográficas.
- Derivaciones para consumo humano y en la industria.
- Salida de la cuenca, hacia un receptor o hacia el mar.

El establecimiento del balance hídrico completo en un sistema hidrológico es un problema muy complejo que involucra muchas mediciones de campo. Con frecuencia, se suele separar el balance de las aguas superficiales y el de las aguas subterráneas.

Evapotranspiración (ET)

Se define como evapotranspiración a la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Se expresa en milímetros (mm) por unidad de tiempo.

Los factores que intervienen en el proceso de evapotranspiración son diversos, variables en el tiempo y en el espacio y se pueden agrupar en aquellos de orden climático, los relativos a la planta y los asociados al suelo (Rojas y Nelson, 1994).

Tipos de evapotranspiración:

- Evapotranspiración potencial.
- Evapotranspiración de referencia o de cultivo de referencia.
- Evapotranspiración real, actual o efectiva.

Actualmente existe equipo electrónico automatizado capaz de calcular la evapotranspiración automáticamente durante extensos periodos de tiempo, estos equipos se localizan incluso dentro de estaciones climatológicas (*Davis Instruments*, 2011).

Formula de Penman y Monteith para estimar la ET, estandarizada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE por sus siglas en inglés, 2005).

$$ET_{SZ} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad 05$$

Donde

ET_{SZ}	Evapotranspiración estandarizada para un cultivo de referencia (mm h ⁻¹)
R_n	Radiación neta calculada para una superficie de cultivo (MJ m ⁻² h ⁻¹)
G	Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo (MJ m ⁻² h ⁻¹)
T	Temperatura media horaria a una altura de 1.5 a 2.5 m (°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) (kPa °C)
γ	Constante psicrométrica (kPa °C)
C_n	Constante numerador dependiente de referencia y tiempo (K mm s ³ Mg ⁻¹ h ⁻¹)
C_d	Constante denominador dependiente de la referencia y tiempo (s m ⁻¹)
	Las unidades para el coeficiente 0.408 están en m ² mm MJ ⁻¹

Las variables utilizadas en la formula anterior son obtenidas siguiendo la metodología de Allen y colaboradores (2005) presentada en el manual del ASCE.

Calor latente de vaporización (λ)

$\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Este valor es el recomendado por el manual del ASCE considerando que solo varia un poco por el rango de variación de la temperatura del aire (temperaturas máximas y mínimas registradas por la estación: máxima 44.7 °C, mínima -4.9 °C) que ocurren en los sistemas hidrológicos o agrícolas).

Temperatura media del aire (T)

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad 06$$

Donde

T	Temperatura media del aire (°C)
T_{max}	Temperatura máxima del aire a cada hora (°C)
T_{min}	Temperatura mínima del aire a cada hora (°C)

Presión atmosférica (P)

Obtenida en pascales a cada hora por la estación, siendo necesario hacer una conversión de pascales (Pa) a kilo pascales (kPa) para la aplicación de la fórmula 07.

Constante psicrométrica (γ)

Este valor se obtuvo aplicando la ecuación que se presenta a continuación donde el resultado es proporcional a la media de la presión atmosférica y es constante para cada sitio de medición.

$$\gamma = .000665P \quad 07$$

Donde

γ Constante psicrométrica (kPa)
 P Presión atmosférica (kPa)

Pendiente de la curva de presión saturante de vapor (Δ)

Este valor se calcula mediante la siguiente formula obtenida del manual del ASCE.

$$\Delta = \frac{2503 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right)}{(T + 237.2)^2} \quad 08$$

Donde

Δ Pendiente de la curva de presión saturante de vapor (kPa °C)
 T Temperatura media del aire (°C)

Presión de vapor saturado (e_s)

La presión de vapor saturado representa la capacidad del aire de mantener el vapor del agua. Para obtenerlo es necesario desarrollar la siguiente ecuación.

$$e_s = e^o(T) = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad 09$$

Donde

e_s Presión de vapor saturado (kPa °C)
 $e^o(T)$ Función de presión de saturación del vapor; sin embargo, esta no se utiliza

cuando el cálculo se lleva a cabo de forma horaria según el manual del ASCE.

Presión de vapor actual (e_a)

Es usada para representar el contenido de agua (humedad) del aire en el sitio con su respectivo clima. Siendo la formula 38 del manual del ASCE donde se utiliza la temperatura del punto de rocío (T_{dew}).

$$e_a = e^o(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right) \quad \underline{10}$$

Radiación neta (R_n)

La radiación neta es el importe neto de la energía radiante disponible en la vegetación o en la superficie del suelo para la evaporación del agua, el calentamiento del aire, o el calentamiento de la superficie. Se calcula de la siguiente manera.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \underline{11}$$

Donde

R_n	Radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
R_{ns}	Radiación solar neta de onda corta ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
R_{nl}	Radiación solar neta de onda larga de salida ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

$$R_{ns} = R_s - \alpha R_s = (1 - \alpha)R_s \quad \underline{12}$$

Donde

α	Albedo o coeficiente de reflexión del dosel. Esta fijado en 0.23 (adimensional) estandarizado para superficies de referencias altas y bajas.
R_s	Radiación solar entrante ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

El proceso estandarizado del ASCE es el mismo adoptado por la FAO-56 y se basa en el método de Brunt (1932, 1952) para predecir la emisividad neta de la superficie.

$$R_{nl} = \sigma f_{cd} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) T_{Khr}^4 \quad \underline{13}$$

Donde

σ	Constante de Stefan-Boltzman ($2.042 \times 10^{-10} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
----------	---

f_{cd}	Función de la nubosidad (sin unidades pero limitada a $0.05 \leq f_{cd} \leq 1.0$)
e_a	Presión de vapor actual (kPa)
T_{Khr}	Temperatura media absoluta horaria ($^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$)

$$f_{cd} = 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \quad \underline{14}$$

Donde

R_s/R_{so}	Radiación solar relativa (limitada a $0.3 \leq R_s/R_{so} \leq 1.0$)
R_s	Radiación solar media medida o calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
R_{so}	Radiación calculada con cielo despejado ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)

Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo (G)

Es la energía térmica que es utilizada para calentar el suelo y es determinada de la siguiente manera.

$$G = .04 R_n \quad \underline{15}$$

Donde

R_n	Radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
-------	---

Relación en el perfil del viento

Son las variaciones de la velocidad del viento con respecto a la altura sobre la superficie del suelo.

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z_w - 5.42)} \quad \underline{16}$$

Donde

u_2	Velocidad del viento a 2.0 metros sobre el suelo (m s^{-1})
u_z	Velocidad del viento medida a z_w metros sobre la superficie del suelo (m s^{-1})
z_w	Altura de la medición del viento sobre la superficie del suelo (m)

Constante numerador (C_n) y Constante denominador (C_d)

Donde

C_n	Constante numerador dependiente de referencia y tiempo ($K \text{ mm s}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ h}^{-1}$)
C_n	66 mm h^{-1}
C_d	Constante denominador dependiente de la referencia y tiempo (s m^{-1})
C_d	$0.25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$

Estos datos son obtenidos de la tabla 1 del manual del ASCE donde C_n considera el paso del tiempo y la rugosidad aerodinámica de la superficie y el C_d considera el paso del tiempo; la resistencia de mayor volumen de la superficie y la rugosidad aerodinámica de la superficie.

Evaporación (E)

La estimación de E con la fórmula de PM presentada por Custodio y Llamas, (1983), se basa en la fórmula de Dalton multiplicada por una función de velocidad del viento:

$$E = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad 17$$

Donde

E	Evaporación diaria (mm)
Δ	Pendiente de la curva de presión saturante de vapor (mm de Hg °C)
R_n	Radiación neta, traducida a mm de agua que se puede evaporar en un día.
γ	Constante psicrométrica (mm de Hg °C ⁻¹)
E_a	$0.35 (0.5 + 0.54 V_2) (e_a - e_d)$

$$R_n = \frac{R_N}{c_1} \quad 18$$

Donde

R_n	Evaporación diaria (mm día ⁻¹)
R_N	Radiación neta diaria (cal cm ⁻²)
c_1	El calor de vaporización necesario para evaporar 1mm de agua por cada cm ² de superficie. Este valor es dependiente de la temperatura y es en general, obtenido de forma tabular.

$$E_a = 0.35 (0.5 + 0.54 V_2) (e_a - e_d) \quad 19$$

Donde

V_2	Velocidad del viento a 2.0 metros de altura sobre la superficie (m s^{-1})
e_a	Tensión de vapor saturante a la temperatura del aire en (mm de Hg)
e_d	Tensión de vapor en el aire (mm de Hg)

Donde

γ	Constante psicrométrica ($\text{mm de Hg } ^\circ\text{C}^{-1}$)
γ	0.485 ($\text{mm de Hg } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Flujo Superficial (FS)

Este escurrimiento es estimado por la diferencia entre el total de volumen de agua que entra y el volumen de agua que sale por E y ET.

$$FS = (WM + DR + P) - (ET + E) \quad \underline{20}$$

Donde Para aplicar la formula en la CSC se consideran las siguientes variables

FS	Perdidas por flujo superficial
WM	Entrada de agua por el canal Wellton-Mohawk
DR	Entrada de agua por el Dren Riíto
P	Entrada de agua por precipitación
ET	Pérdidas de agua por evapotranspiración
E	Pérdidas de agua por evaporación
Todos estos volúmenes anuales de agua están en metros cúbicos (m^3)	

Materiales y Métodos

La Ciénega de Santa Clara es un sistema hídrico muy complejo donde distintos factores naturales como antropogénicos intervienen en las funciones que desempeña. Al paso del tiempo el humedal ha sufrido disminuciones en el envío de agua por el canal WM debido a las construcciones de las presas en los E.U.

El área de estudio presenta dificultades logísticas para su acceso por la presencia de densa vegetación y suelo pantanoso alrededor del perímetro. En base a ello se desarrollaron metodologías que permitieron adquirir información en tiempo real de los componentes en campo que influyen en la hidrodinámica del sitio. En la Figura 4 se resumen las actividades realizadas durante todo el ciclo y que se consideraron para lograr los objetivos propuestos.



Figura 4. Resumen de actividades realizadas durante el estudio.

El monitoreo de los parámetros en campo se desarrolló durante 365 días comenzando el 24 de marzo del año 2010, periodo dentro del cual se llevó a cabo la prueba piloto de la PDY; que inicio el 3 de mayo del 2010 y concluyó el 26 de marzo del siguiente año.

No obstante el 4 de abril 2010 sucedió un evento natural de gran magnitud, el terremoto que afecto gran parte del valle de Mexicali y los alrededores. Sin embargo este

suceso no repercutió en las actividades desarrolladas en nuestra área de estudio y en la investigación ya que el sitio no sufrió alteraciones considerables.

Posteriormente de finalizar el periodo de estudio de esta investigación, el 23 de marzo del 2011 ocurrió un incendio en el humedal el cual no tuvo consecuencias con los datos utilizados pero si con el área de estudio. Consumió la vegetación del sitio casi en su totalidad y como consecuencia alteraciones en el ecosistema. La pérdida de los equipos instalados utilizados en este estudio fue inminente.

Por otro lado, debido a que el estudio inició el 24 de marzo del 2010 se consideraron solamente 8 días para marzo del 2010, y para el siguiente año, hasta el 23 de marzo.

Entradas de agua

Canal Wellton-Mohawk

Para determinar el volumen de agua mensual proveniente de los E.U. hacia la CSC por el canal WM se utilizaron los reportes mensuales de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) proporcionados por la oficina regional de la CILA en Mexicali. 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), así como otros parámetros no utilizados en el cálculo de balance. Estas mediciones fueron realizadas por la CILA en el canal WM a unos 51 km de la CSC en un punto cercano al *SIB* y los resultados se encuentran en unidades inglesas.

Procedimiento

El volumen mensual de agua que ingresó al humedal se calculó con las mediciones de caudal realizadas durante el año de estudio que inicio el 24 de marzo del 2010. Sin embargo, el volumen de agua anual que ingreso a la CSC se calculó solamente con las mediciones de 363 días tomadas de los mismos reportes de la CILA, esto se debió a que los días 29 y 30 de noviembre del 2010 no se reporto ninguna descarga de agua.

Los cálculos del estudio se llevaron a cabo haciendo uso del Sistema Internacional de Unidades y para ello fue necesario convertir los *CFS* a metros cúbicos por segundo para cada uno de los promedios diarios utilizando 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 (86,400) y se obtuvo el volumen diario en metros cúbicos. El volumen utilizado fue el resultante de la suma de los volúmenes diarios en cada mes.

Para calcular los STD transportados en ese volumen se realizó lo siguiente.

1. Debido a que 1 ppm equivale a un 1.00 miligramo sobre litro (mg L^{-1}) los valores se mantuvieron y solamente se modificaron las unidades.
2. El promedio diario de STD ya con las unidades en mg L^{-1} fue multiplicado por el volumen diario de agua y el resultado se dividió entre 1,000. De esa manera se obtuvieron las toneladas de STD que ingresan a la CSC diariamente.
3. Para determinar las toneladas que ingresaron mensualmente al humedal proveniente de los E.U., se sumaron las toneladas diarias durante cada uno de los meses.

Además de utilizar los reportes mensuales de la CILA para conocer el volumen de agua y la cantidad de STD que son enviados hacia la CSC, en México se llevaron a cabo mediciones quincenales de forma manual en el mismo WM (Figura 5). El punto de aforo esta en un puente de concreto ubicado a 300 m del final de la sección revestida del canal (ver Anexo 1) con coordenadas WGS84: $32^\circ 03' 26''$ N y $114^\circ 53' 57''$ W.

Estas mediciones permitirían ver posibles variaciones del caudal por la distancia que recorre el agua hasta el humedal. Para ello se compararon con las mediciones de la CILA sin considerar los STD que transporta.

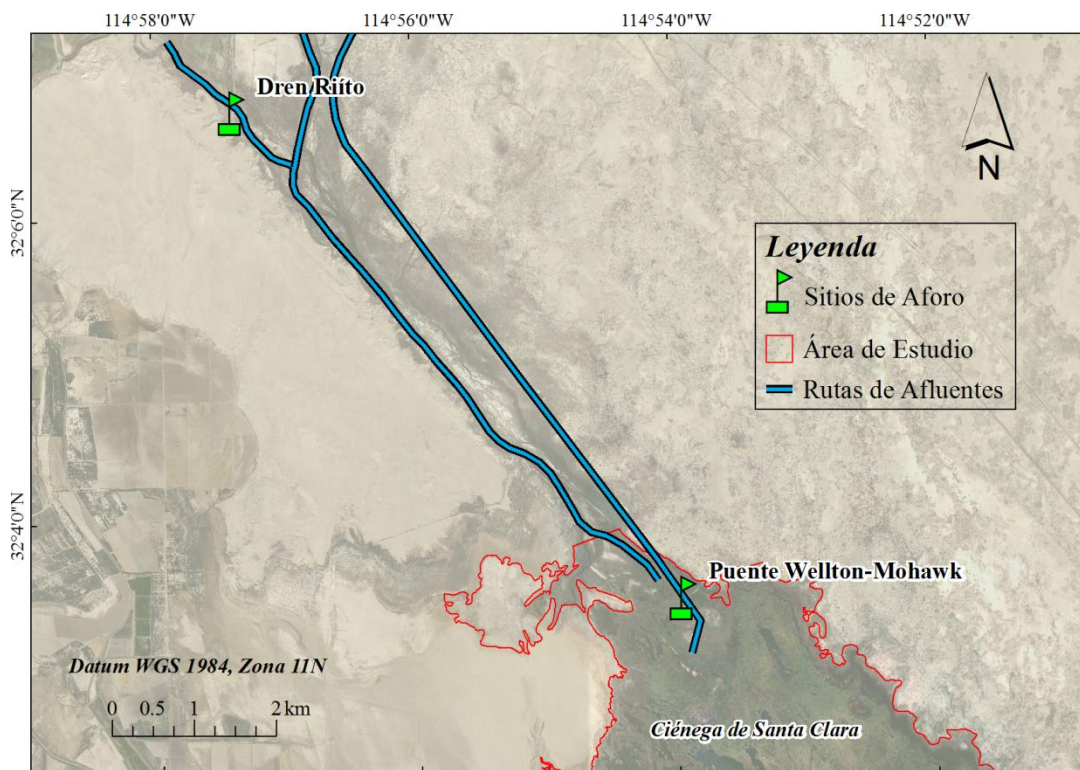


Figura 5. Localización de los sitios de aforo manual en México.

Dren Riito

Los aforos quincenales en el afluente DR se llevaron a cabo en una alcantarilla de concreto que intercepta sobre el camino con destino al Ejido Luis Encinas Johnson (ver Anexo 2) con coordenadas WGS84: 32° 06' 41'' N y 114° 57' 22'' W.

Los resultados mensuales de estas mediciones fueron utilizados para calcular los volúmenes medios de entrada por el DR. Este proceso se llevó a cabo al obtener la media entre una medición mensual y la del mes siguiente. Los valores resultantes se utilizaron solamente para el periodo al que correspondió cada uno de los aforos.

La cantidad de STD que ingresó a la CSC a través del DR se estimó mediante el mismo procedimiento que en el canal WM y los datos de la CILA, con la excepción de que el promedio de los STD diarios se obtuvo mediante los registros diarios de un sensor automatizado *Yellow Springs Instrument* (YSI por sus siglas en ingles).

Durante los primeros meses de investigación se tuvieron problemas con los sedimentos acumulados y el material suspendido (vegetación) dentro del WM debido a los trabajos de desazolve que la CILA realizaba aguas arriba. También, esta limpieza incluyó la superficie inferior en donde se llevaron a cabo los aforos (puente) en territorio mexicano. En el DR se removió material por parte de la CILA de igual manera, solo que aquí la descarga que fluía hacia la CSC disminuyó a tal grado de no poder medirse, ya que en el sitio con coordenadas WGS84: 32° 06' 41'' N y 114° 57' 21'' W sobre el mismo DR, el equipo de dragado accedía modificando la dirección del cauce impidiendo el flujo.

Los resultados de la descarga medidos en el puente fueron graficados en conjunto con los datos de la CILA y además se elaboró otra gráfica que incluye todas las entradas de agua al humedal, con excepción de las mediciones tomadas en el WM del lado mexicano. Los datos calculados de STD fueron incluidos en un balance de masa.

Equipo

Para medir los flujos manualmente se utilizó un Velocímetro Doppler Acústico FlowTracker (FT) desarrollado por la compañía SonTek/YSI (Figura 6). Este dispositivo es el de más alta calidad en el mercado, con un rango de velocidades de ± 0.001 m/s a 4.0 m/s (± 0.003 o 13 ft s⁻¹) y una precisión de velocidad de $\pm 1\%$ de la velocidad medida, ± 0.25 cm s⁻¹. Ha sido probado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en ingles) bajo distintas condiciones encontrando un buen rendimiento en las mediciones de caudal. El FT es un medidor doppler de un solo punto corriente, diseñado para medir velocidades en campo (SonTek, 2009).



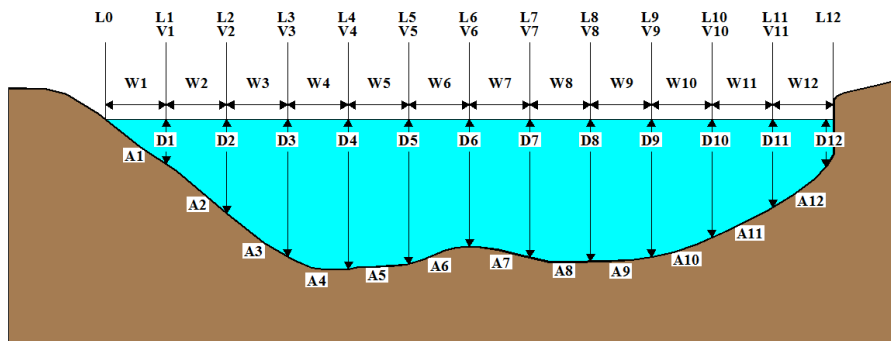
Figura 6. Velocímetro FlowTracker para medir caudales (Imagen de www.hoskin.ca).

Procedimiento

Los puntos de aforo del lado mexicano se dividieron por estaciones de forma transversal a la corriente utilizando una cinta graduada. En cada estación 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 descarga utilizado en el equipo es el principal fundamento para realizar mediciones en ríos o corrientes. Dentro del *FT* se utilizó la ecuación de sección media, los detalles de cómo es calculada la descarga en el equipo se muestran en la Figura 7 y están descritos en los estándares ISO: 748 (1997) y 9196 (1992). Este método es utilizado por el *USGS*, que es la principal agencia encargado de supervisar la descarga de los ríos en E.U.

21



Donde

Cálculos de borde

$$Q_0 = W_0 = A_0 = 0.0$$

i = borde de estación (L_i , D_i)

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

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

$$CF_i$$

$$CF_i * V_{i-1}$$

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

$$Q_i = A_i * V_i$$

Borde inicial, segundo borde de la isla interna

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 en 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

Figura 7. Modelo descriptivo de la ecuación de sección media (Modificado de SonTek, 2009).

Al finalizar las mediciones en campo el caudal resultante se obtuvo automáticamente por el equipo ($m^3 s^{-1}$). La información se descargó en el software SonTek FlowTracker v2.30 donde se generó un reporte detallado del trabajo realizado (ver en Anexo 3).

Precipitación

La precipitación se midió de manera directa utilizando el pluviógrafo de una estación climatológica modelo Vantage Pro 2 Plus de la compañía Davis Instruments. La información registrada automáticamente cada 30 minutos por el equipo, se descargó mensualmente y se insertó en una hoja de cálculo para su post proceso. El equipo se ubicó en el sitio con coordenadas WGS84: $32^{\circ} 02' 09''$ N y $114^{\circ} 53' 13''$ W dentro del cuerpo lagunar de la CSC en una pequeña isla con suelo firme (Figura 8).

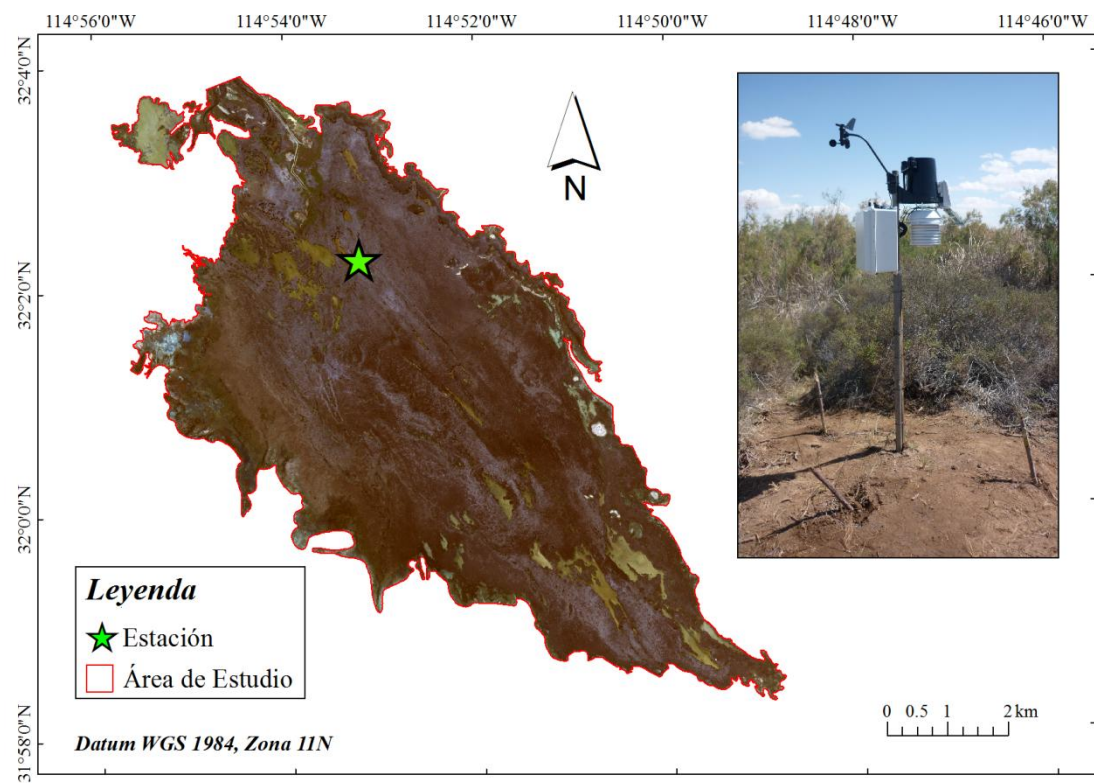


Figura 8. Mapa de localización de la estación climatológica en la CSC. En el recuadro superior derecho se observa una imagen de la estación instalada en el sitio.

Para cumplir con las especificaciones que se indican al utilizar las variables climatológicas en las ecuaciones de evaporación y evapotranspiración, los sensores se colocaron a 2.0 m sobre la superficie terrestre y orientados en dirección norte. Además de la precipitación, las variables climáticas obtenidas por la estación fueron las siguientes: temperatura, radiación solar, velocidad y dirección del viento, humedad relativa y absoluta, presión atmosférica, etc. La última de ellas en conjunto con los registros tomados con los equipos de nombre HOBO instalados en los sitios de monitoreo en la ciénega se utilizó para estimar la elevación del nivel del agua.

Procedimiento

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

Para identificar el porcentaje al que correspondieron los volúmenes de agua entrantes calculados se utilizó la siguiente fórmula.

$$\% = \left(\frac{AC}{\Sigma SC} \right) * 100 \quad \underline{\underline{22}}$$

Donde

AC Afluente calculado (m³)
 ΣSC Sumatoria de todos los afluentes calculados (m³)

Una vez obtenidos en porcentaje los volúmenes de entrada del canal WM, DR y precipitación, fueron expresados gráficamente para identificar sus aportaciones al humedal.

Salidas de agua

En la estimación de pérdidas o salidas de agua del humedal, se consideraron factores que están relacionados con el comportamiento hidrodinámico como son: las variaciones atmosféricas y la influencia de las superficies agua-vegetación que componen a la CSC. Por ello se recurrió al análisis de la superficie del humedal utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcMap Versión 10 (SIG), mismo que permite estimar el área de las superficies que componen a un sitio a través de la inserción de imágenes satelitales.

Los volúmenes de agua que pierde el humedal por los procesos de E y ET fueron variables en función del tiempo y en relación a la superficie cubierta por vegetación y agua expuestas directamente al Sol. Estas variaciones en las superficies fueron calculadas con la ayuda del SIG. Sin embargo, existen otras salidas como es el flujo superficial, que fue obtenido mediante el cálculo del balance hídrico.

Evaporación

Este proceso se estimó diariamente en milímetros mediante la ecuación de PM presentada por Custodio y Llamas en 1983 (Fórmula 17) aplicada para superficies de aguas abiertas. Las variables atmosféricas e información necesaria para desarrollarla se adquirieron de la estación climatológica instalada dentro de la CSC y las tablas del manual de Hidrología Subterránea de los mismos autores.

Procedimiento

Al haber sido desarrollada la fórmula 17 dentro de una hoja de cálculo, se observó gráficamente que los registros diarios de E no presentaban una continuidad debido a la falta de datos climatológicos registrados por la estación ya que la libreta del equipo que captura las mediciones no se encontraba en el sitio. Sin embargo, los días no registrados fueron se estimaron mediante la ecuación resultante para graficar una línea de tendencia polinomial de quinto orden, misma que se obtuvo de los datos existentes de E (Fórmula 23).

La fórmula para graficar la línea de tendencia polinomial es la siguiente.

$$y = -1.33E-11x^5 + 1.21E-08x^4 - 3.08E-06x^3 + 8.92E-05x^2 + 2.44E-02x + 4.39 \quad \underline{23}$$

Donde

x Numero de día durante el periodo correspondiente dentro del ciclo (1-365)

Al concluir con lo anterior y a completar el ciclo hidrológico (365 días), las unidades se transformaron a metros y se realizaron sumatorias diarias en cada uno de los meses para conocer la cantidad de E que se llevó a cabo.

El volumen de agua que perdió el sistema se calculó al multiplicar el área mensual de las lagunas expuestas al Sol por la sumatoria de E correspondiente a dicho mes.

Evapotranspiración

La ET se estimó en función del clima local a cada hora con la ecuación estandarizada para cultivos altos (> 0.50 m) y ásperos de PM (Fórmula 05), simplificada por el *American Society of Civil Engineers* (Allen et al., 2005). Los resultados obtenidos se sumaron diariamente durante el periodo de estudio obteniendo así las salidas de agua en la CSC (m).

La ecuación que el *ASCE* simplifica para estimar ET se eligió ya que utiliza un cultivo de referencia igual o mayor al medio metro, y debido a que la vegetación que predomina en la CSC es el Tule, las dimensiones de esta especie vegetal coinciden con las del cultivo de referencia del *ASCE* para ser llevada a cabo. Además, dicha formulación maneja una gran cantidad de variables para desarrollarla, variables que fueron calculadas haciendo uso de los registros de la estación climatológica instalada dentro de la CSC.

Procedimiento

El procedimiento para estimar ET se llevó a cabo de la siguiente manera:

1. Se obtuvo mensualmente el área total de vegetación utilizando la misma metodología para estimar las dimensiones de la CSC y tomando en consideración que es el Tule la especie vegetal más predominante.
2. Una vez conocida el área vegetal para cada mes se dividió en tres categorías según el vigor de la planta, el cual, se tomó en base al color que presentó la vegetación en las imágenes satelitales Landsat-5. Las áreas que correspondieron a cada categoría se cuantificaron mensualmente.
3. Los resultados estimados de ET se obtuvieron mensualmente para cada categoría mediante la fórmula 05 utilizando un respectivo porcentaje de albedo. Asignándosele a cada categoría de la siguiente manera; vigor alto (.22), medio (.34) y bajo (.50).
4. Los datos inexistentes se generaron mediante las fórmulas 24, 25 y 26 obtenidas dentro de la hoja de cálculo para graficar la respectiva línea de tendencia polinomial de quinto orden. Las fórmulas para graficarlas se muestran a continuación.

Para vegetación con vigor alto:

$$y = -4.71E-11x^5 + 4.35E-08x^4 - 1.29E-05x^3 + 1.22E-03x^2 - 5.54E-04x + 4.93 \quad \underline{24}$$

Para vegetación con vigor medio:

$$y = -3.90E-11x^5 + 3.57E-08x^4 - 1.03E-05x^3 + 9.04E-04x^2 + 7.00E-03x + 4.76 \quad \underline{25}$$

Para vegetación con vigor bajo:

$$y = -2.83E-11x^5 + 2.53E-08x^4 - 6.90E-06x^3 + 4.82E-04x^2 + 1.70E-02x + 4.52 \quad \underline{26}$$

Donde

x Numero de día durante el periodo correspondiente dentro del ciclo (1-365)

5. Finalmente, la sumatoria mensual de ET para cada cultivo (m) fue multiplicado por su respectiva área del mes y el resultado obtenido correspondió al volumen de agua (m³) que salió del humedal por ET.

Albedo

Para estimar la ET con la fórmula 05 se consideraron los porcentajes de radiación que el Tule refleja según se etapa de crecimiento en la que se encuentra. Esta variable se conoce como albedo y fue también utilizada para estimar E en superficies de agua abierta (0.05).

Para las superficies cubiertas por Tule el promedio anual es de 0.34 y fue asignado como se menciona anteriormente a la vegetación de vigor medio. En invierno, incrementa hasta llegar a 0.50 y se asignó al Tule con vigor bajo. Finalmente el albedo de 0.22 para plantas más frescas y en su mejor estado, se asignó a las plantas de vigor alto (Bray, 1962).

En los cálculos anuales de ET con vigor alto y medio se estimó un valor diario de albedo que fue cambiando durante el año. Para ello se utilizaron como referencia las imágenes satelitales Landsat-5 tomadas el 20 de agosto de 2010 y el 16 de marzo del 2011, posteriormente de haber sido analizados los cambios en la cobertura vegetal así como su tonalidad con el resto de las imágenes satelitales del año. De esa manera se asignaron los valores de albedo máximo y promedio (0.22 y 0.34) para la fecha del 20 de agosto debido a que en este mes el color verde que presento la vegetación en la imagen fue la de mayor luminosidad. Lo mismo sucedió con el mes de marzo y el albedo de 0.50 solo que el color que presento la vegetación, fue menor y más oscuro.

Partiendo de lo anterior la diferencia entre los valores mínimos (0.22-0.34) y máximos (0.50), entre el número de días, fue sumada y restada a cada día posterior de las fechas antes mencionadas para obtener el respectivo albedo diario y así, utilizarlos en la fórmula 05 con el fin de obtener una ET más aproximada o real.

En teoría, las variaciones del coeficiente de reflectancia se deben a los cambios estacionarios que sufre el Tule de la CSC y las diferencias entre un albedo constante a uno variable se verán reflejadas en la cantidad de volumen evapotranspirado.

Flujo Superficial

El flujo superficial de salida (Q_{SM}) se obtuvo por medio del balance hídrico una vez calculadas mensualmente las entradas de agua del WM, DR y precipitación; las salidas por E, ET y la diferencia de almacenamiento de agua mensual en el humedal (ΔVol).

Procedimiento

La estimación del Q_{SM} se realizó para cada uno de los meses despejando el flujo superficial de la fórmula 32 de balance hídrico. El resultado obtenido fue considerado como el volumen de agua que sale del humedal mensualmente (Fórmula 33). Sin embargo, debido a las dificultades que presentó el área de estudio y al presupuesto proyectado, no fue posible determinar si existen flujos subterráneos de entrada o salida en el humedal. Por lo que, se supuso que dentro de las salidas de agua por Q_{SM} serían incluidas las infiltraciones de agua que salen del área de estudio. No obstante, la cantidad de STD con la que salió el agua del humedal por Q_{SM} se calculó a través del balance de sales que se verá más adelante.

Los resultados de las salidas de agua calculados anteriormente que son; E, ET y Q_{SM} , fueron convertidos a porcentaje utilizando la fórmula 22. Las salidas fueron graficadas en conjunto con los volúmenes totales calculados para observar su grado de influencia.

Topografía y batimetría

En esta investigación se realizó el primer estudio topográfico de la CSC. Las principales áreas de interés fueron lagunas abiertas, áreas con vegetación, zonas pantanosas y áreas de transición dentro y fuera de la línea costera más alta existente o conocida que rodea al humedal. Uno de los objetivos fue documentar las zonas cercanas a la orilla del área de estudio que podrían ser inundadas o expuestas por los cambios en los flujos de agua entrante. Otro de los objetivos fue estimar el volumen de agua que contuvo el humedal y que se utilizó dentro del balance hídrico. Para ello se utilizaron los datos obtenidos durante los levantamientos topográficos del relieve terrestre y del espejo de agua, en conjunto con los registros de los sensores instalados dentro del perímetro mojado.

Equipo

Para poder llevar a cabo ambos levantamientos se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) marca Topcon modelo GR-3 (Figura 9a). Este dispositivo captura las señales de tres sistemas de posicionamiento satelital que son: GPS, GLONASS y el sistema Galileo de la Unión Europea. El equipo tiene una precisión de 10 mm + 1 ppm en posición horizontal y 15 mm + 1 ppm de manera vertical nominal. El equipo Topcon consiste de una antena fija y una móvil que además de comunicarse de forma independiente con los sistemas satelitales referidos se comunican entre sí mediante un sistema de radio digital UHF de espectro extendido, dicha comunicación en tiempo real proporciona mayor confiabilidad y rapidez en la obtención de datos (Topcon, 2006).

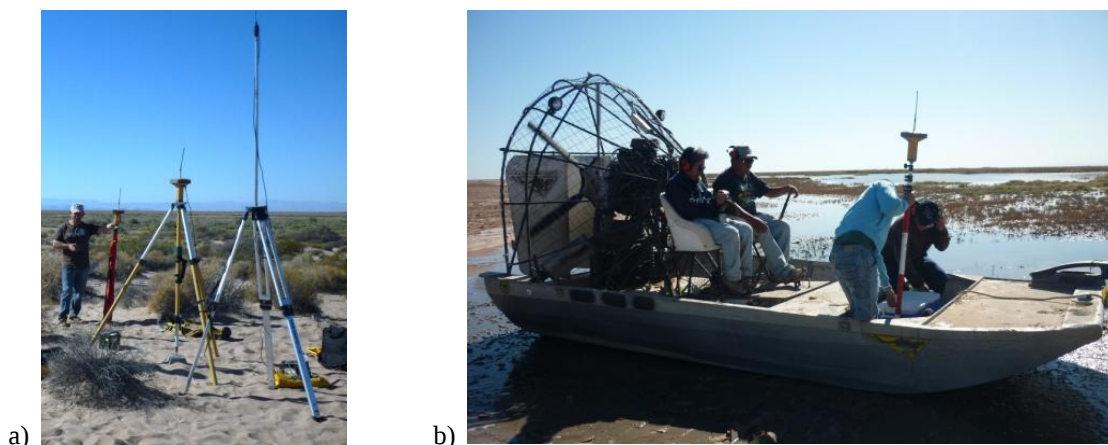


Figura 9. a) Equipo GPS instalado en banco de nivel. b) Utilización del aerobot de CILA para acceder dentro del humedal y obtener datos con el GPS.

Para agilizar el trabajo durante el levantamiento topográfico en superficies de suelo firme se utilizó una base especial donde se colocó la antena móvil (Rover) a un pickup todo terreno, o bien a una cuatrimoto. Sin embargo en las zonas pantanosas donde no se tuvo acceso con los vehículos fue necesario llevar a cabo el levantamiento a pie colocando el Rover a una baliza. De igual forma se realizó dentro del humedal (lagunas-vegetación) solo que en vez de caminar fue requerido un areobote que la CILA proporcionó (Figura 9b).

Procedimiento

Instalación de Bancos de Nivel

Debido a la gran extensión del humedal se establecieron cinco puntos de referencia o bancos de nivel alrededor del perímetro utilizando el GPS GR-3 y el banco de nivel ubicado en el puente del ferrocarril Mexicali-Puerto Peñasco sobre el Río Colorado con coordenadas WGS84: 32° 08' 34'' N y 114° 55' 47'' W y una elevación de 9 msnm.

El procedimiento para instalar los bancos de nivel alrededor del humedal consistió en colocar la antena base del GPS sobre un banco de nivel con referencia conocida, posteriormente a una distancia no mayor a 5 km se posicionó el Rover en un punto y se tomaron mediciones por varias horas en modo de medición estático. La ubicación del nuevo banco de nivel fue la media resultante de las coordenadas geográficas de esas mediciones.

Levantamientos topográficos y batimétricos

Ambos levantamientos se realizaron de manera similar a la instalación de bancos, solo que esta vez, la unidad móvil se utilizó para obtener la elevación de los puntos a lo largo de la ciénega con un énfasis en las lagunas o zonas accesibles y utilizando el método cinemático en tiempo real (*Real Time Kinematic Method* o *RTK* por sus siglas en ingles).

En los cuerpos lagunares se registró tanto la elevación en metros sobre el nivel del mar (msnm) del fondo de la laguna como la elevación del espejo de agua. Los datos del GPS fueron descargados en hojas de cálculo y procesados en el SIG.

Las elevaciones o puntos del relieve terrestre tomados dentro de la CSC y en sus alrededores se interpolaron y extrapolaron dentro del SIG para extender la base de datos y

afinar el resultado. Posteriormente se generó un mapa de curvas de nivel con una separación a cada 0.05 m sobre el cual se trazaron 4 líneas que se convertirían en perfiles topográficos de longitud-elevación que permitirían observar las diferencias de elevación y el comportamiento del relieve terrestre en el humedal.

Aplicando la misma metodología y en conjunto con la obtención de elevaciones del relieve terrestre se obtuvieron puntos de elevación del espejo del agua, solo que a diferencia de las mediciones tomadas en el relieve terrestre, el número de puntos fue menor.

Una vez llevado a cabo el levantamiento del espejo de agua y el pos-proceso de datos en las hojas de cálculo, se generó un modelo digital de elevación (*DEM* por sus siglas en inglés) en el SIG. El modelo generado fue utilizado como un punto de referencia para calcular las diferencias de volumen de almacenamiento ocurridas mensualmente en la CSC.

Dimensiones

Área

Las áreas que conforman a la CSC se estimaron con el SIG, doce imágenes Landsat-5 (www.earthexplorer.usgs.gov) y dos imágenes World View 2 (www.digitalglobe.com).

Las variaciones temporales de la superficie del humedal así como la extensión de las diversas coberturas vegetales fueron delimitadas utilizando la composición de colores rojo (banda 1), verde (banda 4) y azul (banda 7) (*RGB* por sus siglas en inglés) así como la composición de colores *RGB*; 7, 4 y 2 (Figura 10) de las imágenes Landsat-5 y la resolución superficial a 2 m en multiespectral de las imágenes World View 2.

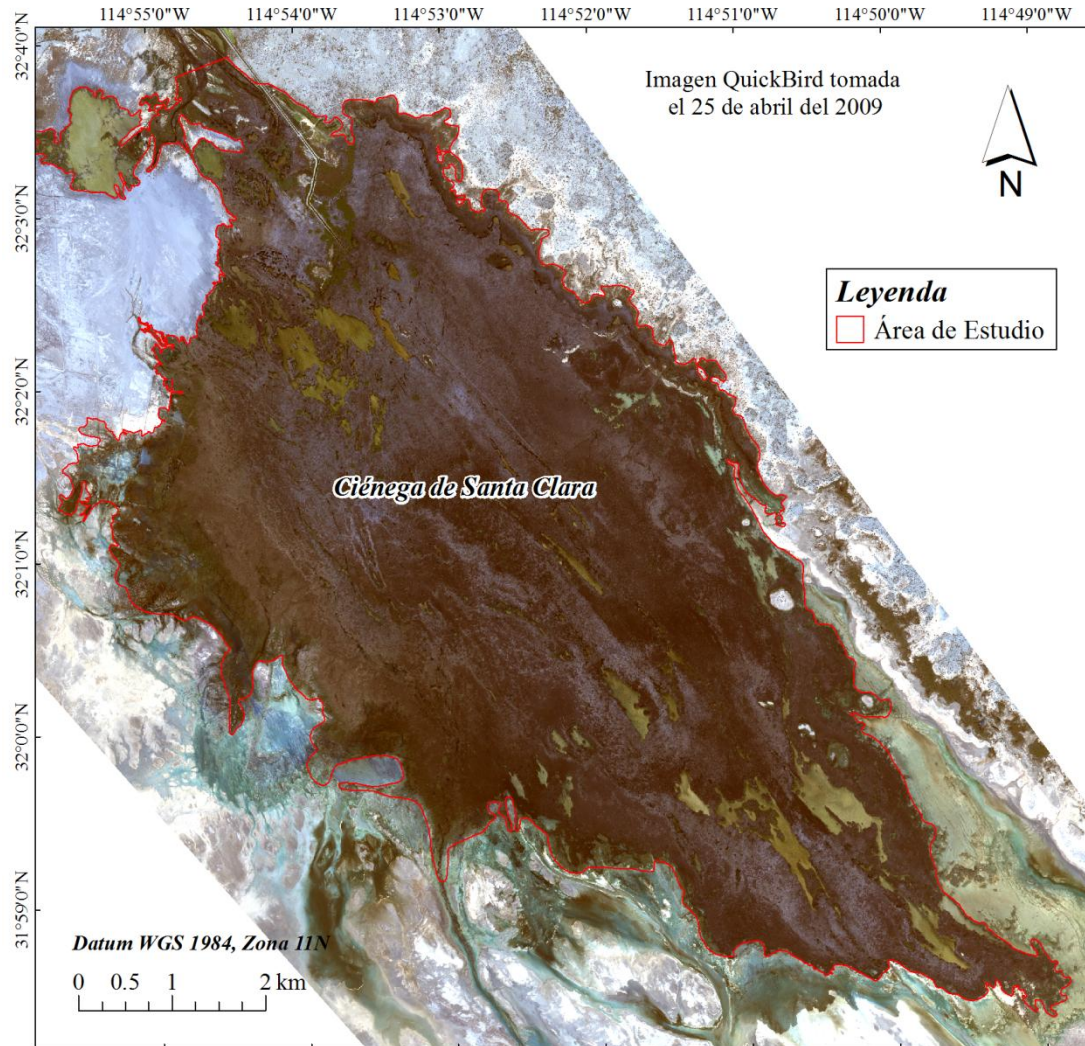


Figura 10. Imagen de la Ciénega de Santa Clara tomada el 25 de abril del 2009 por el satélite QuickBird y referenciada utilizando sistemas de información geográfico.

Se consideraron dos tipos de superficies para los cálculos de E y ET principalmente; (1) las superficies cubiertas por vegetación, y (2) las lagunas expuestas directamente al Sol que se encontraban dentro del humedal. Es preciso aclarar que dentro de las superficies lagunares expuestas, no se consideraron las aguas someras fuera del perímetro de la zona de estudio. Sin embargo, las superficies cubiertas por vegetación fueron además divididas mensualmente en tres categorías: vegetación con vigor alto, medio y bajo. El objetivo de esta categorización fue estimar la ET según su etapa de crecimiento mediante la utilización de la fórmula de PM con un respectivo albedo en cada una de las superficies.

Para los meses de julio, agosto y septiembre del 2010 se calculó un área de perímetro mojado (A_{PM}), ya que a diferencia de los meses restantes, el agua no cubrió por completo el

área de la CSC. Misma que se utilizó para calcular el volumen de agua contenida en el humedal, no obstante para el resto del año se utilizó el área total del humedal (A_{TM}).

Procedimiento

Para llevar a cabo la demarcación y el cálculo de área (m^2) con el SIG, se trazaron polígonos sobre las superficies observadas en las imágenes Landsat-5 y World View 2. Las Landsat-5 se utilizaron para calcular el A_{TM} así como el A_{PM} del humedal mediante el trazo de un polígono. Este polígono presenta dimensiones similares al utilizado por Glenn y colaboradores en el 2010. No obstante, las imágenes World View 2 son de mayor resolución y se utilizaron para definir con detalle las dimensiones así como el número de lagunas en los meses de abril y julio del 2010. Las imágenes World View 2 fueron tomadas como referencia para los meses donde solo se tienen imágenes de baja resolución.

El A_{TM} y de las lagunas expuestas directamente al sol (A_{LM}) fueron calculadas mensualmente de forma independiente con ayuda del SIG y los polígonos. El área de cobertura vegetal mensual existente en el humedal (A_{VM}) es el resultado obtenido entre la diferencia de áreas calculadas del A_{TM} y el A_{LM} localizadas dentro de la CSC.

El área de cubierta vegetal se calculó mediante la siguiente formula.

$$A_{VM} = A_{TM} - A_{LM} \quad \underline{27}$$

Donde

A_{VM}	Área total de cubierta vegetal (m^2)
A_{TM}	Área total de la CSC (m^2)
A_{LM}	Área total de las lagunas (m^2)

Los cálculos de área se obtuvieron mensualmente.

El objetivo de definir las áreas que componen al humedal se debió a que los procesos de E y ET están ligados a la superficie donde son llevados a cabo. El A_{LM} se contempló para estimar la E, y el A_{VM} para estimar ET. Una vez calculada esta última se procedió a categorizar la vegetación según el vigor que presenta.

Volumen

Para poder determinar el volumen de agua de la CSC se utilizó la información obtenida de los levantamientos topográficos, los datos de los sensores colocados en los sitios de monitoreo y las herramientas del SIG. Los pasos realizados fueron los siguientes:

1. La ubicación geográfica y elevación de los levantamientos topográficos se descargó del GPS a una hoja de Microsoft Excel y se insertó al SIG para crear una capa de puntos. La falta de datos en los sitios inaccesibles del humedal fueron completados por medio de extrapolaciones e interpolaciones lineales en la capa de puntos.
2. Se realizó una interpolación de la capa de puntos utilizando el esquema de interpolación distancia inversa ponderada (*IDW* por sus siglas en inglés).
3. Una vez realizada la interpolación, se creó una capa de contornos a cada 0.05 m.
4. Finalmente también dentro del SIG se ejecutó la herramienta 3D análisis y se insertó la capa de contornos como referencia, se generó un *DEM*.

Cabe de mencionar que los cuatro pasos se realizaron para el espejo de agua independientemente del relieve del terreno y en total se llevó a cabo trece veces; uno para el relieve terrestre y doce más para el espejo de agua en cada uno de los meses correspondientes al año de estudio.

En los *DEM* del espejo de agua se relacionó la información del levantamiento topobatimétrico con los resultados normalizados de profundidad media mensual calculados con los sensores que monitorearon los distintos sitios en el humedal. Esto se llevó a cabo al ser calculadas las variaciones en la profundidad del agua y posteriormente realizar una normalización de las mismas.

La normalización de las profundidades se llevó a cabo para cada sensor HOBO e YSI al obtener la profundidad media de cada mes y la profundidad mínima durante todo el año. La diferencia entre la primera y la segunda en cada uno de los meses, fue igual al valor normalizado que posteriormente se utilizó para obtener la media mensual de profundidad de la CSC. Este proceso se realizó para todos los meses en todos los equipos, y una vez obtenidas todas las medias mensuales, se calculó el promedio de las mismas y se le resto a

cada uno de los promedios mensuales. Las variaciones en la profundidad fueron sumadas o restadas en las elevaciones de los puntos del levantamiento topobatimétrico.

5. Una vez listos los trece *DEM* y las áreas del perímetro mojado mensual, se utilizó el SIG para calcular el volumen que existiría entre el área del perímetro mojado con una elevación de referencia cero y el *DEM*. El procedimiento para el cálculo de este volumen de referencia, se llevó a cabo mensualmente, tanto para el espejo de agua (Vol A) como para el relieve terrestre (Vol T).
6. El volumen de almacenamiento se calculó sustrayendo el Vol T al Vol A con ayuda del SIG para cada uno de los meses. Los resultados obtenidos se utilizaron para conocer las diferencias mensuales de almacenamiento de agua del humedal.

Para calcular el volumen de la CSC se utilizó la siguiente formula.

$$\text{Volumen de almacenamiento} = (\text{Vol A} - \text{Vol T}) \quad \underline{28}$$

Donde

<i>Vol A</i>	Volumen calculado mensualmente a partir del Z. <i>DEM</i> del espejo de agua y su respectiva área de perímetro mojado (m ³)
<i>Vol T</i>	Volumen calculado mensualmente a partir del Z. <i>DEM</i> del relieve terrestre y su respectiva área de perímetro mojado (m ³)

Una vez calculados los volúmenes mensuales se calculó la diferencia de almacenamiento (ΔVol), la cual se obtuvo a partir de marzo del 2010 al restarle al volumen de ese mes, el volumen del mes de abril 2010. La siguiente diferencia de almacenamiento se obtuvo al restarle el del mes de mayo al de abril y así consecutivamente. De esa manera se calcularon para cada uno de los meses durante el estudio.

Elevación y profundidad real del agua

Sitios de Monitoreo (Cobertura Espacial)

El cálculo de elevación y profundidad del agua se llevó a cabo mediante los registros de nueve sensores electrónicos localizados dentro del perímetro mojado de la CSC (Figura 11). Los sitios de monitoreo se distribuyeron uniformemente abarcando la mayor cobertura

espacial posible y se ubicaron tomando en cuenta los actos vandálicos que pudieran manifestarse, las condiciones del territorio y el presupuesto del proyecto.

Cada mes un equipo de técnicos del *Sonoran Institute* realizó los monitoreos para descargar la información registrada por los sensores, sin embargo, la accesibilidad y la distancia entre los equipos impidió realizar la toma de datos en un solo día.

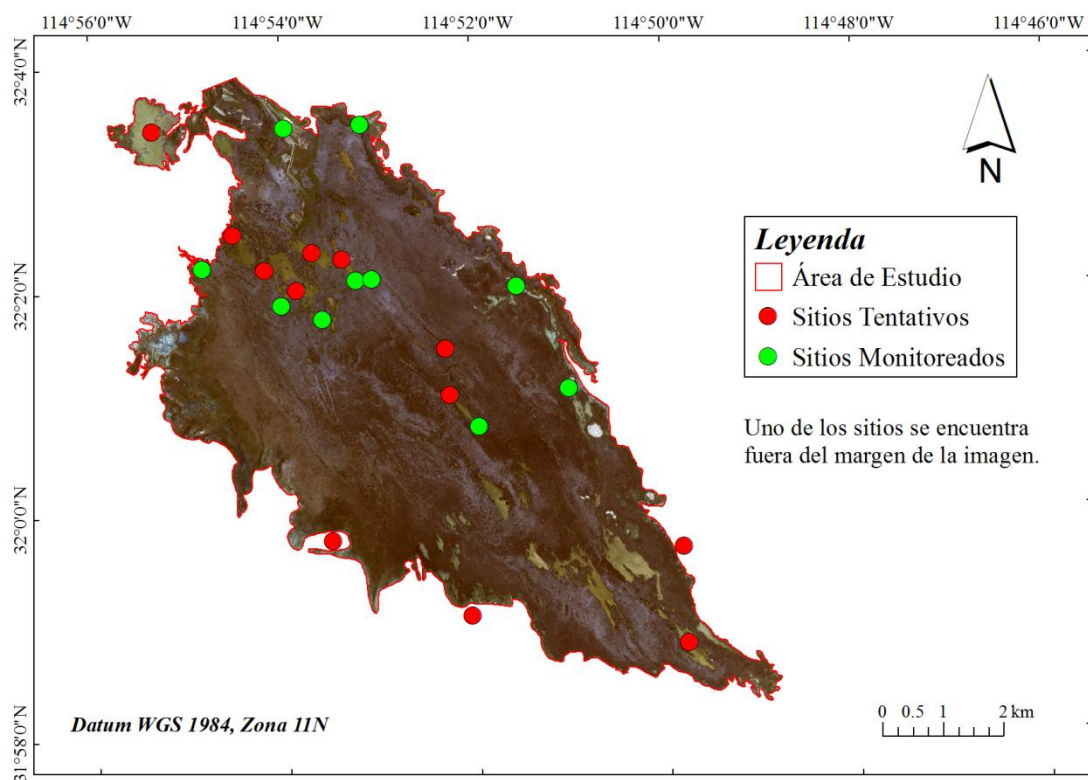


Figura 11. Localización de los sitios de monitoreo donde se instalaron los sensores.

Al iniciar este estudio se tuvo la intención de colocar una mayor cantidad de sensores, sin embargo, esto no fue posible debido al difícil acceso, al vandalismo presente en el lugar.

En total se consiguió instalar un sensor electrónico automatizado y una regleta graduada en once sitios. Dos de los once sitios de monitoreo no se localizaron dentro del perímetro mojado del humedal, sino en los afluentes; DR y el WM. Los registros del sensor en el DR fueron utilizados para conocer la cantidad de STD que ingresaron al humedal por ese conducto, mientras que con los datos del sensor instalado en WM, se relacionó el caudal de entrada enviado desde los E.U. con el tirante de agua en el canal.

Procedimiento

Los niveles de agua se determinaron mensualmente de dos formas independientes; una fue a través de lecturas de la regletas hechas por las brigadas de monitoreo de forma manual y otra, mediante la información registrada por los sensores electrónicos automatizados a cada treinta minutos. Los datos obtenidos mensualmente con los equipos se convirtieron a elevación del nivel de agua (msnm), profundidad del agua en la laguna (m) y finalmente se graficaron para visualizar los posibles cambios en el comportamiento del nivel del agua en el humedal. A cada sitio de monitoreo se le asignó un número y un nombre para ser identificado.

Instalación de Regletas y Equipos

En los once sitios de monitoreo se instaló una regleta graduada de un metro de longitud, la cual, se fijó vigorosamente al suelo para evitar ser movida por las aves, pequeñas embarcaciones, etc. Posteriormente con el GPS se referenció el extremo superior de cada una de las regletas al nivel medio del mar, tomando como referencia los bancos de nivel utilizados en los levantamientos topográficos. Durante el estudio se colocaron nueve regletas más que no fueron niveladas y se excluyeron del análisis.

El objetivo de la nivelación fue determinar la elevación del extremo superior de la regleta y llevar a cabo los cálculos correspondientes con los registros de los sensores.

Los equipos utilizados en los monitoreos fueron en total cinco sensores marca HOBO modelo U20-001-01 que registraron la presión barométrica e hidrostática, cinco sensores marca YSI modelo 600 LS y un YSI modelo 600 XLM; estos últimos calcularon la profundidad en la que se encuentra el equipo con respecto a la altura del espejo de agua y además registraron la conductividad eléctrica del agua utilizada para calcular el promedio mensual de STD que hay en el humedal. Cada uno de los equipos se instaló en los sitios donde se nivelaron las regletas y a una profundidad conocida.

La información registrada por los sensores se descargó con una computadora portátil y su respectiva interface. Mientras que los registros de elevación y profundidad de agua tomados en las regletas se realizaron manualmente con una cinta graduada. Posteriormente

la información obtenida en campo de las regletas y los sensores se vació en hojas para llevar a cabo los siguientes cálculos.

Elevación del agua

La elevación del espejo de agua donde se colocaron los HOBO se obtuvo al restarle la presión atmosférica registrada con la estación meteorológica a la presión registrada por el sensor y el resultado se multiplicó por el factor de conversión (0.10197) para transformar la presión hidrostática a metros (Fórmula 29). Esta altura se corrigió con la elevación del tirante de agua calculado con la lectura de agua en la regleta y la nivelación (Fórmula 30).

$$MCA = (P.BAR - P.ATM) * 0.10197 \quad \underline{29}$$

Donde

MCA Metros columna de agua (m)
P.BAR Presión barométrica HOBO (kPa)
P.ATM Presión atmosférica de la estación climatológica (kPa)

Tabla 1. Ejemplo de información obtenida durante el monitoreo en campo.

Fecha	Hora	Datos de elevación sitio 2		
		Lectura de agua en regleta (cm)	Elevación de la punta del brocal con GPS (msnm)	Elevación del agua (msnm)
29-abr-10	13:45	39	5.57	4.97

$$Elevación\ del\ agua = (E.GPS - 1 + E.A.)/100 \quad \underline{30}$$

Donde

E.GPS Elevación obtenida con GPS de la punta superior de la regleta. (msnm)
E.A. Lectura del agua que se observo en la regleta (cm)
 El valor 1 equivale a la longitud de la regleta (m)

Estos procedimientos se hicieron mensualmente para cada uno de los nueve equipos, permitiendo observar día con día las variaciones de elevación en msnm del espejo de agua.

Posteriormente de ser calculadas las elevaciones de todos los equipos durante todo el periodo de estudio, se obtuvieron los promedios mensuales de elevación mismos que fueron normalizados y utilizados para el cálculo de volumen de agua en la CSC.

Profundidad del agua

La profundidad del agua en cada sitio se calculó como se muestra a continuación.

1. Una vez obtenida la elevación del espejo de agua se calculó la elevación del relieve terrestre del mismo sitio de monitoreo; donde se colocó la regleta y el sensor.

Este paso se llevó a cabo después de haber concluido con todas las mediciones del espejo de agua utilizando la regleta y con las mediciones de profundidad obtenidas con la cinta graduada. Posteriormente, con esta información se calculó la diferencia entre ambas mediciones; esta diferencia se hizo con los respectivos datos mensuales en cada sitio. Después, se obtuvo un promedio con las diferencias para cada uno de los sitios de monitoreo, este promedio arrojó un valor negativo que corresponde a la profundidad del agua con respecto a la lectura de la regleta. Al corregir este valor con la nivelación se obtuvo la elevación del relieve terrestre (msnm) donde se colocó la regleta.

2. Finalmente la profundidad del agua (m) se calculó con la diferencia de estas dos elevaciones.

Tabla 2. Procesamiento de datos obtenidos en el monitoreo en campo.

Fecha	Hora	Datos de elevación sitio 2				
		Lectura de agua en regleta (cm)	Profundidad del agua con cinta (cm)	Elevación de la punta de la regleta con GPS (msnm)	Elevación del agua (msnm)	Elevación del relieve terrestre (msnm)
29-abr-10	13:45	39	98	5.57	4.97	4.09

$$\text{Elevación del relieve terrestre} = (E.GPS - 1) + (-P.Prof/100) \quad \underline{31}$$

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

Con los equipos YSI se obtuvo la profundidad a la que se localizaba el equipo y no fue necesario convertir presiones a metros, solamente se realizaron los cálculos con las formulas 29 y 30 ya que estos medidores hacen la conversión de forma automática.

Equipo

Las regletas instaladas tienen un acabado de esmalte de porcelana que garantizó una lectura fácil y una resistencia a la corrosión o decoloración. Tienen 1.0 m de longitud y están graduadas en unidades métricas (Figura 12). Se aseguraron a bastidores insertados en el terreno natural a una profundidad aproximada de 1.5 m.



Figura 12. Regleta instalada y sujeta a una solera que es enterrada en el suelo; a un lado se observa el tubo donde se introduce el sensor (HOBO en este caso). Imagen tomada por *Sonoran Institute*, 2010.

Sensores

Se eligieron los equipos YSI y HOBO por la facilidad del manejo que presentan, los parámetros que nos proporcionan, el alcance que brindan y a la adaptación que tienen con respecto a la topografía y condiciones del humedal (agua salobre).

Los YSI utilizados que miden con un sistema ventilado la elevación del tirante del agua con respecto a la profundidad a la que se encuentran fueron de dos tipos, el modelo 600 LS (Figura 13) y el 600 XLM.



Figura 13. Sensor YSI modelo 600 LS. Imagen tomada de <http://filemaker2-server.cbl.umces.edu/sensorimages/9725-600LS.gif>

Los YSI registraron también la salinidad del agua y otros parámetros. Debido al espaciamiento en el que se encontraban en el humedal, la salinidad media del área de estudio se obtuvo de la media resultante de todos los datos registrados por los equipos.

Los HOBO modelo U20-001-01 (Figura 14) miden parámetros como presión barométrica y temperatura del agua. A diferencia de los YSI, estos equipos no cuentan con un sistema ventilado. Tienen una precisión de $\pm .005$ m y una resolución de $\pm .0021$ m. Los datos obtenidos del HOBO trabajan en conjunto con la presión atmosférica para poder ser utilizados en análisis de elevación del agua.

Estos equipos se utilizaron en la mayoría de los sitios debido a su bajo costo y por ello pueden ser colocados en sitios más susceptibles al vandalismo.



Figura 14. Medidor HOBO U20-001-01. Imagen tomada de: <http://www.onsetcomp.com/d-image/large/HOBO-U20-Water-Level-Data-Logger-U20-001-01.jpg>

Ambos sensores se introdujeron dentro de un tubo PVC de 4.0 pulgadas de diámetro que fue sujetado a un bastidor. En la parte superior fue colocado un tapón con candado para evitar que fueran robados.

Balance Hídrico

Los recursos de agua de la CSC y sus posibles modificaciones causadas por la prueba piloto de la PDY se calcularon mediante un balance hídrico. El balance hídrico se obtuvo mediante la ecuación general de balance (Fórmula 32) en la que se consideraron los flujos de entrada, la evaporación, la evapotranspiración y el volumen de almacenamiento.

El efluente superficial y subterráneo (Q_{SM}) no fueron medidos por dificultades en las mediciones de campo, como se explicó anteriormente. No obstante estos dos componentes del balance se consideraron como uno solo y fueron obtenidos al ser despejados de la siguiente fórmula.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{WM} + Q_{DR} + (P * A_{TM}) - Q_{SM} - (E * A_{LM}) - (ET * A_{VM}) \quad 32$$

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 Ríoito (m^3/mes)
P	Entrada de agua por precipitación (m/mes)
A_{TM}	Área total de la CSC (m^2/mes)
Q_{SM}	Pérdidas de agua por flujo superficial (m^3/mes)
E	Pérdidas de agua por evaporación (m/mes)
A_{LM}	Área total de las superficies de aguas abiertas (m^2/mes)
ET	Pérdidas de agua por evapotranspiración (m/mes)
A_{VM}	Área total de las superficies cubiertas por vegetación (m^2/mes)

Una vez despejada la fórmula como se muestra a continuación se obtuvo el efluente superficial-subterráneo. En ella se utiliza la variación en el volumen de almacenamiento (ΔVol) el cual se obtuvo por la diferencia de volumen de agua calculado de un mes a otro.

$$Q_{SM} = Q_{WM} + Q_{DR} + (P * A_{TM}) - \Delta Vol - (E * A_{LM}) - (ET * A_{VM}) \quad 33$$

En la siguiente figura se observan los principales componentes del balance en la CSC.

- | | | |
|-----------------------|----------------|----------------------|
| A. Wellton-Mohawk | B. Dren Riíto | C. Precipitación |
| D. Evapotranspiración | E. Evaporación | F. Flujo superficial |

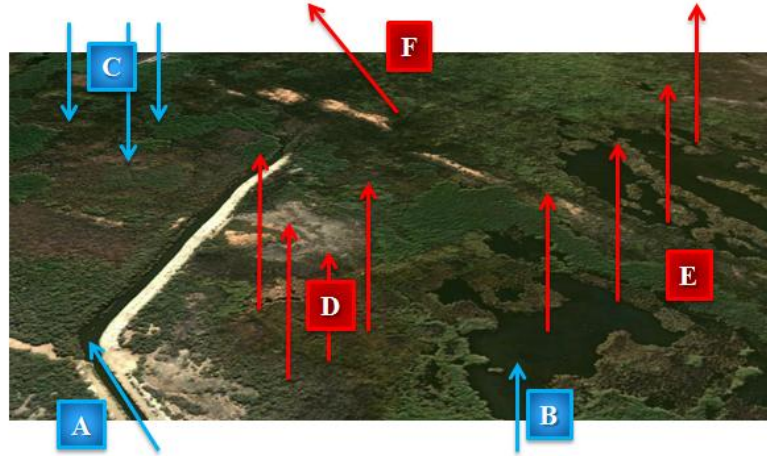


Figura 15. Imagen de la CSC tomada por el satélite Digital Globe, 2012. En la cual se anotaron algunos procesos de los que depende el balance hídrico.

Balance de masa

La concentración de STD en el Q_{SM} se calculó una vez finalizado el balance hídrico y el cálculo de sus variables, de la siguiente manera.

1. Se sumaron las concentraciones diarias de STD provenientes del DR y canal WM.
2. Mediante los YSI instalados dentro del perímetro mojado se estimó el promedio mensual de STD (g L^{-1}) en el agua de la CSC. El resultado se multiplicó por la ΔVol mensual y se dividió entre mil para obtener las toneladas de STD.
3. Una vez calculados los STD de entrada y los que se encuentran en el agua de la CSC, se estimó la diferencia de ambos y el resultado fue multiplicado por el Q_{SM} .
4. El resultado se multiplicó por mil para así obtener la concentración de STD en el Q_{SM} .

Resultados y Discusiones

En este apartado se analizarán los principales resultados de investigación, dejando de lado algunos de los resultados que serán utilizados con fines ambientales, de conservación o restauración pero que no inciden de forma directa en los objetivos de este trabajo.

Entradas de Agua

Wellton-Mohawk

El volumen total de agua que ingresó al humedal durante los 363 días registrados por la CILA fue de 127.20 hm³, siendo en el mes de octubre del 2010 cuando ingresó el mayor volumen de agua (17.02 hm³). Por otro lado, el menor volumen de agua mensual se registró en agosto del mismo año con un total de 4.76 hm³ (Figura 16).

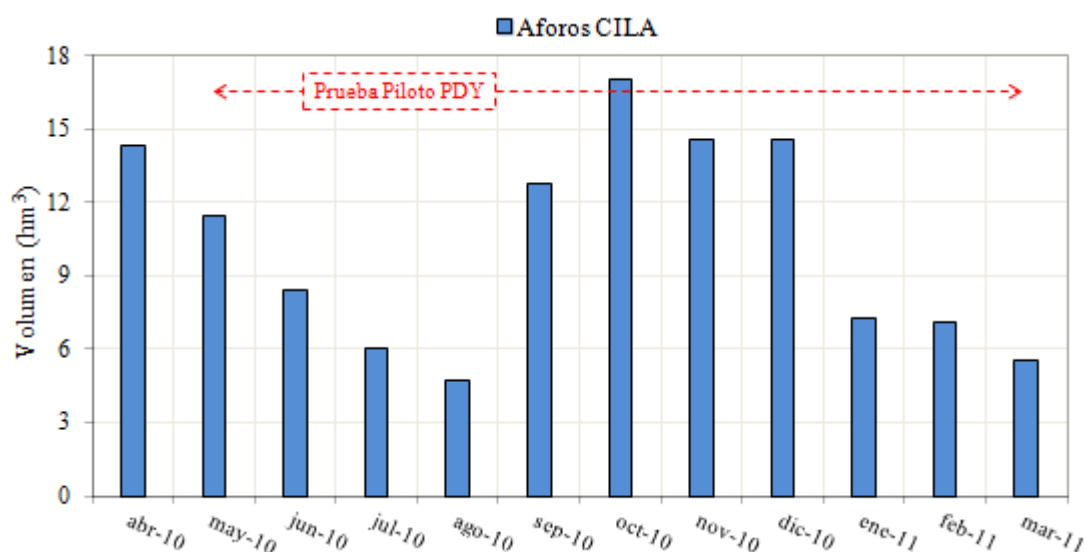


Figura 16. Volúmenes de agua mensual registrados por la CILA.

La disminución del gasto al comienzo de la prueba piloto que se prolonga durante 4 meses se puede apreciar en las figuras 16 y 17. Posterior a ese evento, en el mes de septiembre del 2010 hasta a mediados del mes de diciembre del mismo año se registraron excedentes de agua. Días antes de concluir el año 2010 fue llevada a cabo otra reducción que se prolongó hasta a mediados de febrero del 2011. Sin embargo, casi al finalizar el periodo de estudio (24 de marzo del 2010 al 24 de marzo del 2011) un incremento de flujo ocurrió nuevamente en el mismo mes de febrero con una duración aproximada de 10 días. Después de este período, se mantuvo nuevamente un caudal similar al del inicio de la

prueba piloto ($\approx 5.00 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Este último incremento en el volumen de entrada se debió a la aportación de agua de acuerdo al Acta 316, ya que se había acordado que México y las organizaciones no gubernamentales, aportarían agua durante el periodo de prueba. Sin embargo, no fue hasta marzo del 2010 cuando México aportó agua. Por su parte, las organizaciones no gubernamentales aportaron agua durante toda la operación de la PDY con excepción del mes de septiembre del 2010.

Se estimó que el caudal promedio de 363 días de registros de CILA fue de $4.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con una desviación estándar del 2%. El caudal mayor se midió el 13 de abril del 2010 y registró una velocidad de $7.81 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el caudal de menor velocidad fue de $0.62 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y se obtuvo el 10 de junio del 2010. Para el cálculo de los volúmenes mensuales de entrada se utilizaron los caudales medidos por la CILA debido a su periodicidad, ya que en total, las mediciones aceptadas con el FT en México fueron solamente de 40 aforos. El primero de ellos realizado el 24 de abril del 2010 y el último el 18 de abril del siguiente año (Tabla 3). El caudal máximo medido fue de $8.40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el día 28 de septiembre del 2010, mientras que el mínimo fue de $0.89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y se midió el 11 de febrero del 2011 (Figura 17).

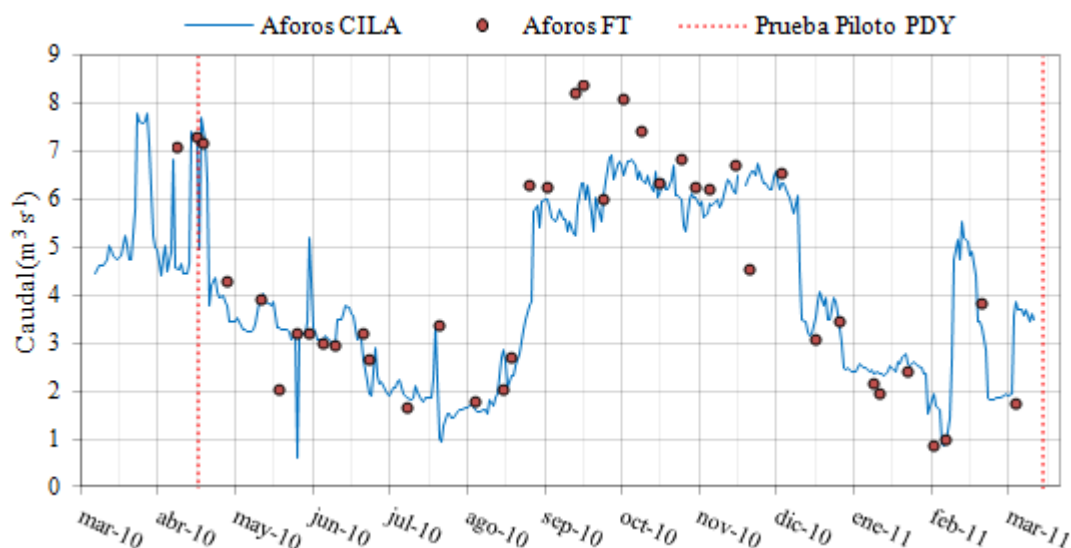


Figura 17. Flujos de entrada por el canal Wellton-Mohawk hacia la Ciénega de Santa Clara durante 365 días comenzando a partir del 24 de marzo del 2010.

Los caudales medidos con el FT en comparación con los registros de CILA muestran diferencias en la cantidad de flujo que ingresa al sistema, identificando algunos periodos de tiempo con diferencias muy significativas. Por ejemplo, el 21 de octubre del 2010, el caudal

de entrada medido fue de $7.46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mayor que el reportado por la CILA ($6.57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), lo que no puede ser posible ya que no existen entradas de agua al canal en todo su trayecto. Sin embargo, variaciones como ésta se observaron en diez mediciones incluyendo la ya mencionada. La variabilidad en los resultados posiblemente se deba al manejo del equipo, pero fundamentalmente a la influencia de sedimentos acumulados en el fondo del canal producto del desazolve del canal WM aguas arriba.

Durante los años 2000 al 2010 el caudal promedio registrado por la CILA fue de $4.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; mayor al caudal promedio calculado durante el 24 de marzo del 2010 al 23 de marzo del 2011, periodo correspondiente a esta investigación. Por otro lado, Cohen (2006) mencionó que el promedio anual de agua de entrada a la CSC era de 134 hm^3 con un caudal medio de $4.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ambos valores también mayores al registrado durante esta tesis (127.20 hm^3 y $4.06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). La reducción del caudal de entrada por el WM, como consecuencia de la prueba piloto que se realizó a partir del 3 de mayo del 2010 al 26 de marzo del 2011, explican los valores menores de caudal y volumen obtenidos en este trabajo con respecto a los reportados en la literatura.

En el presente estudio se observó una reducción del área de cobertura vegetal en relación a la reducción de flujo por la prueba piloto de la PDY, similar a la reducción reportada por Zengel y colaboradores (1995). Esta disminución en el caudal se llevó a cabo en dos periodos con un periodo intermedio de flujo muy próximo a la media anual histórica.

Dren Riíto

El DR se visitó 41 veces al igual que el WM, sin embargo, únicamente se pudieron realizar 19 aforos ya que en el resto de las visitas los caudales fueron muy pequeños o nulos y no se cuantificaron (Tabla 3, Figura 17). Una vez calculada la media mensual para los días no aforados, se estimó que el caudal promedio anual era de $0.18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Los caudales medidos variaron entre 0.02 hasta $0.70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el primero registrado en el mes de junio del 2010, y el segundo en mayo del mismo año. Estos caudales medidos concuerdan con el régimen e intensidad de riego en el Valle de Mexicali (Carrillo, 2009).

En total, el volumen de agua que ingresó por el DR fue de 5.58 hm³. Siendo el mes de mayo del 2010 el que presentó el mayor aporte (1.41 hm³), mientras que el mes que registró el menor volumen de agua fue el de octubre del 2010 con 0.12 hm³.

Tabla 3. Caudales obtenidos con el *FT* en la CSC y el DR.

Fecha	Caudal (m ³ s ⁻¹)		Fecha	Caudal (m ³ s ⁻¹)		Fecha	Caudal (m ³ s ⁻¹)	
	WM	DR		WM	DR		WM	DR
24-abr-10	7.11	0.21	17-ago-10	1.81	0.1	26-nov-10	6.77	0.09
01-may-10	7.34	FDN	28-ago-10	2.05	0.12	02-dic-10	4.59	SD
04-may-10	7.20	0.7	31-ago-10	2.75	SD	14-dic-10	6.58	SD
13-may-10	4.32	FDN	07-sep-10	6.32	SD	27-dic-10	3.10	0.05
26-may-10	3.94	0.35	14-sep-10	6.31	SD	06-ene-11	3.50	SD
02-jun-10	2.05	0.02	25-sep-10	8.24	SD	19-ene-11	2.19	0.09
09-jun-10	3.22	0.14	28-sep-10	8.40	SD	21-ene-11	1.97	SD
14-jun-10	3.26	FDN	06-oct-10	6.05	SD	01-feb-11	2.43	SD
19-jun-10	3.02	0.18	14-oct-10	8.14	0.05	11-feb-11	0.89	0.17
24-jun-10	3.01	FDN	21-oct-10	7.46	SD	16-feb-11	1.02	0.18
05-jul-10	3.24	SD	28-oct-10	6.37	0.04	02-mar-11	3.88	0.53
07-jul-10	2.71	0.11	05-nov-10	6.89	SD	15-mar-11	1.77	SD
22-jul-10	1.70	FDN	11-nov-10	6.28	0.05	16-mar-11	SD	0.64
03-ago-10	3.41	FDN	16-nov-10	6.25	SD	-	-	-

nota: SD (sin datos tomados) FDN (flujo por debajo del nivel de detección)

Precipitación

La precipitación total registrada durante la operación de la estación climatológica fue de 19.45 mm y se concentró en tres eventos principales durante el 2010 y uno para el 2011.

1. El primer evento del 2010 se registró el 22 de abril con 3.55 mm.
2. El segundo se registró como lluvias convectivas de verano, siendo la mayor de 7.36 mm para inicios de octubre y,
3. El tercer evento se registró en diciembre con una precipitación total de 3.26 mm distribuidos en varios días relacionados a las lluvias de invierno.
4. Finalmente, el último evento se llevó a cabo en febrero del 2011 con 3.53 mm, también relacionadas a las lluvias de invierno (Figura 18).

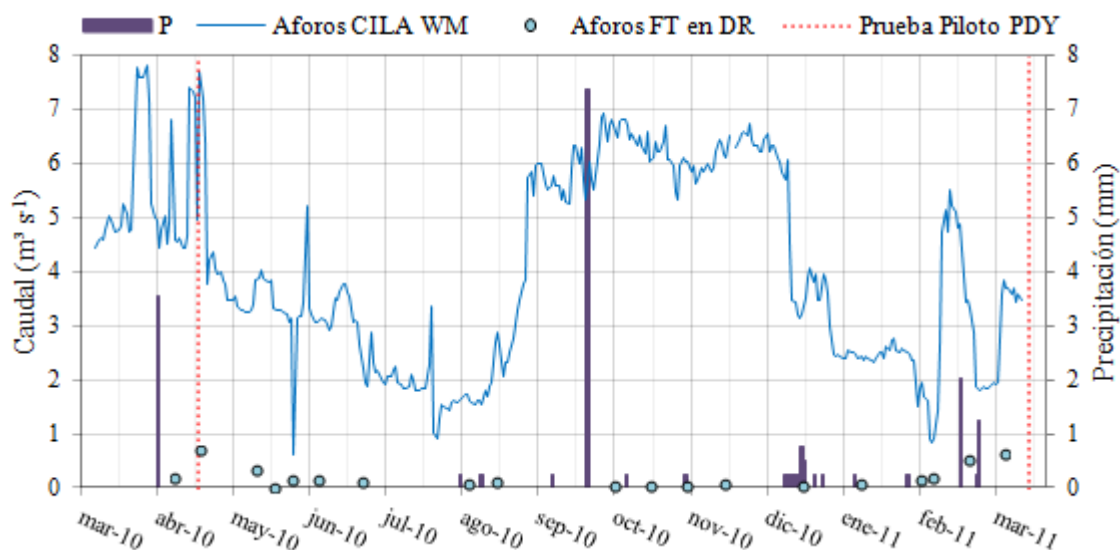


Figura 18. Entradas de agua hacia la Ciénega de Santa Clara durante el periodo de estudio, en el eje secundario se observa la precipitación. La línea roja punteada representa el periodo en el que se llevó a cabo la prueba piloto de la PDY (3 de mayo del 2010 al 26 de marzo del 2011).

El volumen total de agua que ingresó al sistema por precipitación durante el período de estudio fue de 0.94 hm^3 . El mayor de los volúmenes se registró en octubre del 2010 con 0.38 hm^3 y el volumen menor se registró en septiembre del mismo año con 0.01 hm^3 . Durante mayo, junio y julio del 2010, y marzo del 2011 no se registraron precipitaciones.

En la siguiente tabla se muestran los principales eventos de precipitación durante el año de estudio. Los días que no llovió fueron omitidos de la tabla 4.

Tabla 4. Eventos de precipitación registrados en la CSC durante el estudio.

Fecha	P (mm)	Fecha	P (mm)	Fecha	P (mm)
22-abr-10	3.55	16-dic-10	0.25	29-dic-10	0.25
14-ago-10	0.25	17-dic-10	0.25	10-ene-11	0.25
22-ago-10	0.25	18-dic-10	0.25	30-ene-11	0.25
18-sep-10	0.25	19-dic-10	0.25	19-feb-11	2.02
01-oct-10	7.36	20-dic-10	0.25	25-feb-11	0.25
16-oct-10	0.25	21-dic-10	0.76	26-feb-11	1.26
07-nov-10	0.25	22-dic-10	0.50	-	-
15-dic-10	0.25	26-dic-10	0.25	-	-

Los datos de precipitación medidos con la estación climatológica instalada dentro de la CSC son únicos, ya que su ubicación geográfica proporcionó un resultado muy aproximado del comportamiento atmosférico en el humedal. A diferencia de trabajos anteriores, en los que se refieren las variaciones atmosféricas medidas en la estación de

Yuma o San Luis Río Colorado (Huckelbridge et al., 2010). De igual forma, los datos utilizados por Glenn (2010) que han sido extrapolados de los registros climatológicos obtenidos de la estación climatológica ubicada en la Universidad de Arizona en Tucson E.U. La información climatológica obtenida con la estación de la CSC permitió registrar el ingreso por precipitación debido a eventos locales, como son las lluvias convectivas.

Sin embargo la estación meteorológica ya no existe, el 24 de marzo del 2011 un incendio arrasó con la vegetación en distintas zonas de la CSC consumiendo la estación casi por completo (ver Anexo 4). A pesar del terrible suceso, los datos registrados hasta el día del incendio fueron recuperados gracias a que la libreta electrónica que grabó la información de los sensores, se encontraba protegida y aún funcionando.

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 octubre del 2010 con 17.53 hm^3 mientras que el mes con menor aportación fue el de agosto del mismo año con un total de 5.08 hm^3 . Sin embargo, en la tabla 5 se observa que durante el mes de marzo del 2010 el volumen es el menor, sin embargo, no es considerado como el menor ya que solamente se registraron ocho días de caudal (24 al 31 de marzo).

Tabla 5. Volúmenes de agua de entrada calculados mensualmente.

Mes	Volumen de entrada (hm^3)			
	WM	DR	P	Total
mar-10	3.26	0.14	-	3.41
abr-10	14.32	0.54	0.16	15.03
may-10	11.49	1.41	-	12.91
jun-10	8.42	0.30	-	8.73
jul-10	6.02	0.29	-	6.32
ago-10	4.76	0.29	0.02	5.08
sep-10	12.75	0.22	0.01	12.99
oct-10	17.02	0.12	0.38	17.53
nov-10	14.58	0.20	0.01	14.80
dic-10	14.56	0.15	0.16	14.88
ene-11	7.28	0.24	0.02	7.54
feb-11	7.13	0.43	0.16	7.74
mar-11	5.55	1.16	-	6.72
Total	127.20	5.58	0.94	133.73

Se estimó que el volumen total de agua que ingresó por el WM fue de 127.20 hm^3 , por el DR 5.58 hm^3 y por P 0.94 hm^3 . Siendo el primero de ellos el que aportó la mayor cantidad de agua durante el año (95%); mientras que la suma de los volúmenes de agua entrante por el DR y la P fue de solamente el 5%. En total ingresaron a la CSC 133.74 hm^3 de agua mediante estos tres afluentes durante el periodo de estudio (Figura 19).

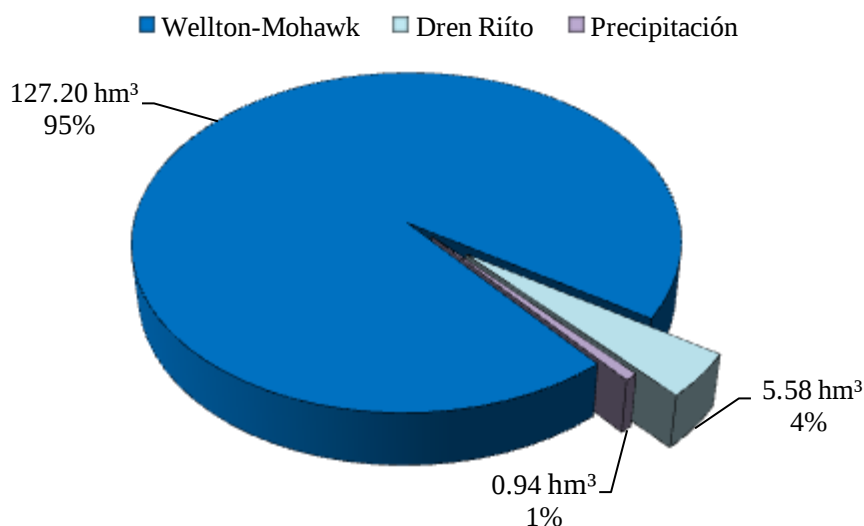


Figura 19. Volúmenes totales que ingresaron al humedal con su respectivo porcentaje.

Sólidos Totales Disueltos (STD) de entrada

STD-WM

Según los cálculos realizados con los datos de la CILA, se estimó que ingresaron al humedal durante el periodo de estudio en total 368,130 ton de material suspendido (STD). El mes de mayor ingreso fue octubre del 2010 con un total de 45,982 ton, mientras que el de menor ingreso fue agosto del mismo año con un total de 16,931 ton.

La concentración media de los 363 días de STD obtenida con los datos de la CILA, fue de 3.03 g L^{-1} y sus mediciones poseen una desviación estándar del 0.47%. En el mes de marzo del 2011 se registraron durante 8 días consecutivos 3.99 g L^{-1} , siendo ésta concentración la más alta durante todo el año. Por otro lado, la concentración más baja del año (2.22 g L^{-1}) se registró durante 8 días consecutivos en el mes de febrero del 2010.

García y colaboradores (2000, 2001b) reportaron que la concentración media de STD que se envía a la CSC 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. Sin embargo, la CSC podría verse afectada si existiese una continuidad con el envío de agua con altas cantidades de STD (sales) que varíen entre las $7\text{-}10 \text{ g L}^{-1}$ (Glenn et al., 1995).

Por lo anterior, es importante mantener y mejorar la calidad de agua que entra por el canal WM para salvaguardar el ecosistema.

STD-DR

Utilizando los datos del sensor YSI en el sitio 9 se estimó que en total ingresaron al humedal 22,434 ton de material suspendido por el DR. El mes en que ingresó la mayor cantidad de material (5,887 ton) fue mayo del 2010, mientras que el de menor ingreso calculado fue octubre del mismo año con 519 ton. La concentración promedio anual de STD fue de 4.00 g L^{-1} con una desviación estándar del 0.17%. Siendo 4.48 g L^{-1} la mayor concentración durante el periodo de estudio, la cual se registró para el día 22 de junio del 2010. Por otro lado, la concentración mínima fue de 3.18 g L^{-1} para el 2 de agosto del 2010.

Salidas de Agua

Evaporación

Se estimó que durante el 24 de marzo del 2010 al 23 marzo del 2011 el agua que salió por E en las lagunas dentro del humedal fue de 1,474 mm, con un promedio diario anual de E de 4.04 mm. Por su parte, el 28 de mayo del 2010 fue el día con más pérdidas del año (6.47 mm), mientras que para el día 21 de diciembre del 2010 se estimaron salidas por E de 0.20 mm, siendo las menores del año.

En la figura 20 se muestra los resultados diarios de E calculados con la fórmula de PM y los registros de la estación climatológica, en ella se indican con rayas punteadas rojas el periodo en que se llevó a cabo la prueba piloto de la PDY. La línea negra representa el ajuste polinomial de los datos para completar la serie como se indicó en la metodología.

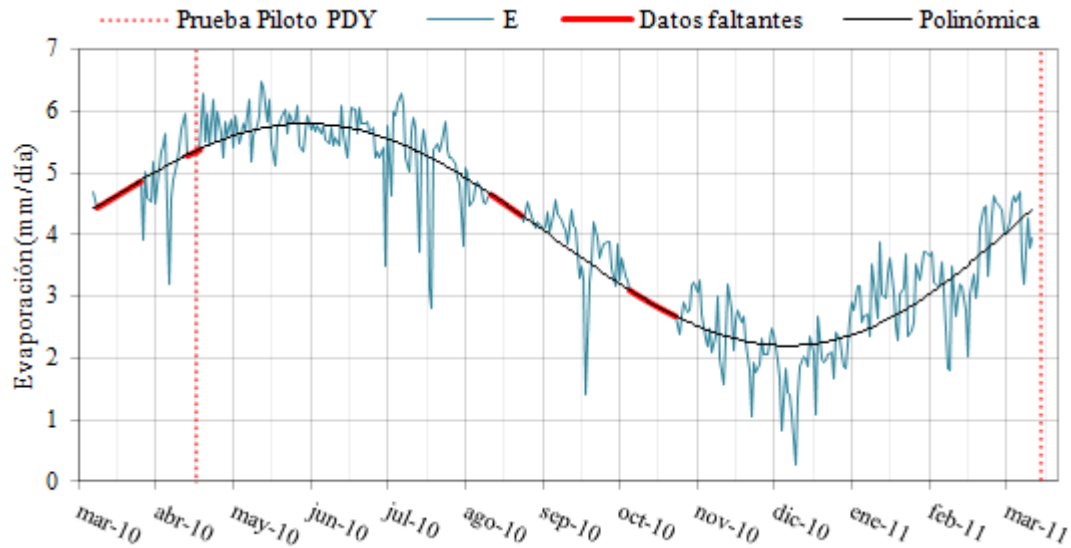


Figura 20. Resultados de las pérdidas diarias de agua por evaporación (E). Los datos donde no existía información (línea roja) fueron calculados con la fórmula 23 del apartado de E.

El volumen de agua que salió del humedal durante el periodo de estudio por E fue de 6.59 hm^3 , esto representa el 5% del volumen total de agua que ingresó a la CSC durante todo el año. Sin embargo, los meses que registraron mayor volumen de pérdidas fueron mayo y junio del 2010 con $\approx 0.83 \text{ hm}^3$. A diferencia de estos meses de verano, el menor volumen de salida se registró en diciembre del 2010 con 0.25 hm^3 de agua evaporada. Como era de esperarse, el aumento de temperatura provocó una mayor pérdida por E a diferencia de los otros meses del año. Esto se debe a que la ecuación de PM está aplicada para lagunas abiertas o en contacto directo con el Sol y por consecuencia, se incrementan las pérdidas por E en los días con temperaturas más elevadas.

El porcentaje de agua evaporada durante los meses de junio a agosto fue del 10-11% y durante los meses restantes fue menor al 6% del volumen de agua que entró durante el mes respectivo. Por ejemplo, en agosto del 2010 el volumen total de agua que ingresó a la CSC fue 5.08 hm^3 evaporándose el 11%, mientras que durante el mes de diciembre se evaporó el 2%, del volumen de agua que ingresó, que fue de 14.88 hm^3 .

En el 2010, Huckelbridge y colaboradores presentaron registros de evaporación en la CSC durante los años 1993-2007 en los cuales se observa un patrón similar a los resultados obtenidos en este estudio ($0.29\text{-}6.47 \text{ mm}$) con variaciones entre $0\text{-}8 \text{ mm/día}$. También, reportan que durante el invierno se registran las menores pérdidas por E y en verano las

mayores. Sin embargo estos resultados fueron estimados con los registros de una estación meteorológica localizada en Yuma, Arizona E.U.; a más de 50 km del área de estudio. La estación meteorológica instalada dentro del humedal que registra las variaciones climáticas *in situ*, proporciona una menor incertidumbre en la estimación de las pérdidas de E con la ecuación de PM y todas las variables que requiere.

Evapotranspiración (ET)

En base a las observaciones propias y otros investigadores (Luecke et al., 1999; Zamora-Arroyo et al., 2001; Flessa, 2010), el Tule se utilizó como referencia para estimar las pérdidas de agua por ET aplicando la metodología de PM y el ASCE. Con esto en consideración, se estimó que durante el año de estudio la salida de agua en el humedal mediante ET fué de 1,681 mm. El promedio de ET diario durante el ciclo hidrológico fue de 4.59 mm, siendo durante julio del 2010 cuando se estimó la mayor ET (7.49 mm/día), mientras que la menor (1.75 mm/día) se estimó para el diciembre del mismo año. Estos valores son consistentes con las temperaturas registradas en la CSC (Figura 21).

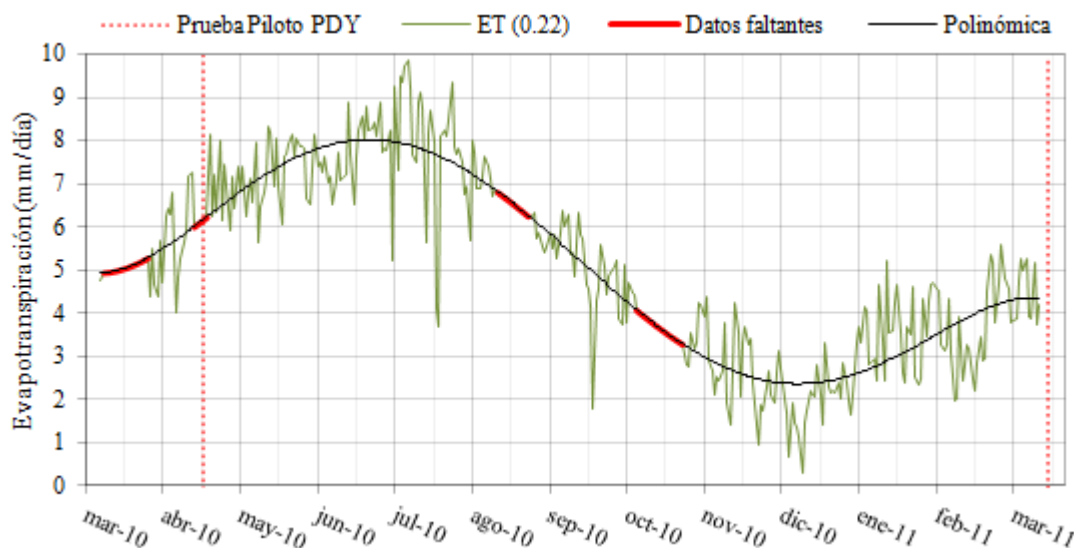


Figura 21. Resultados de las pérdidas diarias de agua por ET utilizando un albedo de 0.22% variable.

En la figura 21 se muestran los resultados de ET calculados diariamente en función al albedo estacional utilizando como referencia 0.22%. Este cálculo se llevó a cabo también con los albedos 0.34 y 0.50%, y una vez obtenidos los resultados, fueron multiplicados por su respectiva área mensual obteniendo así el volumen de agua evapotranspirada (Tabla 6).

Las rayas punteadas rojas indican el período en que se llevó a cabo la prueba piloto de la PDY. La línea roja representa el ajuste polinomial de los datos para completar la serie.

Tabla 6. Resultados de ET mensual utilizando albedos variables (a).

Mes	Volumen de agua evapotranspirado (hm ³)			ET Total
	α (0.22%)	α (0.34%)	α (0.50%)	
mar-10	-	0.13	1.54	1.67
abr-10	0.18	1.14	5.13	6.46
may-10	0.44	2.17	5.69	8.31
jun-10	0.79	2.87	4.22	7.88
jul-10	2.51	4.29	2.24	9.06
ago-10	3.53	2.63	1.24	7.41
sep-10	2.00	1.67	2.38	6.07
oct-10	0.90	1.74	2.31	4.96
nov-10	0.51	0.98	2.24	3.74
dic-10	0.12	0.45	1.90	2.48
ene-11	-	0.35	3.48	3.84
feb-11	-	0.21	3.65	3.86
mar-11	-	0.13	4.03	4.16
Total	11.02	18.82	40.10	69.95

En la tabla anterior se observa que el volumen total de agua evapotranspirada durante el año de estudio fue de 69.95 hm³, lo cual significa que el 52% del agua total que ingresó a la CSC salió mediante este proceso. Durante mayo hasta agosto del 2010 se estimaron volúmenes de ET por arriba de los 7.41 hm³ mismos que fueron los mayores del año. Cabe mencionar que la ET calculada en mayo para las tres clasificaciones de vegetación fue menor que la de junio, sin embargo la superficie vegetal de mayo es 5% más grande, ya que para el mes de junio el área vegetal fue reduciéndose debido a la disminución del flujo por la prueba de la PDY. Por otro lado, el menor volumen de salida con 2.48 hm³ se estimó para diciembre del 2010, mes en el cual la vegetación se encontraba en estado durmiente.

En julio y agosto del 2010, el 100% del agua que ingreso a la CSC se evapotranspiró. Esto se debió a que por una parte, el volumen total de agua de entrada por el WM se fue reduciendo hasta alcanzar los 5.08 hm³ debido a la prueba piloto de la PDY. Por otro lado, durante estos meses las superficies de Tule que se encontraban en un estado más vigoroso predominaban, y como consecuencia, la tasa de ET fue mayor a la del resto de los meses.

Los cambios estacionarios de ET están asociados a la variación del albedo de la vegetación. Esta variable es la de mayor incertidumbre ya que los valores reportados en la literatura por la FAO-56 corresponden a cultivos comerciales. No obstante como se mencionó en la metodología, este coeficiente varió según la etapa de crecimiento de la vegetación. Mientras más vigoroso se encontraba el Tule se incrementaba el volumen evapotranspirado, disminuyendo el albedo. Por otro lado, cuando la planta se encontraba en estado latente el volumen evapotranspirado se redujo, aumentando el porcentaje de albedo.

Otras de las variables que inciden directamente en la estimación de la ET son la radiación y la velocidad del viento. Para ello, la estación climatológica instalada permitió registrarlas de forma directa en la zona de estudio, disminuyendo así la incertidumbre de estos parámetros a diferencia de los datos adquiridos a más de 50 km de distancia como los reportados por Glenn (2010) y Huckelbridge (2010).

En este estudio no se analizó la relación existente entre la vegetación, la salinidad y la ET, sin embargo, hay que tomar en cuenta 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 se explica, ya que entre más intenso es el proceso de ET más se incrementa la concentración de sales en el agua no evaporada. Entonces la salinidad se puede convertir en un factor limitante para la distribución y el crecimiento del Tule en el humedal ya que no tolera salinidades mayores a 6.00 g L^{-1} en un periodo prolongado (Glenn et al., 1995). De igual forma, la ET también aumenta la concentración de selenio (García-Hernández, 2000).

Flujo Subterráneo-Superficial

El volumen de agua que salió de la CSC por flujo subterráneo-superficial (Q_{SM}) calculado a partir de su despeje en la fórmula general de balance (Fórmula 33), arrojó los siguientes resultados. Durante el mes de diciembre del 2010 se registró la mayor salida por Q_{SM} del año con más de 14.84 hm^3 . Esto se debió ya que los procesos de E y ET extrajeron la menor cantidad de agua y además, durante los meses de septiembre hasta diciembre el volumen total de agua que ingresó fue mayor a los 12.99 hm^3 . Por otro lado, en julio y agosto del 2010 se obtuvieron volúmenes de Q_{SM} negativos ya que a diferencia diciembre del 2010, el volumen de agua que entro a la CSC por el WM disminuyo hasta alcanzar los

6.02 hm³ para el mes de julio y 4.76 hm³ para agosto. Esta reducción en conjunto con las altas tasas de E y ET que consumieron más del 100% del agua que ingresó, provocaron una disminución en el almacenamiento de agua en el humedal de hasta 9.94 hm³, lo que explica la inexistencia de salidas superficiales y subterráneas durante julio y agosto del 2010.

En general se estimó que el volumen total de agua extraído por Q_{SM} fue de 59.93 hm³, mismo que corresponde al 45% del volumen total de agua que ingreso a la CSC durante 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 por flujo subterráneo son mínimas mas no han sido estudiadas aún.

Sólidos Totales Disueltos (STD) de salida

Se estimó que la concentración promedio de STD en el Q_{SM} durante el estudio fue de 7.81 g L⁻¹, siendo en junio, septiembre del 2010 y marzo del 2011 donde se registraron las mayores concentraciones (10.42-19.17 g L⁻¹), no obstante, en diciembre del 2010 se estimó la menor concentración con 3.16 g L⁻¹. Estas variaciones en las concentraciones estuvieron en función de la E y la ET así como las toneladas de STD que ingresaron por el WM. De manera que cuando las tasas de E y ET son mayores, extraen solamente el agua dejando en el agua los restos de STD incrementando la concentración media de la CSC y en el Q_{SM} .

En los meses en que se obtuvieron Q_{SM} negativos (julio y agosto del 2010) no se consideraron los valores de STD ya que también fueron negativos, sin embargo, existe una relación para el mes de julio con respecto a la concentración media de la CSC ya que fue la mayor del año con 5.06 g L⁻¹. Esto quiere decir que a diferencia de otros meses la concentración del agua del humedal aumentó en un volumen de agua reducido por la prueba piloto de la PDY.

Otra variable que también influye en el balance de masa para el Q_{SM} es la concentración media de la CSC en función a la diferencia en el almacenamiento, ya que si el volumen de almacenamiento es menor, la concentración de salida por Q_{SM} aumenta (>10.42 g L⁻¹) que fue lo que ocurrió para junio, septiembre del 2010 y marzo del 2011.

La aplicación de los cálculos de balance de masa y balance hídrico permitieron estimar las pérdidas por flujo superficial-subterráneo y su respectivas concentraciones mensuales de STD, ya que el grado de dificultad que presenta la zona sureste del humedal para ser medida manualmente es muy alto.

Volúmenes de salida de agua

Se estimó que el volumen de agua extraído durante el estudio por el proceso de E fue de 6.59 hm^3 , por el de ET 69.95 hm^3 y por Q_{SM} 59.93 hm^3 . Este último extrajo el 45% de agua que entró a la CSC; mientras que por las salidas de E y ET, fueron del 5% y 52% respectivamente. En total fueron extraídos 136.48 hm^3 de agua mediante estos procesos.

Tabla 7. Volúmenes mensuales de agua que salió de la CSC mediante E, ET y Q_{SM} .

Mes	Volumen de salida (hm^3)			
	E	ET	Q_{SM}	Total
mar-10	0.16	1.67	-	1.84
abr-10	0.68	6.46	7.90	15.06
may-10	0.83	8.31	5.04	14.18
jun-10	0.83	7.88	2.08	10.80
jul-10	0.66	9.06	-1.18	9.73
ago-10	0.54	7.41	-1.09	7.96
sep-10	0.58	6.07	1.11	7.78
oct-10	0.48	4.96	8.54	14.00
nov-10	0.38	3.74	9.87	13.99
dic-10	0.25	2.48	14.84	17.58
ene-11	0.36	3.84	4.55	8.76
feb-11	0.37	3.86	3.44	7.68
mar-11	0.39	4.16	2.51	7.07
Total	6.59	69.95	59.93	136.48

En la siguiente figura se observan las pérdidas de agua y sus respectivos porcentajes

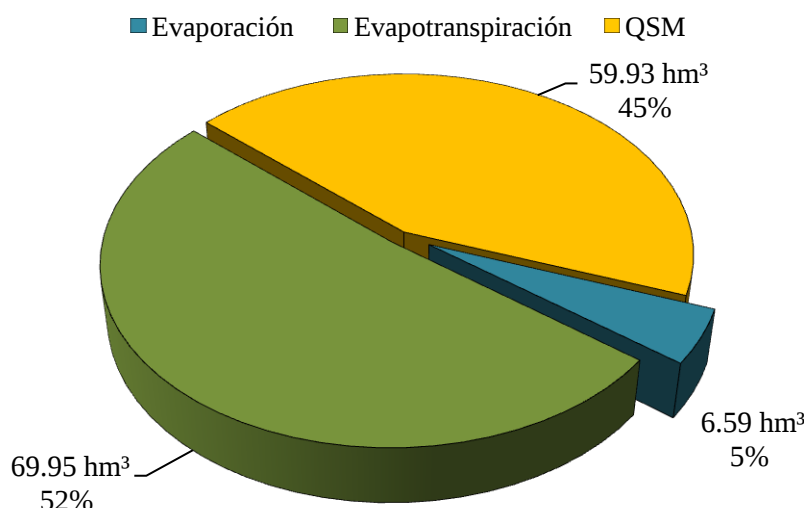


Figura 22. Volúmenes totales de agua que salieron del humedal y su respectivo porcentaje.

Las pérdidas de agua por E por unidad de área fueron 1,474 mm/año, mientras que las pérdidas de ET por unidad de área fueron 1,681 mm/año. Además, las superficies mensuales de vegetación hidrófita (donde se lleva a cabo la ET) tuvieron en promedio una cobertura del 90% del área total del humedal provocando una pérdida de agua mayor que la E en aguas abiertas. No obstante, la ET varía en las regiones del Delta, pero en la CSC la tasa es mayor debido a la gran proporción de vegetación emergente (Cohen, 2001).

Hay que considerar que la CSC se delimitó mensualmente considerando tres estados de la vegetación (alto, medio y bajo) a lo largo de su extensión y excluyendo las zonas de aguas someras al suroeste de la misma. En base a ello, los procesos de E, ET y Q_{SM} omitieron esas aguas de baja profundidad que logran confundirse con aguas provenientes de las mareas altas del Golfo de California. De no ser así, la incertidumbre hubiera sido mayor dentro del balance ya que se estaría dejando pasar el hecho de que la CSC se distribuye de manera uniforme y las profundidades del agua varían a lo largo de toda su extensión.

Topografía y batimetría

Como se mencionó anteriormente, durante este trabajo de investigación se realizó el primer levantamiento topográfico de la CSC y es importante mencionarlo, ya que los datos obtenidos aparte de ser utilizados para conocer el comportamiento del relieve terrestre del

humedal, permitieron determinar la capacidad de almacenamiento del mismo. En la figura 23 se muestran los 5 bancos de nivel alrededor del A_{TM}. En ella se observa el nombre, las coordenadas y la altura obtenida de la nivelación.

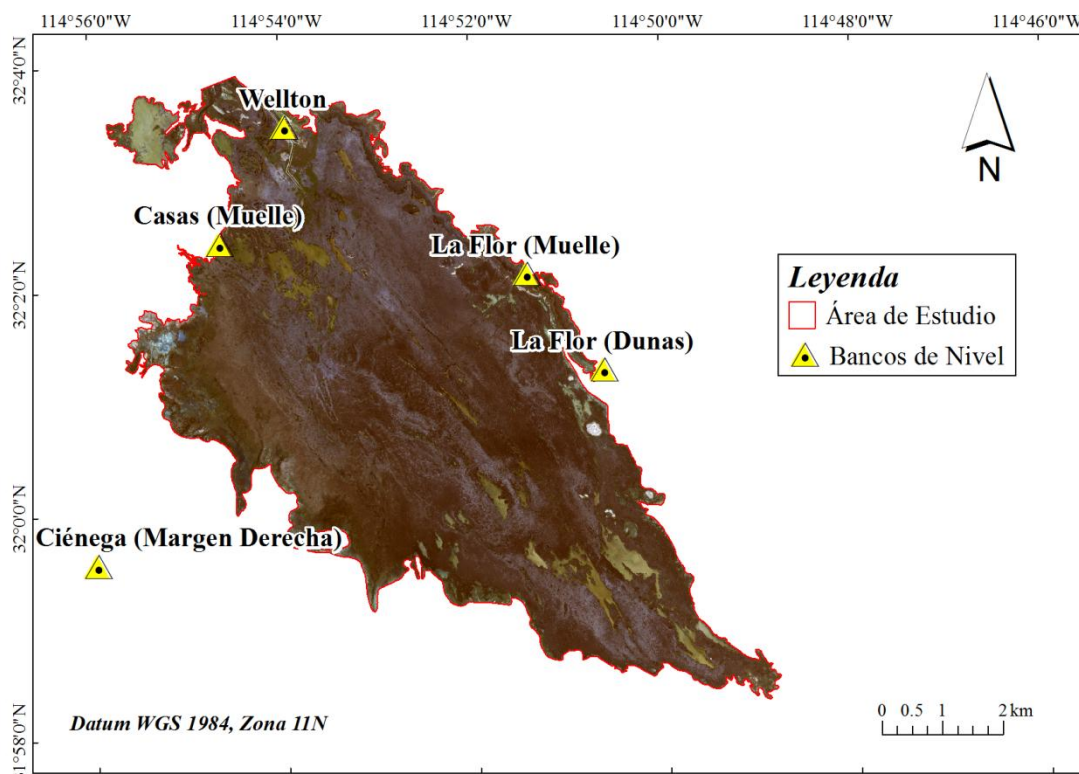


Figura 23. Localización de bancos de nivel utilizados en los levantamientos.

Tabla 8. Nombre y localización geográfica de los bancos de nivel.

Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
La Flor (Dunas)	32° 01' 13''	114° 50' 38''	9.21
La Flor (Muelle)	32° 02' 06''	114° 51' 26''	5.24
Wellton	32° 03' 26''	114° 53' 57''	7.31
Casas (Muelle)	32° 02' 24''	114° 54' 39''	5.93
Ciénega (Margen Derecha)	31° 59' 33''	114° 55' 59''	3.7

Durante los levantamientos topográficos de la CSC se obtuvieron 12,152 puntos dentro y fuera de las lagunas incluyendo las zonas con Tule (Figura 24). En estos puntos se anexaron los calculados por interpolación y extrapolación. Sin embargo, dentro del A_{TM} la elevación máxima obtenida fue de 7.30 msnm, misma que se registró al norte de la CSC y a un costado del WM. Por otro lado, la elevación mínima fue de 2.52 msnm y se tomó dentro

de una laguna central formada por la falla del Cerro Prieto. Esta se localiza en las coordenadas WGS84: 32° 10' 8'' N y 114° 52' 13'' W.

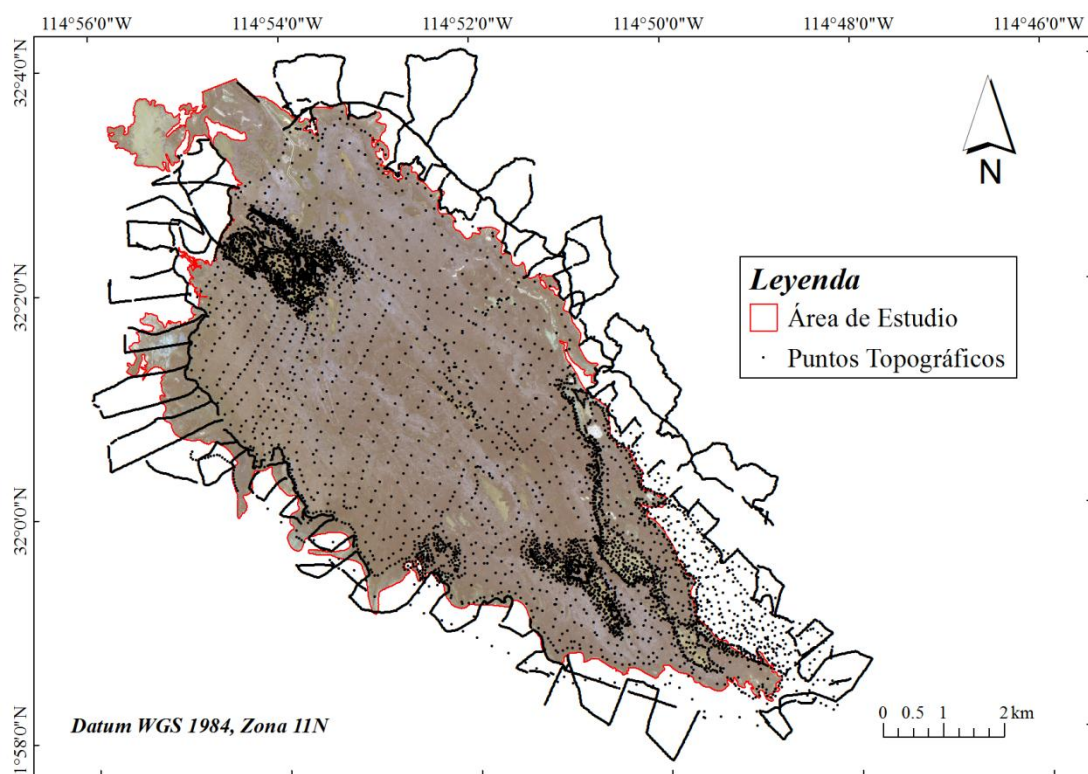


Figura 24. Localización de puntos obtenidos en base al levantamiento del relieve topográfico, cada sitio incluye coordenadas geográficas (x,y) y elevación (z) dentro del SIG.

En la figura 25 se muestran los resultados de las configuraciones de líneas de nivel dentro del humedal una vez interpolados los datos del relieve terrestre en una malla regular utilizando el esquema de interpolación *IDW*.

Los sitios con mayor irregularidad se observan en las lagunas abiertas al noroeste y al sureste del humedal, zonas donde se obtuvo una mayor cantidad de puntos debido a la accesibilidad. No obstante, la configuración de las líneas de nivel permitió estimar la profundidad de estas lagunas.

La curva de nivel más alta del relieve terrestre dentro del A_{TM} fue de 7.0 msnm, las elevaciones menores a esta son las que se contemplaron para el desarrollo del estudio. No obstante fuera del A_{TM} se registraron elevaciones de hasta 8.00 msnm, sin embargo, se encuentran fuera de la zona húmeda la cual no es considerada en este estudio.

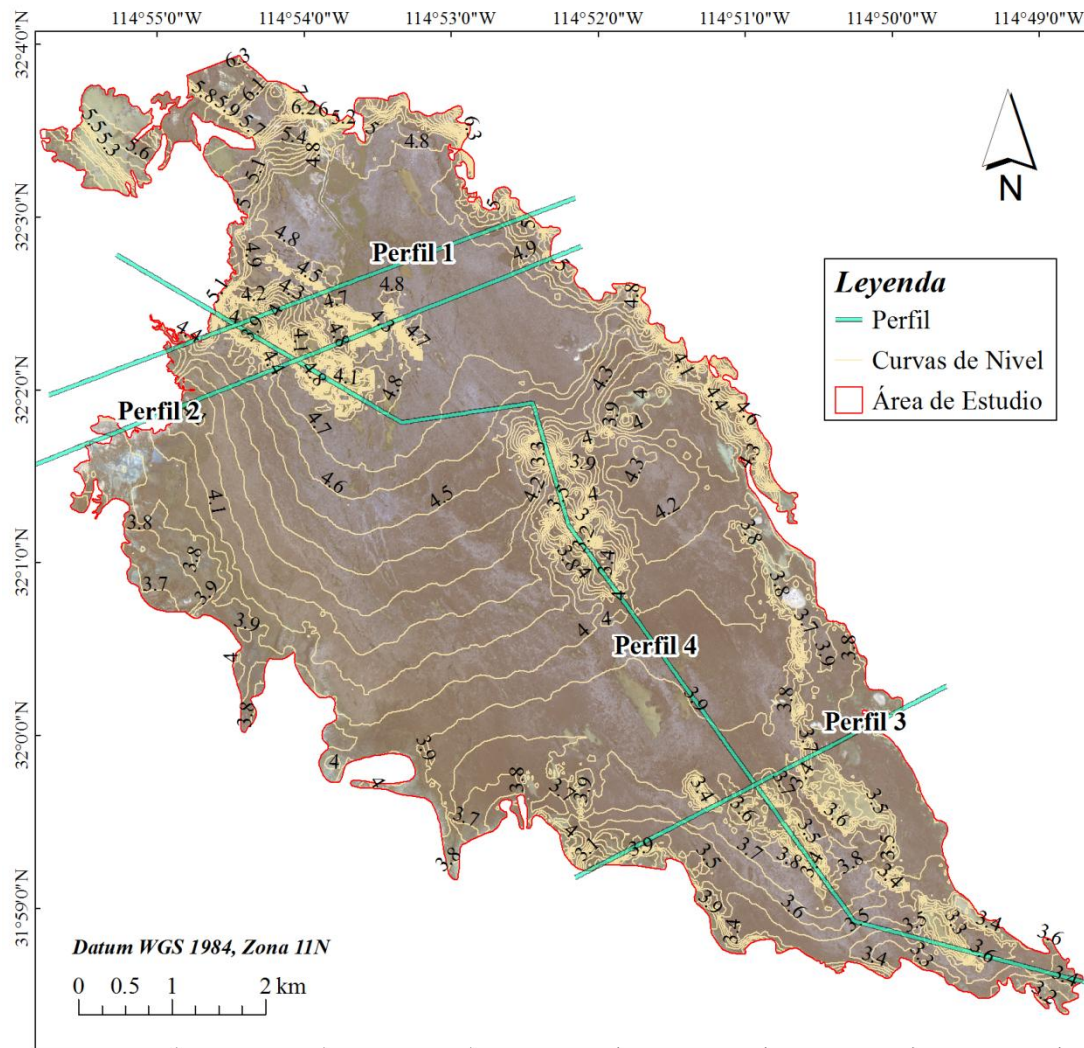


Figura 25. Contornos generados con los puntos topográficos de elevación. Las líneas verdes muestran la ubicación de los perfiles.

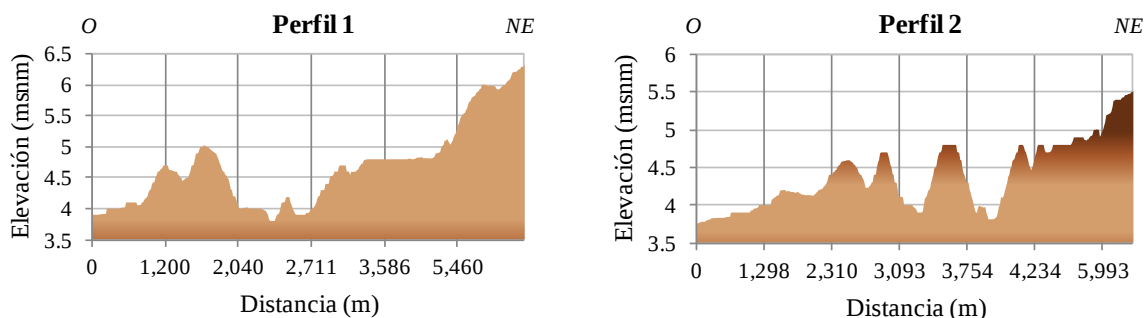
Perfiles Topográficos

Se corroboró el comportamiento del relieve terrestre creando cuatro perfiles, tres de ellos con una dirección suroeste-noreste y uno de ellos atravesando el humedal en toda su extensión con una dirección noroeste-sureste, esta última muestra con mayor referencia el comportamiento del sitio (Figura 25).

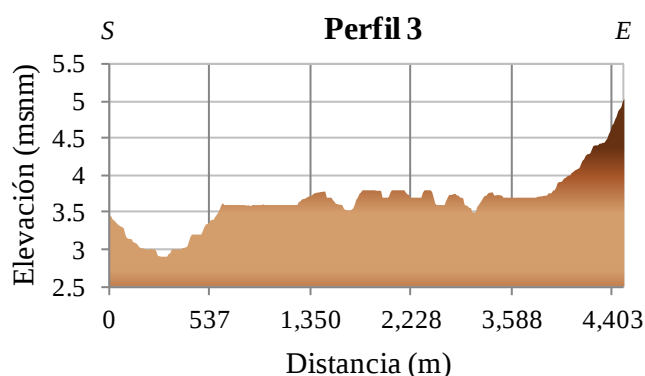
A continuación se mencionan las características observadas en estos perfiles:

En la figura 26 se observan los perfiles 1 y 2 localizados al norte de la CSC que presentan tendencias similares, por ejemplo, en los extremos del lado noreste existe una barrera topográfica que impide el crecimiento del humedal con elevaciones que varían

desde los 6.35 msnm hasta los 6 msnm; también, se aprecia que la elevación del fondo en las lagunas más grandes es menor a los 4 msnm. Sin embargo una de las características que diferenció estas secciones de perfil fue una barrera que alcanzó los 5 msnm al oeste del perfil 1, que evita que las lagunas sean vaciadas por ese extremo. En el perfil 2 no existe esa barrera y se aprecia como el talud va disminuyendo gradualmente hasta alcanzar una elevación de 3.78 msnm.



El perfil 3 (figura 27) localizado al sur y al centro de la CSC con orientación dirigida hacia el este, mostró un rápido incremento en la elevación (≈ 5 msnm) limitando la zona del humedal del resto de la mesa arenosa en el extremo oriental. Se observó que el fondo de las lagunas centrales está ligeramente por encima de los 3.53 msnm, menos que los perfiles 1 y 2, y están separadas por zonas de vegetación de aproximadamente ≈ 3.74 msnm.



En el perfil 4 (Figura 28) que está orientado en dirección noroeste-suroeste de la CSC, se observó como la elevación del fondo de las lagunas a lo largo del humedal se va modificando. Las lagunas posicionadas entre el kilómetro 0+525 y el 4+000 tuvieron

elevaciones de profundidad de los 3.93 a los 4.5 msnm. En el centro del humedal, en el kilómetro 5+300 hasta el 7+100 las elevaciones variaron de 2.74 a 2.83 msnm. Finalmente al suroeste de la CSC se mantienen elevaciones de 3 a 3.24 msnm y finalmente topa con una barrera que limita las salidas superficiales de agua y la intrusión de las mareas.

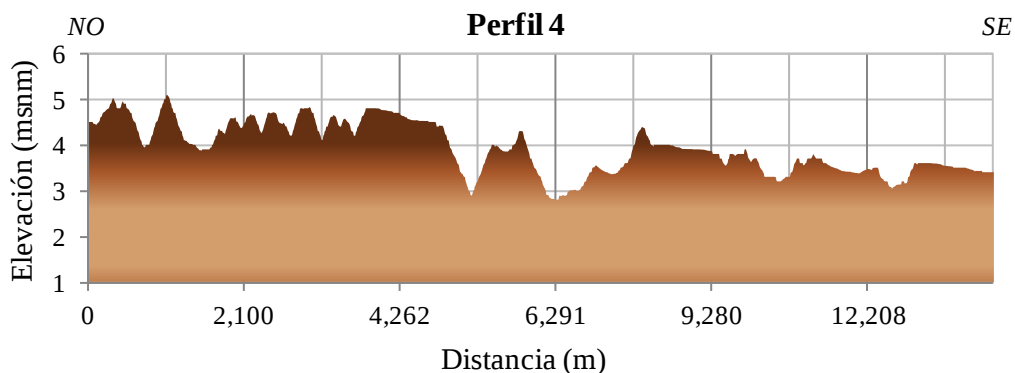


Figura 28. En este perfil se distribuyó de forma longitudinal a lo largo de la CSC pasando sobre todas las lagunas más extensas localizadas con el SIG.

Se creía que la CSC estaba conformada como una sola cuenca, sin embargo, tomando como referencia el levantamiento del relieve terrestre se observa que el sitio se comporta como una cuenca dentro de la cual se ubican varias subcuencas. Esto se apreció mejor al generar las curvas de nivel y el *DEM* del relieve terrestre (Página 89). En este último se observan de color más oscuro los sitios donde la elevación es menor, en algunos de ellos se localizan las lagunas más grandes. La profundidad de las lagunas es mayor en el extremo noroeste encontrándose una laguna con mayor profundidad en la porción central de la CSC y las lagunas más someras en la parte sur. Cabe de mencionar que el comportamiento de la topografía se relaciona con lo que Glenn (2001) observó, ya que el humedal se encuentra rodeado de una barrera de arena que en ocasiones cuando existen mareas altas, la descarga de agua al sureste se mezcla con agua de mar en una cuenca de evaporación misma que funciona como un hábitat para miles de aves pequeñas (Mellink et al., 1996, 1997).

Levantamiento topográfico del espejo de agua

El levantamiento topobatimétrico en conjunto con los niveles de agua obtenidos de los equipos se utilizó para calcular el volumen de la CSC y las variaciones de profundidad en todo el sitio. En el espejo de agua se tomaron 669 puntos a lo largo de la CSC (Figura

29) donde las elevaciones variaron desde 3.2 msnm al sureste en las zonas más bajas hasta 6.6 msnm en las más altas (noroeste).

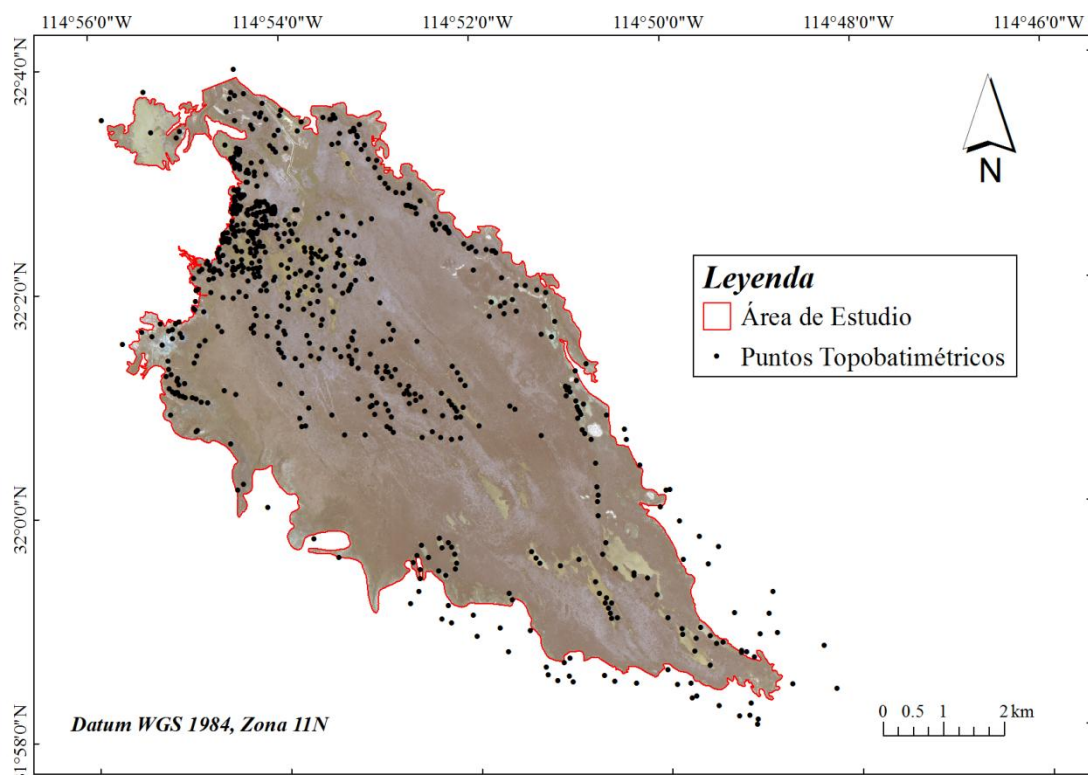


Figura 29. Ubicación de puntos obtenidos en base al levantamiento del espejo de agua utilizando el equipo GPS, cada sitio incluye coordenadas geográficas (x,y) y elevación (z) dentro del SIG.

Debido a la cantidad y espaciamiento de puntos del levantamiento topobatimétrico se logró generar un *DEM* de referencia para calcular mensualmente los volúmenes de la CSC.

Dimensiones de la CSC

Área de la CSC

La dinámica del crecimiento de la CSC a lo largo del tiempo ha provocado que no existiese una frontera que la delimite de forma específica. Sin embargo, en el 2010 en conjunto con Edward P. Glenn y Karl Flessa de la Universidad de Tucson Arizona, E.U., se ha delimitado el humedal 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.

De los resultados obtenidos, el área promedio anual de la CSC fue de 4,698 ha ($4.69 \times 10^7 \text{ m}^2$), siendo el mes de octubre del 2010 la mayor con 5,046 ha ($5.04 \times 10^7 \text{ m}^2$) y el

mes de agosto del mismo año la menor con $4.10 \times 10^7 \text{ m}^2$ (4,105 ha). Las áreas calculadas con sus respectivos porcentajes para el resto de los meses del año se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Resultados de las áreas totales (A_{TM}), áreas de lagunas abiertas (A_{LM}) y áreas de vegetación (A_{VM}), las últimas dos con el porcentaje que representaron con respecto al A_{TM} .

Mes	Áreas (ha) y Porcentajes (%)				A_{TM}
	A_{LM}	%	A_{VM}	%	
mar-10	460	9	4,502	91	4,962
abr-10	467	10	4,200	90	4,668
may-10	467	10	4,308	90	4,775
jun-10	487	11	4,087	89	4,575
jul-10	390	9	3,900	91	4,290
ago-10	371	9	3,733	91	4,105
sep-10	471	10	4,136	90	4,607
oct-10	487	10	4,558	90	5,046
nov-10	488	10	4,524	90	5,012
dic-10	444	9	4,570	91	5,014
ene-11	444	9	4,303	91	4,747
feb-11	440	9	4,296	91	4,737
mar-11	418	9	4,119	91	4,537
Promedio	449	10	4,249	90	4,698

El cambio en el A_{TM} fue más evidente en agosto y octubre del 2010 a diferencia del resto del año de estudio, ya que durante estos meses, ingresaron los volúmenes de agua mínimos (5.08 hm^3) y máximos (17.53 hm^3) producto de la prueba piloto de la PDY.

Lagunas

Durante las campañas de los levantamientos topográficos se observaron extensiones de aguas abiertas dentro y fuera de la zona con vegetación hidrófita. Sin embargo, con las imágenes satelitales se comprobó que estas áreas de aguas abiertas dentro de la zona con vegetación fueron variables. Por ejemplo, en noviembre del 2010 el área fue la mayor del año de estudio con 488 ha ($4.88 \times 10^6 \text{ m}^2$), mientras que en agosto se estimó la menor con 371 ha ($3.71 \times 10^6 \text{ m}^2$). Las A_{LM} mensuales y sus respectivos porcentajes variaron en base al volumen de agua de entrada y a las salidas por E y ET.

Se delimitaron 534 cuerpos abiertos de agua con un área total promedio mensual de 449 ha ($4.49 \times 10^6 \text{ m}^2$), misma que representó el 10% del área total de la CSC en el año.

Durante los meses de junio a septiembre del 2010 se observó que al suroeste de la CSC disminuyó el área de aguas abiertas dentro de la zona vegetal. Esto quiere decir que a pesar de que existió vegetación en esa zona pudo no tener agua superficial. Para corroborar esto, se utilizó una secuencia de imágenes satelitales Landsat-5 desde los años 70's de la evolución de la CSC. En algunas de ellas, por ejemplo la tomada el 6 de septiembre de 1993 (año en que también se redujo el volumen de agua) se observó que el agua fluye por la falla del Cerro Prieto, sin embargo, al suroeste de la CSC a pesar de ser una de las zonas más bajas; cuando disminuye el volumen de agua de entrada los cambios son más apreciables; las lagunas se secan y la tonalidad de la vegetación se modifica. Algo similar sucede fuera de la zona vegetal también al suroeste de la CSC donde se encuentra una extensión cubierta por agua somera que forma parte del humedal y que dependiendo de la época del año la lámina de agua es mayor o menor (10 a 15 cm). Esta superficie no se consideró en el análisis de E ni ET por ser muy variable en extensión a lo largo del año.

Vegetación

En base a las observaciones en campo durante las campañas de levantamiento topográfico a lo largo del humedal, la cobertura vegetal se consideró para una sola especie en particular, el Tule. Glenn y colaboradores (2006) mencionan que la CSC 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.

En diciembre del 2010 se delimitó la mayor área vegetal con 4,570 ha ($4.57 \times 10^7 \text{ m}^2$) mientras que el mes con menor área fue agosto del mismo año con 3,733 ha ($3.73 \times 10^7 \text{ m}^2$). Para el área mayor de diciembre se observó que los tres meses anteriores el volumen de agua que ingresó a la CSC fue mayor a los 12.99 hm^3 , sin embargo, a pesar de que en octubre se registró el mayor volumen de entrada, eso no significó que el área de cobertura vegetal sea la mayor, mas bien, este acumulamiento del volumen de agua en estos meses anteriores, se vio reflejada en el crecimiento de la vegetación hasta diciembre del 2010. Es decir, la respuesta del aumento en el volumen de agua que entra a la CSC se ve reflejado de forma inmediata en la superficie del humedal, sin embargo, el aumento en la superficie de vegetación es más lento y requiere al menos de uno a dos meses para llevarse a cabo.

La superficie vegetal promedio mensual fue de 4,249 ha ($4.24 \times 10^7 \text{ m}^2$), la cual es similar a la presentada por Flessa (2010). En promedio, el 90% del área total de la CSC se encontró cubierta por vegetación en la cual se estimaron mensualmente las salidas por ET.

En el mes con menor área vegetal (agosto, 2010) existió una disminución en el volumen de agua ($< 9 \text{ hm}^3$) durante tres meses antes incluyendo el mismo mes de agosto. Se puede decir que la disminución del flujo continuo durante este periodo tuvo como consecuencia una reducción en la superficie vegetal y en las superficies de aguas abiertas. Esto también aunado a que en este mes se registraron altas tasas de E (11%) y ET ($> 100\%$). Por otro lado, en diciembre del mismo año sucedió lo contrario, ya que aumento la superficie vegetal cuando las salidas por E y la ET fueron las más bajas y el volumen de agua que ingreso fue de los más altos. Este incremento en el área de la CSC se observó a partir de septiembre hasta diciembre con un volumen de agua mayor a los 12 hm^3 .

En relación al estado vegetativo de la CSC, se estimó que en promedio el 11% del área total se encontró con alto vigor durante el estudio, siendo agosto del 2010 el mes en que predominó a diferencia de los otros estados vegetales (1,610 ha) representando el 43% del A_{VM} (3,733 ha). En marzo del 2010 así como en enero, febrero y marzo del 2011 no se contabilizaron superficies con vigor alto ya que no fueron perceptibles en las imágenes satelitales. Por otro lado, la vegetación con vigor medio fue mayor en promedio durante el todo el año (22%) a diferencia del vigor alto. Sin embargo en agosto y septiembre del 2010 esto no ocurrió, ya que a pesar de que el área de la CSC fue reducida, la vegetación que predominó fue la de vigor alto debido a su estado de crecimiento. Por último en promedio, la vegetación con vigor bajo fue del 67%, siendo los meses de invierno cuando predominó con más del 90% del A_{VM} . No obstante, a pesar de su abundancia ($> 3,585 \text{ ha}$), la ET que en ella es baja, debido al estado en que se encuentra la vegetación, lo que explica el por qué el volumen de agua que entro a la CSC no fue expulsado en su totalidad por ET al igual que los meses de julio y agosto del 2010. Cabe de mencionar que durante junio a septiembre del mismo año cuando la vegetación se encontró en crecimiento, fue considerada una superficie con vigor bajo (769 ha), ya que en estos meses se llevó a cabo la prueba piloto y se observó que la vegetación localizada en aguas someras presento una tonalidad distinta a la del resto de la vegetación. Las áreas vegetales con su respectivo vigor se observan a continuación.

Tabla 10. Áreas mensuales de las tres clasificaciones de vegetación y su respectivo porcentaje que representó en relación al A_{VM} .

Mes	Áreas de Vegetación (ha) y Porcentajes (%)						A_{VM}
	Alto	%	Medio	%	Bajo	%	
mar-10	-	-	345	8	4,157	92	4,502
abr-10	115	3	719	17	3,365	80	4,200
may-10	207	5	1,072	25	3,029	70	4,308
jun-10	357	9	1,403	34	2,327	57	4,087
jul-10	979	25	1,830	47	1,090	28	3,900
ago-10	1,610	43	1,353	36	769	21	3,733
sep-10	1,161	28	1,095	26	1,879	45	4,136
oct-10	703	15	1,504	33	2,351	52	4,558
nov-10	546	12	1,122	25	2,855	63	4,524
dic-10	204	4	780	17	3,585	78	4,570
ene-11	-	-	388	9	3,915	91	4,303
feb-11	-	-	234	5	4,061	95	4,296
mar-11	-	-	129	3	3,990	97	4,119
Promedio	452	11	921	22	2,875	67	4,249

Según los resultados obtenidos en este estudio y los de All (2006), el crecimiento vegetativo de la CSC en los meses de verano es mayor al de resto del año, y es de esperarse ya que durante ese periodo hubo más radiación solar. Sin embargo no sucedería si la disponibilidad del agua se viera afectada por la utilización de la PDY. No obstante, durante este estudio la reducción del flujo causado por la prueba piloto abarcó la temporada de verano y lo mencionado por All (2006) no se vio reflejado. Seguramente otros factores como las altas concentraciones de salinidad y selenio influyeron en el crecimiento y distribución de la vegetación como lo menciona Glenn (1995). Sin embargo en este estudio no se analizó la relación calidad del agua-vegetación.

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, estos cambios no son significativos ya que los resultados obtenidos coinciden con la superficie de 4,200 ha que Cohen (2001) y Flessa (2010) mencionan.

De manera general en la figura 30 se observan las áreas mensuales de forma gráfica de cómo predominó la cobertura vegetal en comparación con las superficies de agua. Una tercera línea del volumen total mensual de entrada de agua también es incluida.

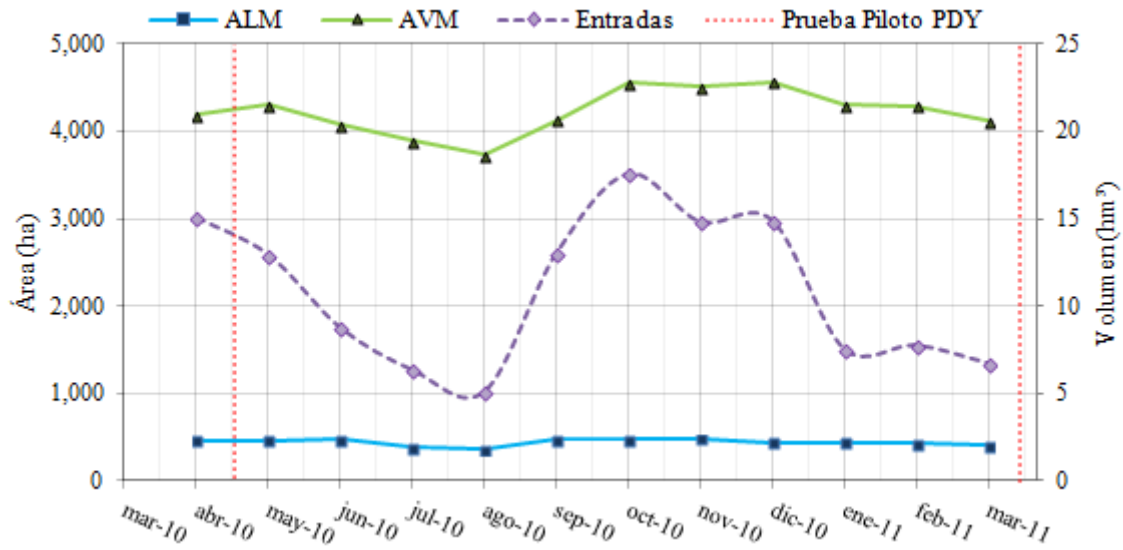


Figura 30. Resultados mensuales de las superficies que compusieron al humedal.

En la siguiente figura se observa la delimitación superficial de la CSC con el SIG:

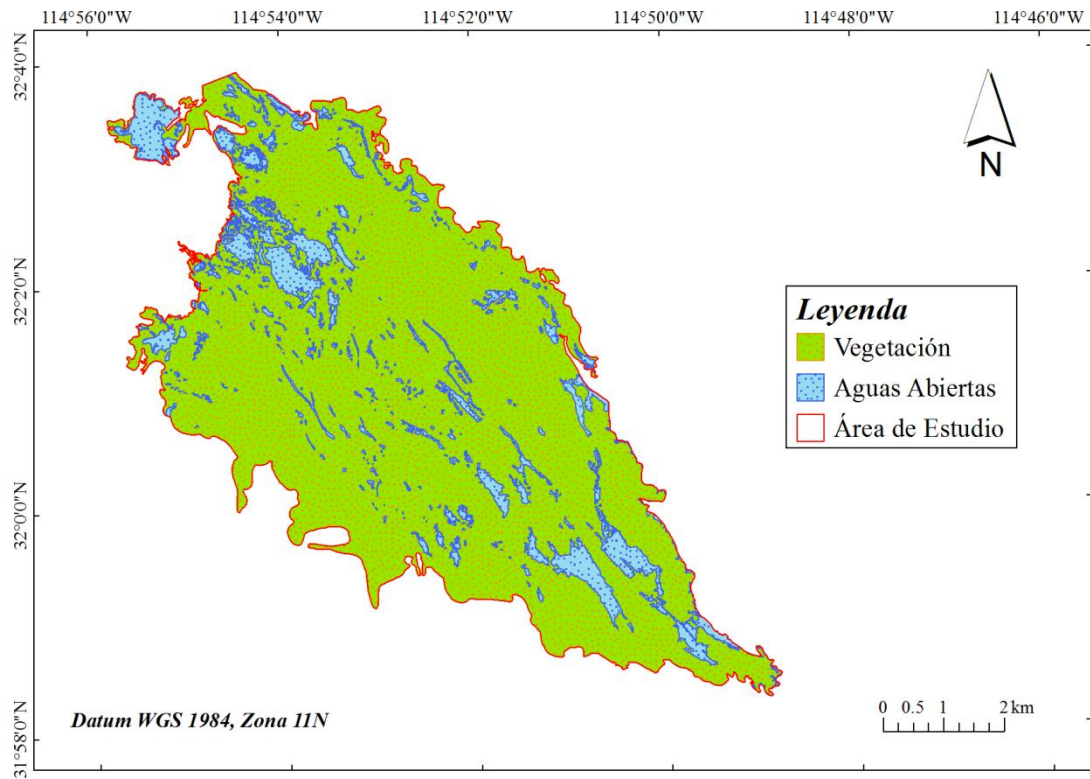


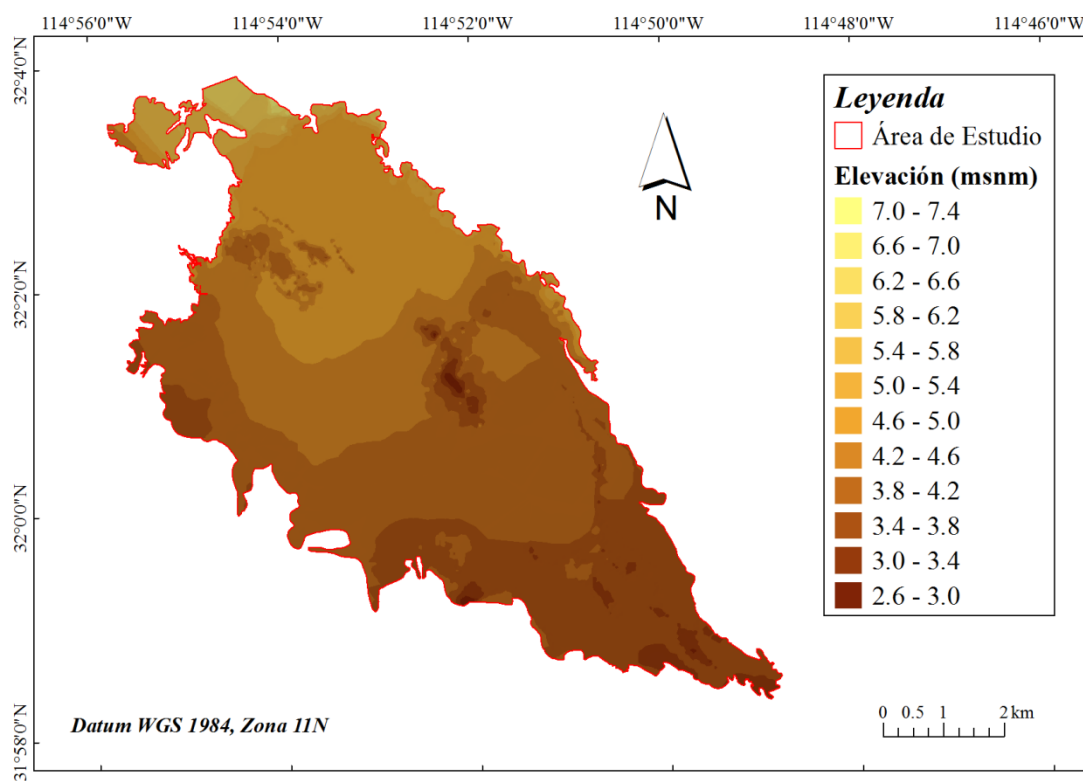
Figura 31. Localización de las superficies con vegetación y aguas abiertas, las áreas obtenidas se multiplicaron por los resultados de E y ET.

Utilizando el SIG en conjunto con las imágenes satelitales Landsat-5 y World View 2 se estimo que durante el año de estudio, en promedio, el 90% del humedal estuvo cubierto

por vegetación y solamente el 10% por aguas abiertas. Las áreas obtenidas fueron aplicables para estimar las salidas de aguas por E y ET mediante la metodología de PM, y los resultados son acordes a los obtenidos por Glenn y colaboradores en el 2012 y su metodología sujeta al índice de diferencia normalizada de vegetación (*NDVI* por sus siglas en ingles). Sin embargo cabe de mencionar que la relación que existe entre los procesos de E, ET y la superficie en donde se llevan a cabo en la CSC 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 CSC por E o ET.

Volumen

La capacidad o volumen de almacenamiento de agua que soporta el humedal fue indispensable para realizar el balance hídrico, y al igual que los datos obtenidos de los levantamientos topográficos y topobatimétricos, son únicos. Esto se debe a que en base al postprocesamiento de los datos topográficos dentro del SIG se obtuvo un *DEM* del relieve terrestre y doce del espejo de agua (uno para cada mes) (Figuras 32 y 33).



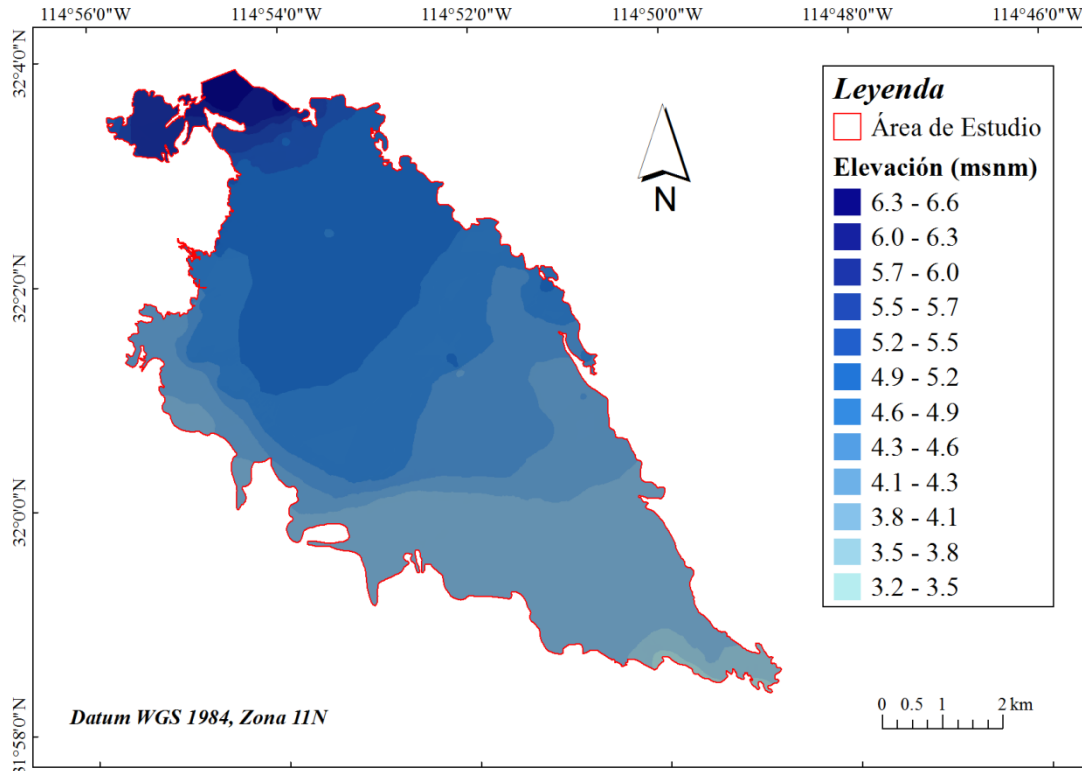


Figura 33. Modelo digital de elevación generado con los datos del levantamiento topográfico del espejo de agua y los sensores electrónicos, mediante el manejo del SIG ArcMap 10.

Anteriormente no se contaba con un levantamiento topográfico que permitiera definir la superficie terrestre por debajo del agua, y como consecuencia, el volumen era determinado al multiplicar una altura basada en el tirante de agua promedio que requiere el Tule para subsistir (≈ 1.5 m), por el área total definida con el SIG e imágenes satelitales. Lo que generaba una gran incertidumbre con respecto al volumen calculado, ya que la superficie terrestre del humedal era considerada completamente plana.

El volumen mensual promedio de la CSC durante el año de estudio fue de 15.61 hm^3 , sin embargo, para el mes de noviembre del 2010 se estimó la mayor capacidad de almacenamiento con 19.50 hm^3 mientras que la menor se obtuvo para agosto del mismo año con 9.94 hm^3 . Estos resultados en relación a los obtenidos de entradas y salidas de agua, así como las áreas mensuales, coinciden. Ya que durante los meses que ingresó más agua se registró la mayor área, y a además, se incrementó el volumen de agua en la CSC. Lo mismo se observó para los meses que ingresó menos agua, disminuyendo el área y la capacidad de almacenamiento del humedal.

Los cambios en las dimensiones del humedal no se basan simplemente en que si ingresa más agua al humedal aumenta su tamaño y viceversa. Se puede decir que el volumen de agua en el humedal está en función de tres factores, los volúmenes de entrada, los volúmenes de salida por E, ET y los volúmenes de salida por flujo superficial Q_{SM} . Esto se observó una vez graficados los resultados (Figura 34), ya que desde el inicio de la prueba piloto hasta agosto del 2010 existió un decremento en los volúmenes de agua de entrada y de almacenamiento, sin embargo, el almacenamiento en la CSC cambió gradualmente mientras que las entradas de agua variaron hasta alcanzar una reducción de 5.08 hm^3 , cuando en promedio se reducían solamente 2.48 hm^3 de un mes a otro.

Para septiembre y octubre del 2010 un aumento en el volumen del humedal del 52% (5.21 hm^3) concordó con el volumen de agua que ingresó, pero a diferencia de estos dos meses, en noviembre el incremento en el volumen de almacenamiento fue menor (23%) e igualmente coincide solo que en este caso con la disminución en el volumen de agua que entro y a las pocas salidas de agua por E y ET; las cuales, son muy bajas a comparación de los meses de verano. Por otro lado, en diciembre el volumen de la CSC disminuyó a pesar de que la cantidad de agua que entró al sistema fue similar a la de noviembre (14.80 hm^3), y en enero del 2011, volvió a disminuir manteniendo un volumen de almacenamiento similar hasta marzo del mismo año. En estos tres últimos meses de estudio, el volumen de entrada se redujo a casi el 50% del que fue enviado en noviembre y diciembre del 2010 (7.54 hm^3), sin embargo, el volumen del humedal se mantuvo constante (no disminuyó). Se pudo esperar que la reducción del 50% durante tres meses se viera reflejada en el volumen de almacenamiento, pero al analizar las pérdidas por E y ET, se observó que durante estos meses se estimaron las tasas más bajas de salida de agua por estos procesos a diferencia de los meses de julio y agosto, donde el volumen de almacenamiento se fue modificando en función a una reducción del agua entrante y a la extracción $> 100\%$ del agua que entro por el WM mediante la ET debido al alto vigor de la vegetación.

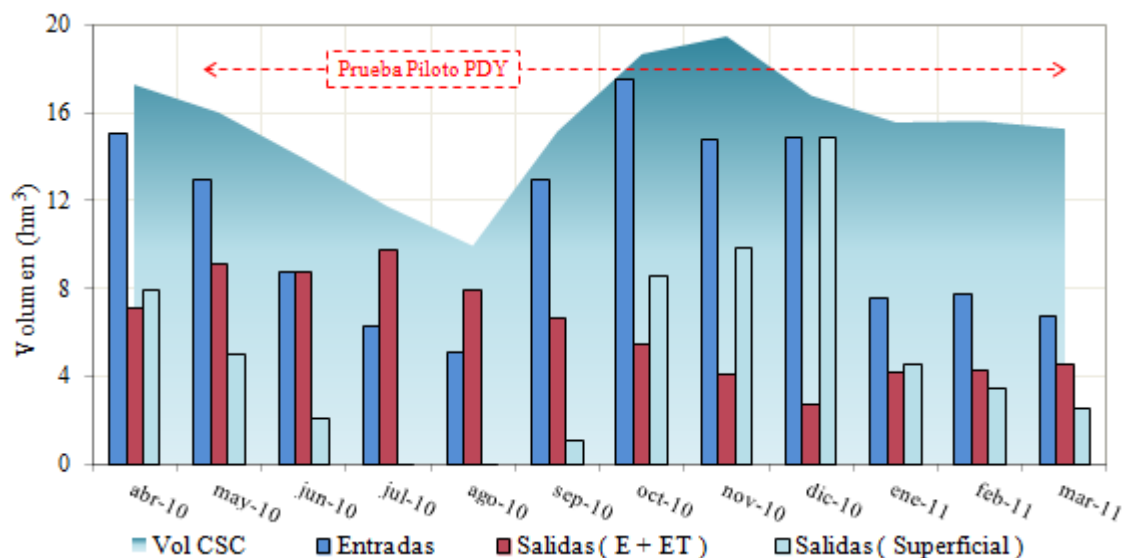


Figura 34. Volúmenes de almacenamiento y procesos que intervienen en su variabilidad.

Niveles de Agua y Profundidad

Los cambios en las dimensiones de la CSC se deben en gran parte al volumen de agua que ingresó y a las salidas por E, ET y Q_{SM} . Sin embargo para observar la hidrodinámica de las lagunas dentro del perímetro mojado se instalaron nueve sensores a los cuales se les asignó un número: 1, 2, 4, 5, 7, 13, 16, 19 y 22, y un nombre (Tabla 11).

Tabla 11. Sitios monitoreados durante el estudio con su respectiva ubicación geográfica (Datum WGS 1984), elevación del nivel y equipos instalados.

Sitio	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)	Equipo Instalado
1	El Tronque Sur	32° 02' 04"	114° 53' 13"	5.38	YSI-HOBO-Regleta
2	Entrada Bocanita	32° 01' 44"	114° 53' 35"	5.58	HOBO-Regleta
4	El Letrero	32° 02' 05"	114° 53' 03"	5.39	YSI-Regleta
5	La Flor (Laguna Sur)	32° 00' 45"	114° 51' 57"	4.87	YSI-XLM-Regleta
7	La Flor (Entrada)	32° 02' 00"	114° 51' 32"	4.75	HOBO-Regleta
8	Wellton-Mohawk	32° 03' 26"	114° 53' 57"	7.99	HOBO-Regleta
9	Dren Riito	32° 06' 16"	114° 56' 55"	7.73	YSI 600LS-Regleta
13	Ciénega Este	32° 01' 05"	114° 51' 00"	4.88	HOBO-Regleta
16	Ciénega Noreste	32° 03' 28"	114° 53' 09"	5.46	YSI 600LS-Regleta
19	Ciénega Noroeste	32° 01' 51"	114° 54' 01"	5.59	YSI 600LS-Regleta
22	Torre de Observación	32° 02' 12"	114° 54' 50"	5.31	HOBO-Regleta

En la siguiente figura se observan los sitios instalados en el humedal.

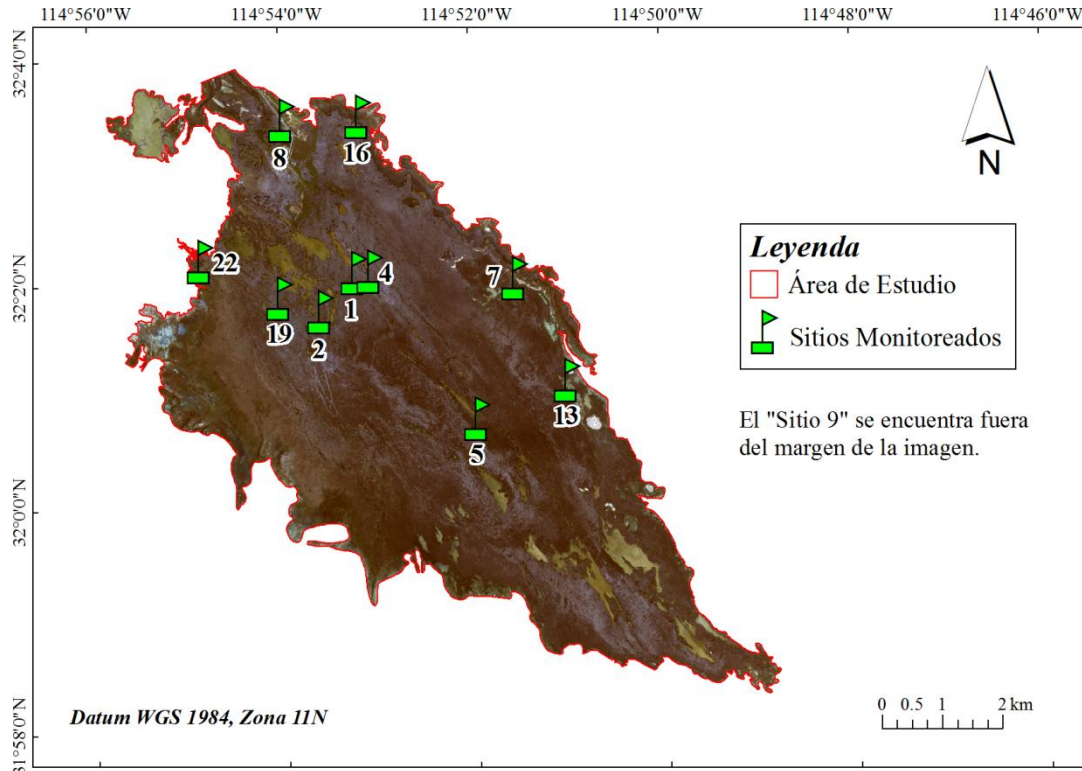


Figura 35. Elevación del agua en msnm de todos los sitios donde se instaló un sensor.

Posteriormente de haber procesado los datos de todos los equipos, se determinó que la mayor profundidad del agua fue de 0.96 m y se registró en el sitio 1. No obstante, otro de los sitios que presentó una profundidad similar fue el número 2 con solo una pequeña diferencia de -0.03 m. Ambos puntos monitoreados registraron la mayor de sus profundidades en noviembre del 2010. El resto de los equipos localizados dentro del humedal también registraron la mayor de sus profundidades en el mismo mes excepto el sitio 16 que de igual forma registró su máxima profundidad en octubre del mismo año.

Durante el mes de agosto del 2010 se registraron las profundidades menores en todos los sensores, la menor fue de 0.08 m en el sensor 19, los sensores 5 y 16 no obtuvieron datos durante este mes debido a complicaciones con los equipos. Solamente de los sensores en los sitios 2 y 7 se obtuvieron registros durante todo el período de estudio, el resto de los sensores interrumpieron los la toma de datos por fallas técnicas, condiciones del lugar y efecto del agua salobre.

Se estimó que la profundidad promedio mensual del agua en la CSC fue de 0.47 m, sin embargo, cabe mencionar que las profundidades resultantes se calcularon exactamente

en el punto donde se instaló el equipo; zonas aledañas a la vegetación y no en medio de las lagunas, por lo que no son las profundidades máximas de las lagunas.

Al suroeste del humedal y en otros sitios alejados de la zona más accesible, no se instaló ningún equipo, lo que impidió conocer las profundidades reales en esas zonas y en consecuencia no fueron consideradas para calcular la profundidad promedio de la CSC.

En total se visitaron 132 veces los 11 sitios durante el periodo de estudio, sin embargo, solamente 103 se utilizaron para determinar los niveles del agua en las distintas lagunas de la CSC, ya que en el resto de las mediciones el nivel del agua fue tan bajo que no pudo ser registrado por la regleta.

Los resultados de los equipos se muestran en las figuras 36 y 37 donde se aprecian los eventos que sucedieron durante el período de monitoreo; el terremoto del 4 de abril, la disminución del volumen de agua por la prueba piloto de la PDY y el incendio.

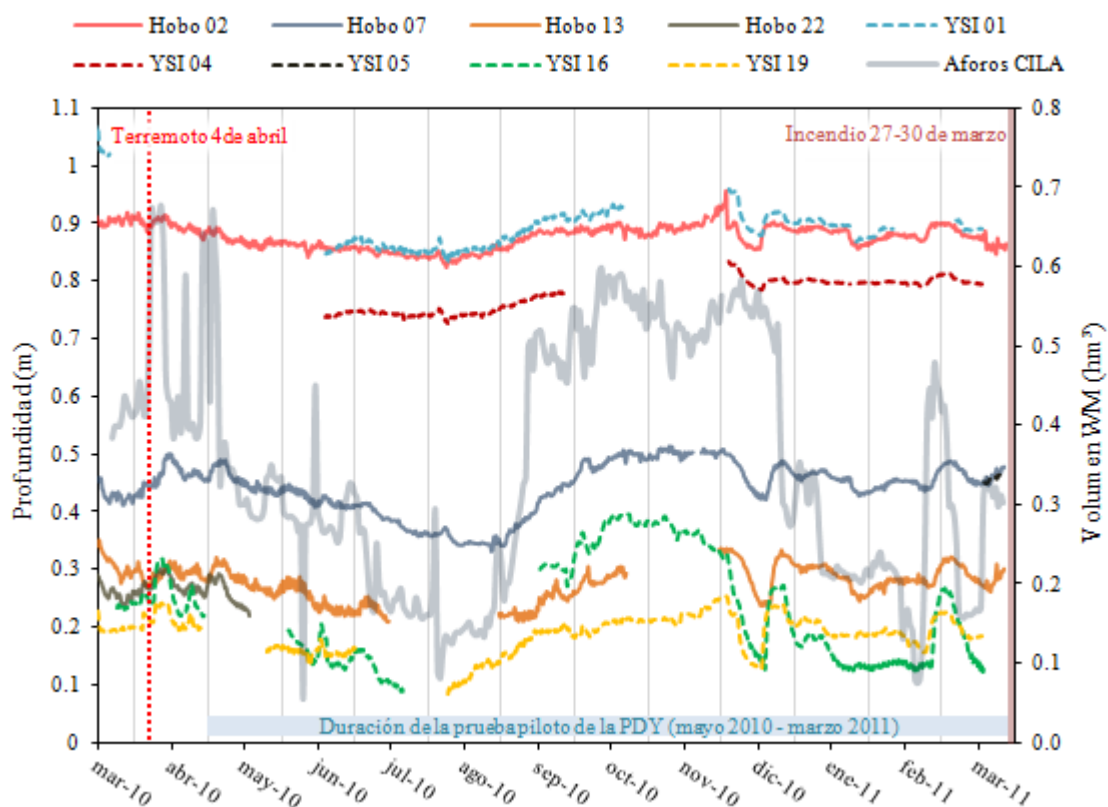


Figura 36. Profundidad del agua en los sitios de muestreo dentro de la CSC. En el eje secundario se incluyó el volumen de entrada del WM medido por la CILA para correlacionarlo con las profundidades.

De ella se puede comentar los siguientes aspectos:

1. La profundidad de agua en cada sitio varió en todo el periodo de monitoreo mostrando comportamientos similares; iniciando con una disminución de profundidad desde los primeros días de mayo hasta mediados de agosto, e incrementando hasta mediados de noviembre del 2010, y otra disminución mas pero de menor magnitud que la anterior en diciembre del mismo años hasta a febrero del 2011. Sin embargo, las variaciones no fueron iguales para todos los sitios. Los sensores que se localizaban en los extremos noreste y este, como son el sitio 7 y el 16, presentaron las variaciones más altas de 0.20-0.25 m, las cuales eran de esperarse ya que las aguas someras están más expuestas a salir por los procesos conjuntos de E y ET.
2. Los equipos situados en el centro del humedal o en la zona más cercana a la falla de Cerro Prieto, no variaron más de 0.15 m. Esta variación tal vez se deba a que los cambios en el almacenamiento no son tan susceptibles a las entradas de agua y salidas de agua a corto plazo, ya que a diferencia de los equipos localizados a la orilla el tirante de agua es mayor al igual que el tiempo de retención. Este último debido a la poca influencia de la E y la ET, además de su ubicación geográfica.
3. El segundo resultado significativo consistió en que la profundidad del agua no es la misma en todos los sitios. Esto se observó en los sitios 16 y 19 donde las aguas someras son de 0.20-0.30 m de tirante y en el sitio 1 alcanza 0.96 m.

Se realizó una segunda gráfica de elevaciones del nivel de agua (Figura 37) y se corroboraron los resultados batimétricos de los niveles de agua anteriores. En esta figura se observa la correlación en el incremento y decremento del volumen del agua enviado a través del canal WM con las variaciones en el nivel de agua en cada sitio.

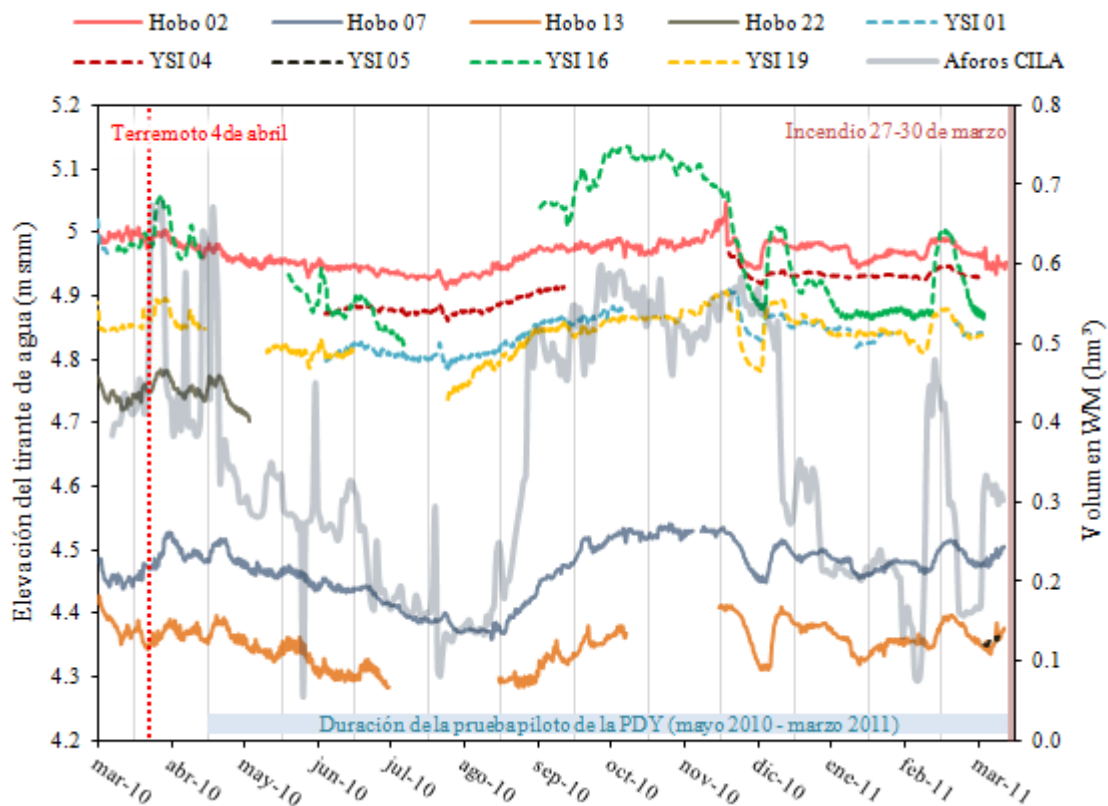


Figura 37. Elevación (msnm) del agua en los sitios de muestreo dentro de la CSC. En el eje secundario se incluyó el volumen de entrada por el WM para observar la correlación que existe entre ellos.

Estos resultados demuestran que la CSC no es solamente una enorme laguna que se comporta como una cuenca, sino que dentro del sistema existen varias lagunas o sub-cuencas donde las variaciones en el nivel del agua son dependientes del volumen que ingresa y a su vez son independientes unas de las otras, con tiempos de respuesta diferentes.

Concentración de STD en el humedal

La conductividad eléctrica registrada por los equipos YSI y la distribución de los mismos dentro de la zona vegetal así como en las orillas del humedal, permitieron estimar de manera uniforme la cantidad de STD en el agua del humedal. Se estimó que durante el año de estudio la concentración media de STD en el agua fue de 3.95 g L^{-1} . Sin embargo, los sitios 10 y 16 localizados en las orillas del humedal, registraron las concentraciones medias mayores de 3.84 a 5.93 g L^{-1} respectivamente. Por otro lado, los sitios 1, 4 y 19 localizados en las lagunas dentro de la zona vegetal se obtuvieron promedios menores que van desde los 3.21 a los 3.60 g L^{-1} .

El mes en el que se obtuvo la mayor concentración fue el de octubre del 2010 donde el sitio 16 promedió 8.11 g L^{-1} . Por otro lado, en noviembre del mismo año se calculó la concentración más baja en el sitio 1 con 2.59 g L^{-1} . Estos resultados son acordes a los analizados en laboratorio por García y colaboradores en el 2010, donde obtuvo las más altas concentraciones (8.16 a 12.10 g L^{-1}) durante los meses de agosto y octubre del 2010. Las altas concentraciones y la variabilidad de los resultados se deben a que la concentración en las aguas localizadas en las orillas del humedal, está en función al flujo de entrada, a los cambios en el área del perímetro mojado y al aumento de la E y la ET. Ya que el agua cuando es sometida a un proceso de evaporación concentra la cantidad de sales. Esto es más evidente cuando el flujo de entrada es menor reduciendo el tirante de agua y aumentando la evaporación. Los medidores de salinidad no obtuvieron registros continuos, sin embargo, el que tuvo menor recopilación de información fue el del sitio 5 con solamente un mes.

Dado el nivel de tolerancia de la vegetación a la concentración de sales, si la concentración de la salinidad en el ingreso es significativamente mayor (7.00 g L^{-1}), o la entrada de agua a los humedales se reduce (aumentando la E y ET), se podría esperar una disminución en la cobertura de la vegetación en el humedal; como consecuencia se reduciría la cantidad de hábitat disponible para la fauna en los humedales y el valor ecológico del ecosistema.

Balance Hídrico

Mitsch y Gosselink (1993) 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 esta investigación parte de la hidrología de la CSC se determinó a través del balance hídrico mensual. Las variables calculadas utilizando esta metodología fueron los volúmenes de agua superficiales de salida, mismos que incluyeron también los volúmenes subterráneos debido a que no fue posible medirlos en campo.

Las variables calculadas utilizadas en el balance hídrico y los resultados de flujo superficial de salida obtenidos se muestran en la tabla 12. La sumatoria mensual se ubica en la parte inferior de la misma. Los valores máximos y mínimos, así como promedios calculados y fechas específicas fueron presentados anteriormente.

Tabla 12. Resultados finales y datos utilizados para la realización del balance hídrico.

Mes	Volumen de entrada (hm ³)			Volumen de salida (hm ³)		dV/dt	Q_{SM}
	WM	DR	P	E	ET		
mar-10	3.26	0.14	-	0.16	1.67	-	-
abr-10	14.32	0.54	0.16	0.68	6.46	-0.02	7.90
may-10	11.49	1.41	-	0.83	8.31	-1.27	5.04
jun-10	8.42	0.30	-	0.83	7.88	-2.07	2.08
jul-10	6.02	0.29	-	0.66	9.06	-2.21	-1.18
ago-10	4.76	0.29	0.02	0.54	7.41	-1.78	-1.09
sep-10	12.75	0.22	0.01	0.58	6.07	5.21	1.11
oct-10	17.02	0.12	0.38	0.48	4.96	3.53	8.54
nov-10	14.58	0.20	0.01	0.38	3.74	0.80	9.87
dic-10	14.56	0.15	0.16	0.25	2.48	-2.70	14.84
ene-11	7.28	0.24	0.02	0.36	3.84	-1.22	4.55
feb-11	7.13	0.43	0.16	0.37	3.86	0.05	3.44
mar-11	5.55	1.16	-	0.39	4.16	-0.35	2.51
Total	127.20	5.58	0.94	6.59	69.95		59.93

Los resultados obtenidos muestran que en relación a las entradas al sistema, el canal WM es el principal afluente del humedal a diferencia del DR y la P. Ya que por su parte se observó que las principales aportaciones del DR fueron en mayo (1.41 hm³); fechas en que es regada la mayor superficie de cultivos agrícolas. Por otro lado, la P no aportó considerables volúmenes de agua ya que la ubicación geográfica en la que se encuentra el humedal presentó solamente lluvias convectivas (Tabla 12).

Con base en el balance de agua y a los cálculos de área mensual, se observó que el cambio en las dimensiones de la CSC se relacionó a dos principales variables, (1) El volumen de agua que ingresó y al que se evaporó; (2) la vegetación y su ET estacional. Esto se observa en la figura 38, ya que el área del humedal durante los meses de junio hasta agosto del 2010 tuvo un decremento similar al agua que ingresó a la CSC. Cabe mencionar que durante estos meses los procesos de E y ET contribuyeron de gran manera a la reducción del agua en el humedal, y en consecuencia, pérdidas de vegetación en zonas

donde la profundidad del agua era somera. También, se observa que las salidas por flujo superficial son las más bajas a diferencia del resto del año debido a la reducción del volumen de entrada y a la alta ET.

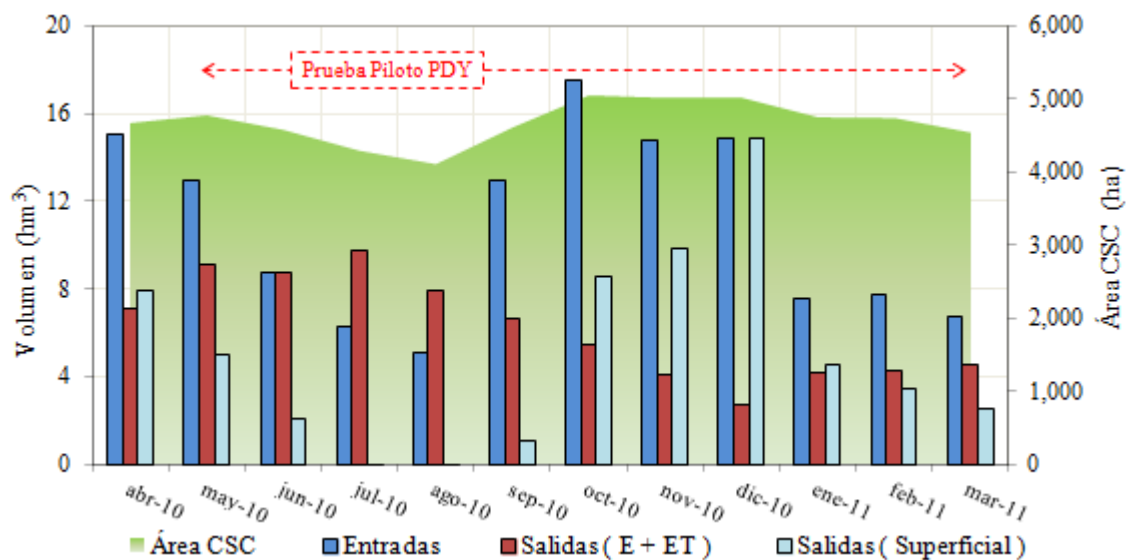


Figura 38. Relación de entradas y salidas de agua, reflejadas en el área del humedal.

En septiembre y octubre, nuevamente incrementó el volumen por el WM así como el área del humedal. Sin embargo para noviembre el volumen de entrada se redujo y se mantuvo similar hasta diciembre ($\approx 14.56 \text{ hm}^3$). No obstante durante este periodo las salidas por flujo superficial-subterráneo aumentaron, ya que las salidas por E y ET no tuvieron tanto impacto debido a la temporada de invierno. Por otro lado, para enero del 2011 se observó nuevamente una reducción en el volumen de entrada y en el área de la CSC, y se mantuvo así hasta febrero del 2011; en marzo volvió a reducirse el volumen y el área del humedal (Figura 38).

Balance de Masa

Se estimó mediante el balance de masa que la concentración de STD con la que el volumen de agua superficial salió varió desde los 3.16 g L^{-1} para diciembre del 2010 hasta los 19.17 g L^{-1} en junio del mismo año (Tabla 13). En promedio la concentración de salida fue de 7.81 g L^{-1} . En los meses de junio y septiembre del 2010 las concentraciones de salida fueron las más altas y se le atribuye a la reducción del volumen de entrada debido a la prueba piloto y a la ET que en promedio expulso el 90% del agua que ingreso al humedal.

Julio y agosto del mismo año no son considerados ya que durante estos meses el agua que fue expulsada por E y ET de la CSC fue > 100% del volumen que ingresó por el WM.

Tabla 13. Resultados finales y datos utilizados para la realización del balance de masa.

Mes	STD de entrada (10 ³ ton)			STD Ciénega			STD Salida		
	WM	DR	Total	STD (g L ⁻¹)	dV/dt (hm ³)	STD (10 ³ ton)	Q^{SM} (hm ³)	STD (10 ³ ton)	STD (g L ⁻¹)
mar-10	8.57	0.52	9.09	3.40	-	-	-	-	-
abr-10	35.61	2.11	37.73	3.51	-0.02	-0.07	7.90	37.80	4.78
may-10	34.20	5.88	40.09	3.47	-1.27	-4.43	5.04	44.53	8.83
jun-10	29.43	1.31	30.74	4.48	-2.07	-9.30	2.08	40.04	19.17
jul-10	19.75	1.20	20.96	5.06	-2.21	-11.22	-1.18	32.18	-27.07
ago-10	16.93	1.11	18.04	4.09	-1.78	-7.27	-1.09	25.32	-23.08
sep-10	35.04	0.91	35.96	4.52	5.21	23.55	1.11	12.41	11.10
oct-10	45.98	0.51	46.50	4.38	3.53	15.50	8.54	30.99	3.63
nov-10	40.30	0.81	41.12	3.37	0.80	2.70	9.87	38.42	3.89
dic-10	36.82	0.62	37.45	3.50	-2.70	-9.46	14.84	46.91	3.16
ene-11	24.60	0.96	25.56	3.93	-1.22	-4.80	4.55	30.36	6.66
feb-11	20.63	1.75	22.38	3.95	0.05	0.22	3.44	22.16	6.44
mar-11	20.22	4.66	24.88	3.72	-0.35	-1.30	2.51	26.19	10.42
Total	368.13	22.43	390.56				59.93	387.36	Avg. 7.80

Los resultados obtenidos en este balance presentan similitudes y discrepancias al realizado por Glenn y colaboradores en el 2012, ya que por ejemplo, en ambos estudios los volúmenes de salida por flujo superficial fueron negativos en agosto del 2010 debido a las altas tasas de ET. Sin embargo, en este estudio se estimó que lo mismo ocurrió en julio del mismo año, más no en el de Glenn y colaboradores. Por otro lado, la concentración promedio de STD en el volumen de entrada por el WM fue similar en ambos estudios ya que en el de ellos, el cual comprendió los años 2009-2011 calcularon que fue de 2.59 g L⁻¹ mientras que en este estudio se estimó que fue de 3.03 g L⁻¹. También, mencionan que las pérdidas por ET equivalieron aproximadamente al 54% del volumen de agua que ingresó, un resultado que es 2% mayor al calculado mensualmente en este análisis. No hay que olvidar que ambas metodologías son totalmente distintas y además, en este trabajo, el balance se realizó mensualmente con datos de una estación meteorológica instalada en el sitio no con una localizada fuera del área de estudio. Sin embargo, quedó de manifiesto que el cálculo de la ET en ambas metodologías presentó incertidumbres que no fue posible reducir ya que este cálculo abarca variables, tanto físicas relacionadas con el clima, como fisiológicas de las plantas y en este caso la reducción del flujo por la prueba de la PDY.

Conclusiones

1. *El balance hídrico mensual asociado al balance de masa obtenido durante la prueba piloto de la PDY, en la que se presentaron enormes variaciones en el caudal del WM, permitió determinar 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 zona inundada y la vegetación, así como las variaciones en la profundidad de las lagunas y el volumen de agua total almacenado. Lo anterior permitió conocer el régimen hidrológico de la CSC aportando elementos para el estudio y conservación de su ecosistema.*
2. *El WM es la principal fuente de abastecimiento de la CSC ingresando el 95% del volumen total de agua al humedal. Por su parte, el Dren Riíto ingresa el 4% y es considerado en conjunto con la precipitación (1%) como un afluente de poca aportación. Las mediciones mensuales de caudal del WM realizadas en este estudio presentaron diferencias con las reportadas por la CILA, que en general no fueron significativas. Sin embargo, la periodicidad diaria de las mediciones de CILA motivó el uso de éstas en el balance hídrico.*
3. *Mediciones directas de la profundidad del nivel de agua de forma mensual durante un año hidrológico permitieron determinar que existe una relación directa entre la disminución del caudal en el WM de $7.81 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hasta $0.62 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y la reducción en el volumen de los cuerpos de agua debido a la prueba piloto de la Planta Desalinizadora de Yuma Arizona. Así como en la extensión de la zona inundada (488 a 371 ha) y la cobertura vegetal (4,570 a 3,733 ha).*
4. *El levantamiento topobatimétrico realizado en este trabajo permitió establecer con claridad que el funcionamiento hidrológico de CSC no corresponde al de una laguna, sino de varias lagunas con diferentes profundidades que se localizan a distintas elevaciones. Además, este levantamiento en conjunto con los datos de elevación de espejo de agua permitieron elaborar un modelo digital de elevación topográfico y del agua, para estimar los cambios en el volumen almacenado de agua utilizados en el balance de agua. Se identificaron dos barreras que delimitan el humedal CSC de*

noroeste-suroeste; una en el flanco oeste que impide el desbordamiento del agua hacia las zonas bajas del Delta y la entrada del agua de mar, y otra, en el flanco este colindante con el Desierto Sonora, con una elevación mayor evitando el crecimiento de plantas hidrófilas.

5. *Las variaciones en los niveles del agua dentro de la CSC (4.28 a 5.13 msnm) son dependientes del volumen de agua que ingresa (5.08 a 17.53 hm³) y afectaron con mayor intensidad a las zonas con aguas someras en los bordes del humedal. Sin embargo, la intensidad y tiempo de respuesta de cada laguna es distinto, observándose que la zona alineada con la falla Cerro Prieto en el interior del humedal es la más estable de todas presentando variaciones del tirante de agua de 4.91 a 5.04 msnm.*
6. *En base a los resultados del balance hídrico, el 52% del volumen total de agua que ingresó al humedal en el año salió a través de la ET, y por ello, este proceso se considera como el principal efluente de la CSC. La suma de este proceso en conjunto con la E, son la principal salida de agua durante los meses de verano y en condiciones de reducción flujo hacia la CSC debido a la utilización de la PDY. De ellas, la ET es la que extrae el 52% del volumen de entrada anual debido a que se lleva a cabo en el 90% de la superficie de la CSC que se compone de vegetación. Sin embargo, de no llevarse a cabo una reducción en el volumen de entrada la principal salida de agua sería a través del flujo superficial, ya que a pesar de haberse llevado a cabo la prueba piloto, este proceso extrajo el 45% del volumen de agua que ingreso en el año. Los flujos de entrada subterráneos no fueron considerados y los subterráneos de salida se consideran en conjunto con los flujos superficiales.*
7. *Las reducciones en el caudal de entrada por la prueba piloto de la PDY redujeron la extensión del humedal y profundidad de las lagunas. No obstante, los flujos adicionales de los Gobiernos de los Estados Unidos de Norteamérica y de México y las Organizaciones de la Sociedad Civil vertidos en el humedal redujeron los efectos. El balance obtenido durante este año hidrológico mostró que la CSC está en equilibrio y que cualquier reducción en el volumen de agua de entrada o aumento en la salinidad de la misma cambiaría la extensión del humedal, la profundidad de las*

lagunas y con ello sus relaciones hidráulicas, así como la salida al mar: Este desequilibrio impactaría la extensión y composición de la cobertura vegetal modificando el hábitat que actualmente alberga diversas especies de aves y peces, algunas de ellas consideradas en peligro de extinción.

8. *Por el análisis de imágenes satelitales se establecieron diferentes extensiones de la zona inundada y de la cobertura vegetal que fueron asociados a la reducción del flujo de entrada y al aumento de la concentración de STD en el agua. Como era de esperar esta reducción en la superficie inundada y de cobertura vegetal se identificó en las zonas donde el relieve terrestre es más alto o en las zonas de aguas someras, en donde además, la vegetación está más expuesta a los incrementos en la salinidad en el agua por el aumento de la tasa de E y ET. Estas variaciones en la superficie también modificaron el área de lagunas abiertas que compone a la CSC con el consiguiente impacto en la E y el balance hídrico.*
9. *La estimación de la E y ET en el CSC resultó ser la componente del balance con mayor incertidumbre por su dependencia con variables climáticas locales, fitofenológicas de las especies vegetales dominantes e hidrológicas del humedal. Su importancia relativa, principalmente en los meses de verano, impacta negativamente en la precisión del balance. Por lo anterior, se propone la medición tanto de los caudales de salida superficiales como los de entrada subterráneos para considerar; tanto la E como la ET incógnitas en la ecuación de balance.*
10. *El uso conjunto de herramientas de percepción remota y mediciones in situ resultaron ser de mucha utilidad para definir el balance hidrodinámico de la CSC, ya que; por un lado, se corroboraron los rasgos observados en las imágenes con visitas de campo, y por otro, los datos in situ de las principales variables hidrológicas del humedal fueron complementados con los rasgos en las imágenes.*
11. *Las variaciones del nivel del suelo registradas en algunos sitios cercanos a la CSC, los volcanes de lodo y el movimiento sísmico mismo provocados por el terremoto “El Mayor-Cucapah” del 4 de Abril, 2010 no modificaron la hidrodinámica del humedal, según los datos obtenidos, por lo que no fue considerado en el análisis del balance.*

Anexos

1. Puente sobre el canal WM donde se efectuaron los aforos con el *FT*.



2. Alcantarilla del Dren Riíto donde se realizaron los aforos con el *FT*.



- ## Hoja #1

Date Generated: Thu May 17 2012

Rows in italics indicate a QC warning. See the Quality Control page of this report for more information.

Discharge Measurement Summary

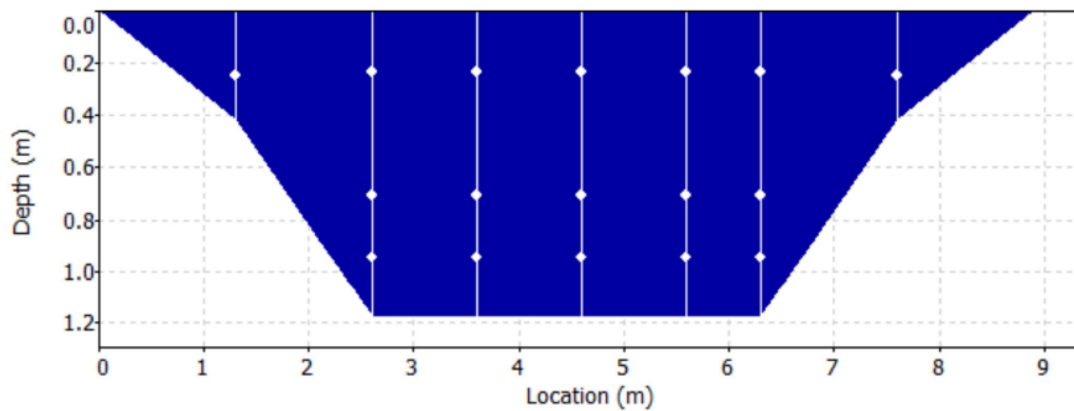
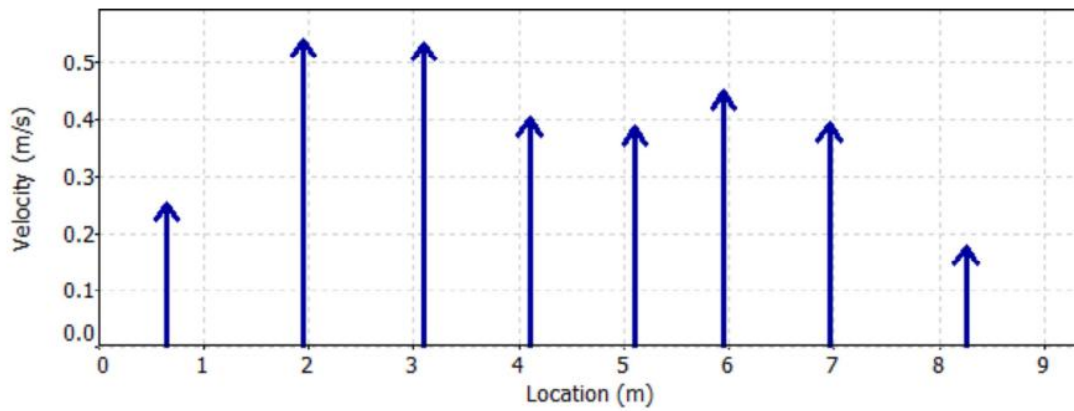
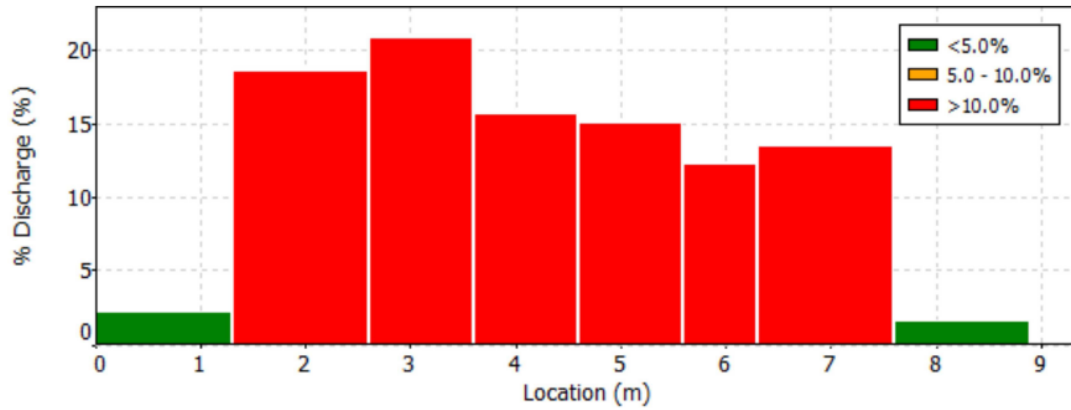
Date Generated: Thu May 17 2012

File Information

File Name WELTON19.003.WAD
Start Date and Time 2010/06/19 11:03:33

Site Details

Site Name WELTON19
Operator(s) INGMLLOMELI



4. Imagen del incendio ocurrido en la CSC durante el mes de marzo del 2011. Tomada de, <http://www.geo.arizona.edu/cienega/>.



Citas y referencias

- Abarca, F. J., Ingraldi, M. F., y Varela-Romero, A. 1993. 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 & Fish Department. Phoenix, AZ.
- Abtew, W. y Hardee, J. 1993. Design of a lysimeter for a wetland environment: Evapotranspiration of cattails (*Typha domingensis*). ASAE. Artículo No. 93-2516. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Adams, R. S., Black, T. A., y Fleming, R. L. 1991. Evapotranspiration and Surface Conductance in a High Elevation, Grass-Covered Forest Clearcut. *Agricultural and Forest Meteorology*. 56:173-193.
- Allen, R. G., Prueger, J. H. y Hill, R. W. 1992. Evapotranspiration from isolated stands of hydrophytes: Cattail and bulrush. *Acta del ASAE* 35(4):1191-1198.
- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L. y Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy J.* 81:650-662.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO riego y drenaje No.56.
- Allen, R. G., Pruger, J. H. y Hill, R. W. 1992. Evapotranspiration from Isolated stands of Hydrophytes Cattail and Bulrush. *Acta del ASAE*. 35 (04) 1191-1198.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliot, R., Howell, T., Itenfisu, D., Jensen, M. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. American Society of Civil Engineers
- All, J. D. y Yool, S. R. 2004. Indexing Endangered Species Risk in the Colorado River Delta, Mexico. Using AVHRR NDVI Time Series Data. *Geocarto Internacional*. 19(4), 5-13.
- All, J. D. 2006. Colorado river floods, droughts, and shrimp fishing in the upper gulf of California, Mexico. *Environmental management*. 37(1), 111-125.
- Antuna-Ibarra, I. 2005. Desarrollo Hidrogeológico e Hidrogeoquímico del Acuífero de la Misión, Baja California. CICESE, Ensenada B.C. Tesis de maestría en ciencias. 100 p.
- Armstrong, W., Armstrong, J. y Beckett, P. M. 1991. Convective gasflows in wetland plant aeration. In *Plant Life Under Oxygen Deprivation*. Eds M B Jackson, D D Davies and H Lambers. pp 283-302. SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands.
- Baeza, S. Domingo. y Diego García de Jalón. 1999. Cálculo de caudales de mantenimiento en Ríos de la cuenca de Tajo a partir de variables climáticas y de sus cuencas. *Limnetica* 16: 69-84. Asociación Española de Limnología. Madrid, España. ISSN: 0213-8409, 1999.
- Banco Mundial. 1986. "Wildlands: Their Protection and Management in Economic Development". Nota Política Operacional. 11.02. Banco Mundial, Washington, D.C.
- Bray, J. 1962. Estimates of Energy Budgets for a *Typha* (Cattail) Marsh. Department of Botany, University of Toronto, Toronto 5, Ontario. *Science* Vol. 136 no. 3522: pp 1119-1120.
- Brezny, O., Mehta, I., y Shirama, R. K. 1973. Studies on transpiration of some aquatic weeds. *Weed Sci.* 21 (May): 197-204.
- Brunt, D. 1932. Notes on radiation in the atmosphere: I. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 58:389-420.
- Brunt, D. 1952. *Physical and Dynamical Meteorology*, 2nd ed. Uni. Press, Cambridge. 428 p.

- Burnett, E., Kandl, E. y Croxen, F. 1993. Ciénega de Santa Clara Geologic and Hydrologic Comments. U.S. Bureau of Reclamation. Yuma Office, AZ.
- Camarillo-Pulido, M., Guzmán- Ruiz, S. D., Martínez-Barrera, A. y López-Lugo, F. 2008. Guía para producir Trigo con Labranza Mínima, Cero y de Conservación en el valle de Mexicali, B.C. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable OEIDRUS. 19 pp.
- Campbell, G. S. y Tanner, B. D. 1985. A Krypton Hygrometer for Measurement of Atmospheric Water Vapor Concentration. In: Moisture and Humidity '85. Instrument Society of America, Research Triangle Park, North Carolina. pp. 609-614.
- Carrillo-Guerrero, Y. 2009. Water Conservation, Wetland Restoration and Agriculture in The Colorado River Delta, Mexico. Tesis doctoral.
- Chaubey, I. y Ward, G. M. 2006. Hydrologic Budget Analysis of a Small Natural Wetland in Southeast USA. 8 (1), 10-21.
- Cisneros-Mata, M., Montemayor-López, G. y Roman-Rodriguez, M. 1995. Life history and conservation of *Totoaba macdonaldi*. Conservation Biology. 9:806-814.
- Cohen, M. J. y Henges-Jeck, C. 2006. El agua perdida. Usos y flujos en la región del delta del Río Colorado.
- Cohen, M., Henges-Jeck, C., Castillo-Moreno, G. 2001. A preliminary water balance for the Colorado River delta, 1992-1998. Journal of Arid Environments (2001) 49:35-48.
- Cohen, M. 2006. The Delta's Perennial Drought: Instream Flows for an Over-Allocated River.
- Cohn, J. P. 2004. Colorado River Delta. Bio Science Vol. 54 No. 5. pp. 386-391.
- Coleman, J. 1981. Deltas: Processes of deposition and models for exploration. 2da Ed. Burgess Publishing Company. Minneapolis. MN. 124 pp.
- Comisión Internacional de Límites y Aguas Entre México y Los Estados Unidos. 2010. Acta Número 316. 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 Desalinizadora de Yuma. Yuma, Arizona. 16 de Abril de 2010.
- Comisión Internacional de Límites y Aguas Entre México y Los Estados Unidos. 1973. Acta Número 242. Solución Permanente y Definitiva del Problema Internacional de la Salinidad del Río Colorado. México, D.F. 30 de agosto de 1973.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. 1991. Efectos del revestimiento del "Canal Todo Americano" sobre territorio Mexicano. Subdirección General de administración del Agua. Gerencia de aguas Subterráneas. México.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA. 2007. Programa Nacional Hídrico 2007-2012. www.conagua.gob.mx
- Crisp, P. 1986. Coastal Wetlands. Wellington, Nueva Zelandia: Nature Conservation.
- Custodio, E., Llamas, R. 1983. Hidrología Subterránea 2 ed., Omega. Tomo 1. p 319.
- Dagg, M. y Blackie, J. R. 1970. Estimates of evaporation in East Africa in relation to climatological classification. Geogr. J. 136:227-234.
- Davis Instruments. 2011. Wireless Vantage Pro2™ & Vantage Pro2™ Plus Stations (manual). http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6152_62_53_63_SS.pdf

- Diario Oficial. 1993. Decreto por el que se declara área natural protegida con el carácter de Reserva de la Biosfera, la región conocida como Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado, ubicada en aguas del Golfo de California y los municipios de Mexicali, B.C. del Puerto Peñasco y San Luis Río Colorado, Sonora. Páginas 24-28 del Diario Oficial de la Federación. Jueves 10 de junio de 1993. Cd. de México.
- Drijver, C. A. y Marchand, M. 1985. Taming the Floods: Environmental Aspects of Floodplain Development in Africa. Leiden, Países Bajos. Centro de Estudios ambientales.
- Dugan, P. J. 1990. Wetland Conservation, A Review of Current Issues and Required Action. Gland, Suiza: IUCN.
- Dunne, T. y Leopold, L. B. 1978. Water in Environmental Planning. W.H. Freeman and Co. New York. 818 pp.
- Eddleman, W. R. 1989. Biology of the Yuma Clapper Rail in the Southwestern; S. and Northwestern México. U.S. Bureau of Reclamation and U.S. Fish and Wildlife Service Region 2, Yuma, AZ.
- ETAS, Encyclopedia of Technology and Applied Sciences (en línea). 1991. Australian Documentation Service. <http://www.ads.org>.
- Ezcurra, E., Felger, R. S., Russell, A. D. y Equihua, M. 1988. Freshwater islands in a desert sand sea: the hydrology, flora, and phytogeography of the Gran Desierto oases of Northwestern Mexico. *Desert Plants*, 9 (2): 35-44, 55-63.
- Furnish, D. B. y Ladman, J. R. 1975. The Colorado River Salinity Agreement of 1973 and the Mexicali Valley. *Natural Resources Journal*. 15:83-107.
- Flessa, K. 2010. Video Entrevista: "Hablando Sobre la Ciénega de Santa Clara". CAP Channel Interviews. Ver en www.cap-az.com.
- García-Hernández, J., Glenn, E. P., Artiola, J. y Baumgartner, D. J. 2000. Bioaccumulation of selenium (Se) in the Ciénega de Santa Clara wetland, Sonora, Mexico. *Ecotoxicology and environmental safety*. 46(3), 298-304. doi:10.1006/eesa.1999.1908
- García-Hernández, J., Hinojosa-Huerta, O., Gerhart, V., Carrillo-Guerrero, Y., y Glenn, E. P. 2001a. Willow flycatcher (*Empidonax traillii*) surveys in the Colorado River Delta: implications for management. *Journal of Arid Environments*. 49:161-169
- García-Hernández, J., King, K., Velasco, A., Shumilin, E., Mora, M. y Glenn, E. 2001b. Selenium, selected inorganic elements, and organochlorine pesticides in bottom material and biota from the Colorado River delta. *Journal of Arid Environments*. 49:65-90.
- Garrat, J. R. y Hicks, B. B. 1973. Momentum, heat and water vapour transfer to and from natural and artificial surfaces. *Quart. J. R. Met. Soc.* 99:680-687.
- Gehrels, J. y Mulamootil, G. 1990. Hydrologic Processes in a Southern Ontario Wetland. *Hidrobiología*. 208: 221-234.
- Glenn, E. P., Felger, R., Burquez, A. y Turner, D. S. 1992. Ciénega de Santa Clara: Endangered wetland in the Colorado River Delta, Sonora, México. *Natural Resources Journal*. 32:817-824.
- Glenn, E. P., Thompson, T. L., Frye, R., Riley, J. y Baumgartner, D. 1995. Effects of salinity on growth and evapotranspiration of *Typha domingensis* Pers. *Aqua. Bot.* 52, 75-91.
- Glenn, E. P., Lee, C., Felger, R. y Zengel, S. 1996. Effects of Water Management on the Wetlands of the Colorado River Delta, México. *Conservation Biology*, 10(4). Aug. 1175-1186.

- Glenn, E. P., García-Hernández, J., Congdon, C., y Luecke, D. 1999. Status of wetlands supported by agricultural drainage water in the Colorado River delta, Mexico. *Horticultural Science*. 34:16-21.
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P., Briggs, M., Shaw, W. y Flessa, K. 2001. Ecology and conservation biology of the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*. 49:5-15.
- Glenn, E. P., Nagler, P. L., Brusca, R. C. y Hinojosa-Huerta, O. 2006. Coastal wetlands of the northern Gulf of California: inventory and conservation status. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 16(1), 5-28. doi:10.1002/aqc.681
- Glenn, E. P. 2007. Just add Water and the Colorado River still reaches the sea. En *Environ Manage*. 40:1-6. Tucson, AZ.
- Glenn, E. P., Mexicano, L., García-Hernández, J., Nagler, P., Gómez-Sapiens, M., Tang, D., Lomeli, M., Ramírez-Hernández, J., Zamora-Arroyo, F. 2012. Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities. *Ecological Engineering* (2012).
- Harvey, J. W., Germann, P. F. y Odum, W. E. 1987. Geomorphological control of subsurface hydrology in the creekbank zone of tidal marshes, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 25, 677-691.
- Healy, R. y Cook, P. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hidrogeology Journal*. 91-109.
- Heimberg, K. F., Allen, L. H. y Huber, W. C. 1982. Evapotranspiration estimates based on surface temperature and net radiation: Development of remote sensing methods. Pub. No. 66. Florida Water Resources Research Center. Univ. of Florida.
- Hinojosa-Huerta, O., DeStefano S., Shaw W., 2001. Distribution and abundance of the Yuma clapper rail (*Rallus longirostris yumanesis*) in the Colorado River delta, México. *Journal of Arid Environments* (2001) 49:171-182.
- Hinojosa-Huerta, O. 2004. Waterbird Communities and Associated Wetlands of the Colorado River Delta, México. *Estudios en biología aviar*.
- Hinojosa-Huerta, O., Iturribarria-Rojas, H., Calvo-Fonseca, A., Butrón-Méndez, J. y Butron-Rodríguez, J. J. 2004. Caracterización de la Avifauna de los Humedales de la Mesa de Andrade, Baja California, México. S.L.R.C.: Pronatura Noroeste-Dirección de Conservación Sonora. 44 pp.
- Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P., Carrillo-Guerrero, Y., Zamora-Hernández, E., García-Hernández, J. y Zamora-Arroyo, F. 2002. Andrade Mesa Wetlands of the All American Canal. *Natural Resources Journal*. 899-914.
- Huckelbridge, K. H., Stacey, M. T., Glenn, E. P. y Dracup, J. A. 2010. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland, *Ecological Engineering*.
- Hundley, N. Jr. 1966. *The Divided Waters, a Century of Controversy between México and the USA*. University of California. Los Angeles, California.
- Hundley, N. Jr. 1986. The West Against Itself: The Colorado River- An Institutional History, in *New Courses of the Colorado River: Major Issues For the Next Century* 9, 39. Gary Weatherford Y F. Brown Eds.
- Idso, S. B. 1981. Relative rates of evaporative water losses from open and vegetation covered water bodies. *Water Resources Bulletin*. 17(1):6-48.
- Ingram, H. y White, D. R. 1993. International Boundary and Water Commission: An Institutional Mismatch for Resolving Transboundary Water Problems. *Natural Resources Journal*. 33:153-189.

- ISO 9196. 1992. Liquid flow measurement in open channels: Flow measurements under ice conditions.
- ISO 748. 2007. Hydrometry: Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or flots.
- Jensen, M. E. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science*. pp. 233-245.
- Koch, M. S., Rawlik, P. S. 1993. Transpiration and stomatal conductance of two wetland macrophytes (*Cladium jamaicense*) and (*Typha domingensis*) in the subtropical everglades. *American Journal of Botany* 80:1146-1154.
- Ledec, G. y Goodland, R. 1988. *Wildlands: Their Protection and Management in Economic Development*. Washington, D.C. Banco Mundial.
- Luecke, D. F., Pitt, J., Congdon, C., Glenn, E., Valdés-Casillas, C. y Briggs, M. 1999. *A Delta Once More: Restoring Riparian and Wetland Habitat in the Colorado River Delta*. Washington, D.C. Environmental Defense Publications. pp 51.
- Lugo, A. E. 1989. *Forested Wetlands Nueva York*: Elsevier Scientific Publications.
- Mellink, E., Palacios, E., González, S. 1996. Notes on nesting birds of the Ciénega de Santa Clara saltflat, northwestern Sonora, México. *Western Birds*, 27:202-203.
- Mellink, E., Palacios, E., González, S. 1997. Non-breeding waterbirds of the delta of the Río Colorado, México. *Journal of Field Ornithology*, 68:113-123.
- Mexicano, L., Nagler, P., Zamora-Arroyo, F., Glenn, E. P. 2012. Vegetation dynamics in response to water inflow rates and fire in a brackish *Typha domingensis* Pers. marsh in the delta of the Colorado River, México. *Ecological Engineering* (2012).
- Mitsch, W. J. y Gosselink, J. G. 1993. *Wetlands*. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Monteith, J. L. 1965. Evaporation and Environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms*. G. E. Fogg (Editor). Symposium of the Society for Experimental Biology, Academic Press. San Diego, California. 19:205-234.
- Morales-Abril, G. 1994. Reserva de la Biósfera Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado. *Ecológica*. 3(2):26-27.
- Nuttle, W. K. y Harvey, J. W. 1995. Fluxes of water and solute in a coastal wetland sediment. The contribution of regional groundwater discharge. *Journal of Hydrology*. 164, 89-107.
- Pelton, W. L., King, K. M. y Tanner, C. B. 1960. An evaluation of the Thornthwaite method for determining potential evapotranspiration. *Agron. J.* 52:387-395.
- Peregrina, M. 2010. Caracterización Hidrogeológica del Flujo Subterráneo Hacia Humedales en la Mesa Arenosa de Andrade, Mexicali B .C. Tesis de maestría en ciencias.
- Ramírez-Hernández, J. 2010. En Ciénega de Santa Clara, Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Baja California, Reporte Interno.
- Ramsar. 1971. Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas.
- Ramsar. 2006. *The Ramsar Manual* 4th edition, 114 páginas.
- Rojas, C., Nelson, Z. 1994. Determinación de la evapotranspiración de *Pinus radiata* D. Don en vivero, mediante lisímetro de drenaje. Memoria para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Departamento de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillán, Chile.

- Rykiel, Jr. E. J. 1977. The Okefenokee watershed: water balance and nutrient budgets. Ph.D. Dissertation, University of Georgia, Athens. 246 pp.
- Scodari, P. F. 1990. Wetlands Protection: The Role of Economics. Washington, D.C.: Environmental Law Institute.
- Sitio Web: 2010. Geotech Environmental Equipment. En:
http://www.geotechenv.com/sontek_doppler_measurement.html
- Sonoran Institute, Aehuric y Pronatura. 2009. Reporte Final "Humedal Las Arenitas".
- SonTek. 2009. FlowTracker® Handheld ADV® Technical Manual.
- Stockton, C. W., y Jacoby, G. C. 1976. Long-term surfacewater supply and streamflow trends in the Upper Colorado River Basin based on tree ring analyses. Lake Powell Research Project Bulletin 18:1-67.
- Sykes, G. 1937. The Colorado Delta. Carnegie Institution of Washington. Publication No. 460. Ungar, I.A. 1974. Inland halophytes of the United States. In: R.J. Reimold and W.H. Queen (Eds.). Ecology of Halophytes. Academic Press, New Cork. 235-306 pp.
- Tanner, C. B. 1960. Energy Balance Approach to Evapotranspiration from Crops. Soil Science Society of America Proceedings. 24:1-9.
- Tetra Tech, Inc. 1999. A Study on Seepage and Subsurface Inflows to Salton Sea and Adjacent Wetlands. San Bernardino, California USBR.
- Topcon. 2006. <http://www.topconpositioning.com/sites/default/files/literature/GR-3Brochure.pdf>
- Townley, L. R. 1995. The response of aquifers to periodic forcing. Advances in Water Resources. 18.
- Tratado de Paz, Amistad, Limites y Arreglo Definitivo Entre la Republica Mexicana y los Estados Unidos de América. 1848. Artículos VI y VII. Guadalupe, Hidalgo. 2 de febrero de 1848.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. Wetland Conservation and Sustainable Development Gland. Suiza.
- U.S. Bureau of Reclamation (USBR). 1984. Colorado River Front Work and Levee System Arizona: Coconino, Mohave, and Yuma Counties, California: Imperial, Riverside, and San Bernardino Counties, Nevada: Clark County. Lower Colorado Region Bureau of Reclamation, Washington, D.C.
- Ven Te Chow, David, R. y Larry, W. Hidrología Aplicada. McGraw Hil. 180-240 pp.
- Zamora-Arroyo, F., Hinojosa-Huerta, O., Glenn, E., y Briggs, M. 2001. Vegetation trends in response to instream flows in the Colorado River Delta, Mexico. Journal of Arid Environments. 49: 49-64 pp. doi:10.1006/jare.2001.0835.
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Glenn, E. P., Nagler, P., Moreno, M., García-Hernández, J., Hinojosa-Huerta, O., De la Garza, M. y Parra, I. 2005. Priorities in the Colorado River Delta. Mexico and the United States.
- Zengel, S., Meretsky, V., Glenn, E. P., Richard, S. F. y Ortiz, D. 1995. Ciénega de Santa Clara, a remnant wetland in the Río Colorado Delta, México. vegetation distribution and the effects of water flow reduction. Elsevier Science B.V.
- Zengel, S. A. y Glenn, E. P. 1996. Presence of the endangered Desert Pupfish (Cyprinodon Macularius, Cyprinodontidae) in Ciénega de Santa Clara, Mexico. following an extensive marsh dry-down. The Southwestern Naturalist. 41: 73-78 pp.
- Zmolek, C., Baker, J. L., Crumpton, W.G. and Kanwar, R.S. 1997. Hydrology of Constructed Wetlands, Paper No. 972036, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, MI.