

**Universidad Autónoma del Estado de Baja California
Instituto de Ingeniería
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería**



“Modelización hidrodinámica del dren agrícola Ayala para evaluarlo como proveedor del servicio ecosistémico de depuración del agua durante el año hidrológico 2016-2017”

**Tesis para obtener el grado de:
Maestría en Ingeniería**

**Presenta:
Ing. Frida Sofía Cital Morales**

**Director de tesis:
Dr. Jorge Ramírez Hernández**

Mexicali, Baja California

18 de Mayo 2018

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Tesis defendida por:

Ing. Frida Sofía Cital Morales

Aprobada por:

Dr. Jorge Ramírez Hernández
Director de tesis

Jurado examinador:

1. Dra. Jaqueline García Hernández

2. Dra. Jesús Eliana Rodríguez Burgueño

3. Dr. Marcelo Antonio Lomeli Banda

4. Dra. María Elizabeth Ramírez Barreto

Mayo 2018

Dedicatoria

Para mis papás por brindarme apoyo incondicional siempre, por su amor, por su paciencia y sobre todo por su tiempo.

Para Moisés Nicolás por su amor, paciencia y apoyo.

Para mi hermano y sobrino, Alexis y Leonardo por ser una fuente de inspiración para superarme.

Para cada una de las personas que contribuyeron a esta investigación.

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional, por cada una de las palabras de fortaleza y esperanza que me brindaron, por demostrarme cuanto me aman y sobre todo por su apoyo y paciencia.

Al Dr. Jorge por su apoyo brindando en la realización de esta investigación, su paciencia y comprensión.

A la Dra. Jaqueline García por su apoyo, su conocimiento y aportaciones a esta investigación.

A Eliana, por compartir parte de su conocimiento conmigo, sus contribuciones, por brindarme palabras de esperanza y apoyo cuando más las necesitaba, por su paciencia y su amistad.

A Walter Ávila, por sus grandes contribuciones a este trabajo, su compañía durante las salidas a campo, por su amistad y su apoyo.

Al laboratorio de Ciencias Ambientales del CIAD, particularmente a Germán Leyva y a Daniela Aguilera, por sus contribuciones a esta investigación, su apoyo en el trabajo de campo y por el análisis de las muestras de agua.

A mis compañeros del laboratorio de Ciencias de la Tierra, Héctor, Uriel, David, Ernesto, Juan, por sus contribuciones, por su amistad, y por hacer mi estadía en el laboratorio divertida y menos cansada.

A CONACYT por brindarme recursos financieros para esta investigación, mediante el proyecto CONACYT-University of Arizona No. CRSP-26155 y por la beca No. 763422.

Resumen

Los drenes agrícolas son un instrumento utilizado por la agricultura para remover los excedentes de riegos por debajo del nivel radicular de los cultivos, así como para el control y la mitigación del fenómeno de la salinidad. Otra de las funciones que se les dan a los drenes, particularmente en el valle de Mexicali, es la recepción y el transporte de aguas residuales tratadas y no tratadas. En lugares como Estados Unidos, Europa y China los drenes agrícolas han sido analizados como proveedores de servicios ecosistémicos, y se ha demostrado que efectivamente contribuyen a la preservación de altos niveles de flora y fauna, además suministran y regulan flujos de agua y aumentan la capacidad de recuperación del ecosistema. Por esta razón es importante el análisis de la hidrodinámica de los drenes y la provisión de los servicios ecosistémicos de los mismos.

Al Sur del valle de Mexicali, se localiza el dren agrícola Plan de Ayala del cual se seleccionó un tramo de 6 km de longitud para ser estudiados durante un año hidrológico. En dicha área se midieron flujos y parámetros fisicoquímicos del agua y además se adquirieron muestras de agua para analizar las concentraciones de nutrientes disueltos.

Como parte de esta investigación se identificaron y se analizaron los servicios ecosistémicos que el dren Plan de Ayala brinda. Los servicios ecosistémicos identificados fueron la provisión de agua, provisión de hábitat y retención de nutrientes. La provisión de hábitat fue analizada mediante un conteo de aves que se realizó en base a la metodología de Búsqueda Intensiva, este análisis determinó que el dren provee hábitat y refugio a 29 especies de aves de las cuales 62% son residentes y 38% migratorias. La depuración del agua fue analizada con la retención de nutrientes, en la cual se estimó un porcentaje promedio de retención entre 0.02 y 55.66% estos porcentajes dependen del estado vegetativo de las plantas acuáticas, a las características fisicoquímicas del agua así como a la carga de nutrientes.

La modelización hidrodinámica del dren Plan de Ayala se realizó en un tramo de 600 metros, se utilizó el código HEC-RAS para dos dimensiones, para este procedimiento se utilizó una interfaz GeoHecRas para la realización de la malla del modelo. El modelo fue calibrado con los valores de rugosidad y se validó comparando los resultados observados y simulados, dichas comparaciones fueron de hasta 9 cm de tirante de agua. Las principales diferencias se presentaron en los meses en los que el caudal disminuye, sin embargo, los valores de tirante de agua y velocidad máximos y mínimos coinciden con las fechas de máximo y mínimo caudal medidos en el sitio Ayala #3.

Abstract

The main functions of agriculture drains are maintain groundwater levels below radicular zone of crops by removing irrigation water from the soil column, in addition of washing salts from soils. In Mexicali valley ag drains also are used as conducts for disposing treated and non-treated urban wastewater. Lately, Ag drains in all around the world have been considered as ecosystems services suppliers. These channels preserve habitat for vegetation and animals that most of time has been removed by agricultural lands. Besides of water regulation and enhance the resilience of ecosystem.

The new challenge is evaluate the way the ag channels provide the primary service of removing water for ag lands and optimize their ecosystem functions by evaluating the hydrodynamic behavior together with their ecosystem services.

We choose a 6 km reach of Ayala drain located on the border south of Mexicali valley as study object during a hydrologic year. Discharge flows was measured monthly and geochemical analysis of water samples was carried out in order to determine physicochemical parameters, mayor ions, and nutrients. Ecosystem services was identified and analyzed by bird count and classification of type and coverage of vegetation.

Water provision, habitat provision and nutrient retention were the most important ecosystem services identified. Our results showed this reach of ag drain provides habitat for 29 bird species, 62% are residents and 38% are migratory according to the intense surveying methodology. Nutrient retention was very variable from 0.02 to 55.6% dependence of vegetative state of aquatics plants, to the physicochemical characteristics of water and the load of nutrients. Two dimensional hydrodynamic modeling was carried out using HEC-RAS along 600 m of channel within the Ayala reach selected previously and roughness coefficient was used to calibrate the model. A difference threshold of 0.09 m was accepted between recorder stage elevations with inundated elevation computed by the model. Maximum differences were found during the lower discharge rates and therefore lower stage elevation.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general	3
1.2.	Objetivos específicos	3
1.3.	Justificación.....	3
1.4.	Hipótesis	4
1.5.	Área de estudio	4
2.	Antecedentes	6
3.	Marco de referencia	11
3.1.	Infraestructura hidroagrícola	11
3.2.	Drenaje agrícola.....	11
3.3.	Funcionamiento de los drenes agrícolas.....	11
3.3.1.	Flujo en canales abiertos.....	11
3.3.2.	Geometría del dren.....	13
3.3.3.	Caudal	13
3.3.4.	Balance hídrico	15
3.4.	Calidad de agua	17
3.4.1.	Nutrientes	18
3.4.2.	Fertilizantes	19
3.4.3.	Nitrógeno	20
3.4.4.	Fósforo	23
3.4.5.	Retención de nutrientes en drenes agrícolas	24
3.5.	Vegetación	25
3.6.	Servicios ecosistémicos	26
3.7.	Hábitat y aves	31
3.8.	Modelización hidrodinámica de flujo en dos dimensiones.....	32
3.8.1.	Esquema numérico utilizado por HEC-RAS	32
3.8.1.1.	Métodos de resolución numérica.....	34
3.8.1.2.	Ventajas y limitaciones de HEC-RAS.....	34
4.	Metodología	35

4.1.1.	Identificación de la cuenca de captación del dren Ayala	35
4.2.	Balance hidrológico	35
4.2.1.	Flujo de entrada y salida:.....	35
4.2.2.	Datos meteorológicos	38
4.2.3.	Precipitación	40
4.2.4.	Evaporación y evapotranspiración.....	40
4.2.5.	Vegetación.....	40
4.3.	Calidad del agua	42
4.3.1.	Adquisición de muestras.....	42
4.3.2.	Método de análisis de nutrientes	43
4.3.3.	Retención de nutrientes.....	43
4.4.	Servicios ecosistémicos	44
4.4.1.	Servicio ecosistémico de provisión de hábitat	44
4.5.	Modelización hidrodinámica del DAPA.....	44
4.5.1.	Geometría del DAPA.....	45
4.5.2.	Malla	46
4.5.1.	Condiciones de frontera iniciales	47
4.5.1.	Rugosidad	47
4.5.2.	Calibración.....	47
5.	Resultados y discusión.....	48
5.1.1.	Infraestructura agrícola.....	48
5.2.	Balance hidrológico	49
5.2.1.	Flujos de agua	49
5.2.2.	Relación caudal-tirante de agua	52
5.2.3.	Vegetación.....	54
5.2.4.	Entrada de agua	56
5.2.5.	Salida de agua.....	57
5.3.	Calidad del agua	60
5.3.1.	Parámetros fisicoquímicos del agua	60
5.3.2.	Análisis de nutrientes.....	62
5.3.3.	Retención de nutrientes.....	65

5.4. Servicios ecosistémicos	67
5.4.1. Servicio ecosistémico de depuración de agua.....	67
5.4.2. Servicio ecosistémico de provisión de hábitat	67
5.5. Modelización hidrodinámica	70
5.5.1. Geometría del cauce	70
5.5.2. Rugosidad	71
5.5.3. Modelización hidrodinámica	71
6. Conclusiones.....	76
6.1. Balance hidrológico y de masa	76
6.2. Servicios ecosistémicos	77
6.3. Modelo hidrodinámico del DAPA.....	78
7. Recomendaciones	79
8. Referencias.....	80
9. Anexos	91
9.1. Formato de resumen de Aforo	91

Índice de figuras

Figura 1.	Localización geográfica del área de estudio	5
Figura 2.	Humedales en el Delta del Río Colorado.	8
Figura 3.	Elementos para estimar el caudal con la ecuación de la sección media. Fuente: Lomeli-Banda (2013).	14
Figura 4.	Complejidad jerárquica de la gestión del agua de drenaje en relación con los problemas de calidad de agua. Modificada de Ricket (1993).	18
Figura 5.	Ganancias y pérdidas de nutrientes en los suelos (Modificada de: Mengel y Kirkby, 2000).	19
Figura 6.	Ciclo del nitrógeno en el suelo (Modificado de Levy et al., 2011).....	22
Figura 7.	Transformaciones del nitrógeno en la zona vadosa, en condiciones húmedas y secas (Modificado de Metcalf et al., 2007).	22
Figura 8.	Procesos geoquímicos, geofísicos y biológicos que ocurren dentro de los drenes agrícolas (Modificado de Dollinger et al., 2015).	28
Figura 9.	Ubicación de los sitios de muestreo y medición de caudal.....	36
Figura 10.	Realización de aforos para medir caudal.	37
Figura 11.	Limnómetro instalado en el sitio Ayala #1.....	38
Figura 12.	Limnómetro instalado en el sitio Ayala #2.....	38
Figura 13.	Ubicación de la estación meteorológica “Colonia Medano”.....	39
Figura 14.	Dron utilizado para la adquisición de imágenes aéreas	41
Figura 15.	Procedimiento de calibración del equipo.....	41
Figura 16.	Procedimiento de la adquisición de imágenes aéreas y clasificación de la cobertura.	41
Figura 17.	Colecta de agua en el sitio Ayala #3.....	42
Figura 18.	Muestra de agua homogenizada.....	42
Figura 19.	Datos de entrada y salida del modelo hidrodinámico.	45
Figura 20.	Equipo GPS GR-5 utilizado para el levantamiento topobatimétrico.....	46
Figura 21.	Banco de nivel MOJO9, utilizado para colocar puntos de liga en el dren Ayala	46
Figura 22.	Configuración del equipo GPS GR-5	46
Figura 23.	GPS GR-5 colocado en el punto de liga	46
Figura 24.	Cuenca de captación del DAPA y red de drenaje.	48
Figura 25.	Modelo conceptual del balance hidrológico del DAPA. Donde ET es la evapotranspiración; E es evaporación; Qe es el volumen de entrada; Qs es el	

	volumen de salida; A.sub. es el aporte de humedad del suelo o agua subterránea; Inf es la infiltración.	49
Figura 26.	Caudales medidos en la estación de aforo Ayala #1 durante el período de estudio.....	50
Figura 27.	Caudales medidos en la estación de aforo Ayala #2 durante el período de estudio.....	50
Figura 28.	Caudales medidos en las estaciones de aforo Ayala #3 y Ayala #4.....	51
Figura 29.	Caudales medidos en las estaciones de aforo Ayala#1, Ayala#2, Ayala #3 y Ayala#4, así como los caudales del efluente de la PTAR km. proporcionados por CESP, 2016.	52
Figura 30.	Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #1 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017.	53
Figura 31.	Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #2 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017	53
Figura 32.	Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #3 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017.	53
Figura 33.	Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #4 para el periodo de octubre 2016 a febrero 2017.....	53
Figura 34.	Sección del DAPA con pino salado.....	54
Figura 35.	Parque de tula.	54
Figura 36.	Zona con vegetación densa.....	54
Figura 37.	Zona del DAPA con agua y Pino Salado.....	54
Figura 38.	Mapa de clasificación de cobertura en el DAPA.	55
Figura 39.	Sección de vegetación del sitio Ayala #4 del DAPA.....	56
Figura 40.	Volumen de entrada del sitio Ayala #1.....	56
Figura 41.	Volumen anual de dren Ayala durante el año hidrológico febrero de 2016 a febrero de 2017, estimado con las estaciones de aforo Ayala #3 y Ayala #4.	57
Figura 42.	Pérdidas por evaporación y evapotranspiración mensuales	58
Figura 43.	Balance hidrológico del DAPA, representado en el modelo conceptual. Donde ET es la evapotranspiración; E es evaporación; Qe es el volumen de entrada; Qs es el volumen de salida; A.sub. es el aporte de humedad del suelo o agua subterránea; Inf es la infiltración.	59

Figura 44.	pH del agua medido durante el período de estudio en los cuatro sitios de muestreo.	60
Figura 45.	Conductividad eléctrica del agua, medida durante el periodo de estudio en los cuatro sitios de muestreo.....	61
Figura 46.	Temperatura del agua y aire, registrada durante el periodo de estudio.....	62
Figura 47.	Concentraciones de nutrientes fosforados vs Caudal medido.....	64
Figura 48.	Concentraciones de nutrientes nitrogenados.....	64
Figura 49.	Retención de nutrientes entre los sitios de muestreo en el DAPA.....	66
Figura 50.	Lechuza llanera (<i>Athene cunicularia</i>).....	69
Figura 51.	Garza Nocturna coroninegra (<i>Nycticorax nycticorax</i>).....	69
Figura 52.	Pelicano americano (<i>Pelecanus erythrorhynchos</i>).....	69
Figura 53.	Cormorán (<i>Phalacrocorax auritus</i>).....	69
Figura 54.	Modelo digital de elevaciones del DAPA.....	70
Figura 55.	Máxima inundación simulada.....	71
Figura 56.	Mínima inundación simulada.....	72
Figura 57.	Resultados de elevación de agua derivados de la simulación hidrodinámica del DAPA (a) y correlación entre datos de elevación del agua observados y calculados (b).	73
Figura 58.	Valores de velocidad obtenidos de la modelización hidrodinámica del DAPA para el sitio Ayala #3.	73
Figura 59.	Resultados de distribución de velocidades obtenidas del modelo, para el día de máxima inundación (20 de abril 2016).	74
Figura 60.	Vectores de dirección de flujo resultado de la simulación.....	74
Figura 61.	Dirección de flujo de la zona con vegetación referida al recuadro de la figura 60.....	75

Índice de tablas

Tabla 1.	Clasificación de los principales efectos de los procesos de los drenes agrícolas sobre los servicios ecosistémicos (Fuente: Dollinger et al., 2015)	29
Tabla 2.	Características de los drenes agrícolas que influyen en los procesos que se realizan dentro de los mismos (Fuente: Dollinger et al., 2015)	30
Tabla 3.	Características y usos del método de Búsqueda Intensiva (Fuente: Ralph, 1996)	31
Tabla 4.	Coordenadas del punto de liga utilizado en el DAPA (UTM WGS84 Zona 11N en X y Y, y datum NAVD88 en la vertical)	45
Tabla 5.	Coordenadas del punto de liga utilizado en el DAPA (UTM WGS84 Zona 11N en X y Y, y datum NAVD88 en la vertical, Z)	45
Tabla 6.	Balance hidrológico para el período de febrero de 2016 a febrero de 2017	58
Tabla 7.	Concentraciones de contaminantes analizados en el DAPA	62
Tabla 8.	Valores analizados, típicos y especificados en la NOM-001-ECOL-1996	63
Tabla 9.	Flujo másico de contaminantes en el DAPA	65
Tabla 10.	Aves avistadas en el DAPA durante el censo realizado el 17 de febrero de 2016	67
Tabla 11.	Valores de rugosidad utilizados en la modelización	71

1. Introducción

La agricultura es el principal usuario de los recursos de agua dulce, utiliza en promedio el 70% de todos los suministros hídricos superficiales del mundo. En México la agricultura es una de las principales actividades económicas, la superficie agrícola total es de aproximadamente 27.5 millones de hectáreas (ha), de las cuales 21.9 millones son superficies con aguas de temporal y 5.5 poseen sistemas de irrigación, en total representan el 25.2% de la superficie total del país (INEGI, 2014).

De acuerdo con la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2006) en el contexto internacional México es líder en la producción de tomate, frutos rojos, aguacates y chiles. En el país los Estados con mayor superficie de riego son Sonora, Sinaloa, Tamaulipas, Michoacán, Baja California y Guanajuato, estos Estados representan el 73% de la superficie total irrigada (FAO, 2014).

Para la superficie de riego es indispensable contar con un sistema de drenaje agrícola. La función principal de los drenes agrícolas (DA) es recibir el agua que se drena de las parcelas de cultivos al ser irrigadas, tanto para mantener el nivel freático por debajo del sistema radicular de los cultivos, como para remover las sales presentes en el suelo y con ello mantener sus concentraciones en niveles adecuados para cada cultivo, arrastrando consigo los remanentes de los agroquímicos aplicados (Ritzema, 1994).

Secundariamente y de forma no intencionada, pero no menos importante, los DA funcionan como vías de descarga de aguas residuales urbanas tratadas y no tratadas, situación que provoca un aumento en el contenido de carga orgánica y biológica. El efluente de los DA es comúnmente vertido en ríos u otros cuerpos de agua que desembocan en el mar (García-Hernández et al., 2011).

Algunos drenes agrícolas brindan servicios ecosistémicos, tales como la provisión de agua para uso ambiental, así como con la recarga incidental de acuíferos (CONAGUA, 2018). Tal es el caso, del Valle de Mexicali (VM), en el cual, las descargas agrícolas provenientes de la irrigación son capturadas por los DA y conducidas a otros cuerpos de agua como son el Estero del Golfo de California y los ríos Hardy y Nuevo, por lo que mantienen vivos a los Humedales del Delta del Río Colorado y al Sistema de Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado, ambos con denominación Ramsar. Sin embargo, pese a que brindan agua para los ecosistemas también aportan una alta concentración de nutrientes y agroquímicos, que representan una carga para estos ecosistemas,

Desde hace 50 años se ha demostrado que la vegetación acuática emergente establecida en los DA realiza una función de tratamiento del agua que transportan

de origen agrícola y residual. Estos drenes con vegetación son nombrados en otras partes del mundo como drenes ecológicos y han sido implementados exitosamente en el Delta del Missisipi, Iowa y Ohio en Estados Unidos, así como en China e Italia (Woltemade, 2000; Smith y Pappas, 2007; Moore et al., 2010).

En México poco se ha realizado con respecto al uso de DA ecológicos, algunos de los trabajos realizados han evaluado el potencial de los DA para el manejo de contaminantes orgánicos derivados de la escorrentía agrícola y aguas residuales domésticas (Moeder et al., 2017) y se ha propuesto la construcción de humedales artificiales que mejoren la calidad del agua (García-Hernández et al., 2011).

En esta investigación se evalúa la depuración del agua mediante la remoción de nutrientes en un tramo del dren agrícola Plan de Ayala (DAPA) en el VM, mediante la estimación de flujo másico de nutrientes a lo largo de un año hidrológico, así como el desarrollo de un modelo hidrodinámico de aguas superficiales que permita establecer las bases para gestionar el manejo de agua dentro del DAPA, para que además de conducir las aguas de origen agrícola y residual tratada, sea una fuente de depuración de las mismas.

1.1. Objetivo general

Evaluar al dren agrícola Plan de Ayala como proveedor de los servicios ecosistémicos de depuración del agua y provisión de hábitat en el año hidrológico 2016-2017 y como drenaje agrícola mediante la modelización del flujo.

1.2. Objetivos específicos

- Estimar el balance hidrológico del DAPA, durante el período hidrológico 2016-2017.
- Estimar el flujo másico de nutrientes en el DAPA durante el año hidrológico 2016-2017.
- Evaluar la remoción de nutrientes en las aguas del DAPA durante el año hidrológico 2016-2017 con base en mediciones puntuales de nutrientes a lo largo del canal y diferencias en la concentración de nutrientes.
- Analizar los servicios ecosistémicos que brinda el dren.
- Modelizar el comportamiento hidrodinámico superficial del dren, con base en sus características físicas como son: geometría del canal y sus bordes de contención, fronteras de vegetación, tipo de vegetación y estructuras hidráulicas.

1.3. Justificación

Dada la importancia del análisis científico de la calidad del agua que descarga hacia nuestros ríos, humedales y mares, es esencial realizar proyectos de investigación que contribuyan al entendimiento de las condiciones físicas que generan problemáticas ambientales, tales como la contaminación de cuerpos de aguas. Existen pocos estudios (Valdes-Casillas et al., 1998; CILA, 2013; Daessle et al., sobre las condiciones químicas de las aguas superficiales en el Valle de Mexicali, incluyendo los drenes agrícolas. Por ejemplo, en el estudio de Valdes-Casillas et al., (1998) se determinó un flujo total de 70 mil toneladas de fertilizantes y alrededor 400 mil litros de insecticidas al año en el Río Hardy, este río al igual que DAPA descarga al Estero del Delta Río Colorado. Así mismo, en el Valle de Mexicali no existen estudios sobre los servicios ecosistémicos que los drenes agrícolas pudiesen proveer.

La determinación de nutrientes en el DAPA durante un año hidrológico y su remoción durante el transporte aportará conocimiento que no se tiene actualmente, lo que podrá ser utilizado como elemento para implementar acciones que coadyuven a la mejora de la calidad del agua que fluye por el DAPA, y por tanto, a la conservación y cuidado de la diversidad y abundancia de especies nativas vegetales y animales, y a la disminución de especies invasivas en la zona, tanto en el DAPA como en el sitio final de descarga el Estero del Delta del Río Colorado.

Además, brindará la pauta para la realización de estudios sobre los servicios ecosistémicos que proveen los drenes agrícolas del Valle de Mexicali, con la finalidad de que estos drenes sean valorados, por ejemplo, por las condiciones de hábitat que propician.

Por otro lado, la modelización hidráulica de una sección del DAPA permitirá reconocer que el funcionamiento del dren como canal de drenaje agrícola se mantiene y además brinda servicios ecosistémicos.

1.4. Hipótesis

La mayor aportación de nutrientes al DAPA está relacionada con la época de mayor flujo, es decir durante la aplicación de riegos a los cultivos.

Se infiere que el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Estación Coahuila aporta una gran cantidad de nutrientes.

El DAPA está contribuyendo con el servicio ecosistémico de depuración de nutrientes en un porcentaje mayor al 20% en promedio, en relación al agua de entrada.

La retención de nutrientes es mayor durante la temporada de primavera-verano, época de reverdecimiento de vegetación acuática.

1.5. Área de estudio

El Estado de Baja California está situado al Noroeste de la República Mexicana, se comprende por cinco municipios Mexicali, Tecate, Tijuana, Ensenada y Rosarito. El área de estudio está localizada en la porción Sur del VM dentro del municipio de Mexicali. En colonia Manuel Ávila Camacho en el Valle de Mexicali, localizada en la margen izquierda del Río Colorado, se ubica la zona de estudio (Figura 1). El área de estudio está comprendida por 6 km longitudinales del dren Plan de Ayala, comprendido entre las coordenadas UTM WGS84 Zona 11N 676,000, 3'555,000 Norte, y 679,000, 3'560,000 y Sur. El dren en estudio es operado por el Módulo de Riego No. 22 del Distrito de Riego 014 Río Colorado.

En el DA confluyen los drenes Camacho y Ortega. Hacia el Sur el dren Ayala intersecta con el dren Perimetral, también llamado "Vaca Güera", en esta zona el caudal se divide, una porción fluye por el antiguo cauce Burna del Río Colorado y la otra parte fluye por el dren Perimetral y desemboca hacia el Estero del Delta del Río Colorado (Figura 1).

Los módulos de riego aledaños a la zona de estudio, 2, 21 y 22 respectivamente, cultivan predominantemente trigo durante el ciclo de otoño-invierno, algodón en primavera-verano y alfalfa como cultivo perenne. Al Sur de la zona de estudio existe

una porción que no es administrada por ningún Módulo de Riego, esto debido a los problemas de salinidad del suelo.

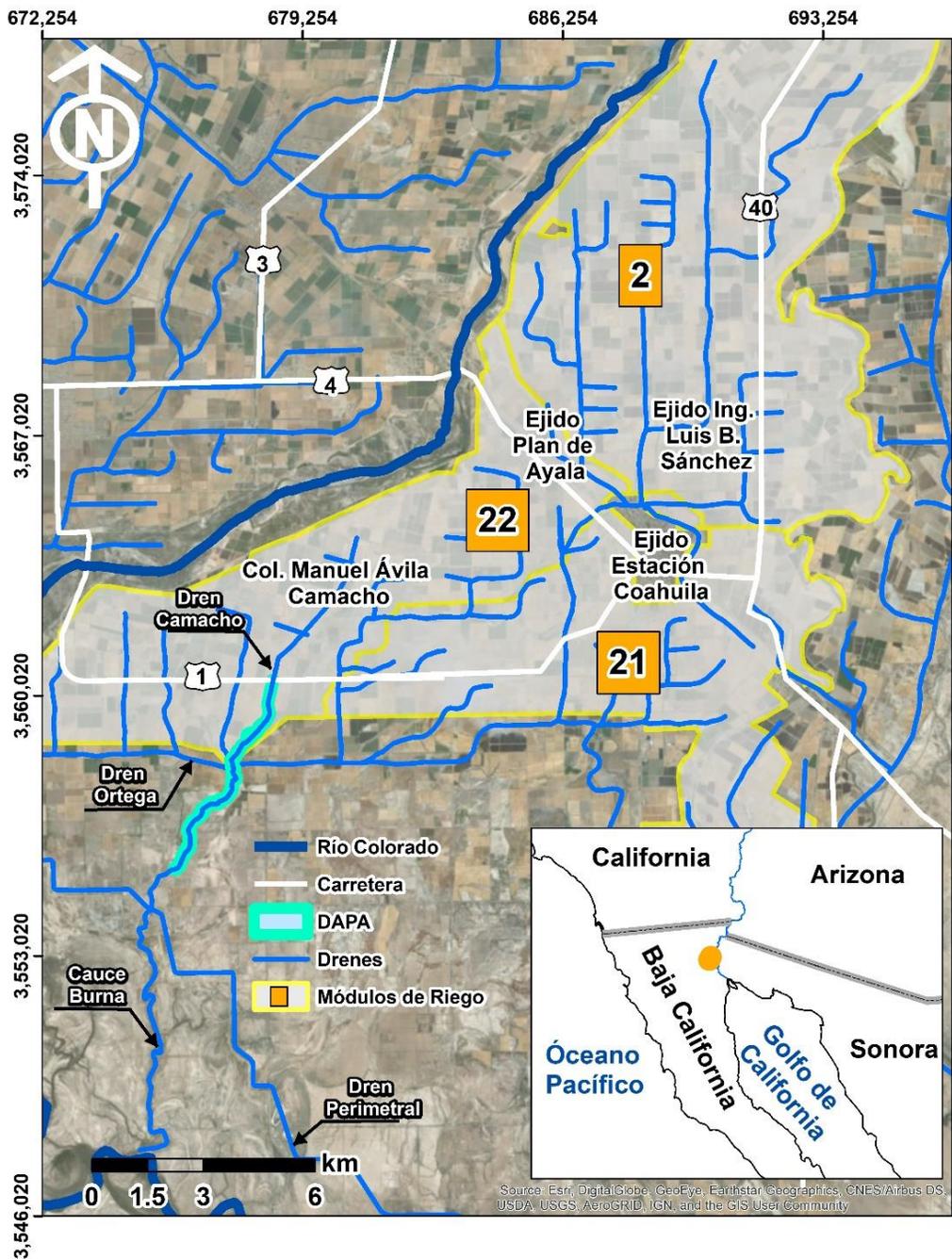


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio

2. Antecedentes

El valle agrícola de Mexicali, surgió a principios del siglo XX (Moreno Mena y López Limón, 2005; Kerig, 2001), cubre una superficie irrigada de aproximadamente 180,239 ha (SEFOA, 2016), se encuentra ubicado en el Municipio de Mexicali del Estado de Baja California. Este valle se caracteriza por ser uno de los más fértiles y productivos en el mundo, a pesar de estar inmerso en una zona desértica.

Las condiciones climatológicas de Mexicali y su valle se caracterizan por ser áridas, la temperatura oscila entre -7°C en los meses de invierno y 54°C en verano. La precipitación es escasa, por debajo de los 55 mm anuales (García, 2004) en cambio, la evapotranspiración potencial anual es de 2,600 mm (SEFOA, 2016). Dadas estas condiciones, la agricultura en el VM requiere de la aplicación de riegos para su desarrollo. Los cultivos predominantes, por su extensión, son el trigo, el algodón y la alfalfa (INIFAB, 2010).

En promedio el VM utiliza para riego aproximadamente el 80% del recurso hídrico disponible del Estado de Baja California (SEFOA, 2016). Esta agua proviene del Río Colorado y del acuífero Valle de Mexicali. La distribución del agua para riego en el VM, se realiza mediante una red de canales de 2,902 km de longitud que forman parte de la infraestructura hidroagrícola del Distrito de Riego 014 Río Colorado (DR014) (Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero, 2010; Ramírez-Hernández, 2006). Desde 1998 este Distrito está concesionado a 22 asociaciones de usuarios agrícolas (módulos de riego), 19 de ellas localizadas en el VM y 3 en el valle de San Luis Río Colorado en el Estado de Sonora, estos módulos administran aproximadamente el 86% del recurso hídrico del Estado (Cortez-Lara, 2011).

Una problemática a la que se ha enfrentado el DR014 es la salinidad del agua y del suelo, cuyo fenómeno se presentó desde el inicio de las actividades agrícolas en el VM. Las causas de este fenómeno han sido atribuidas principalmente a tres factores, 1) la salinidad propia del suelo, 2) las sales solubles contenidas en el agua utilizada para riego y 3) las elevadas tasas de evapotranspiración que se presentan en esta región (Ramírez-Hernández et al., 2006; Padilla-Arzaluz, 2017).

Un instrumento implementado a nivel mundial, incluido México y particularmente el VM en Baja California, desde 1920, como una medida de mitigación y prevención del fenómeno de salinidad, es el drenaje agrícola (Sykes, 1937), el cual además favorece el desalojo de los riegos aplicados excedentes, sales y agroquímicos, ya que mejora la aireación y permite al suelo el acceso a nutrientes (OEIDRUS, 2009).

En un principio, la extracción de agua subterránea mediante pozos localizados en el VM actuó indirectamente como obras de drenaje, ya que disminuía el nivel freático por debajo de la raíz de los cultivos. Sin embargo, el aumento de la superficie

cultivada y por consecuencia el incremento de agua aplicada al suelo y sales, obligó a los agricultores y al Distrito de Riego 014 a realizar excavaciones a cielo abierto. Estas excavaciones conforman el sistema de drenaje agrícola (SDA), constituido actualmente por 1,704 km de DA, que además incluye cauces abandonados del Río Colorado, como es el caso del río Álamo, río Bacanora, Río Pescaderos, Río Nuevo, Río Burna (Sykes, 1937).

El SDA en el VM además de recibir agua de DA recibe agua residual tratada (ART) de las cinco PTARs que se localizan en el valle. Particularmente, el efluente de la PTAR localizada en el poblado Estación Coahuila desde el inicio de sus operaciones es descargado en el DAPA. Esta PTAR tiene una capacidad de tratamiento de 20 L/s, y está conformada por tres lagunas; la aireada, la facultativa y la de maduración (CESPM, 2017).

El drenaje agrícola también recibe descargas de agua residual cruda proveniente del lavado y descarga de fosas sépticas localizadas en los poblados que no cuentan con el servicio de drenaje sanitario, además, en ocasiones los DA son sitios de desfogue denominado coleos de la red de canales del Distrito de Riego 014 cuando el nivel de agua se eleva por encima de los límites permisibles del canal.

La infraestructura Hidroagrícola, específicamente el SDA del Distrito de Riego 014 Río Colorado, formó dos cuencas de captación una con flujo hacia la vertiente Norte y otra hacia la vertiente Sur del valle. La cuenca Norte del valle drena una superficie de 181,400 ha, el volumen de agua drenado es descargado al sistema lagunar del Río Nuevo constituido por las lagunas México, Campestre y Xochimilco en la ciudad de Mexicali, posteriormente el agua es conducida por una estructura hidráulica denominada “El Embovedado” el cual vierte el agua del Río Nuevo hacia su continuación a Estados Unidos, que finalmente descarga en el Salton Sea (CILA, 2013). La cuenca Sur cubre una superficie de 147,500 ha, descarga el agua al Río Hardy y en el Río Colorado, confluyendo en el Estuario del Delta del Río Colorado (Figura 2), una porción de la cuenca Sur forma parte del sistema de humedales del Delta del Río Colorado.

Este sistema de humedales cuenta con la denominación 814 de sitio Ramsar (Ramsar, 2016) tiene una superficie aproximada de 250, 000 hectáreas, además es reconocido como uno de los ecosistemas más singulares y de mayor valor en América Latina, por su importancia como hábitat para las aves, es reconocido como Área de Importancia Para la Conservación de Aves (AICA), y ha sido decretado por la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad como un sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad (Zamora-Arroyo et al., 2005).

Los humedales del Delta del RC albergan a más de 350 especies de aves, incluyendo algunas en peligro de extinción, como el Palmoteador de Yuma (*Rallus*

liongiostriis yumanensis) y el Mosquero Saucero (*Empidonax traillii*) (Zamora-Arroyo et al., 2005). Cada año aves acuáticas, en su mayoría aves playeras, patos y gansos, migran desde zonas de reproducción en latitudes altas a zonas de estancia invernal en latitudes bajas. Diversos estudios como el de Hinojosa-Huerta et al., (2008, 2013 y 2014) han determinado los patrones espaciales y temporales de la riqueza y densidad de aves en el Delta del Río Colorado. El promedio durante el año 2002 a 2003 la abundancia de aves en 240 puntos de observación fue de 29.2 individuos, con una riqueza de 9.6 especies y una densidad promedio de 47.7 individuos por hectárea (Hinojosa-Huerta et al., 2008).

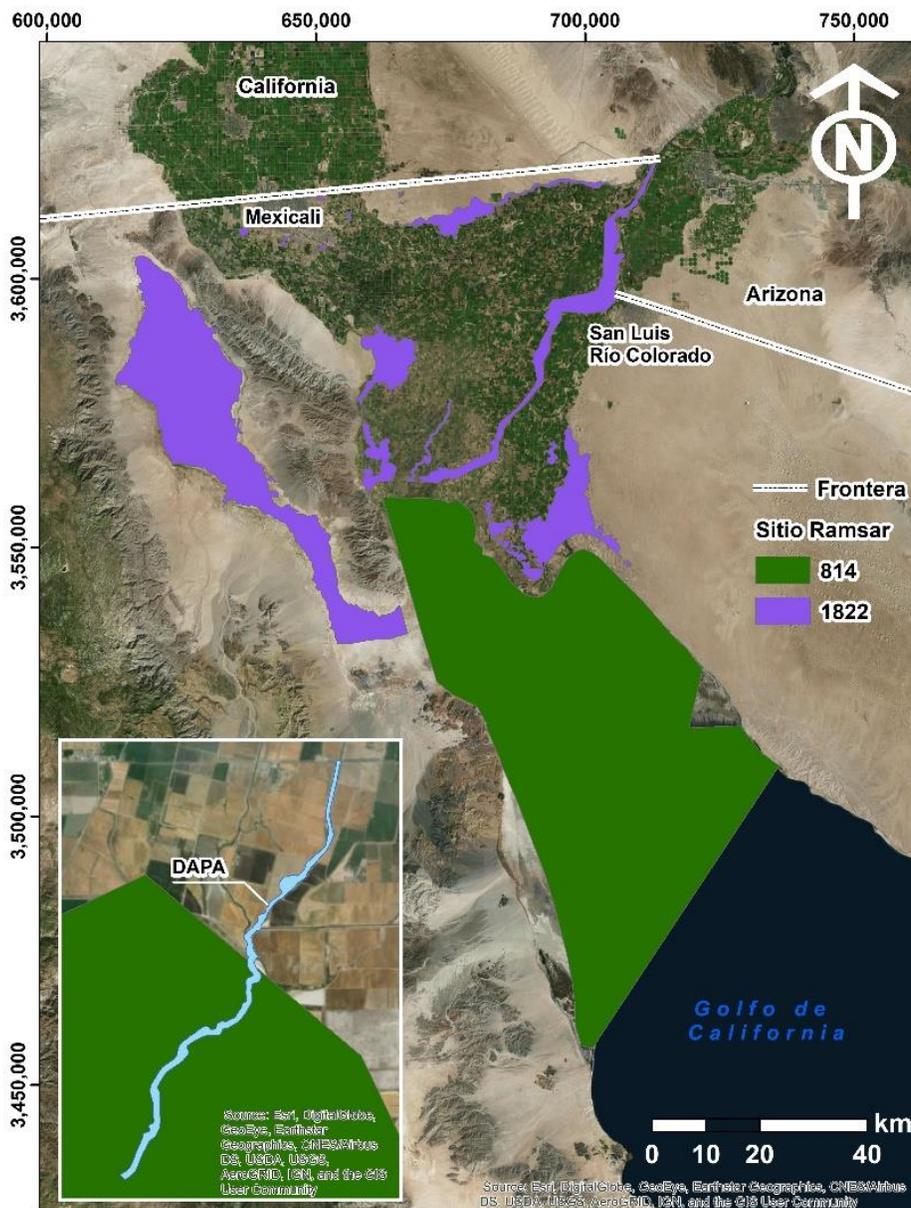


Figura 2. Humedales en el Delta del Río Colorado.

Las especies más comúnmente encontradas en los estudios por Hinojosa-Huerta et al., (2008, 2013 y 2014) realizados en el Delta del RC fueron la Paloma Huilota (*Zenaida macronura*), Tordo Sargento (*Agelaius phoeniceus*) y Vaquero Ojirojo (*Molothrus ater*) además de otras de especies como el Baloncillo (*Auriparus flaviceps*), Gorrión Cantor (*Melospiza melodia*) y Rascador de Abert (*Pipilo aberti*). El estudio realizado por Hinojosa-Huerta et al., (2014) encontró que el agua superficial es una de las características más importantes en relación a la riqueza y densidad de aves, independientemente del tipo de vegetación o cobertura del suelo

Tradicionalmente, los humedales del Delta recibían agua del río Colorado, sin embargo, la intensa regulación del agua y la falta de asignación de una porción del recurso hídrico al medio ambiente han ocasionado la pérdida de aproximadamente el 80% de estos humedales. Pese a estas circunstancias la superficie restante, ha logrado mantenerse gracias a los flujos de retorno del SDA, a la infiltración de los canales no revestidos, a los esporádicos desfuegos de las presas de Estados Unidos descargados al Río Colorado, y a los volúmenes de agua excedentes en la red de canales del Distrito de Riego 014 (Glenn et al., 2001).

Particularmente el DAPA es considerado como uno de los DA principales en cuanto a su aportación de volúmenes de agua a los humedales del Delta del Río Colorado. Además, una parte de su flujo suministra de agua a la Laguna El Indio (Figura 2), la cual está considerada como humedal, la cual cubre una superficie aproximada de 40 ha; además esta observado como sitio con prioridad de conservación en el Delta del Río Colorado, debido a que provee hábitat para dos especies en peligro de extinción el Pez Cachorrito del Desierto (*Cyprinodon macularis*) y el Palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*).

Lo anterior aporta elementos para inferir que en el VM los DA han brindado el servicio ecosistémico de provisión de agua al sistema de humedales del Delta del Río Colorado (Zamora-Arroyo et al., 2005; CILA, 2013). Si bien, la calidad de esta agua juega un papel fundamental en el estado del ecosistema, los humedales han mostrado resiliencia, prácticamente sin afluentes de agua dulce. De tal forma los drenes agrícolas contribuyen en la conservación de la biodiversidad y en aumentar la conectividad del paisaje creando corredores de vegetación lo que permite el movimiento y conexiones de poblaciones de anfibios e insectos (Dollinger et al., 2015) y adicionalmente favorecen a mantener la diversidad y la redundancia, así como a gestionar la conectividad, dos de los siete principios que mejoran los servicios de resiliencia del ecosistema (Biggs et al., 2015; Woodward, 2016)

Trabajos como los de Zamora-Arroyo et al., (2005), Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero (2008), López-Hoffman (2009) y los de asociaciones de la sociedad civil como Sonoran Institute y Pronatura Noroeste, han denotado la importancia de los

DA en los ecosistemas del Delta del río Colorado, sobre todo, destaca el de Zamora-Arroyo y Flessa (2009) en el cual enfatizan la importancia de los flujos de los drenes agrícolas ya que son la mayor fuente de agua del Estuario del Delta.

A diferencia del VM, en diversas partes del mundo como en Estados Unidos, China, Europa y Australia, los DA han sido analizados como proveedores de servicios ecosistémicos, entre ellos destaca la regulación del agua ya que es uno de los servicios ecosistémicos que ha sido mayormente estudiado, y es considerado como un beneficio indirecto para los consumidores de los productos agrícolas (Woodward, 2016).

Estudios previos como el de Herzon y Helenius (2008) y Dollinger et al., (2015) han demostrado que los drenes agrícolas contribuyen a preservar altos niveles de diversidad de plantas, vertebrados e invertebrados que además tienen una diversidad funcional que contribuye a suministrar agua. Otros de los servicios ecosistémicos de regulación con los que contribuyen los drenes agrícolas son aquellos asociados a la capacidad de recuperación del sistema (Woodward, 2016) tales como el ciclo de nutrientes, calidad de agua, control de la erosión del suelo, la polinización y el control biológico a través de la diversificación de hábitats (Zhang et al., 2007; Herzon y Helenius, 2008; García-Llorente et al., 2015; Iniesta-Arandia et al., 2015).

3. Marco de referencia

3.1. Infraestructura hidroagrícola

En zonas agrícolas y áridas como lo es el Valle de Mexicali, la infraestructura hidroagrícola es un elemento esencial para satisfacer la demanda hídrica de los cultivos. La infraestructura hidroagrícola en grandes sistemas de riego consta de diversas obras civiles para cumplir con el servicio de riego, entre las cuales se encuentran las obras de toma de presas, la red de canales de conducción-distribución, la red de drenes agrícolas, así como las tomas en el sistema de distribución (Iñiguez et al., 2015).

3.2. Drenaje agrícola

El drenaje en la agricultura se refiere a la remoción de los excesos de agua (Herzon y Helenius, 2008), consiste en un conjunto de técnicas, que permiten eliminar cualquier exceso de agua y/o sales presentes sobre la superficie del suelo, o en la zona radicular de los cultivos, con el objetivo de proporcionar a éstos un medio adecuado para su desarrollo normal, y mantener el suelo en condiciones favorables de profundidad del nivel freático (Ritzema, 1994; Béjar, 2007; Blann, 2009).

Según Ritzema (1994) las técnicas más comunes utilizadas para drenar el exceso de agua son el drenaje superficial, subsuperficial y subterráneo. El drenaje superficial, como es el caso del dren Ayala tiene como finalidad la remoción del exceso del agua sobre la superficie del terreno y consiste en una serie de canales poco profundos que recogen la escorrentía superficial y la descargan a drenes colectores. Generalmente se utilizan antiguos cauces naturales de ríos o depresiones para los colectores (primarios), mientras que los drenes secundarios y parcelarios se construyen en los perímetros de las parcelas y recogen fundamentalmente el agua subsuperficial y subterránea (USDA, 2001).

El agua de los DA se caracteriza por contener concentraciones de nutrientes, pesticidas y otros residuos de agroquímicos. Esta situación genera repercusiones sobre los cuerpos de agua receptores de los efluentes de los DA, además de las zonas riparias y humedales que se localicen aguas abajo de estas descargas (Blann et al., 2009).

3.3. Funcionamiento de los drenes agrícolas

3.3.1. Flujo en canales abiertos

El dren agrícola Plan de Ayala es considerado como un canal de flujo a cielo abierto, por lo tanto, es necesario aplicar las teorías matemáticas para estas condiciones de flujo. De acuerdo con Chow (1994) las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre del agua puede

cambiar con el tiempo y con el espacio, además de que la profundidad de flujo, el caudal y las pendientes del fondo del canal y de la superficie libre son interdependientes.

Aunado a lo mencionado anteriormente, el coeficiente de rugosidad de un canal natural (de tierra) juega un papel fundamental en la hidrodinámica del dren, ya que tanto los taludes como el fondo del canal varían por la presencia de vegetación, raíces, cambios del tipo de material, como arenas, gravas, etc. por lo que es necesario seleccionar los coeficientes de rugosidad que correspondan a las características del sitio de estudio (Chow, 1994).

El flujo en los canales abiertos puede clasificarse de diversas maneras, para el caso de este estudio se usará la clasificación de Chow (1994) relacionada con el cambio temporal del régimen de flujo.

Esta clasificación considera 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. El flujo es no permanente si la profundidad cambia con el tiempo dentro del período considerado. Cuando el caudal de un flujo permanente no es uniforme a lo largo del curso del flujo, se le conoce como flujo espacialmente variado o discontinuo, de acuerdo con Chow (1994) este tipo de flujo se presenta en los canales de riego, en canales de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como en los drenes agrícolas.

Clasificación de flujo en un canal abierto de acuerdo a Chow (1994):

- Flujo permanente
 - Flujo uniforme
 - Flujo variado
 - Flujo gradualmente variado
 - Flujo rápidamente variado
- Flujo no permanente
 - Flujo uniforme no permanente
 - Flujo no permanente
 - Flujo gradualmente variado no permanente
 - Flujo rápidamente variado no permanente

En este trabajo se considera flujo gradualmente variado no permanente. Debido a los cambios de flujos superficiales y de profundidad de agua a lo largo del cauce.

3.3.2. Geometría del dren

La geometría del cauce natural en el estudio de las condiciones hidrodinámicas es de suma importancia ya que de esta característica depende el volumen de almacenamiento del cauce, la velocidad del flujo debido a la pendiente, así como de la distribución del agua dentro del cauce (USACE, 2016).

Al tratarse de un cauce natural no revestido, las variaciones en la geometría son muy importantes a lo largo del tramo estudiado, por lo que se debe caracterizar con el mayor detalle posible. Una de las metodologías aplicadas para la caracterización de la geometría es el levantamiento topo batimétrico del cauce, la cual consiste en determinar las elevaciones del fondo del canal y de sus terrazas mediante la aplicación de técnicas e instrumentos de topografía y de Sistemas de Información Geográfica (Carrera, 2015).

3.3.3. Caudal

El término caudal, se refiere a la cantidad de fluido por unidad de tiempo, en este caso agua, que pasa por el área de la sección transversal en un determinado tiempo (Chow, 1994). El caudal puede ser estimado directamente con medidores volumétricos o con mediciones de velocidad-superficie, o bien puede ser calculado con métodos indirectos como son la relación caudal-tirante (USGS, 2007). Se expresa en unidades de volumen dividida en unidad de tiempo. En un canal natural, como el estudiado en esta investigación, el caudal puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$Q = A * v \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde

- Q , es el caudal por unidad de tiempo (m^3/s)
- A , es el área mojada de la sección transversal (m^2)
- v , es la velocidad promedio del agua en la sección (m/s)

Para realizar las mediciones de caudal existen diferentes instrumentos, por ejemplo, medidores de corrientes y medidores de tipo Doppler acústicos (USGS, 2016). El FlowTracker es un instrumento que ha sido utilizado ampliamente en mediciones de caudales en corrientes de agua. De acuerdo con Lomeli-Banda (2013) la ecuación utilizada por el dispositivo de medición, es el principal fundamento para realizar mediciones en corrientes de agua. En el caso de esta investigación se utilizó la ecuación de la sección media (Figura 3).

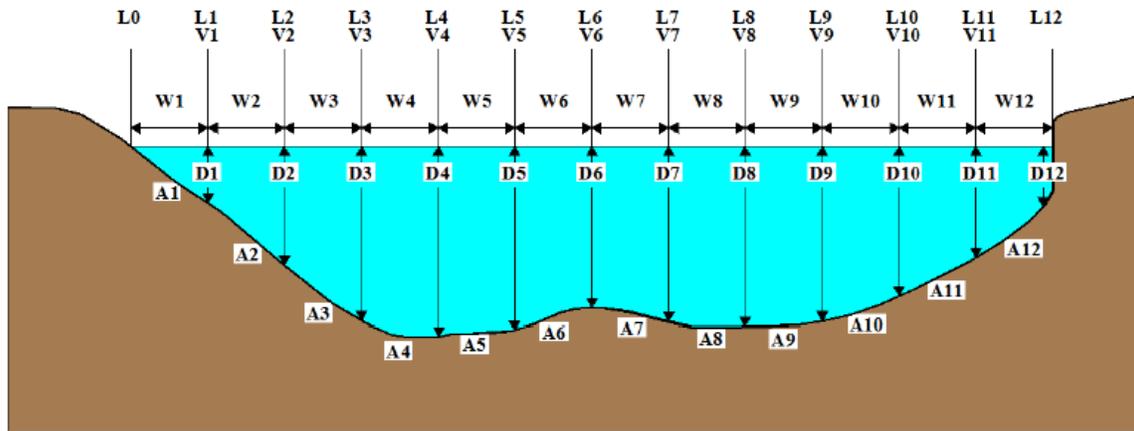


Figura 3. Elementos para estimar el caudal con la ecuación de la sección media.
Fuente: Lomeli-Banda (2013).

Donde, W es el ancho de la subsección, D es el tirante de agua, A es el área mojada de la subsección, V es la velocidad medida con el FlowTracker y L es el cadenamiento de la sección (posición). El caudal se puede calcular con las siguientes ecuaciones de acuerdo al método de la sección media:

Cálculos de borde (Estación inicial y final)

$Q_0 = W_0 = A_0 = 0.00$	Borde de estación inicial
$i = \text{Borde de la estación } (L_i, D_i)$	Borde de la estación
$W_i = L_i - L_{i-1}$	Ancho del borde
$A_i = W_i * (D_i + D_{i-1})/2$	Área del borde
CF_i	Factor de corrección del borde
$CF_i * V_{i-1}$	Velocidad del borde
$MV_i = (V_i + V_{i-1})/2$	Velocidad media del borde
$Q_i = A_i * V_i$	Descarga de borde

Cálculos de agua abierta (Estaciones intermedias)

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

ΣQ_i

Descarga total

3.3.4. Balance hídrico

El balance hídrico se basa en el principio de la conservación de masa. Establece que, para cualquier período, la diferencia entre las entradas y las salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada. De acuerdo con Sokolov y Chapman (1981), la ecuación del balance hídrico para cualquier cauce o masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo, así como la variación del volumen de agua almacenada (dv/dt) en el cauce o masa de agua (Ecuación 2).

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \frac{dv}{dt} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Las entradas al sistema (en este caso el canal de drenaje agrícola) pueden darse mediante los siguientes procesos:

Precipitación: es el agua que cae directamente a la superficie del canal debido a la condensación del vapor de agua.

Aporte de aguas subterráneas: es la entrada de agua al canal por los taludes o el lecho del canal de forma subsuperficial y subterránea por la elevación del nivel freático en las inmediaciones del dren por arriba del nivel en el canal, debido al riego de las parcelas aledañas o a las condiciones del acuífero local (Winter et al., 1998).

Descarga de aguas residuales tratadas y no tratadas: descarga directa de aguas residuales al canal de drenaje, como el efluente de una planta de tratamiento, o bien, del drenaje sanitario de los poblados aledaños al cauce.

Las salidas del agua pueden ser:

Infiltración: es el movimiento del agua, a través de la superficie del lecho y los taludes del canal de drenaje hacia adentro del suelo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares debido a que el nivel freático está por debajo del nivel de agua en el canal (Winter et al., 1998).

Evaporación: evaporación del agua dentro del canal de drenaje. De acuerdo con Custodio y Llamas (1983) la evaporación es el resultado del proceso físico, por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmosfera en forma de vapor. Todo tipo de agua en la superficie terrestre está expuesta a la evaporación. El método de Penman (Ecuación 3) es el más utilizado para estimar la evaporación a partir de parámetros climáticos.

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} R_n + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde

- E Evaporación (mm/d).
 Δ Pendiente de la curva de tensión saturante a la temperatura (mm Hg/C).
 γ Constante psicométrica (mmHg).
 R_n Radiación neta, traducida en mm de agua que puede evaporar en un día (Cal/cm²)
 E_a $0.35 (0.5 + 0.54 V_2)(e_a - e_d)$ (mm/d)
 V_2 Velocidad del viento a 2 m de altura sobre la superficie evaporante (m/s).
 e_a Tensión de vapor saturante del aire (mm Hg).
 e_d Tensión de vapor en el aire expresado (mm Hg).

Evapotranspiración (ET): representa la pérdida de agua de la superficie de la tierra a través de los procesos combinados de evaporación (del suelo y las superficies de la planta) y la transpiración de la planta (es decir, evaporación interna) (Jensen et al., 1990). De acuerdo con Lomeli et al., (2015) existe una relación entre los cambios estacionales de la superficie compuesta por agua-vegetación, y las salidas del sistema por ET y flujo superficial. La ET depende fundamentalmente de la temperatura del agua, temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del aire sobre la superficie, el proceso de radiación solar y el tipo de cobertura vegetal.

El cálculo de la evapotranspiración se puede realizar con la ecuación estandarizada para cultivos altos y ásperos de Penman-Monteith, simplificada por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (Allen et al., 2005) (**Ecuación 4**).

$$ET_{sz} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde

- ET_{sz} Evapotranspiración estandarizada para un cultivo de referencia (mm/d).
 R_n Radiación neta calculada para una superficie de cultivo (MJ/m²·d).
 G Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo (MJ/m²·d).
 T Temperatura media diaria a una altura de 1.5 a 2.5 m (°C).
 u_2 Velocidad media del aire diaria a una altura de 2 m (m/s).
 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 psicométrica (kPa °C).
 C_n Constante numerador dependiente de la referencia y tiempo (Kmms³/Mg·d).

C_d Constante denominador dependiente de la referencia y tiempo (s/m).
Las unidades para el coeficiente 0.408 están en $m^2 \text{ mm/MJ}$.

Escorrentamiento o descarga hacia otro cuerpo receptor: es el agua que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida del tramo de canal estudiado (USGS, 2018b).

3.4. Calidad de agua

La calidad del agua es el término utilizado para describir las características químicas, físicas y biológicas del agua. De acuerdo con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en Ingles) la agricultura es una de las actividades que contribuye en gran medida a incrementar los problemas de calidad de agua. Esta situación debido al uso de fertilizantes en la agricultura, que puede resultar en un exceso de nitrógeno y fósforo en el agua superficial y el agua subterránea (USGS, 2018).

La calidad de las aguas de los drenes agrícolas normalmente está más degradada que el agua aplicada en el riego ya que contienen compuestos que son lixiviados de los horizontes de suelo. Adicionalmente, durante su recorrido incorporan sustancias disueltas y suspendidas, por ejemplo, sales, compuestos orgánicos y otras partículas (Blann et al., 2009) Entre los contaminantes más importantes se pueden encontrar 1) nutrientes, 2) pesticidas, 3) elementos tóxicos (arsénico, mercurio, bario, cromo, níquel, etc.)

La calidad del agua puede ser determinada mediante mediciones directas de los parámetros fisicoquímicos tales como temperatura, acidez (pH), oxígeno disuelto, y conductividad eléctrica, así como el análisis de compuestos en ella, como es el caso de nutrientes, metales pesados, plaguicidas, entre otros. Evaluar la calidad del agua es fundamental para la gestión del agua de los DA, ya que su complejidad está relacionada con los problemas de calidad del agua, tal como se muestra en la figura 4 (Madramootoo et al., 1997).



Figura 4. Complejidad jerárquica de la gestión del agua de drenaje en relación con los problemas de calidad de agua. Modificada de Ricket (1993).

3.4.1. Nutrientes

Los nutrientes son los compuestos químicos necesarios para el crecimiento y metabolismo de los organismos vivos (Mengel y Kirkby, 2000). Los nutrientes principales presentes en los DA son el nitrógeno y el fósforo.

Algunas de las fuentes naturales y antropogénicas de nutrientes en los cuerpos de aguas superficiales y subterráneos son la 1) precipitación, 2) disolución de minerales en el suelo o en formaciones geológicas, 3) descomposición de materia orgánica, 4) aplicación de fertilizantes, y 5) los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Estas fuentes de nutrientes son influenciadas principalmente por el uso de suelo, el drenaje del suelo, la geología y la profundidad del agua subterránea (Mueller y Helsel, 1996).

Debido a que los nutrientes se ven afectados por procesos químicos y biológicos que pueden cambiar su forma y transferirlos al agua, suelo, organismos biológicos y/o a la atmósfera, el riesgo de que contaminen el agua es latente. Tal como se muestra en la figura 5, la erosión del suelo y la lixiviación son importantes fuentes de aporte de nutrientes hacia los DA (Mengel y Kirkby, 2000).

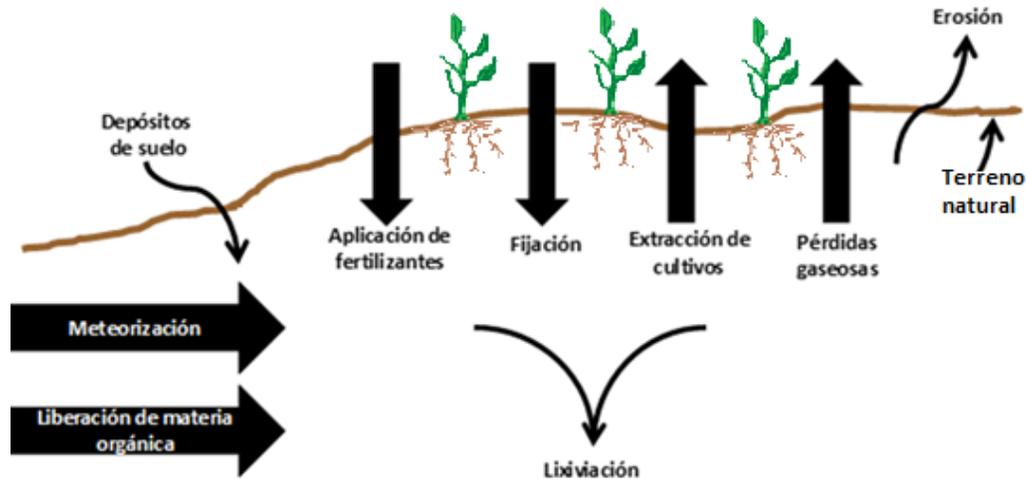


Figura 5. Ganancias y pérdidas de nutrientes en los suelos (Modificada de: Mengel y Kirkby, 2000).

En los últimos años la contaminación del agua por nutrientes ha sido uno de los temas, en materia ambiental, de mayor preocupación (Ongley, 1997). Si bien, son necesarios para la productividad en ecosistemas acuáticos y terrestres, concentraciones elevadas de ellos pueden ser una causa de contaminación del agua y puede tener efectos adversos sobre la vida acuática y la salud humana (Mueller y Helsel, 1996). De acuerdo con la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en Inglés) los nutrientes al igual que los contaminantes orgánicos son las dos principales causas de la degradación de la calidad del agua en ríos, lagos y estuarios en Estados Unidos (Mueller y Helsel, 1996; Escobar, 2003).

La concentración de nutrientes puede ser estimada mediante diferentes técnicas, una de las más utilizadas para la detección de contaminantes es la espectrofotometría (Sosa y Sánchez, 2004). El fundamento físico-químico de la espectrofotometría está relacionado con la capacidad que tienen las moléculas de absorber energía luminosa y almacenarla en forma de energía interna. La absorbancia es directamente proporcional a la concentración de moléculas en la muestra (Harris, 2003).

3.4.2. Fertilizantes

Debido a que la zona de estudio de esta investigación está localizada sobre un área cuyo uso de suelo predominante es el agrícola, una de las fuentes potenciales de liberación de nutrientes es la fertilización de los cultivos. Esta práctica antropogénica, consiste en la aplicación de sustancias de origen mineral a los cultivos agrícolas (Mengel y Kirkby, 2000).

Los fertilizantes más utilizados alrededor del mundo son los denominados NPK (nitrógeno, fósforo y potasio) también denominados macronutrientes, ya que éstos aportan los nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos (FAO e IFA, 2002).

El nitrógeno es esencial para el crecimiento de la planta, aumenta el contenido en proteína, participa en la fotosíntesis y forma parte de las células del cultivo. El fósforo interviene en la fotosíntesis, en el almacenamiento y transferencia de energía, en la división celular, promueve la formación y el crecimiento de las raíces. El potasio contribuye a evitar organismos invasores. Cada cultivo requiere de dosis de nutrientes específicas para su crecimiento, que de forma general su requerimiento está estrechamente relacionado con el rendimiento esperado (FAO e IFA, 2002).

3.4.3. Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, a pesar de su abundancia, no es un elemento común en la tierra dado que el reservorio principal de este elemento es la atmósfera. De forma natural su ocurrencia puede darse en la materia orgánica del suelo y de los océanos, rocas, sedimentos, guano y depósitos de carbón. Para comprender las reacciones, procesos y compuestos involucrados en la transformación del nitrógeno, es necesario analizar los componentes del ciclo hidrológico en suelos, derivados de la fertilización de los cultivos agrícolas (Mosier et al., 2013)

Dentro del ciclo del nitrógeno, la **fijación biológica** representa el proceso natural de mayor importancia, ya que resulta en la formación de compuestos orgánicos nitrogenados a partir del N_2 (nitrógeno gaseoso). Estos compuestos, pueden ser absorbidos directamente por las plantas, o bien, en algunas ocasiones deben ser mineralizados para que puedan ser aprovechados. Otras formas de fijación del nitrógeno son las descargas eléctricas en la atmósfera, así como aportes de N_2 en el agua de lluvia (Mengel y Kirkby, 2000).

Una vez fijado el nitrógeno en el suelo, éste es transformado a amonio (NH_4^+) por la acción de la biomasa microbiana. A su vez el NH_4^+ es oxidado a nitrato (NO_3^-) por microorganismos. Ambas formas (NH_4^+ y NO_3^-) pueden ser absorbidas o asimiladas por las plantas. En zonas de agrícolas, la transformación del nitrógeno orgánico en formas inorgánicas asimilables es de suma importancia en la nutrición de los cultivos (Mengel y Kirkby, 2000).

Otra componente importante en el ciclo del nitrógeno, es la **mineralización natural** del nitrógeno, la cual engloba dos procesos 1) **amonificación**, que es la transformación de nitrógeno orgánico a NH_4^+ y 2) **nitrificación**, que es la oxidación de NH_4^+ y NO_3^- . En cambio, la **inmovilización** representa la transformación de NH_4^+

y NO_3^- a nitrógeno orgánico. Estos tres procesos son realizados por bacterias y microorganismos presentes en el suelo (Levy et al., 2011).

En las parcelas agrícolas, el NH_4^+ originado por la amonificación o agregado como fertilizantes es oxidado rápidamente a NO_3^- (Levy et al., 2011). La nitrificación resulta de la liberación de H^+ , lo cual es una de las principales causas de la acidificación de los suelos producida por fertilizantes que contienen NH_4^+ como la urea, nitrato de amonio o el amoníaco anhidro (Mengel y Kirkby, 2000).

Las pérdidas del nitrógeno en los suelos, son atribuidas principalmente por la volatilización del amoníaco (NH_3), la desnitrificación, el lavado de los suelos y pérdidas por erosión. La **volatilización** del NH_3 se produce por la conversión de NH_4^+ a NH_3 , este proceso es de vital importancia cuando se realiza la fertilización de los cultivos con compuestos amoniacales o de urea, y se ve afectada por factores del suelo, tales como el pH, capacidad de intercambio catiónico, temperatura, humedad del suelo, así como de las características del fertilizante y el método de aplicación (Mengel y Kirkby, 2000).

La **desnitrificación** es la reducción biológica de NO_3^- a formas gaseosas, principalmente en óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno gaseoso (N_2), que se pierden en la atmósfera, ambas formas gaseosas generan impactos en el ambiente (Figura 6). Durante el lavado de NO_3^- la cantidad perdida en ecosistemas agrícolas dependen de la concentración de NO_3^- en el suelo y del volumen de agua aplicado, además de la frecuencia de los lavados. La erosión hídrica y eólica son una fuente importante de pérdidas de nitrógeno principalmente en la capa superficial del suelo (Levy et al., 2011; Silva et al., 2017).

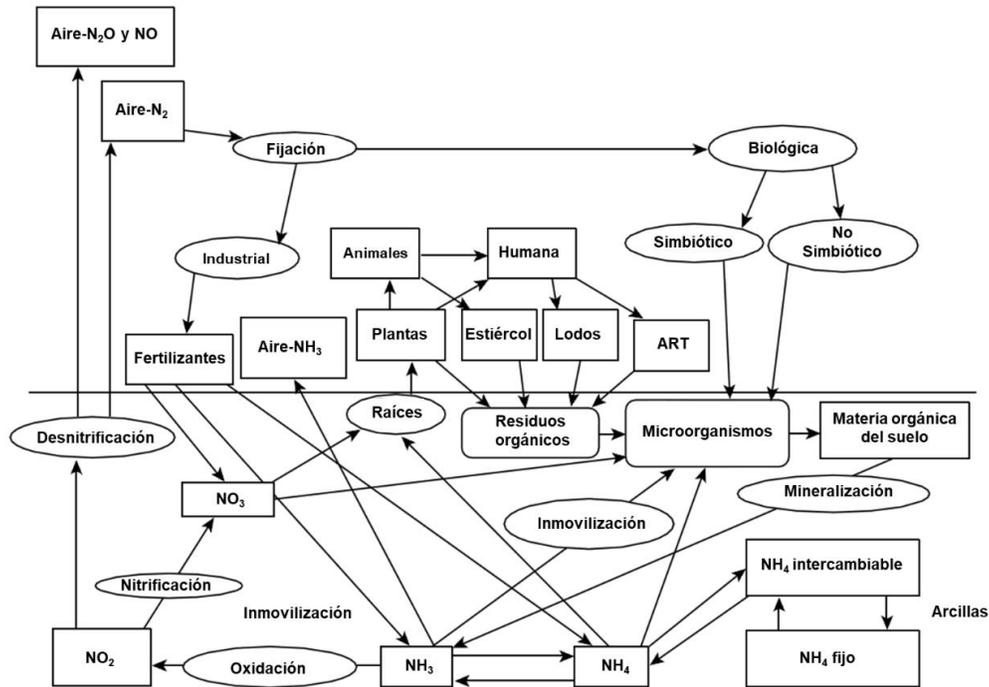


Figura 6. Ciclo del nitrógeno en el suelo (Modificado de Levy et al., 2011)

Aun con las pérdidas de nitrógeno, cantidades sustanciales de compuestos nitrogenados son acarreados a los drenes agrícolas, situación que impacta negativamente a la calidad de agua en los cuerpos de aguas receptores que usualmente son arroyos, ríos o estuarios (Skaggs et al., 2005; Silva et al., 2017). Generando preocupación, debido a los impactos negativos que pueden tener sobre la calidad del agua, ya sea por la eutrofización, el efecto sobre el contenido de oxígeno y la toxicidad para la vida acuática (Kadlec y Wallace, 2008). A su vez, estos procesos también aumentan el crecimiento de las plantas y estimulan los ciclos biogeoquímicos que se llevan a cabo en los drenes (Figura 7).

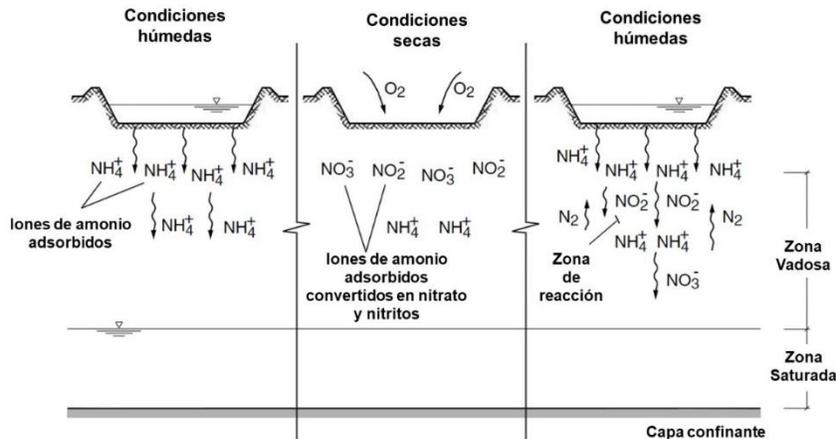


Figura 7. Transformaciones del nitrógeno en la zona vadosa, en condiciones húmedas y secas (Modificado de Metcalf et al., 2007).

A continuación, se hace una breve descripción de los compuestos derivados del nitrógeno que serán analizados en esta investigación:

Nitrato: es una de las formas en las que se puede encontrar el nitrógeno disuelto en el agua. Es un compuesto formado por nitrógeno y oxígeno, altamente soluble en el agua y estable en diferentes condiciones ambientales. Además, se transporta fácilmente en aguas subterráneas y arroyos (Mueller y Hesel, 1996).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) la concentración de nitrato en las aguas superficiales normalmente se encuentra debajo de 18 mg/L, sin embargo, las aguas de escorrentía agrícola suelen tener concentraciones mayores. La EPA, al igual que la NOM-127-SSA1-1994, establece 10 mg/L como concentración máxima en agua potable (EPA, 2018). En la normatividad mexicana se indica que concentraciones mayores a las recomendadas pueden ocasionar impactos negativos en la salud humana, ya que restringe el transporte de oxígeno en el torrente sanguíneo. En los infantes, esta condición es denominada como Metahemoglobinemia (síndrome del bebe azul) (Mueller y Hesel, 1996).

Nitritos: es una forma transitoria del nitrógeno y es la forma más peligrosa (Madramootoo et al., 1997). Los nitritos en concentraciones elevadas reaccionan dentro del cuerpo humano y pueden llegar a formar compuestos cancerígenos y tóxicos.

3.4.4. Fósforo

El fósforo es un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de los seres vivos, y, por lo tanto, es un elemento esencial en la producción agrícola. Sin embargo, la mayoría de los suelos poseen concentraciones más bajas que los requerimientos de los cultivos, por lo que se dice que son deficientes en formas de fósforo asimilable, por lo que en los sistemas de producción agrícola se requiere la aplicación de fertilizantes fosforados para lograr altos niveles productividad (Fernández, 2007).

De acuerdo con Song (2017) la aplicación de fósforo en cantidades superiores a las necesidades de los cultivos para asegurar los niveles de productividad deseados hace que los sistemas agrícolas se caractericen por ser grandes exportadores de fósforo, una fracción de las concentraciones de fósforo son transportadas aguas abajo a ríos, lagos o embalses. Una vez ingresado el fósforo al ecosistema acuático, una porción se retiene en los sedimentos, la otra es movilizadada en la columna de agua.

Los flujos de fósforo en ambientes acuáticos están determinados por una combinación de procesos fisicoquímicos y biológicos. Los procesos fisicoquímicos como la sedimentación, adsorción y la precipitación retienen fósforo en los sedimentos. Las interacciones reducción-oxidación (redox) son el mecanismo

dominante en los flujos de fósforo, por esta razón el oxígeno es el principal controlador de la carga de fósforo. En condiciones aeróbicas el fósforo permanece en los sedimentos de forma estable, en cambio, en condiciones anaerobias el fósforo retenido en los sedimentos se vuelve a movilizar liberándose en el agua (Song, 2017).

Los fosfatos son la única forma disuelta significativa de fósforo en el agua, son el resultado de la combinación del fósforo con oxígeno e hidrógeno. Este compuesto es moderadamente soluble y en comparación con los nitratos, no se transporta fácilmente en suelos y aguas. Los fosfatos tienden a permanecer unidos a las partículas del suelo. Sin embargo, la erosión puede transportar cantidades sustanciales de fosfato (USGS, 1996).

Los límites máximos permisibles en Estados Unidos establecidos por la EPA para el control de la eutrofización de los cuerpos de agua son de 0.05 mg/L para los fosfatos, en el caso del fósforo total las concentraciones máximas no deberán exceder 0.1 mg/L (Mueller y Hesel, 1996). La legislación mexicana establece en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximo permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, un límite máximo permisible de 10 mg/L de fósforo total para la protección de la vida acuática y para descarga en estuarios, como es el caso del DAPA.

3.4.5. Retención de nutrientes en drenes agrícolas

Estudios como los de Chen et al., (2010); Guo et al., (2011); Fu et al., (2014); Shen et al., (2016); Kumwimba et al., (2017), Nsenga et al., (2017b) y She et al., (2017); realizados en el continente asiático, otros como los de Van Kessel (1976); Borin y Troccheto (2007); Bulc et al., (2011); Pierobon et al., (2013); Castaldelli et al., (2015); Canga et al., (2016) realizados en Europa y Skaggs et al., (1994); Woltemade (2000); Cooper et al., (2004); Bouldin et al., (2004); Herzon y Helenius (2008); Moore et al., (2010); Kröger et al., (2011); Strock et al., (2010); Ahiablame et al., (2011); Adeuya et al., (2012); Iseyemi et al., (2016) y Moeder et al., (2017) realizados en el continente Americano, principalmente en Estados Unidos, han demostrado la capacidad que tienen los drenes agrícolas de retener hasta el 92% de los nutrientes en el agua. Cabe destacar que dicha retención se ve influenciada por procesos físicos, químicos y biológicos.

A diferencia del nitrógeno inorgánico, el fósforo inorgánico es retenido en los sedimentos de los drenes agrícolas por la sorción, la capacidad de retención de fósforo en los sedimentos se ve influenciada por la hidroquímica, particularmente por el potencial redox y el pH, por las características de los sedimentos, características del cauce y de la vegetación (Nedeelman et al., 2007).

La disminución de la concentración de nitrato en los drenes agrícolas está directamente relacionada con la actividad biológica, en cambio, la retención del amonio y del fósforo se debe a procesos fisicoquímicos (Dollinger et al., 2015) y, además, el pH del agua tiene implicaciones en las interacciones que ocurren en el agua y los sedimentos (Van Nguyen 2016).

La absorción de la planta puede ser una fuente importante de almacenamiento de nutrientes en drenes agrícolas, aproximadamente asimilan el 5% de los nutrientes, la capacidad de asimilación se ve influenciada por la concentración de los nutrientes en el agua, y el estado de la vegetación. Además, es importante mencionar que los nutrientes retenidos por la vegetación pueden ser liberados durante la temporada de inactividad de la planta (Dollinger et al., 2015).

3.5. Vegetación

Los flujos intermitentes que se presentan en los drenes agrícolas permiten el establecimiento de vegetación, por lo que es común identificar diferentes especies vegetales, tanto en las márgenes como en el lecho del canal, estas especies suelen ser acuáticas y terrestres con una gran capacidad de resistencia a la salinidad (Ritzema, 1994).

La vegetación establecida en los drenes es un elemento fundamental en el proceso de movimiento del agua, debido a que tiene efectos importantes sobre la magnitud del flujo, perfil de velocidad, aumenta la resistencia de flujo y provoca una reducción de la velocidad promedio (Ritzema, 1994; Kadlec y Wallace, 2008). La vegetación rígida no sumergida en los taludes y en el lecho del dren, disminuyen la capacidad de descarga de agua, sin embargo, esta capacidad de descarga puede beneficiarse si se aumenta la profundidad del agua (Wu, 2008).

Además de lo mencionado anteriormente, las funciones de la vegetación son muy variadas e importantes, forman parte de procesos como la transpiración y la captura de contaminantes, así como la resistencia al flujo, todas se relacionan con el tipo y densidad de la vegetación. Otra función importante de la vegetación, es provisión de hábitat para diversas especies, las terrazas y los taludes de los drenes ofrecen vegetación y suelos húmedos (Herzon y Helenius, 2008).

Existen muchos efectos que la vegetación puede tener sobre el proceso químico y la remoción de nutrientes en el agua, a través de procesos de asimilación y captura de sedimentos (Kumwimba et al., 2017). Por ejemplo, en el caso de la eliminación del nitrógeno, la vegetación tiene dos efectos directos 1) durante el ciclo de crecimiento de la planta, ésta almacena nitrógeno estacionalmente y posteriormente lo libera y 2) se crean nuevos residuos estables que contienen nitrógeno y, por lo tanto, tiene una implicación en el ciclo del nitrógeno (Kadlec y Wallace, 2008).

Existen especies vegetales como el Carrizo (*Phragmites australis*), Tule (*Typha latifolia* y *Typha domingensis*), Junco (*Scirpus atrovirens*), los cuales tienen la capacidad de eliminación de nitrato de hasta 70 a 85% (Kadlec y Wallace, 2008). Además, estas especies son capaces de producir oxígeno en sus raíces para contrarrestar las dificultades de crecer en ambientes anaeróbicos.

Además de las especies mencionadas anteriormente, en el Valle de Mexicali incluyendo sus DA, abunda el Pino salado (*Tamarix Ramossissima*); esta especie está considerada dentro de las 100 especies invasoras más dañinas del mundo de acuerdo con Aguirre Muñoz et al., (2009), debido a su potencial de propagación esta especie ha generado decrementos significativos en la diversidad de los bosques riparios (Mack et al., 2000).

Una práctica común de los agricultores, es mantener libre de vegetación los canales de drenaje con la finalidad de conservar su capacidad de descarga, este proceso se realiza a través de dragados y/o quema de la vegetación, sin embargo, las consecuencias suelen ser negativas en cuanto a la calidad de agua debido a dos razones, 1) las propiedades del material del lecho del dren se modifica con el dragado; 2) grandes concentraciones de nutrientes y otros contaminantes como pesticidas son liberados como resultado del dragado, impactando negativamente la calidad del agua (Dollinger et al., 2015; Kumwimba et al., 2017).

3.6. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos (SE) son aquellas funciones o procesos ecológicos que directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano y riqueza económica (Constanza et al., 1997; EEM, 2005; Camacho-Valdez y Ruiz-Luna, 2012; De Groot et al., 2010). La Evaluación de Ecosistemas del Milenio (EEM, 2003) clasificó a los SE como de suministro, regulación y servicios culturales, todos contribuyen directamente al bienestar de las personas, además de los servicios de base que mantienen y regulan a los demás servicios. A continuación, se enlistan las definiciones de los SE:

- Los **servicios de suministro** se refieren a los servicios de los ecosistemas que proporcionan un producto a las personas, como podrían ser: alimentos, fibras, agua, entre otros (EEM, 2003).
- Los **servicios de regulación** son los beneficios que las personas obtienen de los procesos que llevan a cabo los ecosistemas para mantenerse, y que al hombre le son útiles para disminuir o regular procesos que lo afectan, por ejemplo, los procesos de depuración de agua al fluir sobre un canal natural con cierto tipo de vegetación, la erosión del suelo por la acción del aire o la circulación de agua es aminorada por la presencia de vegetación. El mantenimiento de la humedad y temperatura en las inmediaciones de los

ríos, ayuda a regular el clima, por la presencia de agua y vegetación (EEM, 2003).

- Los **servicios culturales** son aquellos beneficios intangibles que las personas obtienen de los ecosistemas mediante el enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión y recreación. Entre ellos se encuentran las puestas de sol sobre alguna montaña o mar, o simplemente el sonido tranquilizador del agua al fluir en los ríos. Incluye los de recreación como el nadar en un lago tranquilo, o bien, caminar en una vereda rodeado de vegetación natural y poder observar y oír el canto de las aves (EEM, 2003). De igual forma incluye actividades como la pesca deportiva o la caza de especies permitidas.

Los DA cumplen con características específicas para proporcionar servicios ecosistémicos. Estudios como los Herzon y Helenius (2008) y Dollinger et al., (2015) han demostrado que efectivamente, los DA proporcionan una variedad de SE, por ejemplo, control de anegamiento, prevención de la erosión del suelo, recarga de aguas subterráneas, regulación del agua, retención de nutrientes, sedimentos y pesticidas, purificación del agua, así como la conservación de la biodiversidad. Si bien, los SE anteriormente mencionados son brindados por los DA, un diseño adecuado, el mantenimiento, la geometría (longitud, ancho, pendiente), características del suelo (textura y estructura) y las características funcionales (cobertura y vegetación) de los drenes agrícolas deben ser consideradas para maximizar los SE brindados por los mismos (Dollinger et al., 2015).

Como se puede observar en la figura 8 la provisión de los SE son el resultado de la combinación de procesos biológicos, geoquímicos y geofísicos, sin embargo, dependen en su mayoría, de los procesos hidrológicos que se realizan dentro de los mismos. Además, la mayoría de los procesos están involucrados de forma positiva en varios servicios y en algunos pocos se involucran de forma negativa (Tabla 1), las características de los drenes que influyen en la provisión de los SE se muestran en la tabla 2 (Dollinger et al., 2015).

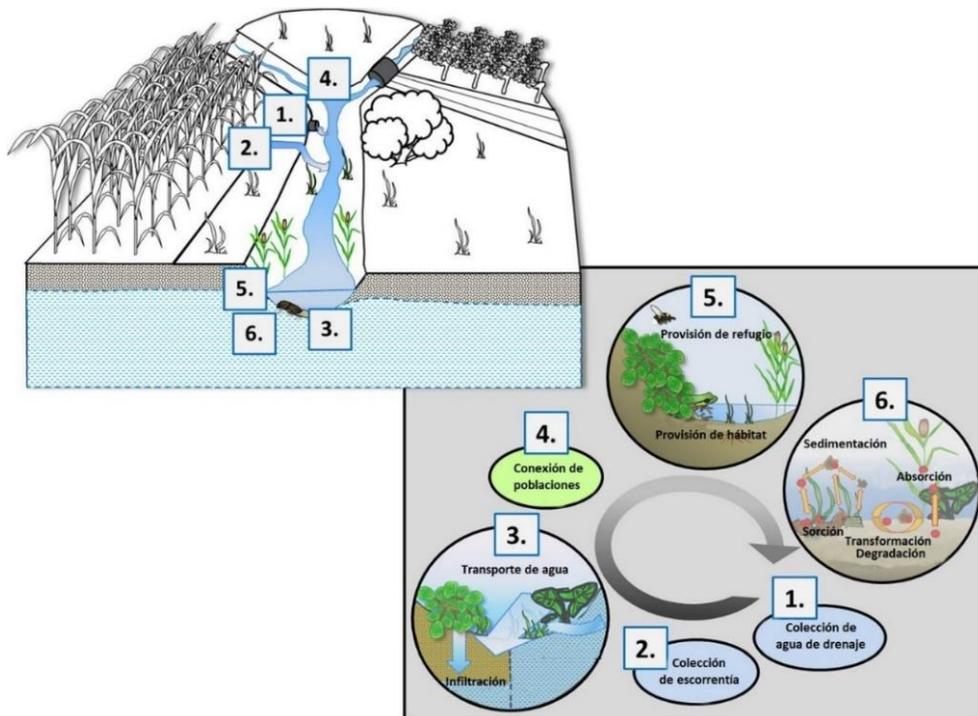


Figura 8. Procesos geoquímicos, geofísicos y biológicos que ocurren dentro de los drenes agrícolas (Modificado de Dollinger et al., 2015).

La evaluación de los SE es un tema que se encuentra en desarrollo. Actualmente existen diferentes métodos para su evaluación (Paruelo et al., 2011; Wratten et al., 2013; Brown et al., 2014). Sin embargo, la aplicación de cada uno dependerá de la información disponible, así como del área de estudio.

Por ejemplo, uno de los métodos utilizados en la evaluación de SE relacionados con el uso, provisión y calidad del agua es la modelización. En el caso de la evaluación del SE de provisión de hábitat, se ha aplicado ampliamente el estudio de la cobertura vegetal, así como la identificación de las especies que alberga el ecosistema. Ambas metodologías han sido aplicadas para evaluar el estado de los SE en México, particularmente en cuencas hidrográficas (INECC, 2018).

Tabla 1. Clasificación de los principales efectos de los procesos de los drenes agrícolas sobre los servicios ecosistémicos (Fuente: Dollinger et al., 2015)

Procesos	Control de anegamiento	Prevención de la erosión del suelo	Regulación de inundaciones	Recarga de agua subterránea	Purificación de agua			Conservación de la biodiversidad
					Sedimentos	Pesticidas	Nutrientes	
Hidrología								
Colección de escorrentía	+	+	-	+	-/(+)	-/(+)	-/(+)	+/-
Colección de agua subsuperficial	+	+	-		-/(+)	-/(+)	-/(+)	+/-
Infiltración			+	+	+	+/-	+/-	+/-
Transporte de agua	+	+	-	-	-	-	-	+/-
Erosión								
Sedimentación					+	+	+	+/-
Transporte y removilización					-	-	-	-
Pesticidas								
Sorción						+		+
Degradación						+		(+/-)
Adsorción de la planta						+		-
Nutrientes								
Sorción							+	+/-
Transformación							+	+/-
Adsorción de la planta							+	+/-
Biodiversidad								
Adsorción de la planta								
Provisión de hábitat						(+)	(+)	+
Refugio								+
Conexión de poblaciones								+

NOTA: El símbolo + indica un efecto positivo, en cambio el signo – indica un efecto negativo sobre los servicios ecosistémicos. Los efectos indirectos se indican entre paréntesis. Las casillas vacías indican que no existe relación conocida entre los procesos y los servicios proporcionados.

Tabla 2. Características de los drenes agrícolas que influyen en los procesos que se realizan dentro de los mismos (Fuente: Dollinger et al., 2015).

Procesos	Características de los drenes agrícolas							
	Cobertura vegetal	Morfología	Localización	Textura y estructura del suelo	Propiedades de los sedimentos	Propiedades del lecho	Biota	Topología de la red y alcance de conexión
Hidrología								
Colección de escorrentía		*	*					*
Colección de agua subsuperficial		*	*	*	*			
Infiltración	*	*		*	*	*		
Transporte de agua	*	*			*			*
Erosión								
Sedimentación	*	*						
Transporte y removilización								
Pesticidas								
Sorción	*			*		*		
Degradación	*						*	
Adsorción de la planta	*							
Nutrientes								
Sorción	*			*				
Transformación	*						*	
Adsorción de la planta	*							
Biodiversidad								
Provisión de hábitat	*					*		
Refugio	*					*		
Conexión de poblaciones	*							*

3.7. Hábitat y aves

Los DA tienen una estrecha relación con la provisión de hábitat para especies, en el caso particular de las especies acuáticas; sin embargo, también pueden generar un impacto negativo en el hábitat, debido a que la variabilidad de los flujos de agua depende de la temporada de riego y, además, a la baja calidad del agua que transportan (Blann et al., 2009). No obstante, el ambiente húmedo, no profundo y terrazas con vegetación permiten que otro tipo de especies, como las aves, utilicen los DA como hábitat y refugio, ya sean especies residentes o migratorias (Hands et al., 1991; Herzon y Helenius, 2008; Dollinger et al., 2015).

Para analizar el servicio ecosistémico de la provisión de hábitat se requiere del monitoreo de aves. Existen diferentes métodos para el monitoreo y censo de aves, entre los más comunes se encuentran el Conteo por puntos, Mapeo de parcelas y Conteo por búsqueda intensiva, la selección del método dependerá de los objetivos, así como del alcance geográfico requerido (Ralph et al., 1996). El método de Conteo por búsqueda intensiva, es uno de los más utilizados ya que ofrece varias ventajas (Tabla 3), entre ellas se encuentra la relación con el hábitat, un error potencial moderado, así como la posibilidad de aplicarlo fuera de la época reproductora de las aves (Ralph et al., 1996).

Tabla 3. Características y usos del método de Búsqueda Intensiva (Fuente: Ralph, 1996).

Variables y características	Conteo por Búsqueda Intensiva
Variables medidas	
Tamaño poblacional	Si
Densidad	No
Sobrevivencia adultos	No
Sobrevivencia juvenil	No
Productividad	No
Reclutamiento	No
Relación con el hábitat	Si
Tamaño de la nidada	No
Depredación/Parasitismo	No
Identificación individual	No
Estado reproductor conocido	No
Características generales	
Tipos de hábitat medidos	Mayoría
Especificidad del hábitat	Buena
Detección de especies raras	Buena
Detección de especies dosel	Buena
Conocimiento del área	Si
Tamaño del área cubierta	Pequeño
Error potencial	Moderado
Uso fuera de época reproductora	Si
Escala de aplicación	Amplia

El método aplicado durante este proyecto para el análisis de provisión de hábitat del DAPA, fue el de búsqueda intensiva, así como para identificar a especies residentes y migratorias que utilizan el dren como una zona de refugio y/o descanso durante su migración. Este método, consiste básicamente en efectuar una serie de tres censos de 20 minutos cada uno, en tres áreas distintas que el observador recorre por completo en busca de aves (Ralph, et al., 1996) y ha sido aplicado exitosamente en estudios como el de Atkinson et al., (2006); Martínez et al., (2010) y Arguedas y Céspedes (2014).

3.8. Modelización hidrodinámica de flujo en dos dimensiones

La modelización matemática de un cauce superficial consiste en intentar conocer los valores que toman las variables hidráulicas (tirante de agua, velocidad, caudal, entre otras) a partir de la resolución de ecuaciones por métodos numéricos. La modelización es siempre una aproximación a la realidad y dependerá de cuanto se adapten las ecuaciones de partida y el esquema numérico de resolución al fenómeno que se está estudiando (Bladé, 2006). La modelización de aguas superficiales provee información valiosa para la identificación de la provisión de servicios ecosistémicos hidrológicos.

Entre los códigos de simulación para agua superficial se encuentra el programa HEC-RAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidráulica (HEC por sus siglas en inglés) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés). HEC-RAS es un programa de uso libre, el cual permite representar y modelizar redes fluviales, así como considerar elementos especiales como puentes, compuertas, tuberías, etc., bajo diferentes condiciones de flujo. Además, permite simular el flujo en forma unidimensional (1D) y bidimensional (2D) en condiciones permanentes y no permanentes (USACE, 2016).

En la modelización de cauces es necesario recurrir a un modelo 2D cuando existen meandros o llanuras de inundación con condiciones geométricas específicas (por ejemplo, pendientes pequeñas, profundidades someras) y se requiera representarlas con una mejor aproximación a la realidad. Otro caso en el que se recurre a la modelización en 2D es para estudiar tramos cortos de cauces, cuando existen cambios pronunciados en el ancho de los cauces, es decir ensanchamientos y estrechamientos, los cuales provocan cambios en las condiciones hidráulicas de tirante de agua y velocidad, así como cambios en los patrones de las zonas de recirculación.

3.8.1. Esquema numérico utilizado por HEC-RAS

En el contexto de la modelización de canales e inundaciones HEC-RAS, utiliza un conjunto de ecuaciones simplificadas a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, las ecuaciones resultantes son conocidas como ecuaciones de Aguas Someras

(SW, *Shallow Water*). Estas ecuaciones utilizadas por HEC-RAS asumen que el flujo es incomprensible, densidad y presión hidrostática uniforme, además supone que la escala de longitud vertical es más pequeña que la horizontal (USACE, 2016). Por lo tanto, en los modelos 2D se trabaja sobre un dominio con tres variables definidas en cada punto del dominio: el tirante de agua y las dos componentes de velocidad horizontal (Ecuaciones 5 y 6).

Distancia horizontal en la dirección x:

Ecuación 5.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f v + f v$$

Cambios de velocidad respecto al tiempo
Gravedad
Coefficiente de fricción

Inercia
Viscosidad
Fuerza de Coriolis

Distancia horizontal en la dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f u + f u$$

Ecuación 6.

Donde u y v son los componentes de velocidad en la dirección x y y , g es la aceleración gravitacional, v_t es el término de viscosidad de Eddy, C_f es el coeficiente de fricción del lecho y f es el parámetro de Coriolis (USACE, 2016).

Además de las ecuaciones de Saint Venant, HEC-RAS permite elegir entre dichas ecuaciones y las de Onda Difusa en 2D para realizar la modelización. De acuerdo con Lluén Chero (2015), las ecuaciones de Onda Difusa en 2D (Ecuaciones 7 y 8) permiten que el software procese la información rápidamente y tiene mayores propiedades de estabilidad, sin embargo, las ecuaciones de Saint-Venant 2D son aplicables a una gama más amplia en la resolución de problemas (Bladé et al., 2014).

Distancia horizontal en la dirección x:

$$-g \frac{\partial H}{\partial y} - c_f u$$

Ecuación 7.

Distancia horizontal en la dirección y:

$$-g \frac{\partial H}{\partial x} - c_f v$$

Ecuación 8.

3.8.1.1. Métodos de resolución numérica

El esquema numérico de resolución que HEC-RAS utiliza es el de volumen finito implícito, este algoritmo de solución implícita permite pasos de tiempo (*time steps*) computacionales más grandes que los métodos explícitos. La solución de volúmenes finitos proporciona mayor estabilidad y robustez que las técnicas de diferencias finitas. Además, con el uso de volúmenes finitos se consigue que el mojado y el secado de las zonas del cauce tenga mayor estabilidad y proporcione soluciones estables en situaciones de flujo en regímenes subcrítico, crítico y mixto (USACE, 2016).

3.8.1.2. Ventajas y limitaciones de HEC-RAS.

De acuerdo con Etkin (2016) y Lluen-Chero (2015) el uso de HEC-RAS para una modelización presenta diversas ventajas y desventajas las cuales se enlistan a continuación.

Ventajas:

- Es un software de dominio público, no requiere licencia.
- Incluye una herramienta RAS Mapper para realizar el pre y post proceso de la modelización.
- Se pueden integrar modelos unidimensionales.
- Las celdas pueden iniciar en estado seco.
- Permite pasos de tiempo mayores.
- Puedes crear mallas no estructuradas flexibles.
- Las celdas no tienen fondo plano y se pueden dimensionar de acuerdo a las características del terreno.
- Utiliza el enfoque de volumen finito implícito lo que mejora la estabilidad del modelo.

Algunas de las limitaciones que tiene HEC-RAS respecto a la modelización bidimensional se encuentran:

- La herramienta de edición de malla es limitada.
- La capacidad de modelizar estructuras hidráulicas está limitada, tal es el caso de los puentes, ya que no se pueden modelizar en un área bidimensional.
- No se puede realizar la simulación de transporte de sedimentos producto de la erosión o deposición dentro de un área bidimensional.
- No se puede realizar la simulación de calidad de agua dentro un área bidimensional.
- La modelización está limitada por la calidad de la batimetría.

4. Metodología

4.1.1. Identificación de la cuenca de captación del dren Ayala

Con la finalidad de definir la subcuenca de captación del DAPA, se realizó el trazado de los drenes agrícolas de los módulos de riego aledaños al dren, es decir, los módulos 2, 21 y 22 del Distrito de Riego 014 Río Colorado.

El procedimiento de trazado de los drenes agrícolas se realizó en GoogleEarth®, en este programa se trazaron líneas sobre los drenes agrícolas que se ubican dentro de los módulos de riego de interés. Una vez trazados los drenes agrícolas, se exportaron las líneas correspondientes a los drenes agrícolas a un programa de información geográfica. En este caso, el programa utilizado fue ArcGIS® en su versión 10.2.1, se importaron las líneas y se procedió al trazado de la subcuenca. Una vez trazada la cuenca, se estimó la extensión con la herramienta de cálculo de superficie del ArcGIS®.

La cuenca del DAPA abarca aquellas parcelas que tienen influencia sobre los DA que confluyen en el DAPA e incluye la descarga del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales, ubicada en el ejido Estación Coahuila.

4.2. Balance hidrológico

4.2.1. Flujo de entrada y salida:

El flujo de entrada del DAPA corresponde a los flujos de retorno agrícola de los Módulos de Riego 2, 21 y 22. En cambio, el flujo de salida en esta investigación se considera el flujo en la última estación de aforo. Dado que estos flujos no son constantes, fue necesario seleccionar diferentes sitios de aforo y muestreo para representar los cambios en las aportaciones de los drenes que confluyen en el DAPA.

Para la selección de los sitios de muestreo de agua y de aforo se realizó un recorrido de campo a lo largo del DAPA, se seleccionaron 3 sitios, cuyas ubicaciones geográficas se muestran en la figura 9. En el proceso de selección se consideró la accesibilidad y la limpieza del canal, para la medición de caudal, además de las condiciones particulares mencionadas a continuación:

- El sitio 1, denominado “Ayala#1”, se localiza 20 metros aguas abajo de la carretera estatal 4, fue seleccionado debido a que permitió cuantificar las entradas de agua provenientes del dren Camacho y además de evaluar la concentración de nutrientes en el agua de ambos drenes antes del aporte del efluente de agua residual tratada de la PTAR Estación Coahuila. En este sitio a partir del mes de enero de 2017 no fue aforado debido a la presencia de basura en el cauce.

- El sitio Ayala #2, se ubica 3 km aguas abajo del sitio Ayala #1, y se localiza después de la confluencia con el dren Ortega, lo cual permitió estimar las entradas de agua provenientes del dren Ortega y de la descarga del efluente de la PTAR Estación Coahuila.
- El sitio Ayala #3, se ubica 3 km aguas abajo del sitio Ayala #2 antes de la confluencia con el dren Perimetral. El monitoreo en este sitio permitió estimar el volumen descargado de la zona de estudio y la concentración de nutrientes para evaluar la depuración del agua en la zona de estudio. Sin embargo, del mes de septiembre el tirante de agua disminuyó de tal forma que no fue posible realizar las mediciones, razón por la cual se seleccionó el sitio Ayala #4, ubicado 100 metros aguas abajo, en la zona en la cual el ancho del cauce se reduce (Figura 9).

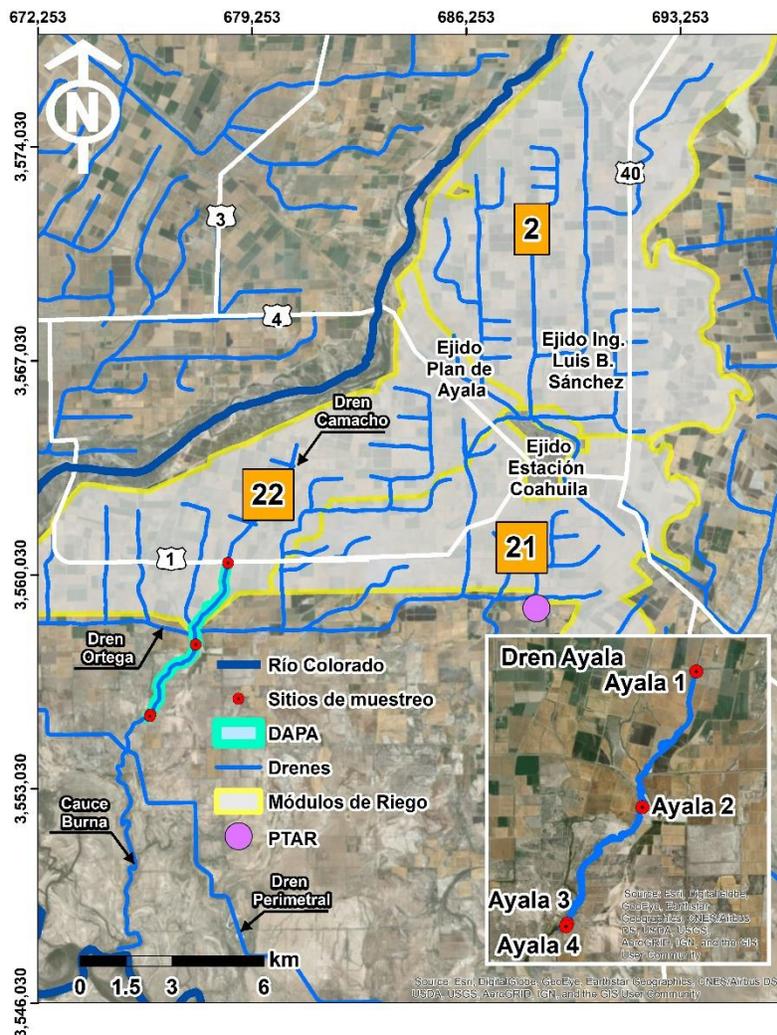


Figura 9. Ubicación de los sitios de muestreo y medición de caudal.

Para determinar los flujos de agua superficial de entrada y salida se utilizó un Velocímetro Doppler Acústico FlowTracker, de la marca SonTek/YSI el cual mide velocidades y posteriormente con la ecuación de la sección media (ver apartado 3.3.3) estima el caudal. El dispositivo tiene un rango de medición de velocidades entre ± 0.001 y 4 m/s, una precisión de la velocidad medida de $\pm 0.1\%$ (± 0.25 cm/s). De acuerdo con Lomeli-Banda (2013) este dispositivo es el de más alta calidad en el mercado y es ampliamente utilizado por el USGS.

Para realizar el monitoreo de los sitios, se utilizó el protocolo de medición de agua superficial con equipo FlowTracker del USGS. El procedimiento para la medición de velocidad consistió en colocar una cinta graduada de forma transversal a la corriente, después se procedió a dividir la sección en 20 para determinar el ancho de cada estación (Figura 10). En el FlowTracker, se registró el nombre de la estación, la fecha del aforo, la salinidad del agua la cual es medida previamente con una sonda multiparamétrica, posteriormente se inició el aforo en la margen izquierda de la sección. En cada estación se registró el calado y se realizaron 20 mediciones de velocidad a 0.60 ó 0.2 y 0.8 metros del tirante de agua. Para la medición de la velocidad, la sonda del FlowTracker se colocó de forma perpendicular a la sección de acuerdo con los estándares ISO 748 (1997) y 9196 (1992).

Una vez finalizado el aforo, el FlowTracker estimó el caudal automáticamente en m^3/s utilizando el método de la sección media, y en una computadora se descargó la información a través del software SonTek FlowTracker® el cual genera un reporte del aforo realizado (Anexo 6.1).

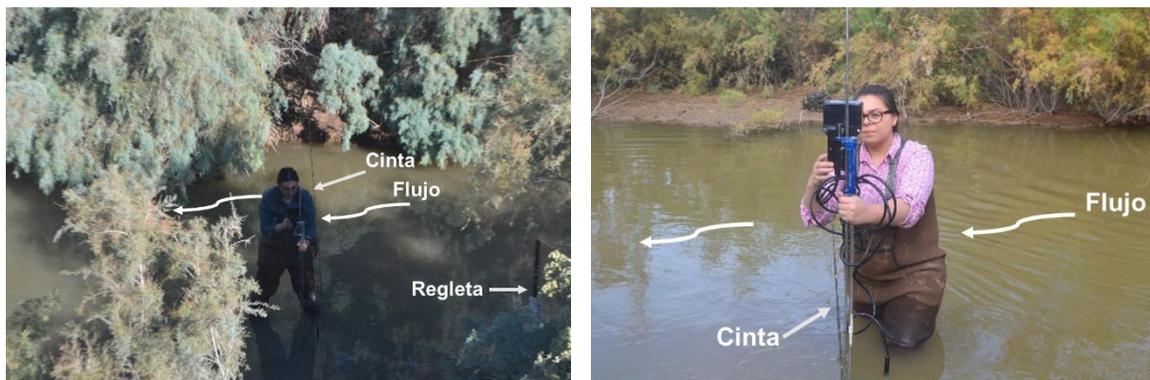


Figura 10. Realización de aforos para medir caudal.

De forma adicional, para tener el registro de los tirantes de agua en cada sitio de aforo se instalaron limnímetros de fibra de vidrio de 1.20 m de altura graduados a cada centímetro, fijados a un ángulo de acero. Se colocaron en lugares poco visibles y en donde no afectarían el paso con lancha o canoa en el dren, para evitar que fueran removidas (Figuras 11 y 12). Durante cada visita de campo se registró el valor de tirante de agua en el limnómetro. Posteriormente con un equipo de Sistemas

de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) diferencial se nivelaron las regletas para conocer la elevación del espejo del agua referida al nivel medio del mar.



Figura 11. Limnómetro instalado en el sitio Ayala #1.



Figura 12. Limnómetro instalado en el sitio Ayala #2.

Los registros de los limnómetros se utilizaron para realizar relaciones caudal-tirante de agua y obtener las ecuaciones de correlación entre ambas variables. Estas ecuaciones te permiten estimar una de las dos variables en la función. Esta metodología se utilizó para estimar el caudal del sitio Ayala #1 para los meses de enero y febrero de 2017 teniendo como variable conocida el tirante de agua registrado en el limnómetro.

Es importante destacar que el ajuste de correlación relacionado se realizó de tipo lineal debido a que de acuerdo con la literatura (Bracca, 2008 y Salcedo-Peredia, 2016) este comportamiento se presenta cuando el cauce no se desborda, como en el DAPA.

4.2.2. Datos meteorológicos

Las variables meteorológicas fueron adquiridas del monitoreo realizado por la estación meteorológica denominada “Colonia Medano” marca Adcon, perteneciente a la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS). La estación está ubicada a 17 km del DAPA en la colonia que lleva el mismo nombre que la estación, en el municipio de San Luis Río Colorado, Sonora (Figura 13).

Los datos meteorológicos utilizados en esta investigación corresponden al período de febrero de 2016 a febrero de 2017, con un intervalo de adquisición de datos de 10 minutos. Las variables que la estación registra son:

- Temperatura máxima (°C)
- Temperatura mínima (°C)
- Temperatura promedio (°C)
- Humedad relativa (%)

- Precipitación (mm)
- Velocidad de viento (km/hr)
- Ráfaga de viento (k/mhr)
- Dirección de viento (°)
- Presión barométrica (mb)

El sensor de temperatura instalado en la estación meteorológica corresponde al denominado TR1, el cual tiene una precisión de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ a $+20^{\circ}\text{C}$ y cuenta con un rango de medición de -40°C a $+60^{\circ}\text{C}$.

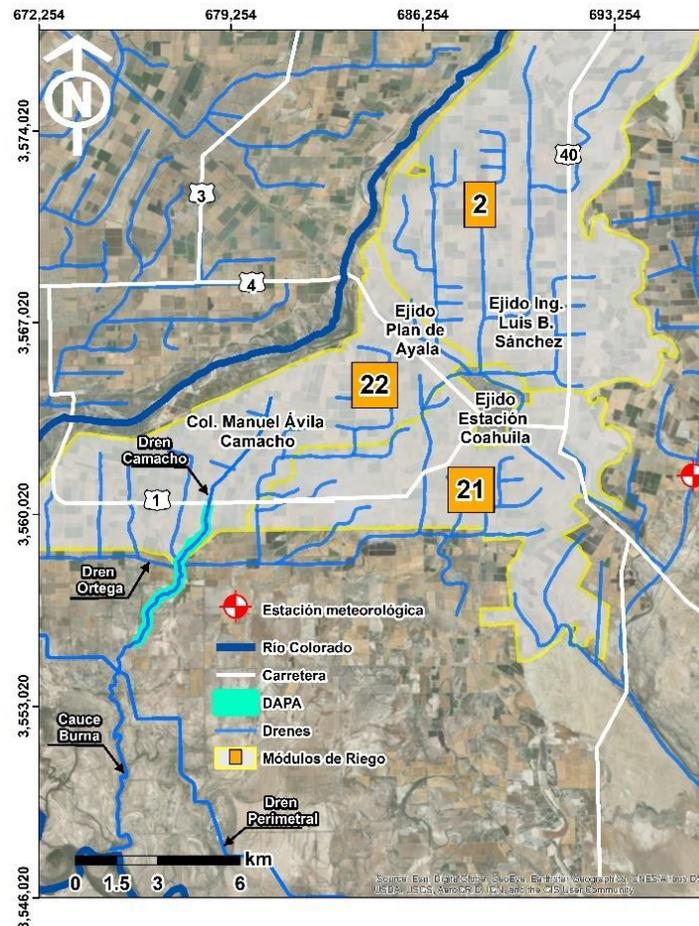


Figura 13. Ubicación de la estación meteorológica “Colonia Medano”.

Para la estimación de elementos del balance se requiere de datos meteorológicos diarios, por lo que fue necesario realizar un post proceso de los datos. Dicho post proceso, consistió en filtrar los datos de tal forma que se obtuvieran horarios, posteriormente estos fueron analizados para obtener el valor de temperatura máximo y mínimo en las 24 horas del día correspondiente, respecto a las demás variables meteorológicas los datos horarios correspondientes a cada día se promediaron para obtener un valor diario.

4.2.3. Precipitación

La precipitación también es uno de los procesos que aporta agua a la zona de estudio, por ello de los registros adquiridos de la estación meteorológica se obtuvieron los datos de precipitación, se trasladaron a formato útil para analizarlos y agregar esta componente del balance hidrológico.

4.2.4. Evaporación y evapotranspiración

La evaporación y evapotranspiración fueron calculadas de manera separada. Ambas fueron estimadas con las variables meteorológicas de la estación Meteorológica Colonia Medano del REMAS.

La evaporación diaria del agua fue estimada con el Método de Penman descrito anteriormente en el marco teórico (Ecuación 3). En el caso de la evapotranspiración se estimó utilizando la Ecuación Estandarizada para Cultivos Altos y Ásperos de Penman-Monteith, simplificada por la ASCE (Ecuación 4). Para conocer los volúmenes evaporados y evapotranspirados fue necesario conocer la superficie de cobertura vegetal del DAPA así como la superficie de agua libre.

4.2.5. Vegetación

La cobertura vegetal del DAPA se analizó mediante la adquisición y procesamiento de imágenes aéreas adquiridas con un vehículo aéreo no tripulado (drone).

Se realizaron tres campañas (10 de febrero, 17 de marzo y 7 de abril del 2017) para la adquisición de fotografías para lo cual se utilizó un drone Phantom 3 Professional® de la compañía DJI, equipado con una cámara fc300x 4k de 12 megapíxeles y GPS (Figura 14). Para la captura de las imágenes se diseñaron tres planes de vuelo en el software DroneDeploy®, éstos fueron a una altura de 70 m para obtener una resolución de 2 cm/pixel.

En campo se definieron 8 puntos de control para las imágenes aéreas, distribuidos uniformemente en el área de estudio con la finalidad de realizar ajustes durante proceso de generación del ortomosaico. Los puntos de control consistieron en cartulinas de color fluorescente y negro divididas en cuadrantes. En el cruce de los cuadrantes se les colocó una varilla (Figura 15). Estas varillas fueron niveladas topográficamente con un GPS Topcon GR-5 en modo cinemático en tiempo real (Rodríguez-Burgeño, 2012).

En total se adquirieron 1,525 imágenes del DAPA, incluyendo el cauce y sus taludes, post procesadas con el software Agisoft PhotoScan (Agisoft, 2017). El primer paso del proceso, consistió en la alineación de las imágenes, posteriormente se rectificó la alineación con los puntos de control previamente establecidos.



Figura 14. Dron utilizado para la adquisición de imágenes aéreas



Figura 15. Procedimiento de calibración del equipo.

Una vez alineadas y rectificadas las imágenes se procedió a generar la nube de puntos, posteriormente se obtuvo el ortomosaico, el cual fue exportado a ArcGIS® para realizar la clasificación de la cobertura.

La composición de un mosaico de fotos aéreas tomadas con un dron para toda la zona de estudio y el análisis de clasificación supervisada permitió estimar la cobertura del DAPA. La zona de influencia del DAPA con la vegetación riparia fue considerada incluyendo el canal principal (superficie inundada), los taludes (cubiertos de vegetación y zonas desnudas) y la rasante del canal hasta el inicio de los caminos de terracería a la superficie agrícola.

Para la clasificación de la cobertura se aplicó la clasificación supervisada con el algoritmo de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood), en la cual se determinaron tres clases de cobertura: 1) agua, 2) suelo desnudo y 3) vegetación. Este procedimiento se presenta de manera resumida en la figura 16. Las superficies de agua y vegetación estimadas fueron utilizadas para estimar volúmenes de agua evaporados y evapotranspirados.

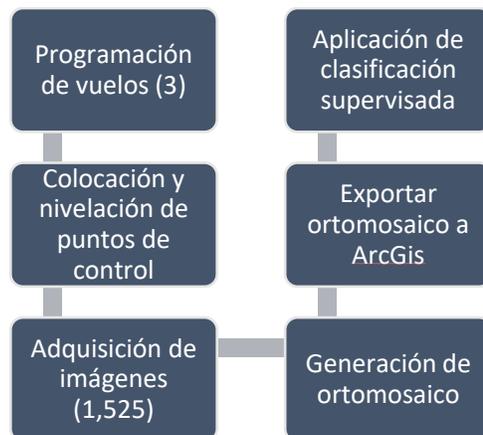


Figura 16. Procedimiento de la adquisición de imágenes aéreas y clasificación de la cobertura.

4.3. Calidad del agua

Analizar la calidad del agua para estimar la depuración de la misma, es uno de los pasos importantes en esta investigación. Para el análisis de la calidad del agua fue necesario realizar trabajo de campo, de análisis en laboratorio, así como de análisis e interpretación de los datos. A continuación, se detallan las actividades que se realizaron en esta parte del proyecto.

4.3.1. Adquisición de muestras

La adquisición de muestras de agua para el análisis de nutrientes se realizó quincenalmente en los tres sitios de aforo (Ayala #1, Ayala #2, Ayala #3-Ayala #4), durante el período comprendido entre febrero del 2016 a noviembre del 2016

El procedimiento, se realizó siguiendo el protocolo descrito en el Manual de campo para el muestreo de la calidad del agua de la Universidad de Arizona (University of Arizona et al., 1995). En el caso del sitio Ayala#1 el muestreo fue de tipo simple instantáneo y en los sitios Ayala #2, Ayala #3-Ayala #4 el muestreo fue de tipo compuesto.

Las muestras se obtuvieron en botellas de plástico de 750 ml, enjuagadas previamente tres veces con agua del sitio. En el sitio Ayala #1 la muestra se colectó al centro de la sección de aforo. En los sitios Ayala #2, Ayala #3 y Ayala #4, se midió el ancho de la sección del dren, posteriormente se dividió en segmentos de 30 cm, en cada segmento se colectó una submuestra la cual se vació a una cubeta de plástico previamente preparada para la recepción de la muestra compuesta (Figura 17). Una vez adquiridas todas las submuestras en la cubeta, se homogenizó con una espátula de plástico previamente lavada (Figura 18), después se llenó la botella de plástico y se procedió a realizar el etiquetado de la misma.

Las muestras recolectadas fueron transportadas refrigeradas para conservarlas a 4°C, una vez que se llegó al laboratorio se almacenaron en un sistema de enfriamiento hasta que se realizó su análisis.



Figura 17. Colecta de agua en el sitio Ayala #3



Figura 18. Muestra de agua homogenizada

En cada muestreo se midió temperatura, pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos (STD). Para la medición de dichos parámetros físico-químicos se utilizaron dos sondas multiparamétricas, HANNA HI 991301 (de febrero a agosto de 2016) y YSI 556 MSI (de agosto a noviembre 2016).

Con la finalidad de que las mediciones de los parámetros físico-químicos fueran representativas de los sitios Ayala #2, Ayala #3 y Ayala#4, se realizaron tres mediciones, una en cada margen y otra al centro de la sección. En el caso del sitio Ayala #1 solo se realizó una medición al centro del cauce, debido a que esta sección es estrecha.

4.3.2. Método de análisis de nutrientes

El análisis de nutrientes se realizó en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Se utilizó un espectrofotómetro SMART® espectro LaMotte.

Los nutrientes analizados fueron nitrato (NO_3), nitrito (NO_2), amonio (NO_4), fosfatos (PO_4), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). Cada uno fue analizado en base al método establecido por el fabricante del equipo. Las concentraciones se reportan en mg/L. La concentración de nutrientes en el agua se multiplicó por el caudal para estimar el flujo másico.

4.3.3. Retención de nutrientes

La tasa de retención de nutrientes (%) se calculó en base a la diferencia de concentración entre la entrada y la salida de la zona de estudio, es decir entre sitios, Ayala #1 a Ayala #2 y Ayala #2 a Ayala #3-#4.

$$R(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100 \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde **R** representa la tasa de retención del nutriente en porcentaje, C_{in} y C_{out} son las concentraciones del nutriente disuelto en la entrada y salida respectivamente. Esta misma metodología fue aplicada para evaluar el servicio ecosistémico de depuración de agua.

De tal forma que, si se obtienen tasas de retención positivas se indica que efectivamente existe retención de nutrientes y provisión del servicio ecosistémico, en cambio, valores negativos indican aumento en la concentración de nutrientes e impacto negativo en el servicio ecosistémico.

4.4. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos fueron evaluados de acuerdo con lo descrito en otros trabajos referidos en el marco teórico de esta investigación. En el caso de la depuración del agua, la metodología aplicada fue el análisis de la remoción de nutrientes en el agua y la provisión de hábitat se analizó mediante un censo de aves.

La modelización hidrodinámica permitió estimar la superficie de agua, tal como lo menciona Hinojosa-Huerta et al., 2014, es la característica más importante relacionada con el hábitat para las especies, además conocer la el tirante de agua en el DAPA permitirá conocer las áreas en las que puede establecerse vegetación acuática para aumentar la capacidad de remoción de nutrientes.

4.4.1. Servicio ecosistémico de provisión de hábitat

El servicio ecosistémico de provisión de hábitat se evaluó realizando un conteo de aves con el método de Censo de Búsqueda Intensiva (Ambrose, 1989), dicho conteo se realizó en el mes de febrero del 2016, la finalidad fue identificar a las especies residentes y migratorias que utilizan al dren agrícola como hábitat, refugio o como sitio de descanso durante su migración.

El Censo de búsqueda intensiva consiste en efectuar una serie de tres censos de 20 minutos cada uno, en tres áreas distintas que el observador recorre por completo en busca de aves (Ralph, et al., 1996). Esta metodología fue aplicada por investigadores del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. los cuales realizaron un conteo de aves a lo largo de los 6 kilómetros longitudinales de la zona de estudio. Las aves avistadas durante los recorridos fueron anotadas en una hoja de campo en la cual se indicó la especie, la familia, así como número de individuos avistados.

4.5. Modelización hidrodinámica del DAPA

La modelización hidrodinámica se realizó en un tramo de 600 m longitudinales localizados al Sur del DAPA. El modelo tiene una superficie de dominio de 3.26 ha. Esta superficie fue seleccionada, debido a que se ubica aguas debajo de las confluencias con los drenes Camacho, Plan de Ayala y Ortega. Además de ser una zona que se encuentra dentro de los polígonos del sitio Ramsar #814 Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado y es una zona establecida como prioritaria para la conservación en el Delta del Río Colorado.

La modelización se realizó en HEC-RAS en su versión 5.0.3. (USACE, 2016) y en el software comercial GeoHecRas (CivilGEO, 2018). De forma general la metodología y los datos requeridos para la construcción del modelo hidrodinámico se esquematizan en la figura 19.

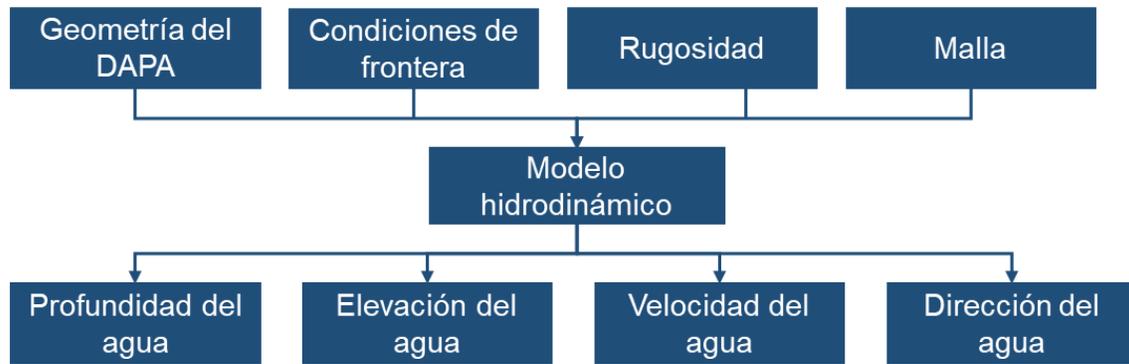


Figura 19. Datos de entrada y salida del modelo hidrodinámico.

4.5.1. Geometría del DAPA.

La geometría del cauce se adquirió mediante un levantamiento topobatimétrico del DAPA. Se utilizó un equipo GPS de doble frecuencia marca Topcon Modelo GR-5 (Figura 20). Para ello fue necesario colocar un punto con coordenadas conocidas (punto de referencia) en la zona de estudio. Se localizó el banco de nivel más cercano al dren, en este caso fue la mojonera denominada “MOJO9” cuyas coordenadas se muestran en la tabla 4 (Figura 21). Posteriormente, se realizó un levantamiento estático de dos horas en el punto de referencia y MOJO9, con la finalidad de conocer las coordenadas X, Y y la elevación del punto de liga (Tabla 5).

Tabla 4. Coordenadas del punto de liga utilizado en el DAPA (UTM WGS84 Zona 11N en X y Y, y datum NAVD88 en la vertical).

Referencia	X (m)	Y (m)	Z (m.s.n.m.)
MOJO9	678,491.097	3,548,014.6	5.022

El punto de liga se colocó estacando una varilla de acero corrugado de 50 cm cuyas coordenadas se muestran en la [tabla 6](#). Una vez conocidas las coordenadas del punto de liga, se realizaron dos campañas de levantamiento topobatimétrico, una de ellas en el mes de octubre de 2017 y la otra en enero de 2017.

Tabla 5. Coordenadas del punto de liga utilizado en el DAPA (UTM WGS84 Zona 11N en X y Y, y datum NAVD88 en la vertical, Z).

Punto de liga	X (m)	Y (m)	Z (m.s.n.m.)
PL-DA	677,524.559	3,558, 557.74	7.358

El levantamiento topobatimétrico se realizó utilizando el GPS en modo cinemático en tiempo real (*Real Time Kinematic, RTK*) mediante la adquisición de puntos en secciones separadas entre sí 20 a 40 m, aproximadamente. Durante la obtención de puntos del cauce, se buscó caracterizar la geometría del dren, por lo que se adquirieron puntos de las terrazas de inundación, del lecho del dren, así como de los taludes.



Figura 20. Equipo GPS GR-5 utilizado para el levantamiento topobatimétrico



Figura 21. Banco de nivel MOJO9, utilizado para colocar puntos de liga en el dren Ayala



Figura 22. Configuración del equipo GPS GR-5



Figura 23. GPS GR-5 colocado en el punto de liga

Una vez obtenida la información del levantamiento topobatimétrico, los datos fueron procesados. La primera parte del procesamiento de datos se realizó en AutoCAD Civil 3D® y consistió en realizar una interpolación de puntos entre secciones, esto con la finalidad de obtener una nube de puntos densa y evitar errores en la generación del modelo digital de elevaciones (MDE).

Una vez interpolados los puntos, éstos se exportaron a ArcGIS® y se aplicó herramienta de interpolación *Kriging* para obtener del MDE. El método *Kriging* se aplicó debido a que es el que representa de mejor manera las influencias direccionales y las distancias correlacionadas espacialmente en los datos a interpolar.

4.5.2. Malla

La construcción de la malla se realizó utilizando la herramienta de malla adaptativa de GeoHecRas®, debido a que la herramienta de creación de mallas en HEC-RAS es limitada a celdas con un máximo de 8 vértices y la edición se realiza de forma

manual, situación que puede ocasionar errores y mayor tiempo de computo durante la simulación del modelo.

4.5.1. Condiciones de frontera iniciales

Las condiciones de frontera se definieron en el extremo superior del dominio del modelo, esta condición se definió como “aguas arriba” y se eligió la opción de hidrograma de flujo, en cambio la condición de frontera aguas abajo se determinó la condición de profundidad normal.

Se realizó una primera simulación sin condiciones iniciales de elevación de superficie de agua para que el programa automáticamente definiera en una segunda simulación la elevación inicial de la superficie del agua.

4.5.1. Rugosidad

Como ya se mencionó en el marco teórico, la rugosidad es un parámetro fundamental en la modelización hidrodinámica. HEC-RAS tiene valores definidos de rugosidad, sin embargo, el usuario puede cambiar este valor introduciendo un archivo con la distribución geográfica de valores de rugosidad.

Los valores de rugosidad introducidos al modelo se asignaron de acuerdo a los polígonos de la cobertura del dren, creados en el análisis de la vegetación y consideraron los valores utilizados en Salcedo-Peredia (2015) y Shields et al., (2017) así como los valores de la base de datos Nacional de Coberturas de Estados Unidos (NLCD, por sus siglas en Ingles). Los valores utilizados fueron de 0.04 para el cauce del dren, 0.12 para las zonas con vegetación y 0.1 para el suelo desnudo.

4.5.2. Calibración

La calibración del modelo hidrodinámico se realizó con el parámetro de rugosidad, dichos valores fueron modificados dentro de lo establecido en la literatura por Salcedo-Peredia (2015) y Shields et al., (2017). Este proceso consistió en cambiar los valores de rugosidad en el modelo, posteriormente se realizaba la simulación y por último se compararon los resultados obtenidos de elevación de la superficie del agua contra los datos observados durante las mediciones de campo, este procedimiento se repitió hasta obtener una diferencia menor a 10 cm.

5. Resultados y discusión

5.1.1. Infraestructura agrícola

Se determinó que la cuenca de captación del dren DAPA cubre una superficie de 24,764 ha, dentro de la cual existe una red de drenes agrícolas de 168 km (Figura 24), el DAPA es administrado por el Módulo de Riego 22, sin embargo, en el confluyen aguas de los Módulos 2, 21 y 22 del Distrito de Riego 014 Río Colorado.

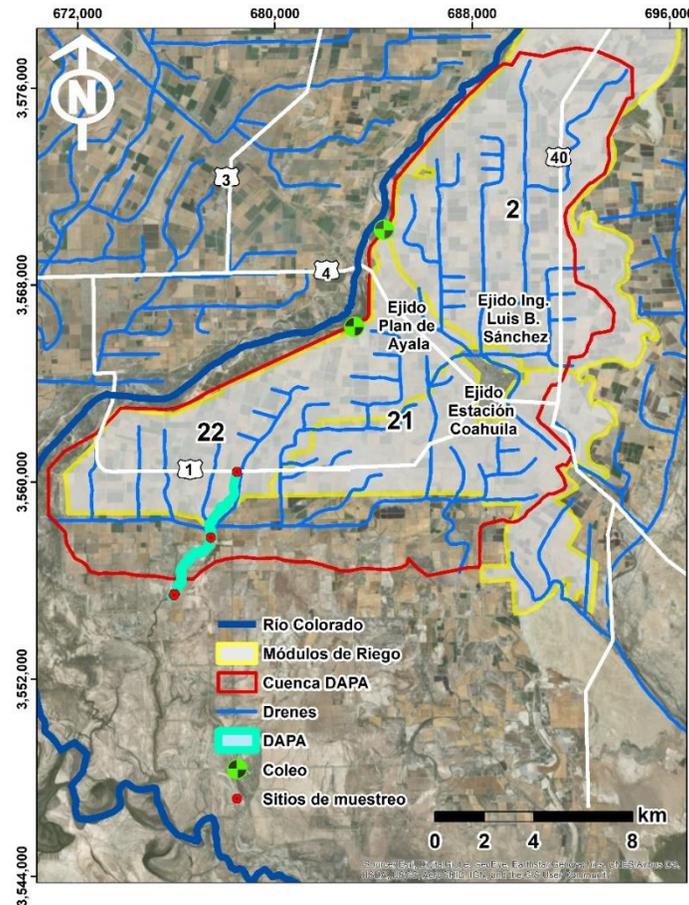


Figura 24. Cuenca de captación del DAPA y red de drenaje.

Adicional a la red de drenes, se encontraron dos sitios ubicados dentro de DAPA que funcionan como desfogues, localizados en el km 18+300 y km 21+150 del canal Barrote, estos desfogues esporádicos son nombrados comúnmente como coleos, son volúmenes de agua de riego que entran la red de canales del Distrito de Riego 014 y en ocasiones no puede ser aprovechada en las parcelas, por lo que se descarga hacia drenes o antiguos cauces del Río Colorado.

5.2. Balance hidrológico

La estimación del balance hidrológico del DAPA en el año hidrológico 2016-2017 se realizó en base al modelo conceptual, tal como se muestra en la figura 25.

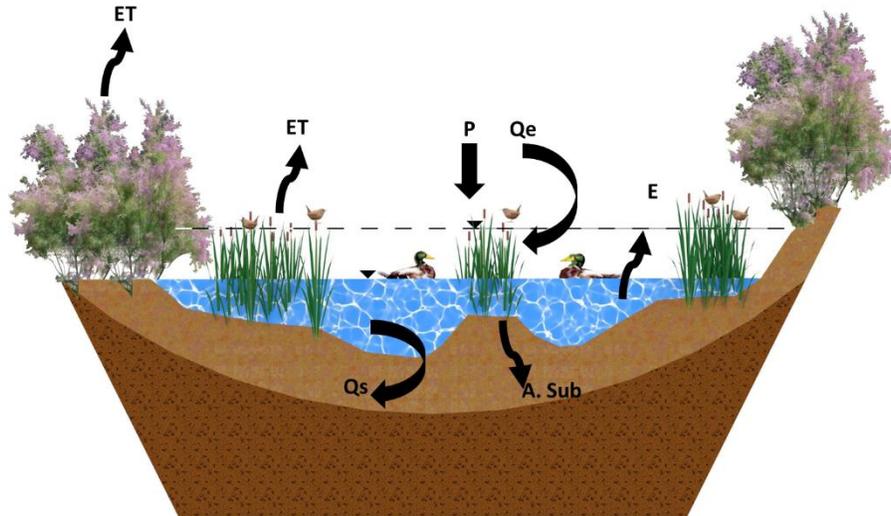


Figura 25. Modelo conceptual del balance hidrológico del DAPA. Donde ET es la evapotranspiración; E es evaporación; Qe es el volumen de entrada; Qs es el volumen de salida; A.sub. es el aporte de humedad del suelo o agua subterránea; Inf es la infiltración.

5.2.1. Flujos de agua

Durante el mes de abril se presentó un caudal máximo de 153 L/s en el sitio Ayala #1, en cambio, el caudal mínimo fue de 17.6 L/s en octubre. Durante el período de estudio el caudal promedio del sitio Ayala #1 fue de 72.3 L/s. El hidrograma de este sitio se muestra en la figura 26. La barra de error que se indica en la figura incluye los errores de medición ISO del FlowTracker como se comentó en el apartado 4.2.1.

En la figura 27, se muestra el hidrograma del sitio Ayala #2 para el período de monitoreo, en promedio el caudal medido para este sitio fue de 502.6 L/s. El caudal máximo medido fue de 1,219 L/s y al igual que el sitio Ayala #1 se presentó durante el mes de abril. En el mes de octubre se registró el caudal mínimo que fue de 121.6 L/s.

Los caudales medidos en los sitios Ayala #3 y Ayala #4, localizados al sur de la zona de estudio se utilizaron para crear un solo hidrograma (Figura 28). Al igual que los dos sitios localizados aguas arriba, los meses de caudales máximos y mínimos coinciden, los valores medidos fueron de 1,007 L/s y 111.6 L/s, respectivamente. En promedio el caudal de ambos sitios fue de 423.6 L/s.

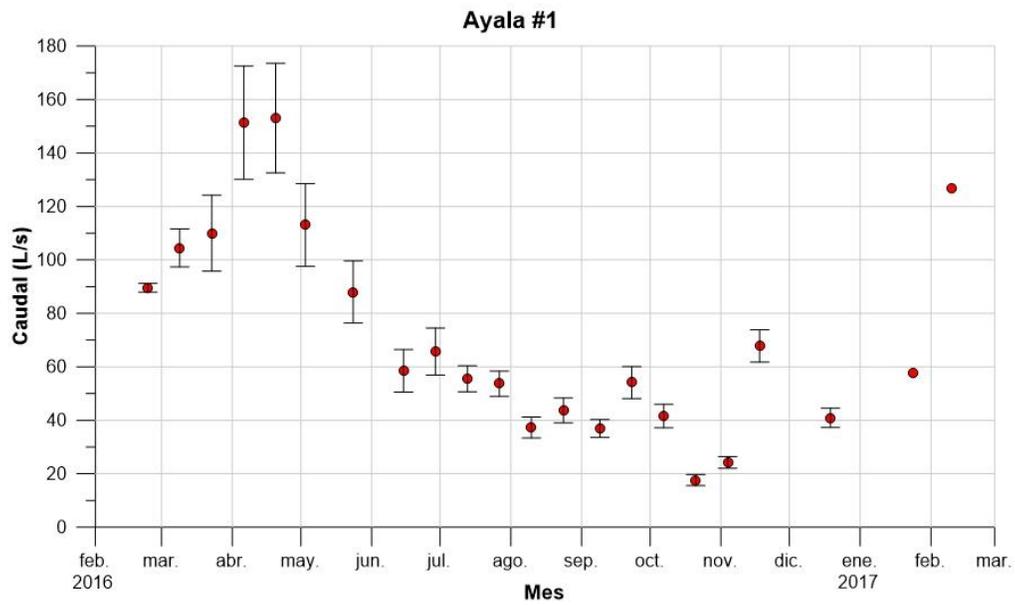


Figura 26. Caudales medidos en la estación de aforo Ayala #1 durante el período de estudio.

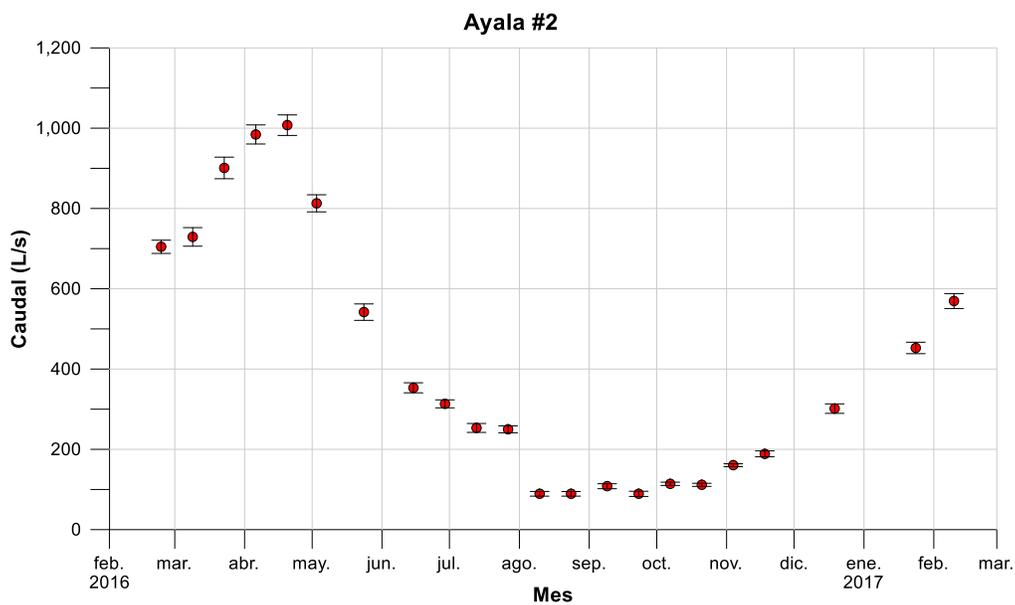


Figura 27. Caudales medidos en la estación de aforo Ayala #2 durante el período de estudio.

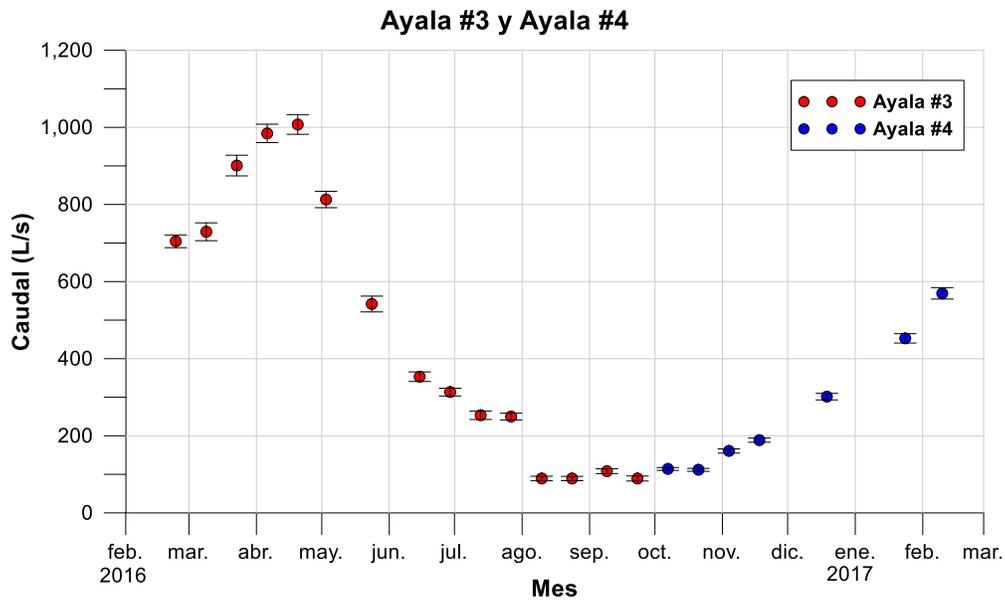


Figura 28. Caudales medidos en las estaciones de aforo Ayala #3 y Ayala #4.

La figura 29 muestra los caudales medidos en las tres estaciones de aforo y el caudal del efluente de la PTAR del poblado Estación Coahuila (Km.57). Se puede observar que el comportamiento de los flujos de agua del DAPA en las tres estaciones de aforo sigue la misma tendencia debido a que el aporte principal es el agua de retorno agrícola, principalmente de cultivos de trigo, algodón y alfalfa.

El caudal de la PTAR Km. 57 se mantiene casi constante a lo largo del período hidrológico de estudio, es decir entre 10 y 12 L/s, caudal menor a su gasto de diseño operativo (20 L/s) (CESPM, 2018).

El sitio Ayala #1 registra los menores caudales, debido a que los principales aportes de agua se ubican aguas debajo de esta estación de aforo. En cambio, el sitio Ayala #2 es el que presenta el mayor caudal debido a que recibe el aporte del dren Ortega y el Plan de Ayala con el efluente de la PTAR Km. 57. Por su parte, en el sitio Ayala #3 registra un caudal menor al del sitio anterior, situación que es atribuida a pérdidas por evaporación directa, evapotranspiración e infiltración del agua.

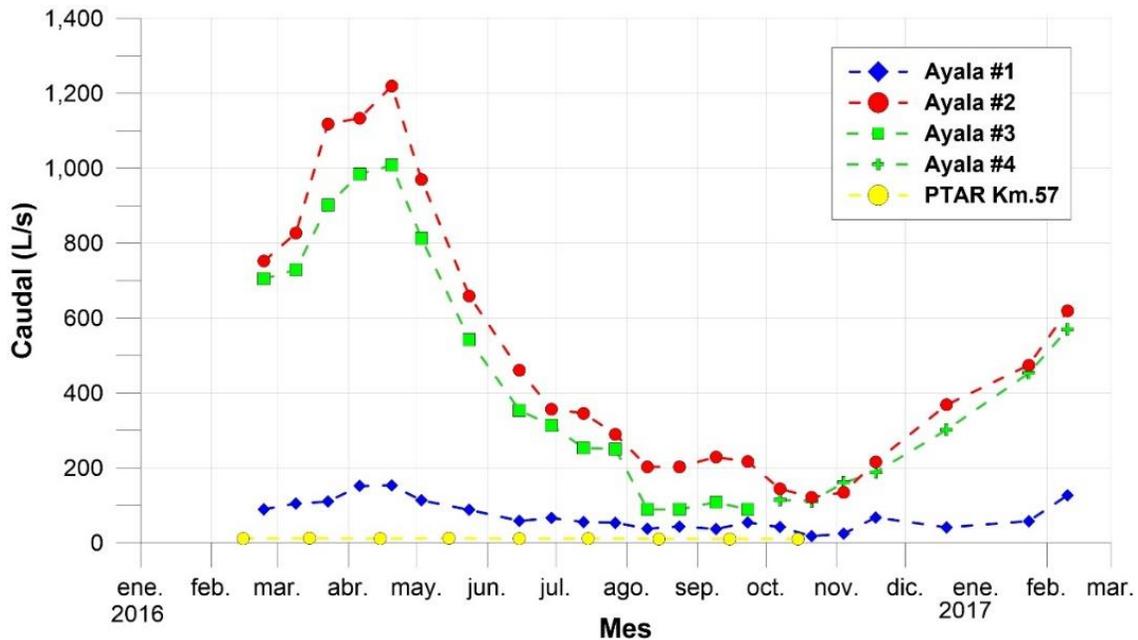


Figura 29. Caudales medidos en las estaciones de aforo Ayala#1, Ayala#2, Ayala #3 y Ayala#4, así como los caudales del efluente de la PTAR km. 57 proporcionados por CESP, 2016.

5.2.2. Relación caudal-tirante de agua

Las figuras 30 a 33 muestran las relaciones descarga-tirante obtenidas de la medición de flujos en cada estación de aforo y el tirante de agua registrado el mismo día. Para cada sitio, se obtuvo la ecuación de ajuste derivada de la correlación descarga-tirante, obteniendo coeficiente de correlación (R^2) de: 0.8276 para el sitio Ayala #1 fue, para el sitio 2 de 0.964, para el sitio 3 de 0.9625 y para el sitio 4 de 0.9885. Según la literatura (Di Balssarre y Montanari, 2009) se debe buscar un R^2 mayor a 0.75, dado que los coeficientes obtenidos sobrepasan el 0.80, se considera que las ecuaciones permitieron obtener caudales a partir del nivel de agua con una certidumbre aceptable.

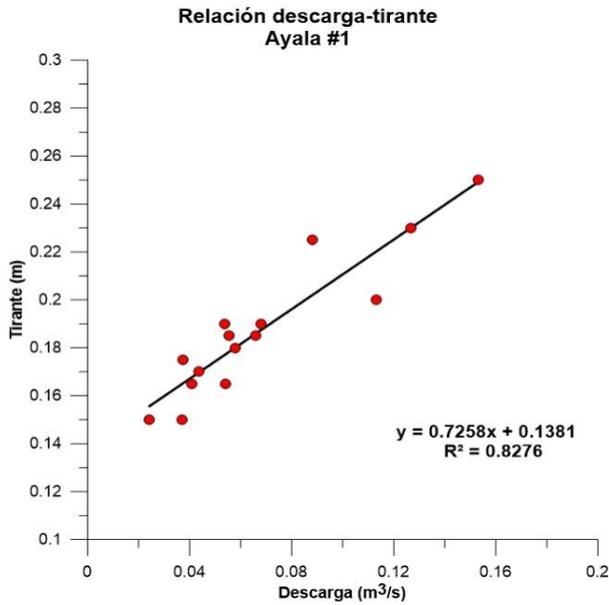


Figura 30. Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #1 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017.

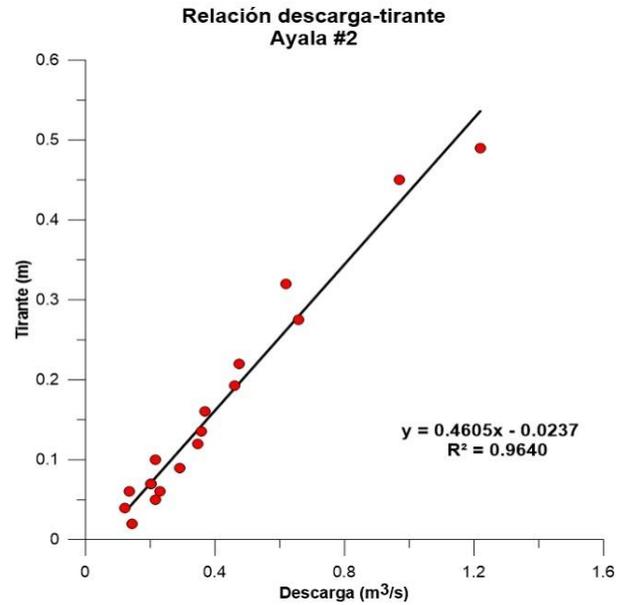


Figura 31. Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #2 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017

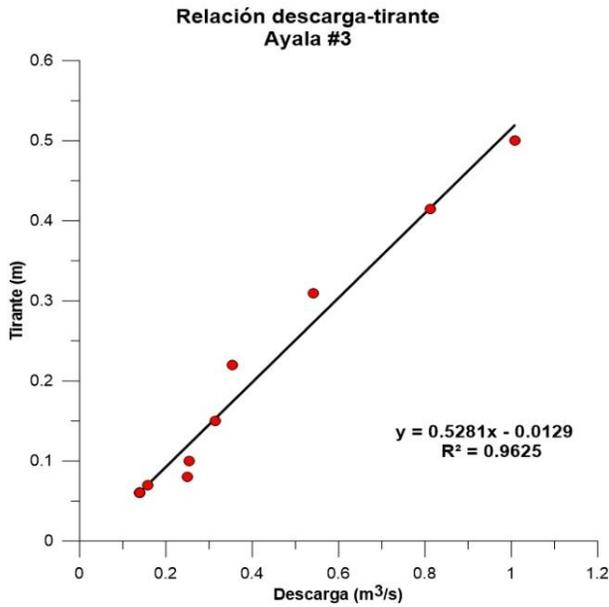


Figura 32. Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #3 para el periodo de febrero 2016 a febrero 2017.

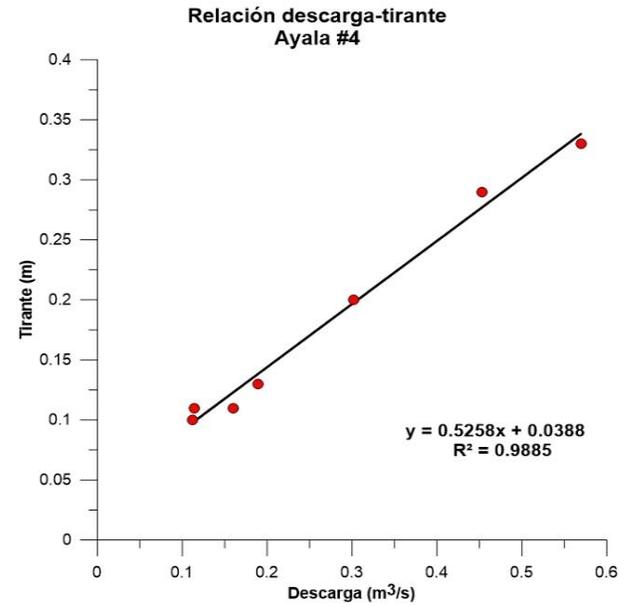


Figura 33. Relación descarga tirante de la estación de aforo Ayala #4 para el periodo de octubre 2016 a febrero 2017.

5.2.3. Vegetación

Los recorridos periódicos de tramos del dren estudiado permitieron reconocer que el cauce y los bordos del DAPA se encuentran cubiertos parcialmente con vegetación (figuras 34 a 37). Las especies dominantes son Pino Salado (*Tamarix ramosissima*), Carrizo (*Phragmites australis*), Tule (*Typha domingensis*), Cachanilla (*Pluchea seríceea*) y en menor abundancia se encuentra el Mezquite (*Prosopis glandulosa*).



Figura 34. Sección del DAPA con pino salado.



Figura 35. Parche de tule.



Figura 36. Zona con vegetación densa.



Figura 37. Zona del DAPA con agua y Pino Salado.

De total de la superficie en estudio (24.63 has), 12.48 ha (50.68%) corresponden a la superficie inundada del canal, 8.41 ha (34.16 %) están ocupadas por vegetación existente en el cauce y taludes y las 3.74 ha (15.16 %) corresponden al suelo desnudo en taludes. Los resultados de la zonificación de la cobertura vegetal se presentan en la figura 38.

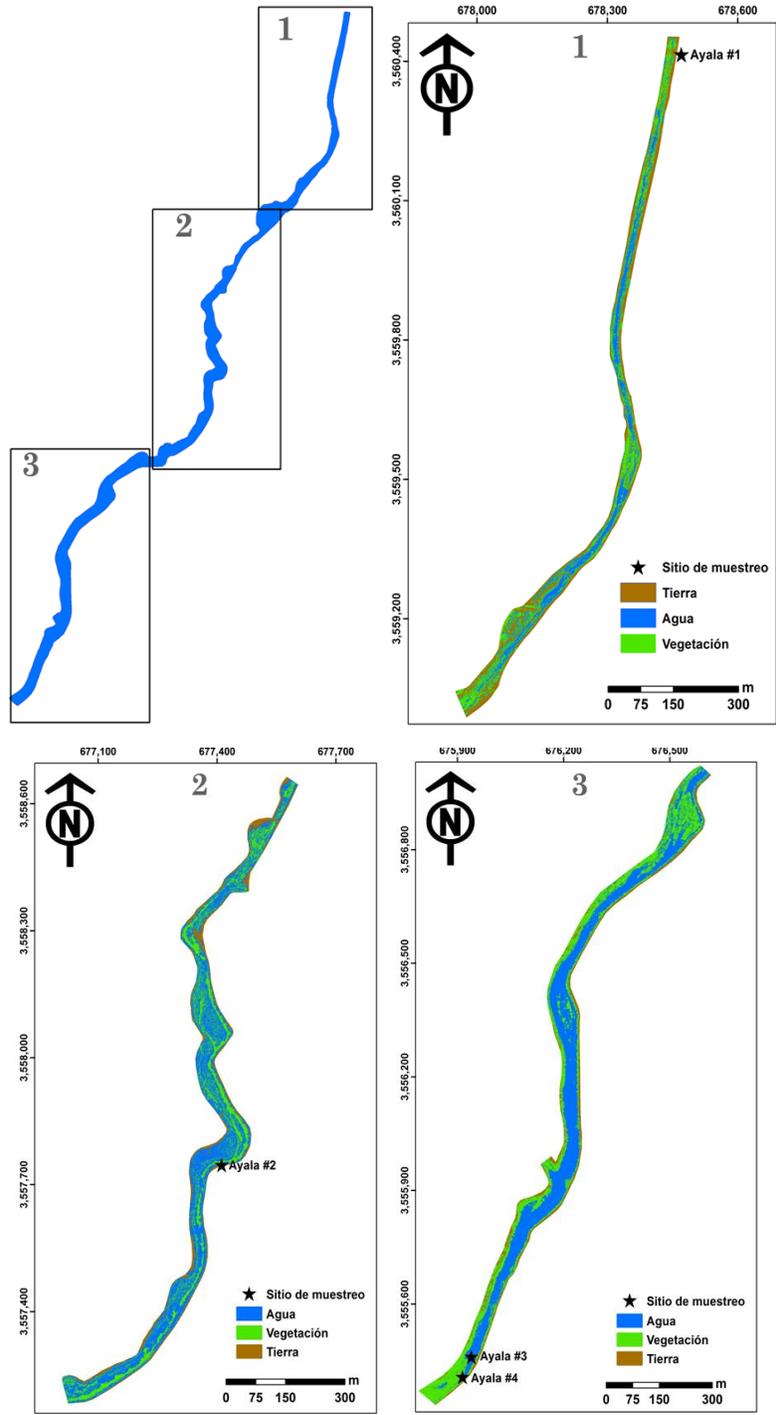


Figura 38. Mapa de clasificación de cobertura en el DAPA.

La distribución típica de la cobertura vegetal en una sección del DAPA se muestra en la figura 39. Esta sección corresponde al sitio de aforo Ayala #4, en la cual se puede observar que las terrazas bajas y la zona de inundación se pueden encontrar las especies acuáticas como el Carrizo, en las terrazas medias y altas predomina el Pino Salado y arbustos como la Cachanilla, en los taludes existe una alta presencia de pino salado, cachanilla y en menor abundancia mezquite.

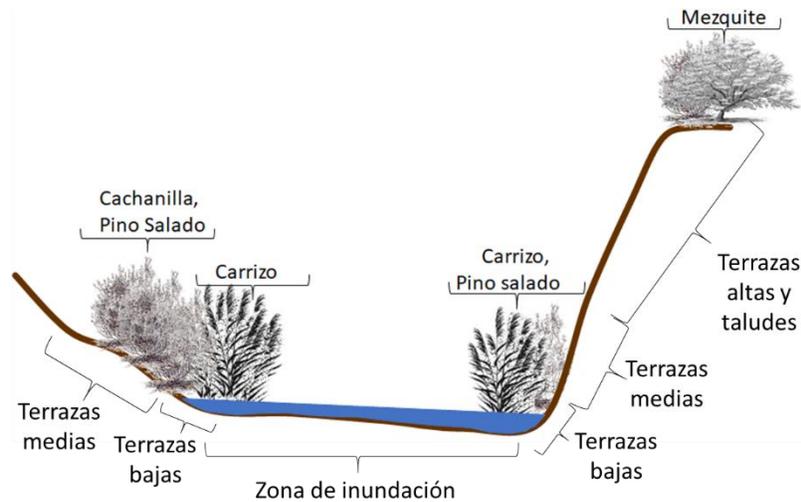


Figura 39. Sección de vegetación del sitio Ayala #4 del DAPA.

5.2.4. Entrada de agua

De acuerdo con las mediciones realizadas, el volumen total de agua que ingresó al dren Ayala durante febrero de 2016 a febrero de 2017 por el sitio Ayala #1 fue de 2.24 hm³. Durante el mes de abril se presentó el mayor volumen de entrada, para este mes se estimó un volumen diario de 13,000 m³ (0.013 hm³), en cambio en el mes de octubre se presentó el menor volumen de entrada con 1,520 m³ (0.0015 hm³) (Figura 40).

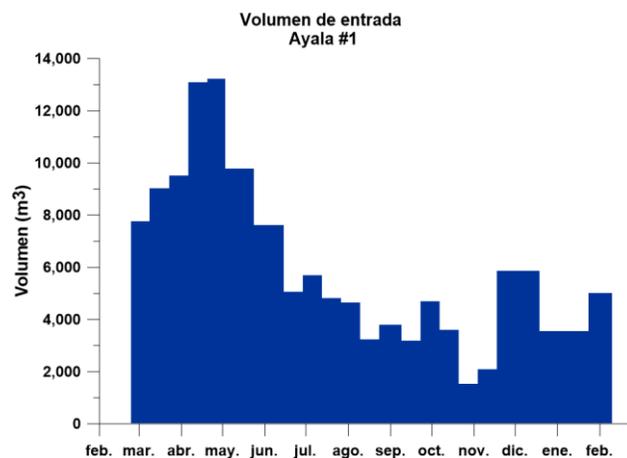
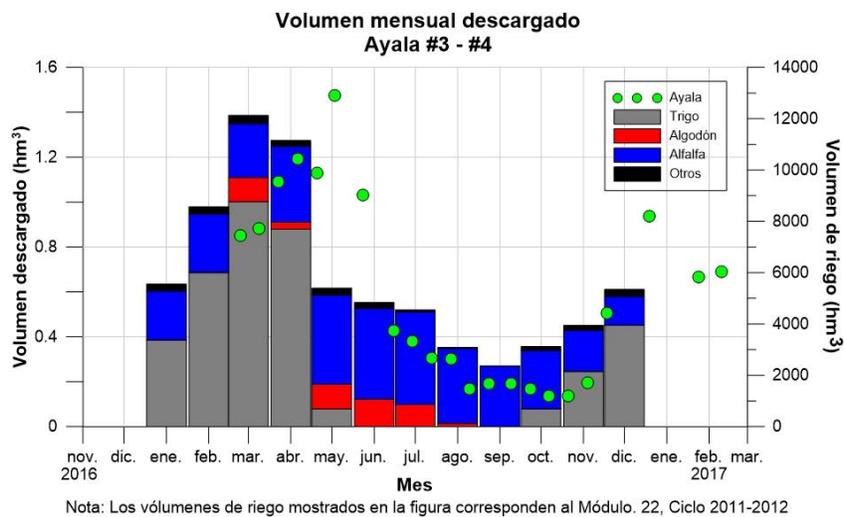


Figura 40. Volumen de entrada del sitio Ayala #1

En el caso del sitio Ayala #2 el volumen total anual estimado fue de 15.48 hm³, es decir entre el tramo Ayala #1-Ayala #2 se integró un volumen adicional a lo medido en el Ayala #1 de 13.24 hm³. El volumen obtenido en este trabajo es sustancialmente superior (más de dos veces) al reportado por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) para el año 2015 de 6.20 hm³/año (CONAGUA, 2013), esto puede deberse a que la ubicación de la estación de aforo reportada por CONAGUA (2013) se localiza fuera de la zona de estudio, es decir entre la descarga del efluente de la PTAR y entre el sitio Ayala #2. Por lo que no considera aportaciones importantes como lo son el dren Ortega y el Camacho.

5.2.5. Salida de agua

Con los datos obtenidos de las estaciones de aforo Ayala #3 y Ayala #4 se estimó un volumen de agua de salida del tramo de DAPA analizado, en el orden de 13.29 hm³ para el año hidrológico febrero de 2016 a febrero de 2017. Los volúmenes estimados muestran una tendencia similar a la implementación de volúmenes de riego agrícola (figura 41).



Nota: Los volúmenes de riego mostrados en la figura corresponden al Módulo. 22, Ciclo 2011-2012
 Figura 41. Volumen anual de dren Ayala durante el año hidrológico febrero de 2016 a febrero de 2017, estimado con las estaciones de aforo Ayala #3 y Ayala #4.

Adicional al flujo de entrada del sitio Ayala#1, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Estación Coahuila (Km. 57) descarga su efluente, es decir agua residual tratada al dren Ayala, lo que represento un volumen anual de 0.387 hm³.

Durante el período de estudio las pérdidas de evaporación fueron de 3,136 mm, en junio se presentó la mayor evaporación con 354 mm, en cambio, en diciembre se presentó la menor evaporación con 123 mm. La evapotranspiración también representa una salida de agua, se estimaron 3,260 mm de ET, durante el mes de junio se presentó la mayor pérdida por evapotranspiración la cual fue de 365 mm,

en enero del 2017 se presentó la menor pérdida por evapotranspiración con 160 mm (Figura 42).

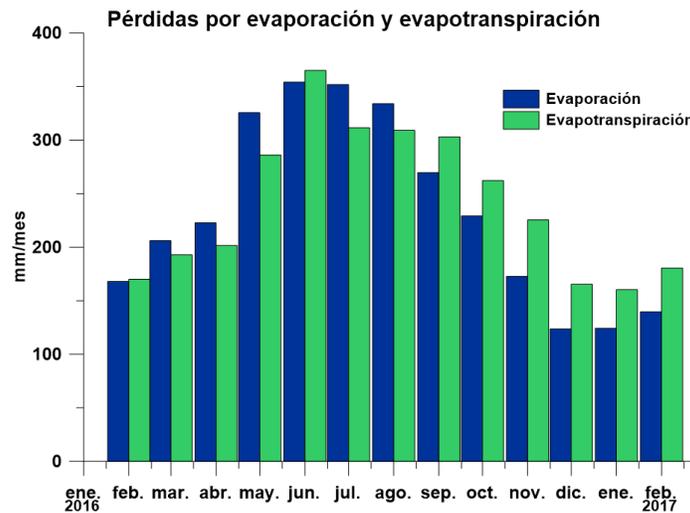


Figura 42. Pérdidas por evaporación y evapotranspiración mensuales

En la tabla 6 se muestra el balance hídrico para el periodo de estudio, se puede observar que el volumen de entrada estimado con las mediciones de flujo en el sitio Ayala #2 es mayor que el de las salidas durante la mayor parte del año, a excepción del mes de octubre y noviembre donde el volumen de salida excede al valor de entrada, este volumen adicional pudo originarse por aportaciones de agua subterránea.

Tabla 6. Balance hidrológico para el período de febrero de 2016 a febrero de 2017.

Fecha	Entradas (m ³)	Evaporación (m ³)	Evapotranspiración (m ³)	Salida por flujo superficial (m ³)	Entradas -Salidas (m ³)
24-feb-16	1,007,394	12,848	10,753	852,163	131,630
09-mar-16	1,114,261	15,732	12,667	882,040	203,821
23-mar-16	1,477,795	10,509	7,966	1,089,850	369,470
06-abr-16	1,541,018	17,376	13,347	1,190,609	319,686
20-abr-16	1,526,862	19,339	15,103	1,131,624	360,796
03-may-16	1,939,121	34,255	25,969	1,474,926	403,971
24-may-16	1,388,699	39,831	34,194	1,029,853	284,820
15-jun-16	607,444	26,359	22,217	427,352	131,517
29-jun-16	494,782	26,168	13,461	378,968	76,185
13-jul-16	464,616	25,553	24,257	306,392	108,414
27-jul-16	393,915	28,003	23,821	302,279	39,812
10-ago-16	273,938	21,919	16,965	166,925	68,129
24-ago-16	321,375	25,260	21,368	190,771	83,976
09-sep-16	305,496	18,207	19,527	189,907	77,855
23-sep-16	311,663	19,292	17,181	166,925	108,264

Fecha	Entradas (m ³)	Evaporación (m ³)	Evapotranspiración (m ³)	Salida por flujo superficial (m ³)	Entradas-Salidas (m ³)
07-oct-16	210,790	17,199	16,315	138,015	39,260
21-oct-16	155,705	14,238	15,817	134,991	-9,342
04-nov-16	180,831	13,383	13,654	194,141	-40,347
18-nov-16	740,681	22,201	24,569	505,414	188,496
19-dic-16	1,252,754	20,100	25,750	937,786	269,118
24-ene-17	771,108	12,530	12,075	664,779	81,725
10-feb-17	1,209,339	16,101	18,656	934,727	239,855

Los resultados obtenidos demuestran que considerando el 100% el agua medida en el sitio Ayala#2, el 2.29% de agua se evapotranspira, 2.58% de pierde por evaporación directa, 20% se infiltra, 75.13% escurre superficialmente hasta el sitio Ayala #3 y se infiere que, durante el período de octubre a noviembre, cuando los flujos de retorno agrícola disminuyen, el dren recibe 0.28% de entradas de agua subterránea (Figura 43).

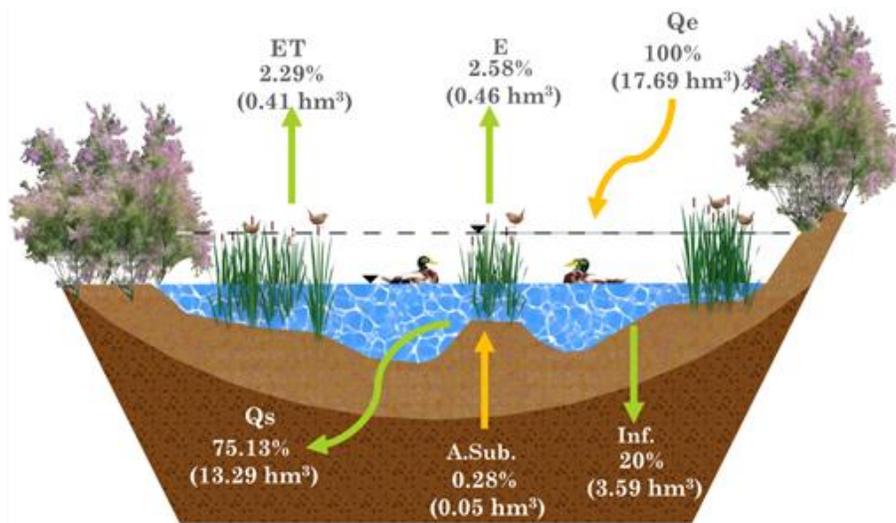


Figura 43. Balance hidrológico del DAPA, representado en el modelo conceptual. Donde ET es la evapotranspiración; E es evaporación; Qe es el volumen de entrada; Qs es el volumen de salida; A.sub. es el aporte de humedad del suelo o agua subterránea; Inf es la infiltración.

Es importante denotar que, aguas abajo del sitio Ayala #2 ya no existen parcelas agrícolas aledañas al dren, por lo tanto, los escurrimientos que se reciben son superficiales y no subsuperficiales como ocurre aguas arriba. Por esta razón, se infiere que a partir del sitio Ayala #2 el DAPA funciona únicamente como un canal conductor de agua.

Como es de esperarse, los valores más elevados de CE se presentaron durante los meses de máximo caudal en el dren Ayala (abril y mayo), esto debido al desalojo de agua en las parcelas, por ende, mayor desalojo de sales solubles presentes en el suelo. A partir del mes de octubre, la CE disminuyó y continuo con esta tendencia hasta el mes de diciembre, posteriormente, cuando el volumen de riego aumento también la CE.

Los valores de conductividad eléctrica registrados pueden representar un problema para especies acuáticas que habitan en el dren, tales como el tule, el cual tiene una tolerancia de hasta 10.15 mS/cm de conductividad eléctrica. En cambio, para otras especies como el carrizo estos valores no representan riesgo alguno, debido a que su tolerancia es de hasta tres veces más salinidad que tolera el tule (Baeza et al., 2012). Esto se observa directamente en la vegetación del segmento entre el sitio Ayala #1 y Ayala #2 (Figura 36) en donde la vegetación dominante es tule, y en los Ayala #2 y Ayala #3-#4 hay una variedad de especies.

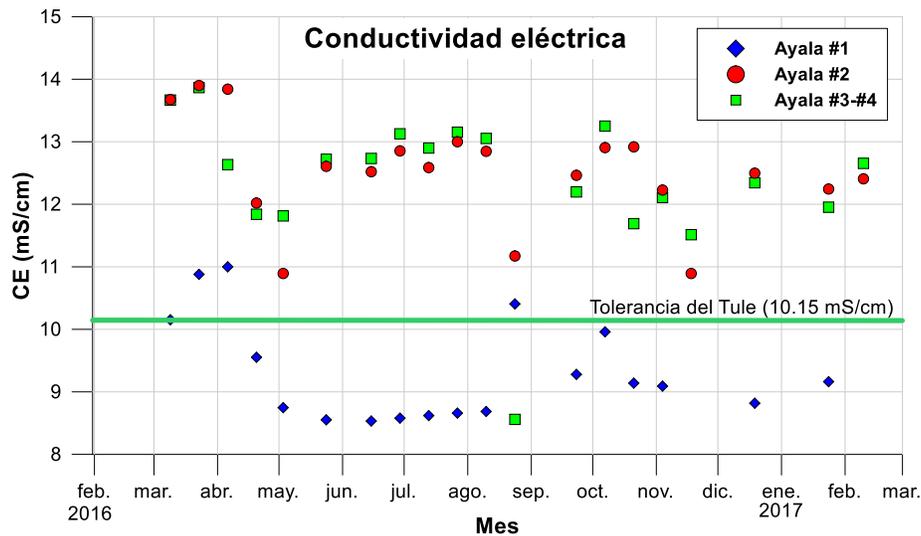


Figura 45. Conductividad eléctrica del agua, medida durante el periodo de estudio en los cuatro sitios de muestreo

Otro de los parámetros medidos fue la temperatura del agua, en promedio la temperatura del agua fue de 21°C en el DAPA. Se puede observar en la figura 46 que durante los meses de invierno la temperatura desciende considerablemente hasta 9.1°C y aumenta en los meses de verano, hasta 32°C. Los valores de temperatura durante febrero de 2016 y febrero de 2017 fueron similares (17.1 y 17.3°C), por lo que se puede decir que la temperatura del agua sigue un comportamiento estacional. Este comportamiento sigue la tendencia de las temperaturas registrada en la estación meteorológica Colonia Medano.

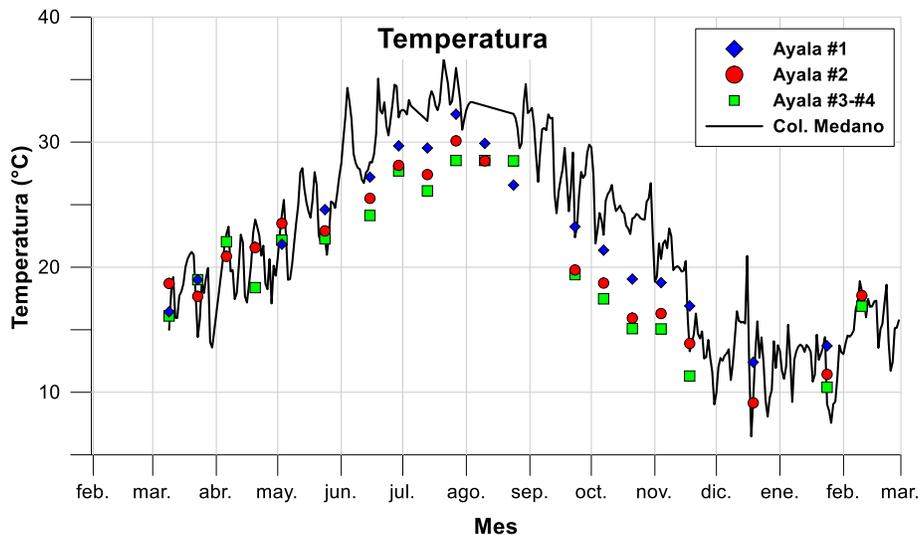


Figura 46. Temperatura del agua y aire, registrada durante el periodo de estudio.

5.3.2. Análisis de nutrientes

Los resultados de los análisis de nutrientes realizados para las formas individuales de nitrógeno y fósforo, durante el período de estudio, en los tres sitios de muestreo, se encuentran en un rango analizado entre 0 a 32 mg/L (Tabla 7).

Tabla 7. Concentraciones de contaminantes analizados en el DAPA

Sitio	Rango analizado (mg/L)					
	Nitrógeno total (NT)	Nitrato (NO ₃)	Nitrito (NO ₂)	Amonio (NH ₄)	Fósforo total (PT)	Ortofosfato (PO ₄)
Ayala #1	0-8	0-18	0.006-0.151	0.31-1.36	0-1.26	0.06-1.09
Ayala #2	0-14	1-32	0.017-0.22	0.02-1.93	0-2	0.02-1.62
Ayala #3	0-17	0-24	0.01-0.154	0.24-2.1	0-0.4	0.02-0.80

De los resultados obtenidos, se puede observar que los más notables, en cuanto a presencia, son los nitratos, lo cual es de esperarse en aguas de origen agrícola y residual tratada como ha sido reportado en la literatura (Mueller y Hesel, 1996). Es importante resaltar que la concentración máxima de nutrientes en el agua supera con 14 mg/L los valores típicos de nitratos en aguas superficiales, valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011). El contaminante de menor presencia son los nitritos, estos resultados de acuerdo a De Miguel-Fernández y Vásquez Taset (2006) son un buen indicador de que el ciclo del nitrógeno se está realizando de forma normal en el DAPA.

En el caso del Nitrógeno total y del Fósforo total, las concentraciones se encuentran por debajo de los límites de la NOM-001-ECOL-1996 (Tabla 8).

Tabla 8. Valores analizados, típicos y especificados en la NOM-001-ECOL-1996.

Contaminante (mg/L)	Rango Analizado (mg/L)	NOM-001 (mg/L)
NT	0-17	25
NO ₃	0-32	NE
NO ₂	0-0.2	NE
PT	0-2	10
NH ₄	0.02-2.1	NE
PO ₄	0-1.6	NE

NT: Nitrógeno total

PT: Fósforo total

NE, No especificado en la norma

Con la finalidad de estimar alguna relación del caudal con las concentraciones de nutrientes se presentan las figuras 47 y 48, sin embargo, no se observa con claridad que el aumento en la concentración de los nutrientes esté relacionado con caudal del DAPA. Esta falta de correlación está relacionada con que la concentración de nutrientes depende fundamentalmente de las prácticas de fertilización de los cultivos y del tiempo de transporte de estos nutrientes hasta el canal de drenaje, ya sea de forma subterránea por infiltración como de forma superficial.

Se pudieron identificar dos procesos relacionados con las prácticas de riego que podrían modificar esta correlación; 1) los períodos de requerimientos de la planta de los distintos compuestos químicos para maximizar su crecimiento y aumentar su rendimiento por hectárea, si bien están relacionados con la época de mayor vigor y crecimiento no se aplican todos en los mismos momentos, y 2) la práctica de descargas de agua de riego –libre de nutrientes- a los drenes agrícolas no está controlada ni reportada ya que es una práctica no deseada. A estos dos procesos debemos sumar el transporte de los nutrientes en el suelo y hasta el dren que depende de las propiedades hidrológicas de los mismos y los gradientes de los niveles de agua en la parcela y el dren.

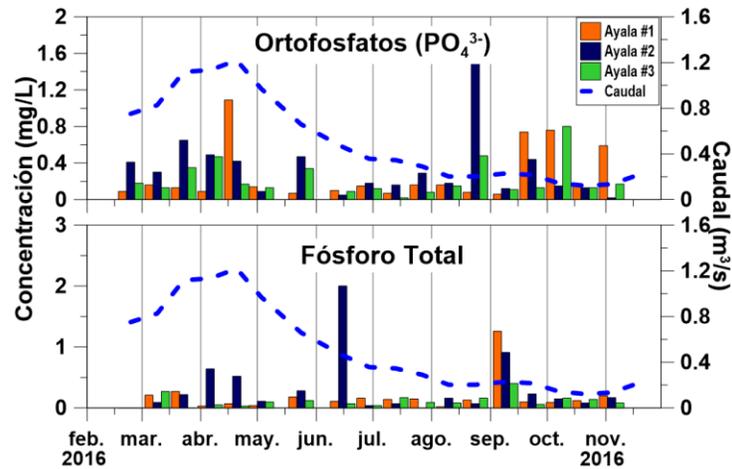


Figura 47. Concentraciones de nutrientes fosforados vs Caudal medido.

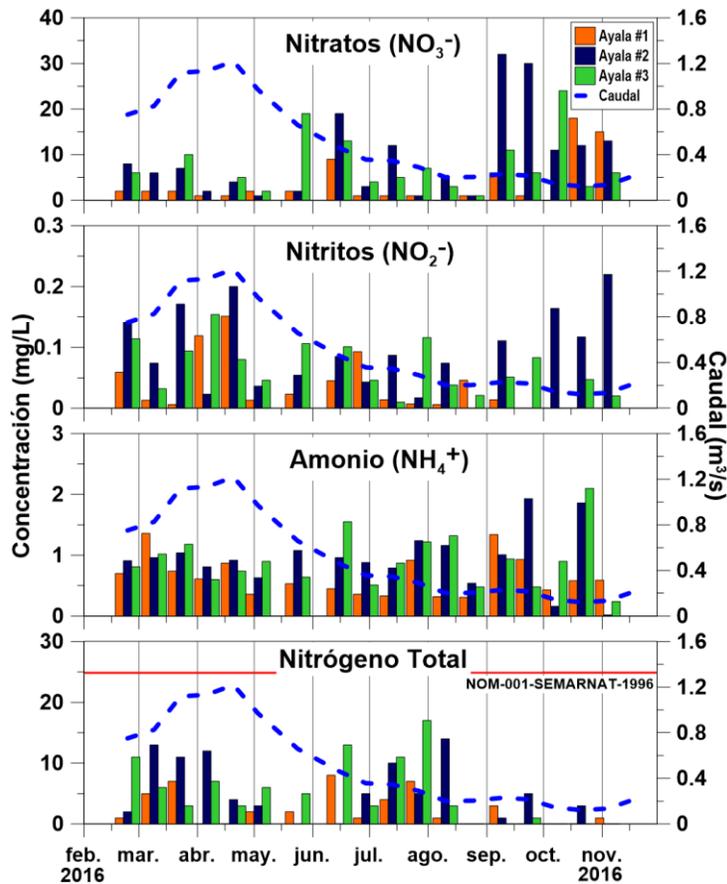


Figura 48. Concentraciones de nutrientes nitrogenados

Al margen de la discusión de las concentraciones obtenidas en el tiempo y su relación con los flujos, los resultados de flujo másico coinciden con la tendencia de los caudales medidos en los sitios de aforo. El flujo de contaminantes estimado de las muestras puntuales colectadas en el DAPA fue de 21,199 kg (Tabla 9), de los cuales el 3.1% corresponde al sitio Ayala #1, el 52.2% de los contaminantes se

incorporan entre el sitio Ayala #1 y Ayala #2 y únicamente 41.56% salen del sitio Ayala #3 - #4.

Tabla 9. *Flujo másico de contaminantes en el DAPA*

Sitio	Flujo másico (kg)					
	Nitrógeno total (NT)	(NO ₃)	NO ₂	NH ₄	PT	PO ₄
Ayala #1	266.81	260.5	5.58	76.41	16.33	31.97
Ayala #2	4,936.45	5,383.51	77.42	746.13	284.17	302.54
Ayala #3-#4	3,926.56	3,991.66	54.69	592.93	89	156.42

5.3.3. Retención de nutrientes

La retención de nutrientes en el DAPA del sitio Ayala #1 al Ayala #2 fue en promedio de 9.66% para los NO₃, 23.44% para los NO₂, 21.34% para el NH₄, 6.77% para el NT, 33.11% para el PO₄ y 0.28% para el PT. En el caso de la retención entre el sitio Ayala #2 y Ayala #3, las retenciones promedio fueron de 55.66% para los NO₃, 47.2% para los NO₂, 17.03% para el NH₄, 3.3% para el NT, 36.32% para el PO₄ y 0.02% para el PT.

Cabe mencionar que los resultados de la retención de nutrientes de esta investigación concuerdan con los resultados de otros estudios recopilados en Dollinger et al., (2015).

Los porcentajes de retención obtenidos, son el resultado de procesos e interacciones que se llevan a cabo dentro del dren, como es el caso de la nitrificación, desnitrificación y la asimilación. De hecho, estudios previos (Dollinger et al., 2015) han la provisión de hábitat a las especies vegetales y microbianas genera un impacto positivo en la retención de nutrientes, ya que estas especies los utilizan para su desarrollo y crecimiento tal como se presentó en la tabla 2.

En la figura 49 se muestran los porcentajes de retención obtenidos, en los meses en los que no se presentan datos indican que no se llevó a cabo retención, esta situación puede ser atribuida a descargas puntuales de dichos nutrientes, o bien a la liberación de nutrientes por las plantas y/o el suelo como parte de los procesos e interacciones que se llevan a cabo en el DAPA.

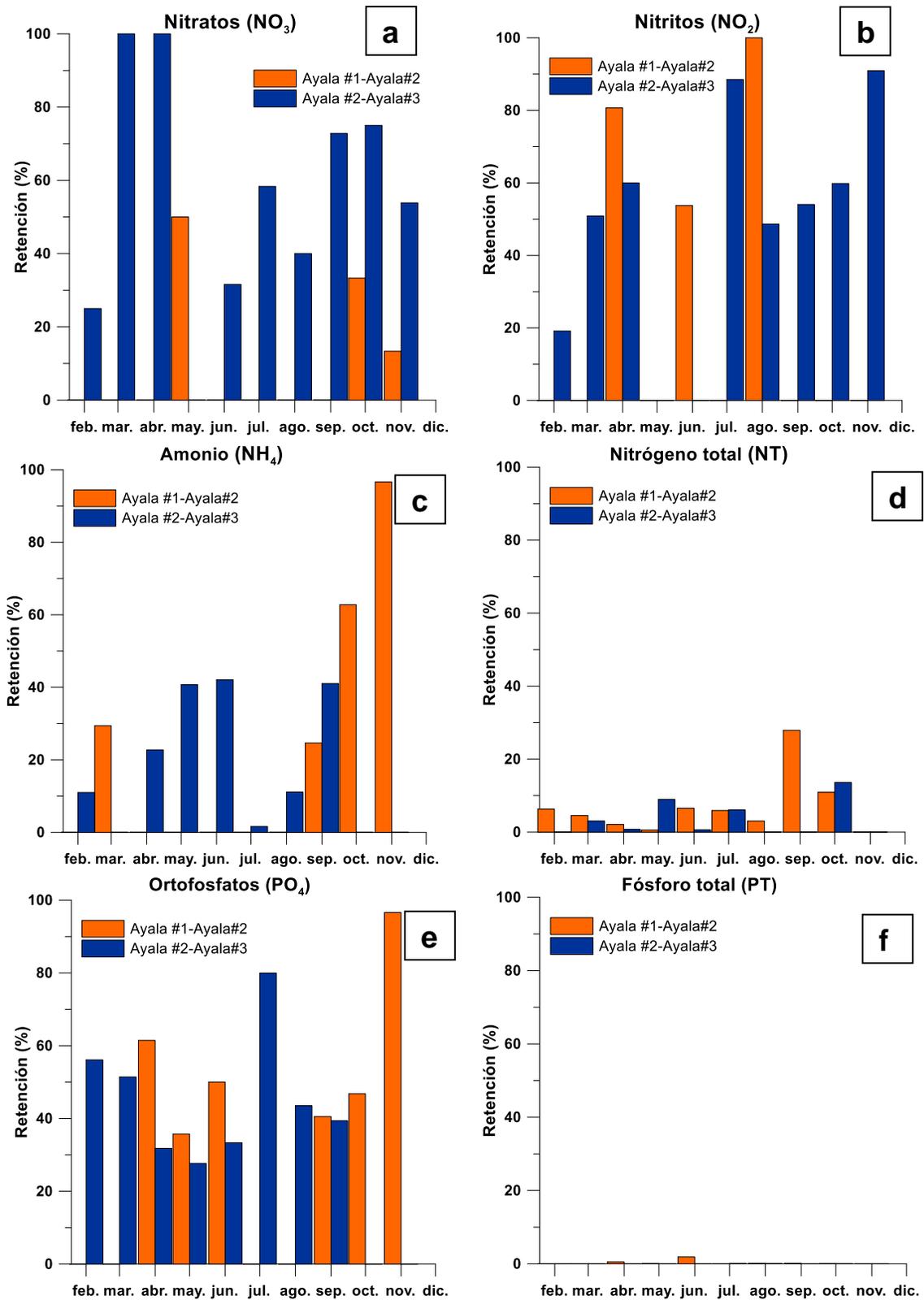


Figura 49. Retención de nutrientes entre los sitios de muestreo en el DAPA.

5.4. Servicios ecosistémicos

5.4.1. Servicio ecosistémico de depuración de agua

La depuración del agua, como servicio de regulación fue evaluada con la retención de nutrientes. Dichos resultados demuestran que efectivamente, existe depuración del agua en el DAPA, esta depuración oscila temporalmente entre 0.02% y 55.66% y varía entre los puntos muestreados.

Si bien, no se sabe con precisión si estos nutrientes fueron retenidos por las plantas y/o el suelo, o sufrieron algún proceso de transformación. Los resultados demuestran que la depuración del agua existe, lo que implica un mejoramiento de la calidad del agua.

5.4.2. Servicio ecosistémico de provisión de hábitat

En la tabla 10 se muestran las 29 especies avistadas en el dren Ayala durante el conteo de aves, el 62% de estas aves son residentes y el 38% migratorias. La especie más avistada (37 aves) fue el Chipe Rabadilla Amarilla (*Dendroica coronata*) la cual es una especie migratoria, residente de invierno en el Delta del Río Colorado y en el desierto de la costa. La segunda especie más avistada (28 aves) fue el Gorrión Cantor (*Melospiza Melodia*) esta ave es riparia residente del Delta del Río Colorado y la tercer especie más avistada fue el Pato de Collar (*Anas Platyrhynchos*), es un ave de invierno bastante común en el Delta del Río Colorado y en la Ciénega de Santa Clara (Carrillo-Guerrero et al.,2013).

Tabla 10. Aves avistadas en el DAPA durante el censo realizado el 17 de febrero de 2016.

Nombre común	Nombre científico	Nombre en ingles	Ocurrencia temporal	Número de avistamientos
Anatidae				
Pato De Collar	<i>Anas platyrhynchos</i>	Mallard	Migratoria	23
Pato Tepalcate	<i>Oxyura jamaicensis</i>	Ruddy Duck	Residente de verano	9
Pelecanidae				
Pelicano Americano	<i>Pelecanus erythrorhynchos</i>	American White Pelican	Migratoria	8
Rallidae				
Gallareta Americana	<i>Fulica americana</i>	American coot	Residente	13
Gallineta Frente Roja	<i>Gallinula chloropus</i>	Common Moorhen	Residente	2
Ardeidae				
Garza Dedos Dorados	<i>Egretta thula</i>	Snowy Egret	Residente	3
Garcita Verde	<i>Butorides virescens</i>	Green Heron	Residente	1
Garzón Cenizo	<i>Ardea herodias</i>	Grat Blue Heron	Residente	4

Nombre común	Nombre científico	Nombre en inglés	Ocurrencia temporal	Número de avistamientos
Garza Nocturna Coroninegra	<i>Nycticorax nycticorax</i>	Black-crowned Night Heron		1
Threskiornithidae				
Ibis Cara Blanca	<i>Plegadis chihi</i>	White-face Ibis	Residente de verano	21
Recurvirostridae				
Candelerero Americano	<i>Himantopus mexicanus</i>	Black-necked Stilt	Residente de verano	6
Scolopacidae				
Playero Patas Amarillas Mayor	<i>Tringa melanoleuca</i>	Greater Yellowlegs	Migratoria	2
Accipitridae				
Gavilan Rastrero	<i>Circus cyaneus</i>	Northern Harrier	Migratoria	1
Cathartidae				
Zopilote Aura	<i>Cathartes aura</i>	Turkey Vulture	Residente	2
Remizidae				
Baloncillo	<i>Auriparus flaviceps</i>	Verdin	Residente	8
Cuculidae				
Correcaminos Norteño	<i>Geococcyx californianus</i>	Greater Roadrunner	Residente	1
Mimidae				
Cuitlacoche Pico Corto	<i>Toxostoma bendirei</i>	Bendire's Thrasher	Residente	1
Troglodytidae				
Saltapared Pantanero	<i>Cistothorus palustris</i>	Marsh Wren	Residente	13
Tyranidae				
Tirano Occidental	<i>Tyrannus verticalis</i>	Western Kingbird	Residente de verano	2
Papamoscas Negro	<i>Sayornis nigricans</i>	Black Phoebe	Residente	2
Mosquero Cardenalito	<i>Pyrocephalus rubinus</i>	Vermilion Flycatcher	Residente de verano	2
Mosquero Llanero	<i>Sayornis saya</i>	Say's Phoebe	Migratoria	1
Parulidae				
Chipe Rabadilla Amarilla	<i>Dendroica coronata</i>	Yellow-rumped Warbler	Migratoria	37
Chipe Oliváceo	<i>Oreothlypis celata</i>	Orange crowned warbler	Residente	2
Emberizidae				
Gorrión Cantor	<i>Melospiza melodia</i>	Song Sparrow	Residente de verano	28
Gorrión Corona Blanca	<i>Zonotrichia leucophrys</i>	White-crowned Sparrow	Migratoria	2
Icteridae				
Tordo Sargento	<i>Agelaius phoeniceus</i>	Red-winged Blackbird	Residente	4

Nombre común	Nombre científico	Nombre en inglés	Ocurrencia temporal	Número de avistamientos
Pradero Occidental	<i>Sturnella neglecta</i>	Western Meadowlark	Residente	2
Zanate Mexicano	<i>Quiscalus mexicanus</i>	Great-tailed Grackle	Residente	8

Las aves avistadas durante el conteo realizado, concuerdan con los resultados de estudios previos Zamora-Arroyo et al., (2005); Hinojosa-Huerta et al., (2013); Hinojosa-Huerta et al., (2013b). Comparando los resultados obtenidos en esta investigación y los estudios anteriormente mencionados se encontró que de las 10 especies de aves más comunes en la zona de inundación del río Colorado referidas en Hinojosa-Huerta et al., 2008, cinco utilizan el DAPA como sitio de hábitat o refugio, estas especies son 1) Tordo Sargento (*Agelaius phoeniceus*), 2) Baloncillo (*Auriparus flaviceps*), 3) Zanate Mexicano (*Quiscalus mexicanus*), 4) Gorrión Cantor (*Melospiza melodía*) y 5) Chipe Rabadilla Amarilla (*Dendroica coronata*). Algunas especies comúnmente encontradas en el DAPA de ellas se muestran las figuras 50 a 53.



Figura 50. Lechuza llanera (*Athene cunicularia*).



Figura 51. Garza Nocturna coroninegra (*Nycticorax nycticorax*)



Figura 52. Pelicano americano (*Pelecanus erythrorhynchos*).



Figura 53. Cormorán (*Phalacrocorax auritus*)

Los resultados demuestran que el servicio ecosistémico de provisión de hábitat es brindado por el DAPA. El cual brinda hábitat y refugio a especies migratorias y residentes, y al garzón cenizo (*Ardea herodias*) especie sujeta a protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010, además ofrece hábitat a especies de interés cinegético como es el caso de los patos.

5.5. Modelización hidrodinámica

5.5.1. Geometría del cauce

La configuración geométrica del cauce se realizó para los 6 km del DAPA, sin embargo, para fines de la modelización se trabajó con los últimos 600 m localizados al Sur de la zona de estudio (Figura 54).

Se adquirieron un total de 1,010 puntos durante el levantamiento topobatimétrico. Las elevaciones medidas encuentran en el rango de 3.80 y 7 m s.n.m. Las zonas más altas (5.01 a 7 m s.n.m) de la zona de estudio corresponde a los bordos del dren en la porción superior de los taludes, y las zonas bajas corresponden a la zona de inundación del cauce (3.8 a 5 m s.n.m). Dentro de los límites geográficos de la zona de estudio se pueden encontrar barreras o parches de vegetación que se encuentran ente 0.30 y 0.40 m más elevados que el fondo del canal (Figura 54).

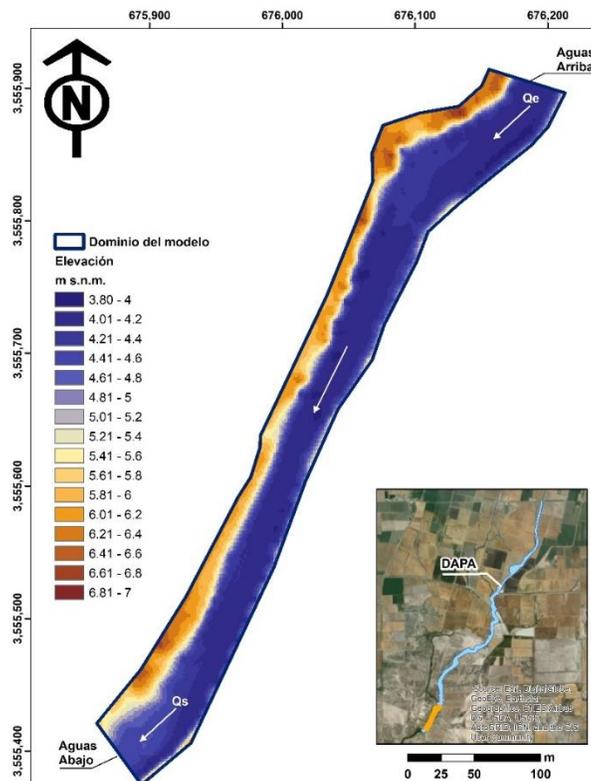


Figura 54. Modelo digital de elevaciones del DAPA.

5.5.2. Rugosidad

Los valores de rugosidad utilizados en la modelización se muestran en la tabla 11, estos valores se encuentran dentro de lo reportado en la literatura (Salcedo-Peredia, 2015 y Shields et al., 2017), de acuerdo al tipo de cobertura obtenida del análisis de imágenes adquiridas con Drone.

Tabla 11. Valores de rugosidad utilizados en la modelización.

Cobertura	Rugosidad
Cauce	0.04
Vegetación	0.12
Suelo desnudo	0.10

5.5.3. Modelización hidrodinámica

Los resultados de la simulación hidrodinámica indican que, dentro de la zona del dominio del modelo, el tirante de agua máximo fue de 0.96 m, registrados durante el día 20 de abril del 2016 (Figura 55), en esta fecha la superficie inundada fue de 1.84 ha. En cambio, el tirante de agua mínimo se registró el día 19 de octubre de 2016 con 0.07 m (Figura 56) generando una superficie inundada fue de 1.28 ha, es decir 0.56 ha menos que el día de máxima inundación, estos resultados concuerdan con las mediciones de flujo máximas y mínimas registradas durante los meses de abril y octubre respectivamente.

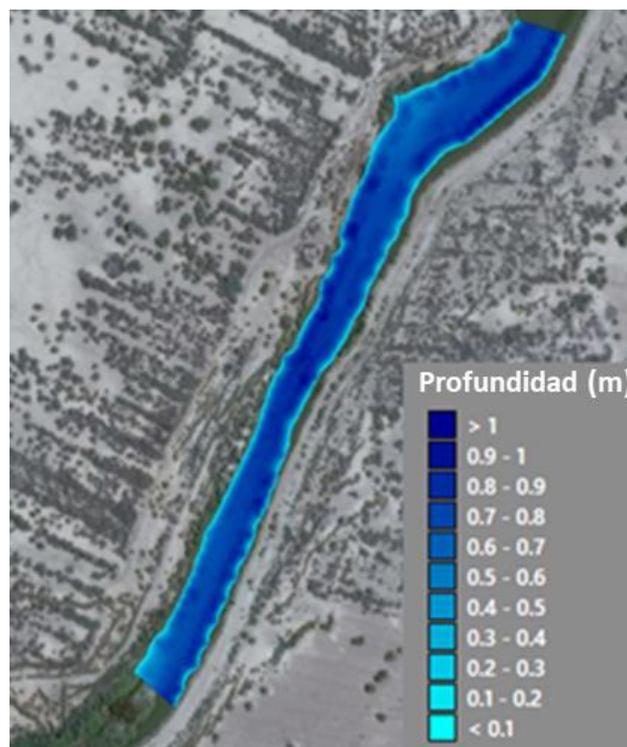


Figura 55. Máxima inundación simulada.

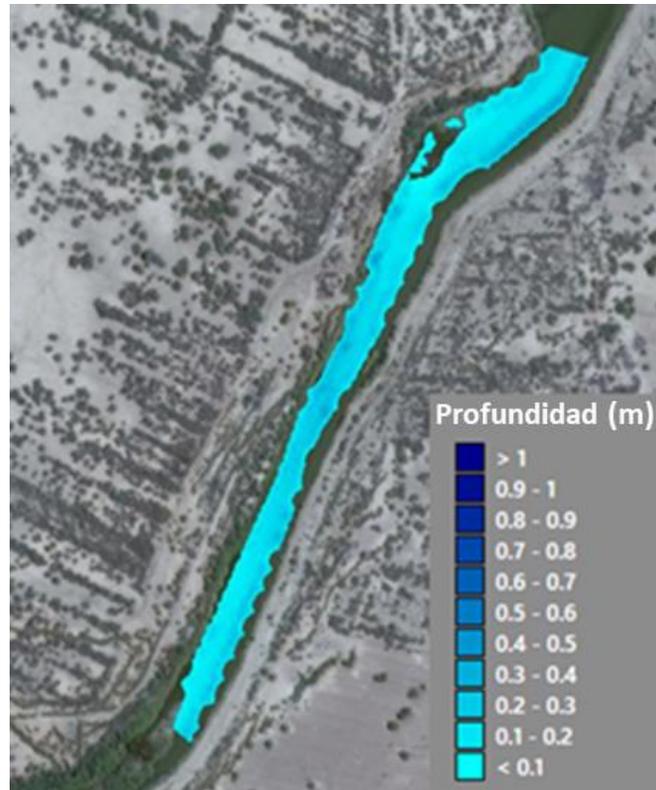


Figura 56. Mínima inundación simulada

De la modelación hidrodinámica realizada se obtuvo un tirante de agua máximo simulado en el sitio Ayala #3 de 0.56 m y el mínimo fue de 0.07 m, los cuales se presentaron en los meses de abril y octubre, respectivamente.

Durante los recorridos de campo, se observó que un menor tirante de agua permitió el establecimiento de vegetación en el DAPA, esto debido a que tirantes de agua entre 0.1 y 0.40 m permiten el establecimiento de especies acuáticas como el Carrizo (*Phragmites australis*) y el Tule (*Typha domingensis*) (López de Juambelz y Aguilar Contreras et al., 2009), cuando el tirante aumenta más de 1.5 m las especies vegetales, pueden morir (Kadlec y Wallace, 2008). Además del tirante de agua, otro de los resultados obtenidos fue la elevación de la superficie del agua (Figura 57a), dicha elevación oscila entre 6.56 y 4.5 m s.n.m.

Se puede observar en la figura 57a que en los meses de febrero-septiembre y de diciembre-febrero, los datos observados y simulados tienen una diferencia de hasta 0.06 m. Durante los meses de menor flujo (octubre y noviembre) el modelo subestima los niveles de agua por hasta 0.09 m, lo cual pudiera estar relacionado a la configuración geométrica del cauce, los valores de rugosidad y a la conectividad hidráulica del dren.

La correlación (R^2) entre los datos observados y calculados de elevación del nivel del agua fue de 0.90 (Figura 57b), indicador de confiabilidad de los resultados de las simulaciones del modelo hidrodinámico del DAPA.

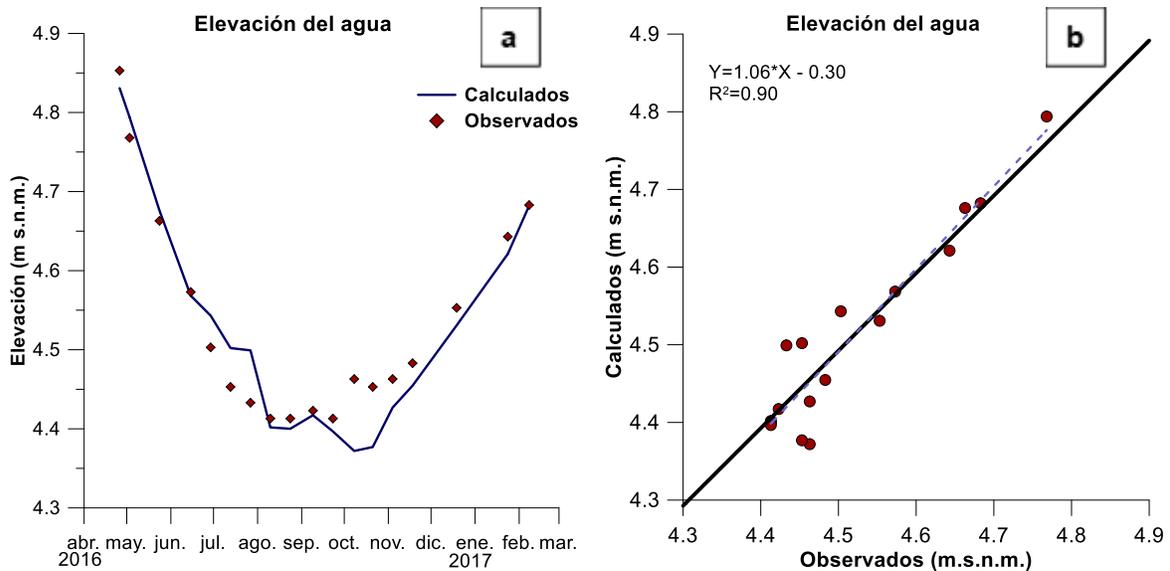


Figura 57. Resultados de elevación de agua derivados de la simulación hidrodinámica del DAPA (a) y correlación entre datos de elevación del agua observados y calculados (b).

Derivado de la simulación hidrodinámica, se obtuvieron velocidades del agua para cada día (Figura 58). De forma general, en la zona del dominio del modelo los resultados de velocidad de agua en la simulación fueron entre 0.003 y 0.15 ms^{-1} , particularmente en el sitio Ayala #3 la velocidad promedio durante el período simulado fue de 0.006 m/s , el valor mínimo de velocidad (0.003 m/s) y el máximo (0.009 m/s) coinciden con las fechas de mayor y menor flujo, registrados durante los meses de abril y octubre, respectivamente.

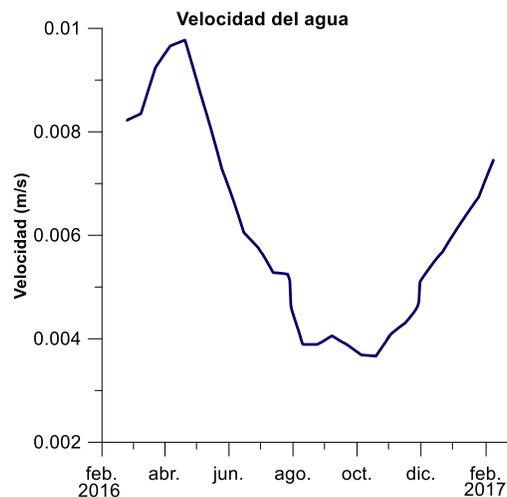


Figura 58. Valores de velocidad obtenidos de la modelización hidrodinámica del DAPA para el sitio Ayala #3.

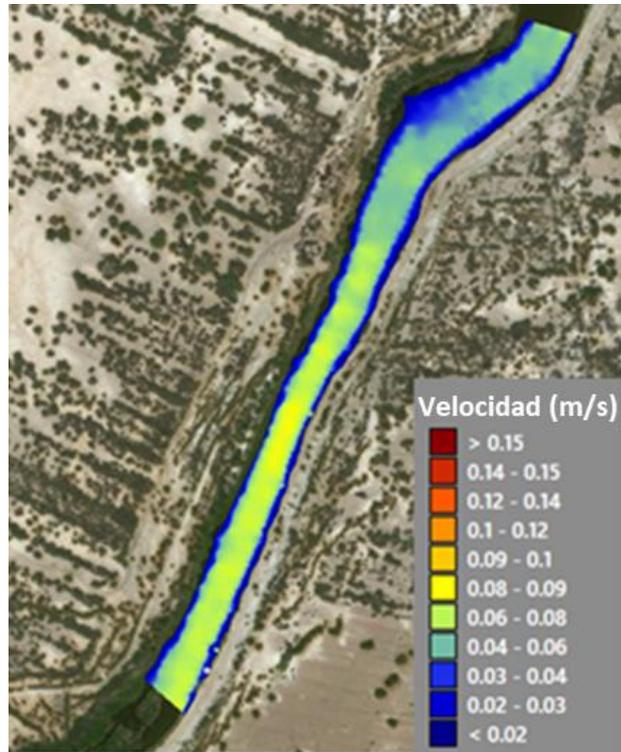


Figura 59. Resultados de distribución de velocidades obtenidas del modelo, para el día de máxima inundación (20 de abril 2016).

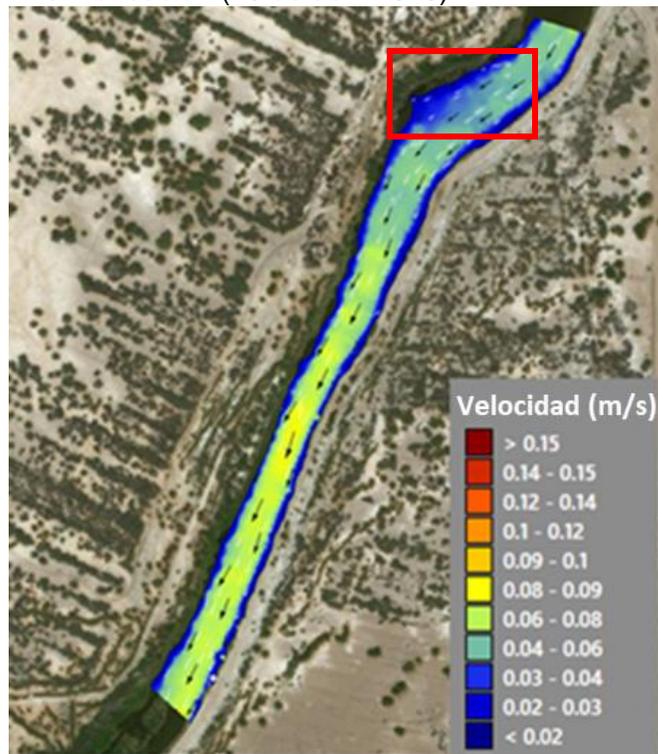


Figura 60. Vectores de dirección de flujo resultado de la simulación

En la figura 60, se observa en general los vectores de dirección del flujo son perpendiculares al cauce de estudio, además, se puede apreciar en el inicio del dominio del modelo una zona de baja velocidad en el centro del cauce y en ambos márgenes del dren, las cuales corresponden a áreas donde existe vegetación que actúa como una obstrucción para el libre flujo (Figura 61).

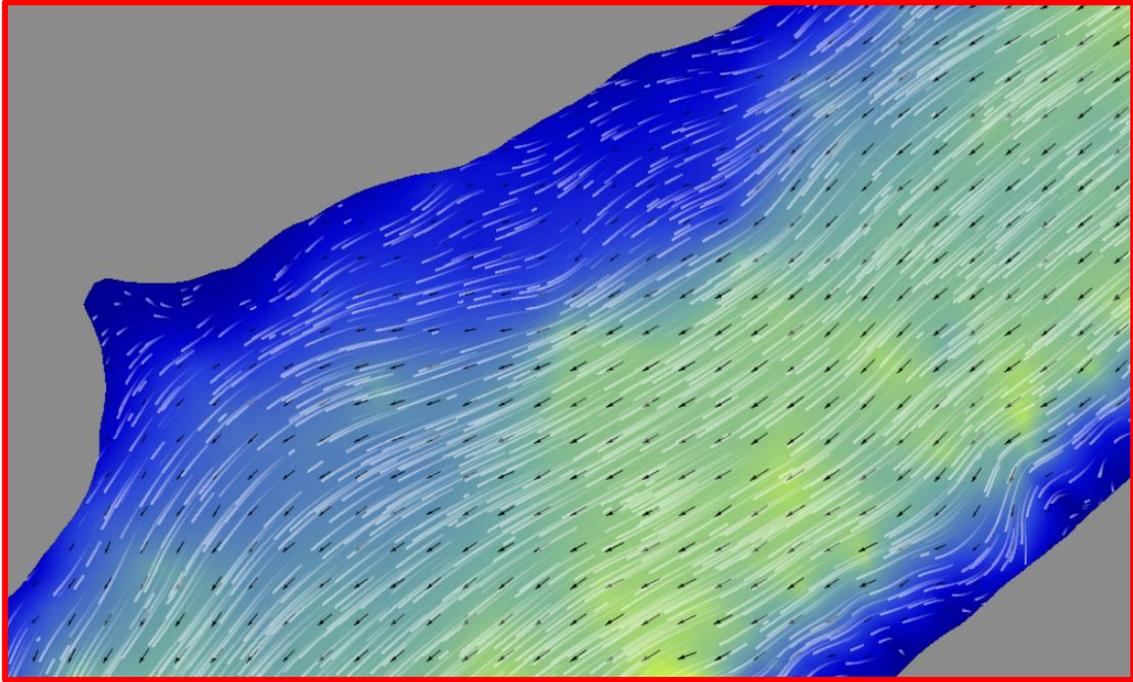


Figura 61. Dirección de flujo en la zona con vegetación referida al recuadro de la figura 60.

6. Conclusiones

El objetivo principal de esta investigación se alcanzó. Se desarrolló el modelo hidrodinámico del dren Plan de Ayala y se analizó la depuración del agua en base a la retención de nutrientes para el período comprendido de febrero de 2016 a noviembre de 2016.

6.1. Balance hidrológico y de masa

1. De acuerdo al balance hidrológico realizado, del 100% del agua que pasa por el sitio Ayala#2, las salidas del sistema son de: 2.3% evapotranspiración, 2.6% por evaporación directa, 20% se infiltra y 75.1% escurre superficialmente y llega al sitio Ayala #3. La disminución del caudal de aguas arriba (Ayala#2) hacia aguas abajo (Ayala#3) permite suponer que no existe ingreso de agua por retorno de riego en este tramo. El proceso de entrada de agua más importante es representado por la descarga de escurrimientos superficiales de los 186 km de drenes agrícolas que tiene la cuenca de captación de 24,760 ha del DAPA.
2. El volumen total anual de salida medido en el sitio Ayala #3 durante el período de estudio fue de 13.29 hm³, los cuales contribuyen a la sobrevivencia de los humedales de la Laguna El Indio, así como a los Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado. Dicho caudal está influenciado directamente por la aplicación estacional de riegos en la cuenca de captación del DAPA.
3. Los resultados fisicoquímicos del agua demuestran que el valor máximo de salinidad (13.90 mS/cm) puede representar un problema para el Tule, especie acuática que habita en el dren y tiene una tolerancia de 10 a 15 mS/cm, en cambio dichos valores no representan peligro alguno para el carrizo y el pino salado que son altamente tolerantes (31 y 50 mS/cm).
4. Las concentraciones de los nutrientes analizados fueron de 0 a 17 mg/L para el nitrógeno total, de 0 a 32 mg/L para los nitratos, de 0 a 0.2 mg/L para los nitritos, de 0.02 a 2.1 mg/L para el amonio, de 0 a 2 mg/L para el fósforo total y de 0 a 1.6 mg/L para los ortofosfatos. La concentración de

nitrógeno total y el fósforo total, siempre estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles para la descarga de agua en cuerpos de agua nacionales, establecidos en la norma NOM-001-ECOL-1996. Por su parte, la concentración de nitrato, supera los valores típicos de nitratos en aguas superficiales, establecidos por la Organización Mundial de la Salud.

5. La tendencia del comportamiento del flujo másico total de los compuestos analizados coincide con los caudales medidos en los sitios de aforo, es decir, entre menos caudal menos flujo másico y viceversa. El de menor flujo másico fue el sitio Ayala #1 que aporta únicamente 657.6 kg de nutrientes; en el sitio Ayala #2 se integra la mayor carga másica, 11,730 kg, atribuidos a la descarga del dren de la PTAR; en el sitio Ayala #3 se cuantificaron 8,780 kg observándose una disminución del flujo másico asociada a la disminución del flujo.
6. La retención de nutrientes promedio en los tramos de dren entre los sitios estudiados fue variable, por ejemplo: para los nitratos fue de 9.7% y 55.66%; para los nitritos 23.4% y 47.2; para el amonio 21.3 y 17.0%; para los ortofosfatos 33.1% y 36.32%; para el fósforo total 0.28% 0.02%; para el nitrógeno total 6.8% y 3.3%, entre los sitios Ayala #1 a Ayala #2 y Ayala #2 a Ayala #3, respectivamente. Esto nos permite concluir que la retención es diferencial entre tipos de compuestos, esto puede ser atribuido al estado vegetativo de las plantas acuáticas, a las características fisicoquímicas del agua, así como a la carga de nutrientes.

6.2. Servicios ecosistémicos

7. El volumen de agua cuantificado que transita desde el punto Ayala#1 hasta el Ayala#3 y que finalmente descarga en el Estuario del Delta del Río Colorado muestra que el DAPA, como se indicó en la conclusión 2, brinda el servicio ecosistémico de provisión de agua.
8. El servicio ecosistémico de depuración del agua, fue evaluado con la retención de nutrientes. Dichos resultados demuestran que existe depuración del agua en el dren Plan de Ayala, esta depuración oscila

entre 0.02% y 55.66%, varía entre los puntos muestreados y entre los compuestos analizados.

9. Los resultados obtenidos del análisis del servicio ecosistémico de provisión de hábitat demuestran este servicio ecosistémico es brindado por el DAPA. El cual brinda hábitat y refugio a 12 especies migratorias y 17 residentes, entre las que se encuentra al garzón cenizo especie sujeta a protección especial de acuerdo con la NOM-059-SEMARNAT-2010, y especies de interés cinegético como es el caso de los patos. A su vez, en el DAPA se pueden encontrar 5 de las 10 especies más comunes en la zona de inundación del Delta del Río Colorado.

6.3. Modelo hidrodinámico del DAPA

10. Los resultados de la modelización hidrodinámica de un tramo del DAPA demostraron que el tirante de agua en esa zona oscila entre 0.96 y 0.07 metros. La superficie mínima inundada es de 1.28 has y durante la máxima inundación esta superficie aumenta a 1.84 has. El rango de velocidad del agua en el DAPA es de 0.003 a 0.15 m/s.
11. La modelización hidrodinámica de un tramo del DAPA permitió conocer su funcionamiento hidráulico, dado que se utilizaron las características físicas del cauce y terrazas del segmento modelizado. Esta modelización es una herramienta fundamental para crear medidas de gestión y manejo del agua y del DAPA.

7. Recomendaciones

La gestión y manejo integral del dren son aspectos fundamentales para que el dren agrícola DAPA cumpla con sus funciones hidráulicas definidas y como proveedor de servicios ecosistémicos, tanto de depuración de agua como de provisión de hábitat, además de los que no se analizan en esta investigación.

Si bien, la vegetación favorece en la retención y asimilación de nutrientes y de otros contaminantes en el DAPA, también representa un obstáculo para el flujo libre del agua, por lo que es común que dentro de los planes de manejo de los drenes la vegetación sea quemada o bien sea removida mediante dragados. Esta situación hace evidente la implementación de prácticas de gestión y manejo adecuadas para cumplir con las funciones hidráulicas y la provisión de servicios ecosistémicos del dren, tanto en el DAPA como en su cuenca de captación. Algunas de las prácticas que se pueden implementar son:

- Optimizar, a nivel de cuenca de captación, el uso de fertilizantes y agroquímicos y evitar descargas al DAPA de agua residual cruda así como desechos de ganado, con ello se disminuye la carga de nutrientes que llegan al DAPA.
- Mantener en el DAPA parches de vegetación acuática, los cuales favorecerán en la retención y asimilación de contaminantes, los cuales representan un sitio atractivo para aves. Estos parches de vegetación deben mantenerse del tal forma, que la funcionalidad del DAPA como dren prevalezca. Es imperioso mantenerlos debido a que la vegetación realiza la depuración del agua y como consecuencia se reduce la carga de contaminantes que llegan a los humedales Remanentes del Delta del Río Colorado
- Crear barreras de tierra en el DAPA para aumentar el tiempo de retención del agua dentro del dren y con ello mejorar la calidad del agua, además son hábitats utilizados por las aves. Estas barreras se deben diseñar de tal forma que no afecte el funcionamiento del dren y que además en caso de una avenida extraordinaria no represente peligro alguno para las zonas aledañas al dren.

8. Referencias

- Adeuya, R., Utt, N., Frankenberger, J., Bowling, L., Kladvko, E., Brouder, S., & Carter, B. (2012). Impacts of drainage water management on subsurface drain flow, nitrate concentration, and nitrate loads in Indiana. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6), 474-484
- Agisoft LLC. (2017). PhotoScan. 11B Degtyarniy per. St. Petesburg, Russia, 191144.
- Aguirre Muñoz, A., Alfaro, M., Gutiérrez, E., & Morales, S. (2009). Especies exóticas invasoras impactos sobre las poblaciones de flora y fauna, los procesos ecológicos y la economía. *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio/Sarukhán, J. (Coord. gen.) p. 277-318.
- Ahiablame, L. M., Chaubey, I., Smith, D. R., & Engel, B. A. (2011). Effect of tile effluent on nutrient concentration and retention efficiency in agricultural drainage ditches. *Agricultural water management*, 98(8), 1271-1279.
- Allen, R.G.; Walter, I.A.; Elliott, R.L.; Howell, T.A.; Itenfisu, D.; Jensen, M.E.; Snyder, R.L. *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*: ASCE Publications; 2005
- Ambrose, S. 1989. The Australian bird count—Have we got your numbers? *RAOU Newsletter*, Publicado por The Royal Australasian Ornithologists Union, Moonee Ponds, Vic. 3039, Australia, 80:1-2.
- Arguedas, J. C. V., Céspedes, J. V. (2014). Avifauna del Caribe sur asociada a ecosistemas alterados en Limón, Costa Rica. *UNED Research Journal*, 6(2).
- Atkinson, P. W., Fuller, R. A., Gillings, S., & Vickery, J. A. (2006). Counting birds on farmland habitats in winter. *Bird Study*, 53(3), 303-309.
- Baeza, K., Lopez-Hoffman, L., Glenn, E. P., Flessa, K., & Garcia-Hernandez, J. (2013). Salinity limits of vegetation in Cienega de Santa Clara, an oligotrophic marsh in the delta of the Colorado River, Mexico: implications for an increase in salinity. *Ecological engineering*, 59, 157-166.
- Béjar, M.V. (2007). *Drenaje*, editorial Tecnológica de CR.
- Biggs, R., Schlüter, M., & Schoon, M. L. (Eds.). (2015). *Principles for building resilience: sustaining ecosystem services in social-ecological systems*. Cambridge University Press.
- Blann, K. L., Anderson, J. L., Sands, G. R., & Vondracek, B. (2009). Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 39(11), 909-1001.
- Borin, M., & Tocchetto, D. (2007). Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters. *Science of the Total Environment*, 380(1), 38-47.

- Bouldin, J. L., Farris, J. L., Moore, M. T., & Cooper, C. M. (2004). Vegetative and structural characteristics of agricultural drainages in the Mississippi Delta landscapes. *Environmental Pollution*, 132(3), 403-411.
- Braca, G. (2008). Stage-discharge relationships in open channels: Practices and problems. Univ. degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- Brown, C., Reyers, B., Ingwall-King, L., Mapendembe, A., Nel, J., O'Farrell, P., ... & Bowles-Newark, N. J. (2014). Measuring ecosystem services: Guidance on developing ecosystem service indicators. UNEP-WCMC, Cambridge, UK.
- Bulc, T. G., Klemenčič, A. K., & Razinger, J. (2011). Vegetated ditches for treatment of surface water with highly fluctuating water regime. *Water Science and Technology*, 63(10), 2353-2359.
- Camacho-Valdez, V. & Ruiz-Luna, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1.
- Canga, E., Heckrath, G. J., & Kjaergaard, C. (2016). Agricultural drainage filters. II. Phosphorus retention and release at different flow rates. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(8), 276.
- Carrera, V., E., J. (2015). De la modelación hidrodinámica a la mejora del desempeño hidráulico del humedal artificial Las Arenitas. Universidad Autónoma de Baja California. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería.
- Carrillo-Guerrero, Y., Glenn, E. P., & Hinojosa-Huerta, O. (2013). Water budget for agricultural and aquatic ecosystems in the delta of the Colorado River, Mexico: implications for obtaining water for the environment. *Ecological engineering*, 59, 41-51.
- Castaldelli, G., Soana, E., Racchetti, E., Vincenzi, F., Fano, E. A., & Bartoli, M. (2015). Vegetated canals mitigate nitrogen surplus in agricultural watersheds. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 212, 253-262
- CESPM. (2016). Reporte operativo planta de tratamiento de aguas residuales Km. 57.
- CESPM. (2017). Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali. Consultado en línea: <http://www.cespm.gob.mx/infraestructura.html>
- Chen, D., Lu, J., Wang, H., Shen, Y., & Kimberley, M. O. (2010). Seasonal variations of nitrogen and phosphorus retention in an agricultural drainage river in East China. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2), 312-320.
- CILA. (2013). Estudio de gran visión para la instalación de las plantas desaladoras a ubicar en el río Nuevo y en el Golfo de California; así como el aprovechamiento en usos ambientales de las aguas residuales tratadas de las plantas de tratamiento ubicadas en el valle de Mexicali y del agua de retorno agrícola del DR-014. Informe Final.

- CivilGEO. Asia Pacific A-154A, 3rd Floor Sector 63, Noida UP 201307, India.
- CONAGUA. (2013). Subdirección General Técnica. Gerencia del Consultivo Técnico (2013) Informe de la visita de evaluación de la contaminación del Río Hardy en Mexicali, B.C.
- CONAGUA. (2018). Canales y drenes: Sistema de recarga incidental. Comisión Nacional del Agua, DTOCPBC.
- Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., & Raskin, R. G. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *nature*, 387(6630), 253.
- Cooper, C. M., Moore, M. T., Bennett, E. R., Smith, S., Farris, J. L., Milam, C. D., & Shields, F. D. (2004). Innovative uses of vegetated drainage ditches for reducing agricultural runoff. *Water Science and Technology*, 49(3), 117-123.
- Cortez Lara, A. (2011). Gestión y manejo del agua: el papel de los usuarios agrícolas del Valle de Mexicali. *Problemas del desarrollo*, 42(167), 71-95.
- Daessle, L., Orozco, A., Struck, U., Camacho-Ibar, V., van Geldern, R., Santamaría-del-Ángel, E., Barth, J. 2017. Sources and sinks of nutrients and organic carbon during the 2014 pulse flow of the Colorado River into Mexico. *Ecol. Eng.* 106, 799-808.
- De Groot, R. S., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., & Willemen, L. (2010). Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological complexity*, 7(3), 260-272.
- De Miguel-Fernández, C., & Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO₃) y nitritos (NO₂) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. *Minería & Geología*, 22(3), 9.
- Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 913.
- Dollinger, J., Dagès, C., Bailly, J. S., Lagacherie, P., & Voltz, M. (2015). Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review. *Agronomy for sustainable development*, 35(3), 999-1020.
- EEM. (2003). Ecosistemas y bienestar humano. Marco para la Evaluación. Resumen. Informe del Grupo de Trabajo sobre Marco Conceptual de la Evaluación de Ecosistemas del Milenio. World Resources Institute, Washington, DC.
- EEM. (2005). Los ecosistemas y el bienestar humano: humedales y agua. Informe de síntesis. Evaluación de Ecosistemas del Milenio. World Resources Institute, Washington, DC.

- EPA. (2018). Estimate Nitrate Concentrations in Groundwater Used for Drinking. United States Environmental Protection Agency. Consultado en línea: <https://www.epa.gov/nutrient-policy-data/estimated-nitrate-concentrations-groundwater-used-drinking>
- Escobar., J. (2003). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. Organización de las Naciones Unidas. Volumen 50. Disponible en línea: <http://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/LCL1799S.PDF>
- ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.). 380 New York Street, Redlands, California, 92373-8100, Estados Unidos. Copyright 1995-2011.
- Etkin. (2016). Applications of 2D surface Flow modeling in the new HEC-RAS versión 5.0. ASFPM. Annual National Conference, Grand Rapids, MI. Disponible en línea: http://www.floods.org/Files/Conf2016_ppts/G7_Etkin.pdf
- FAO, I., & IFA, A. (2002). Los Fertilizantes y su Uso. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes.
- FAO. 2014. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/mex/indexesp.stm.
- Fu, D., Gong, W., Xu, Y., Singh, R. P., Surampalli, R. Y., & Zhang, T. C. (2014). Nutrient mitigation capacity of agricultural drainage ditches in Tai lake basin. *Ecological engineering*, 71, 101-107.
- García. (2004). Modificaciones Al Sistema De Clasificación Climática De Köppen (2ª edición), Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F (1988) (56 pp).
- García Hernández, J., Valdés-Casillas, C., Cadena-Cárdenas, L., Romero-Hernández, S., Silva-Mendizábal, S., González-Pérez, G., Leyva-García, G. N. & Aguilera-Márquez, D. 2011. Humedales artificiales como un método viable para el tratamiento de drenes agrícolas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2, 97-111.
- García-Llorente, M., Iniesta-Arandia, I., Willaarts, B. A., Harrison, P. A., Berry, P., del Mar Bayo, M., & Martín-López, B. (2015). Biophysical and sociocultural factors underlying spatial trade-offs of ecosystem services in semiarid watersheds. *Ecology and Society*, 20(3).
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Shaw, W. & Flessa, K. 2001. Ecology and conservation biology of the Colorado River delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 49, 5-15.
- Guo, L., & Ma, K. (2011). Seasonal dynamics of nitrogen and phosphorus in water and sediment of a multi-level ditch system in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 21(4), 437-445.

- Hands, H., Ryan, M., & Smith, J. (1991). Migrant Shorebird Use of Marsh, Moist-Soil, and Flooded Agricultural Habitats. *Wildlife Society Bulletin (1973-2006)*, 19(4), 457-464. Disponible en línea: <http://www.jstor.org/stable/3782158>
- Harris C. D., (2003). *Análisis químico cuantitativo 2a ed.*, Ed. Reverte. Capítulos 4, 5 y 9.
- Hernández-Vázquez, B., Loza, V.E., Morales, M. A., Payan, O. S., Avila, C. E., Alvarado, P. J. I., (2010). *Guía técnica para el área de influencia del campo experimental del valle de Mexicali*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en línea: <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/handle/123456789/1674>
- Herzon, I., & Helenius, J. (2008). Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. *Biological conservation*, 141(5), 1171-1183.
- Hinojosa-Huerta, O., Iturribarría-Rojas, H., Zamora-Hernández, E., & Calvo-Fonseca, A. (2008). Densities, species richness and habitat relationships of the avian community in the Colorado River, Mexico. *Studies in Avian Biology*, 37, 74-82.
- Hinojosa-Huerta, O., Carrillo-Guerrero, Y.K., 2010. *La Cuenca Binacional del Delta del Río Colorado, Las Cuencas Hidrográficas de México*, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Disponible en: <http://www.publicaciones.inecc.gob.mx/libros/639/rcolorado.pdf>
- Hinojosa-Huerta, O., Soto-Montoya, E., Gómez-Sapiens, M., Calvo-Fonseca, A., Guzmán-Olachea, R., Butrón-Méndez, J., & Román-Rodríguez, M. (2013b). The birds of the Ciénega de Santa Clara, a wetland of international importance within the Colorado River Delta. *Ecological engineering*, 59, 61-73.
- INECC. (2018). *Evaluación de servicios ecosistémicos de riesgos por cambio climático en cuencas hidrográficas de Chile y México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INEGI. (2014). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Encuesta Nacional Agropecuaria, ENA 2014, Conociendo el campo de México, Resultados*. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/encuestas/agropecuarias/ena/ena2014/doc/presentacion/ena2014_pres.pdf
- Iniesta-Arandia, I., Del Amo, D. G., García-Nieto, A. P., Pineiro, C., Montes, C., & Martín-López, B. (2015). Factors influencing local ecological knowledge maintenance in Mediterranean watersheds: insights for environmental policies. *Ambio*, 44(4), 285-296.
- Iñiguez, M., Ojeda-Bustamante, W., & Díaz-Delgado, C. (2015). La infraestructura hidroagrícola ante escenarios del cambio climático. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(5), 89-101.

- Iseyemi, O. O., Farris, J. L., Moore, M. T., & Choi, S. E. (2016). Nutrient mitigation efficiency in agricultural drainage ditches: an influence of landscape management. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 96(6), 750-756.
- 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.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press.
- Kerig, D. (2001). *El valle de Mexicali y la colorado River Land Company 1902-1946 [Colección Baja California: Nuestra Historia]*. Mexicali [México]: Universidad Autónoma de Baja California.
- Kröger, R., Moore, M. T., Farris, J. L., & Gopalan, M. (2011). Evidence for the use of low-grade weirs in drainage ditches to improve nutrient reductions from agriculture. *Water, Air, & Soil Pollution*, 221(1-4), 223.
- Kumwimba, M. N., Zhu, B., & Muyembe, D. K. (2017). Estimation of the removal efficiency of heavy metals and nutrients from ecological drainage ditches treating town sewage during dry and wet seasons. *Environmental monitoring and assessment*, 189(9), 434.
- Kumwimba, M. N., Dzakpasu, M., Zhu, B., Wang, T., Ilunga, L., & Kavidia Muyembe, D. (2017b). Nutrient removal in a trapezoidal vegetated drainage ditch used to treat primary domestic sewage in a small catchment of the upper Yangtze River. *Water and Environment Journal*, 31(1), 72-79.
- LaMotte. (2016). SMART Spectro 2, Soectrophotometer. Operator's Manual. <http://www.lamotte.com/en/browse/2000-02.html>
- Lomeli-Banda. (2013). *Comportamiento hidrodinámico de La Ciénega de Santa Clara durante el ciclo hidrológico 2010-2011*. Tesis para obtener el grado de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Baja California.
- López de Juambelz, R., & Aguilar Contreras, A. (2009). Las plantas acuáticas en el diseño. *Bitácora arquitectura*, (19), 50-53.
- López-Hoffman, L., McGovern, D. E., Varady, G. R., Flessa, W. K., (2009) *Conservation of Shared Environments, learning from the United States and México*. The Edge: Environmental Science, Law and Policy Series. University of Arizona Press.
- Lluen-Chero. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Tesis para obtener el grado en master en Ingeniería Civil. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos.

- Mack, R.N., D. Simberloff, W.M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout et al. 2000. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecology* 10: 689-710.
- Madramootoo, C. A., Johnston, W. R., & Willardson, L. S. (Eds.). (1997). Management of agricultural drainage water quality (Vol. 13). Food & Agriculture Org.
- Martínez J. A., Hernández, R. E., Cástro, J.M., Priego, R.A., Martín, A, García, C., Gutiérrez, D. (2010). Fortalecimiento de las capacidades locales para el uso de la fauna silvestre como atractivo ecoturístico en Jalisco, México. *Gestión Ambiental* 19:19-32.
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal (No. 581.1335 631.811). International Potash Institute.
- Metcalf, E., Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*.
- Moeder, M., Carranza-Díaz, O., López-Angulo, G., Vega-Aviña, R., Chávez-Durán, F. A., Jomaa, S., & Delgado-Vargas, F. (2017). Potential of vegetated ditches to manage organic pollutants derived from agricultural runoff and domestic sewage: A case study in Sinaloa (Mexico). *Science of the Total Environment*, 598, 1106-1115.
- Mosier, A., Syers, J. K., & Freney, J. R. (Eds.). (2013). *Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment* (Vol. 65). Island Press.
- Moore, M. T., Kröger, R., Locke, M. A., Cullum, R. F., Steinriede, R. W., Testa, S., & Cooper, C. M. (2010). Nutrient mitigation capacity in Mississippi Delta, USA drainage ditches. *Environmental Pollution*, 158(1), 175-184.
- Moreno Mena, J. A., & López Limón, M. G. (2005). Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el valle de Mexicali. *Estudios fronterizos*, 6(12), 119-153.
- Mueller y Helsel. (1996). *Nutrients in the nation's water too much of a good thing*. U.S. Geological Survey. Circular 1136. Disponible en línea: <https://pubs.usgs.gov/circ/1996/1136/report.pdf>
- NLCD. National Land Cover Database, Land Cover Collection. U.S. Geological Survey. <https://catalog.data.gov/dataset/national-land-cover-database-nlcd-land-cover-collection>
- NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental - Especies nativas de México de flora y fauna silvestre – Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio -Lista de especies en peligro.
- NOM-127-SSA1-1994. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud, Salud ambiental.

- NOM-001-SEMARNAT-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- OEIDRUS. (2009). Estudio bibliográfico sobre la salinidad del valle de Mexicali. Secretaría de Fomento Agropecuario. Oficina Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable. Mexicali, Baja California. Disponible en: <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/1856.pdf>
- Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos (No. 55). Food & Agriculture Org.
- Padilla-Arzaluz, L.S. (2017). Variabilidad espacial de la salinidad en suelos del Distrito de Riego 014, Mexicali, Baja California. Tesis para obtener el grado de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Planeación Urbana y Regional, Toluca, México. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/67920/UAEM-FaPUR-Tesis-Leonardo%20Sebastian%20Padilla%20Arzaluz.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., & Laterra, P. (2011). Valoración de servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial.
- Pierobon, E., Castaldelli, G., Mantovani, S., Vincenzi, F., & Fano, E. A. (2013). Nitrogen removal in vegetated and unvegetated drainage ditches impacted by diffuse and point sources of pollution. *CLEAN—Soil, Air, Water*, 41(1), 24-31.
- Ralph, C. J., Geupel, G. R., Pyle, P., Martin, T. E., DeSante, D. F., & Milá, B. (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-159. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 46 p, 159.
- Ramírez-Hernández. (2006). La contaminación del agua subterránea en el valle de Mexicali. *Contaminación y Medio Ambiente en Baja California*. 201-225.
- Ramsar. (2016). *Ramsar* [Online]. 2016. Disponible en: <http://www.ramsar.org/es>
- REMAS. (2017). Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (www.siafeson.com/remas) CESAVE, SIAFESON.
- Rickert, D., 1993. Water quality assessment to determine the nature and extent of water pollution by agriculture and related activities. In: *Prevention of Water Pollution by Agriculture and Related Activities*. Proceedings of the FAO Expert Consultation, Santiago, Chile, 20–23 October 1992. Water Report 1, FAO, Rome, pp. 171–194
- Ritzema, H.P. (1994). Subsurface Flow to Drains. *Drainage Principles and Applications*. International Institute for Land Reclamation and Improvement

(ILRI), Chapter 8 in: Publication 16, second revised edition, Wageningen, The Netherlands. ISBN 9070754 3 39

- Rodriguez-Burgueño, J.E., (2012). Modelación geohidrológica transitoria de la relación acuífero-río de la zona FFCC-vado Carranza del río Colorado con propósito de manejo de la zona riparia. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería.
- SAGARPA. (2006). Contexto internacional para el sector agroalimentario mexicano. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO). Disponible en: http://www.sagarpa.gob.mx/programas2/evaluacionesExternas/Lists/Otros%20Estudios/Attachments/24/contexto_internacional.pdf
- Salcedo-Peredia. (2016). Simulación hidráulica del flujo pulso en el corredor ripario del Delta del Río Colorado. Tesis para obtener el grado de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Baja California.
- SEFOA. (2016). Necesidades de infraestructura y cambios en el manejo del agua en el Distrito de Riego 014. CILA: Foro Ciudadano, Región Mexicali. Dr. Carlos Orozco Riezo. Disponible en línea: http://www.cila.gob.mx/foros/prpm040316_1.pdf
- She, D., Zhang, L., Gao, X., Yan, X., Zhao, X., Xie, W., & Xia, Y. (2017). Limited N removal by denitrification in agricultural drainage ditches in the Taihu Lake region of China. *Journal of Soils and Sediments*, 1-10.
- Shen, L. D., Zheng, P. H., & Ma, S. J. (2016). Nitrogen loss through anaerobic ammonium oxidation in agricultural drainage ditches. *Biology and fertility of soils*, 52(2), 127-136.
- Silva, A. R. E., Cobelas, M. Á., & González, E. M. (2017). Impactos del nitrógeno agrícola en los ecosistemas acuáticos. *Revista Ecosistemas*, 26(1), 37-44.
- Skaggs, R. W., Breve, M. A., & Gilliam, J. W. (1994). Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage*. *Critical reviews in environmental science and technology*, 24(1), 1-32.
- Skaggs, R. W., Youssef, M. A., Chescheir, G. M., & Gilliam, J. W. (2005). Effect of drainage intensity on nitrogen losses from drained lands. *Transactions of the ASAE*, 48(6), 2169-2177.
- Smith, D. R., & Pappas, E. A. (2007). Effect of ditch dredging on the fate of nutrients in deep drainage ditches of the Midwestern United States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 62(4), 252-261.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico. Guía internacional de métodos de investigación (versión en español). Instituto de Hidrología de España-UNESCO.

- Sosa, A., I., Sánchez, L. J., (2004). Espectrofotometría de absorción. Instituto de Biotecnología. Universidad Autónoma de México. Maestría en Ciencias Bioquímicas.
- Strock, J. S., Kleinman, P. J., King, K. W., & Delgado, J. A. (2010). Drainage water management for water quality protection. *Journal of soil and water conservation*, 65(6), 131A-136A.
- Sykes, G.G. (1937). *The Colorado Delta*. American Geographical Society, special publication No. 19.
- Tamm, C. O. (1991). Introduction: geochemical occurrence of nitrogen. Natural nitrogen cycling and anthropogenic nitrogen emissions. In *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems* (pp. 1-6). Springer, Berlin, Heidelberg.
- University of Arizona., Water Resources Research, C., Arizona & Department Of Environmental, Q. 1995. Field manual for water quality sampling, Tucson, Ariz., Arizona Water Resources Research Center.
- USACE. HEC-RAS. River Analysis System. US Army Corps of Enigners. Insitute for Water Resources. Hidrologiçn Engineering Center (HEC). 609 Second Street, Davis, CA 95619-4687.
- USACE. (2016). HEC-RAS. River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Gary W. Brunner. US Army Corps of Enigners. Insitute for Water Resources. Hidrologiçn Engineering Center (HEC). 609 Second Street, Davis, CA 95619-4687.
- USDA. (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres.
- USDA. (2001). Water Management (Drainage). Part 650 Enineering Field Handbook. National Engineering Handbook. Disponible en línea: <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17551.wba>
- USGS. (2007). U.S. Geological Survey Streamganing... from de National Streamflow Information Program. March 2007. Disponible en línea: <https://pubs.usgs.gov/fs/2005/3131/FS2005-3131.pdf>
- USGS. (2018). Texto sobre la calidad del agua. La ciencia del agua para las escuelas. Servicio Geológico de los Estados Unidos. Consultado en línea: <https://water.usgs.gov/gotita/waterquality.html>
- USGS. (2018b). Water Science Glossary of Terms. Servicio Geológico de los Estados Unidos. Consultado en línea: <https://water.usgs.gov/edu/dictionary.html>
- Van Nguyen, H., & Maeda, M. (2016). Effects of pH and oxygen on phosphorus release from agricultural drainage ditch sediment in reclaimed land, Kasaoka Bay, Japan. *Journal of Water and Environment Technology*, 14(4), 228-235.

- Van Kessel, J. F. (1976). Influence of denitrification in aquatic sediments on the nitrogen content of natural waters. *Pudoc*.
- Winter, C. T., Harvey, W. J., Franke, L. O., Alley, M. W., (1998). Groundwater and Surface Water A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139.
- Wratten, S., Sandhu, H., Cullen, R., & Costanza, R. (Eds.). (2013). Ecosystem services in agricultural and urban landscapes. John Wiley & Sons.
- Woltemade, C. 2000. Ability of restored wetlands to reduce nitrogen and phosphorus concentrations in agricultural drainage water. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55, 303-309.
- Wu, F. S. (2008). Characteristics of flow resistance in open channels with non-submerged rigid vegetation. *Journal of Hydrodynamics*, Ser. B, 20(2), 239-245.
- Valdes-Casillas, C., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Carrillo-Guerrero, Y., Garcia-Hernandez, J., Zamora-Arroyo, F., Muñoz-Viveros, M., Briggs, M., Lee, C. & Chavarría-Correa, E. 1998. Wetland management and restoration in the Colorado River delta: the first steps. *Special publication of CECARENA-ITESM Campus Guaymas and NAWCC, Mexico*.
- Van Kessel, J. F. (1976). Influence of denitrification in aquatic sediments on the nitrogen content of natural waters. *Pudoc*.
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., & Parra, I. (2005). Prioridades de conservación en el delta del río Colorado, México y Estados Unidos. Sonoran Institute, Environmental Defense, University of Arizona, Pronatura Noroeste Dirección de Conservación Sonora, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, and World Wildlife Fund-Gulf of California Program. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/prioridades-de-conservacion-en-el-delta-del-rio-colorado-mexico-y-estados-unidos/>
- Zamora-Arroyo, F., Flessa, W. K., (2009). Nature's Fair Share: Finding Allocating Water for the Colorado River Delta. Conservation of shared environments, learning from the United States and Mexico.
- Zhang, W., Ricketts, T. H., Kremen, C., Carney, K., & Swinton, S. M. (2007). Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological economics*, 64(2), 253-260.

9. Anexos

9.1. Formato de resumen de Aforo

System Report

Página 1 de 5

Resumen de aforo				Datos generados: Wed Mar 23 2016		
Información de fichero		Detalles del punto de aforo				
Nombre del fichero	AYALA3.23M.WAD	Nom. del punto de aforo	AYALA3			
Fecha y hora de inicio	2016/03/23 11:44:42	Operadores	WAR			
Información del sistema		Unidades técnicas		Incertidumbre del aforo		
Tipo de sensor	FlowTracker		(Metrico)	Categoría	ISO	Estadística
Numero de serie #	P5770	Distancia	m	Precision	1.0%	1.0%
Version de CPU	3.9	Velocidad	m/s	Calado	0.1%	0.3%
Version de software	2.30	Area	m ²	Velocidad	0.5%	1.9%
Factor de corrección montaje	0.0%	Caudal	m ³ /s	Ancho	0.1%	0.1%
Resumen				Metodo	1.0%	-
Int. de promediado	20	# Estaciones	35	# Estaciones	1.5%	-
Margen de inicio	Mizq	Ancho total	30.900	Total	2.1%	2.2%
SNR promedio	39.8 dB	Area total	15.126			
Temp promedio	18.85 °C	Calado medido	0.490			
Ecuac. Caudal	Area central	Velocidad media	0.0596			
		Caudal total	0.9008			

file:///C:/Program%20Files%20(x86)/SonTek/FlowTracker/Resources/Reports/Summary.... 23/03/2016

Resumen de aforo

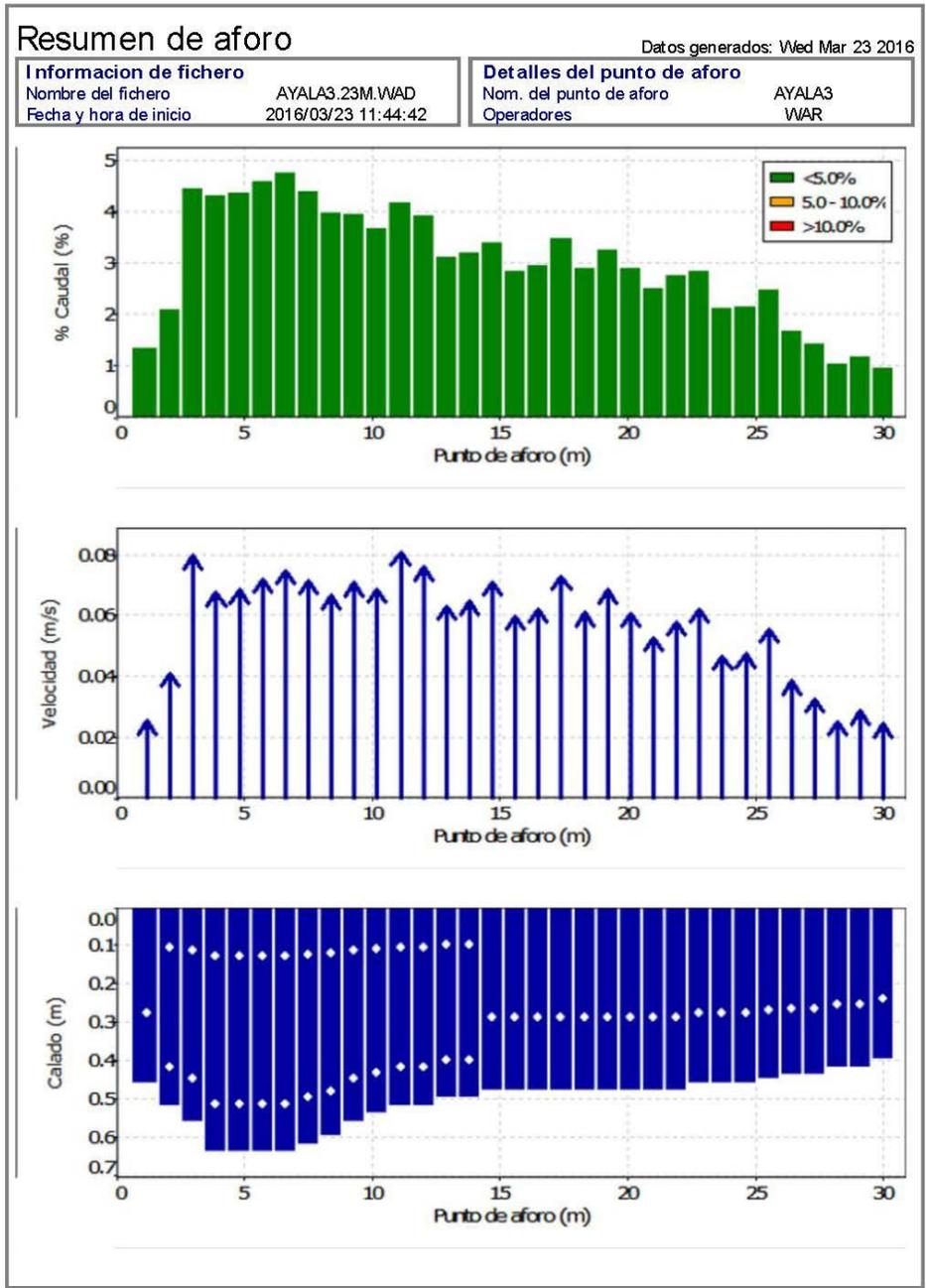
Datos generados: Wed Mar 23 2016

Información de fichero		Detalles del punto de aforo	
Nombre del fichero	AYALA3.23M.WAD	Nom. del punto de aforo	AYALA3
Fecha y hora de inicio	2016/03/23 11:44:42	Operadores	WAR

Resultados de la medida

St	Reloj	PtoAfo	Metodo	Calado	% Calado	CalMed	V	FactCorr	Vmedia	Area	Caudal	% Q
0	11:44	0.00	Ninguno	0.000	0.0	0.0	0.0000	1.00	0.0000	0.000	0.0000	0.0
1	11:44	1.20	0.6	0.460	0.6	0.184	0.0254	1.00	0.0254	0.483	0.0123	1.4
2	11:47	2.10	0.2/0.8	0.520	0.2	0.416	0.0539	1.00	0.0410	0.468	0.0192	2.1
2	11:47	2.10	0.2/0.8	0.520	0.8	0.104	0.0282					
3	11:49	3.00	0.8/0.2	0.560	0.2	0.448	0.0894	1.00	0.0798	0.504	0.0402	4.5
3	11:48	3.00	0.8/0.2	0.560	0.8	0.112	0.0703					
4	11:51	3.90	0.2/0.8	0.640	0.2	0.512	0.0732	1.00	0.0676	0.576	0.0390	4.3
4	11:52	3.90	0.2/0.8	0.640	0.8	0.128	0.0621					
5	11:54	4.80	0.8/0.2	0.640	0.2	0.512	0.0819	1.00	0.0686	0.576	0.0395	4.4
5	11:53	4.80	0.8/0.2	0.640	0.8	0.128	0.0554					
6	11:55	5.70	0.2/0.8	0.640	0.2	0.512	0.0776	1.00	0.0721	0.576	0.0415	4.6
6	11:56	5.70	0.2/0.8	0.640	0.8	0.128	0.0666					
7	11:58	6.60	0.8/0.2	0.640	0.2	0.512	0.0777	1.00	0.0748	0.576	0.0431	4.8
7	11:57	6.60	0.8/0.2	0.640	0.8	0.128	0.0720					
8	11:59	7.50	0.2/0.8	0.620	0.2	0.496	0.0839	1.00	0.0715	0.558	0.0399	4.4
8	12:00	7.50	0.2/0.8	0.620	0.8	0.124	0.0591					
9	12:02	8.40	0.8/0.2	0.600	0.2	0.480	0.0839	1.00	0.0666	0.540	0.0360	4.0
9	12:01	8.40	0.8/0.2	0.600	0.8	0.120	0.0494					
10	12:03	9.30	0.2/0.8	0.560	0.2	0.448	0.0834	1.00	0.0708	0.504	0.0357	4.0
10	12:04	9.30	0.2/0.8	0.560	0.8	0.112	0.0583					
11	12:06	10.20	0.8/0.2	0.540	0.2	0.432	0.0876	1.00	0.0687	0.486	0.0334	3.7
11	12:05	10.20	0.8/0.2	0.540	0.8	0.108	0.0498					
12	12:07	11.10	0.2/0.8	0.520	0.2	0.416	0.0817	1.00	0.0809	0.468	0.0379	4.2
12	12:07	11.10	0.2/0.8	0.520	0.8	0.104	0.0802					
13	12:09	12.00	0.8/0.2	0.520	0.2	0.416	0.0826	1.00	0.0761	0.468	0.0356	4.0
13	12:09	12.00	0.8/0.2	0.520	0.8	0.104	0.0697					
14	12:11	12.90	0.2/0.8	0.500	0.2	0.400	0.0815	1.00	0.0631	0.450	0.0284	3.2
14	12:11	12.90	0.2/0.8	0.500	0.8	0.100	0.0447					
15	12:13	13.80	0.8/0.2	0.500	0.2	0.400	0.0642	1.00	0.0648	0.450	0.0292	3.2
15	12:12	13.80	0.8/0.2	0.500	0.8	0.100	0.0654					
16	12:15	14.70	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0712	1.00	0.0712	0.432	0.0308	3.4
17	12:17	15.60	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0599	1.00	0.0599	0.432	0.0259	2.9
18	12:18	16.50	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0621	1.00	0.0621	0.432	0.0268	3.0
19	12:19	17.40	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0731	1.00	0.0731	0.432	0.0316	3.5
20	12:20	18.30	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0611	1.00	0.0611	0.432	0.0264	2.9
21	12:21	19.20	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0686	1.00	0.0686	0.432	0.0296	3.3
22	12:23	20.10	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0608	1.00	0.0608	0.432	0.0263	2.9
23	12:24	21.00	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0529	1.00	0.0529	0.432	0.0229	2.5
24	12:25	21.90	0.6	0.480	0.6	0.192	0.0580	1.00	0.0580	0.432	0.0251	2.8
25	12:26	22.80	0.6	0.460	0.6	0.184	0.0622	1.00	0.0622	0.414	0.0258	2.9
26	12:27	23.70	0.6	0.460	0.6	0.184	0.0467	1.00	0.0467	0.414	0.0193	2.1
27	12:29	24.60	0.6	0.460	0.6	0.184	0.0475	1.00	0.0475	0.414	0.0197	2.2
28	12:30	25.50	0.6	0.450	0.6	0.180	0.0556	1.00	0.0556	0.405	0.0225	2.5
29	12:31	26.40	0.6	0.440	0.6	0.176	0.0385	1.00	0.0385	0.396	0.0152	1.7
30	12:32	27.30	0.6	0.440	0.6	0.176	0.0328	1.00	0.0328	0.396	0.0130	1.4
31	12:33	28.20	0.6	0.420	0.6	0.168	0.0251	1.00	0.0251	0.378	0.0095	1.1
32	12:35	29.10	0.6	0.420	0.6	0.168	0.0286	1.00	0.0286	0.378	0.0108	1.2
33	12:36	30.00	0.6	0.400	0.6	0.160	0.0244	1.00	0.0244	0.360	0.0088	1.0
34	12:36	30.90	Ninguno	0.000	0.0	0.0	0.0000	1.00	0.0000	0.000	0.0000	0.0

Filas en caracteres itálicos indica aviso de control de calidad. Consulta la información de control de calidad.



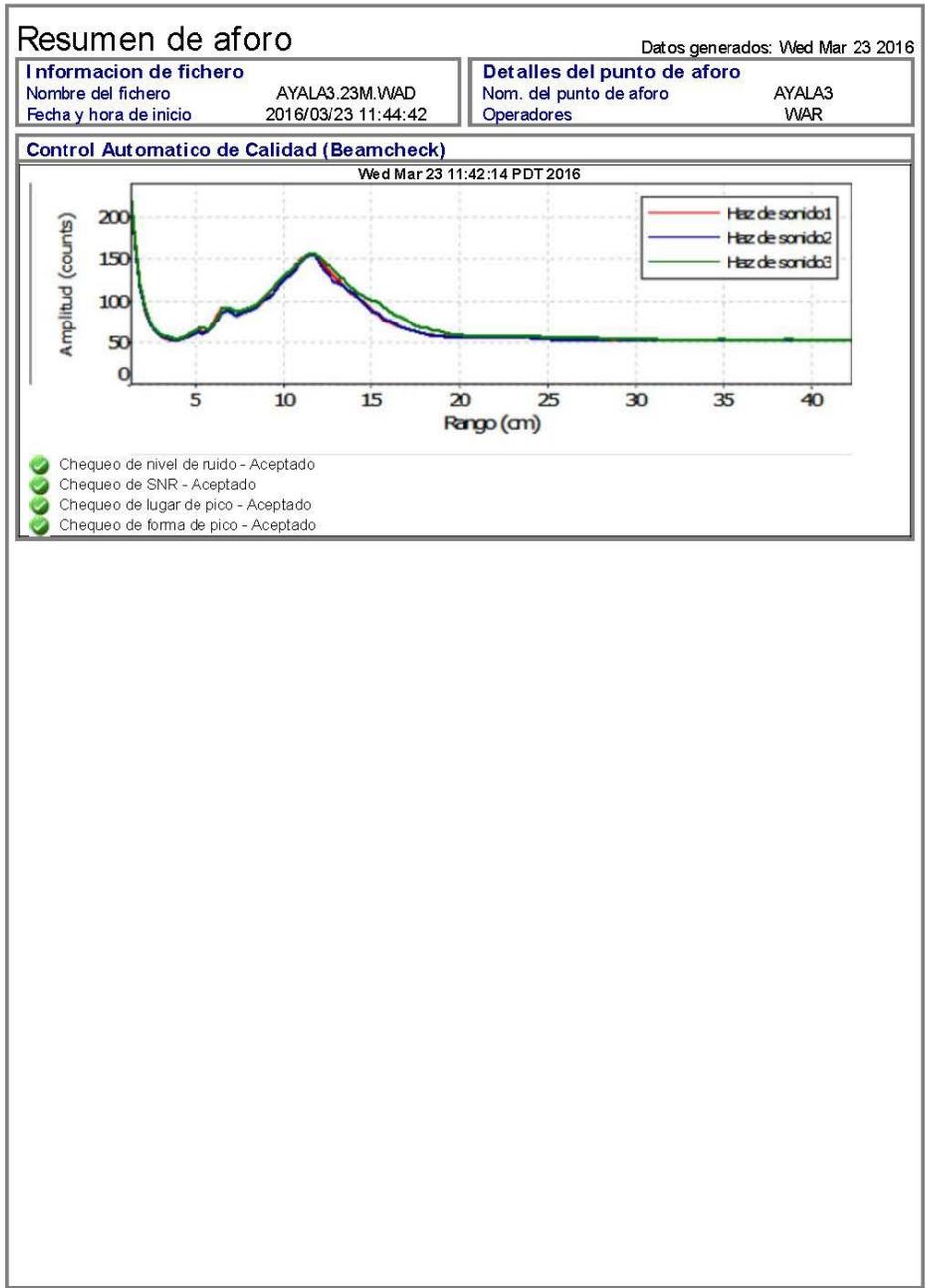
file:///C:/Program%20Files%20(x86)/SonTek/FlowTracker/Resources/Reports/Summary.... 23/03/2016

Resumen de aforo		Datos generados: Wed Mar 23 2016	
Información de fichero		Detalles del punto de aforo	
Nombre del fichero	AYALA3.23M.WAD	Nom. del punto de aforo	AYALA3
Fecha y hora de inicio	2016/03/23 11:44:42	Operadores	WAR
Control de calidad			
Sin avisos de control de calidad			

file:///C:/Program%20Files%20(x86)/SonTek/FlowTracker/Resources/Reports/Summary.... 23/03/2016

Resumen de aforo		Datos generados: Wed Mar 23 2016	
Información de fichero		Detalles del punto de aforo	
Nombre del fichero	AYALA3.23M.WAD	Nom. del punto de aforo	AYALA3
Fecha y hora de inicio	2016/03/23 11:44:42	Operadores	WAR
Control de calidad			
Sin avisos de control de calidad			

file:///C:/Program%20Files%20(x86)/SonTek/FlowTracker/Resources/Reports/Summary.... 23/03/2016



file:///C:/Program%20Files%20(x86)/SonTek/FlowTracker/Resources/Reports/Summary.... 23/03/2016