

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Determinación del caudal ecológico para el Río Hardy: Ciclo hidrológico 2018

Tesis para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería

Alumno:

Ernesto García Arvizu

Director:

Dr. Jorge Ramírez Hernández

Constancia de aprobación

Tesis defendida por :

Ing. Ernesto García Arvizu

Aprobada por:

Dr. Jorge Ramírez Hernández
Director de tesis

Jurado examinador:

1. Dra. Jesús Eliana Rodríguez Burgueño _____
2. Dr. Osvaldo Leyva Camacho _____
3. M.I: Edgar Carrera Villa _____
4. M.C. Alejandro Cruz Rosas Palafox _____

Dedicatoria

A mis padres que siempre me apoyaron y están cuando más los necesitas.

A mi esposa que estuvo a mi lado en los momentos más importantes dándome su amor y apoyo.

Para mis amigos y familia que siempre me forzaban a no rendirme.

Agradecimientos

Gracias a mis padres, esposa, familia y amigos que no me dejaron desistir de esta gran experiencia, brindándome su paciencia y apoyo, así como comprender de mis inasistencias en algunas ocasiones.

Gracias al Dr. Jorge Ramírez por su guía y paciencia, así como por la confianza y apoyo en todo momento de esta investigación.

A todos compañeros y amigos del laboratorio de Ciencias de la Tierra: Romario, Víctor, Vicente, Kyara, Antonio y Juan que me brindaron su apoyo en todo momento, participando en los trabajos de campo, recopilación de información y apoyándome en toda ocasión.

Gracias en especial a mis grandes amigos: Frida, Héctor y Eliana que me han apoyado desde el primer momento de conocerlos, induciéndome a no rendirme en los momentos más difíciles, demostrándome su apoyo a su forma particular.

Gracias al instituto de ingeniería por permitirme llevar este proceso y a CONACYT por la financiación de este proyecto de investigación.

Resumen

El Río Hardy (RH) se puede considerar un patrimonio invaluable de Baja California, ubicado al sur del valle de Mexicali, actualmente es la única fuente de agua dulce del estuario del Delta del Río Colorado, manteniendo un hábitat de peces y aves de importancia primordial para esta región semiárida, aunado a esto mantiene una importancia internacional por su aporte a la cultura de la etnia Cucapá y aledañas al río, brindando recursos económicos mediante actividades de pesca y recreativas.

Desde una perspectiva de caudal ecológico se pueden analizar los sucesivos impactos causados al RH, la degradación del ecosistema, la colonización de especies exóticas, los cambios en el uso del suelo, la pérdida de capacidad de conducción de agua, brindando los elementos para impulsar las actividades para la conservación del ecosistema ripario, analizando las características geométricas y flujos en el cauce del río.

Como parte de la investigación se realizaron diversos trabajos de campo y oficina, el primero fue delimitar la cuenca de captación de escurrimientos del RH, incluyendo, los escurrimientos desde la Sierra Cucapá, los canales de drenaje agrícola y la descarga de la PTAR “Las Arenitas”. Enseguida se analizaron los cuatro últimos episodios de variaciones régimen de escurrimiento y su impacto, en la hidrodinámica como en la calidad del agua y en el ecosistema ripario, realizando una base de datos histórica de caudales provenientes de los distintos drenes agrícolas que aportan su flujo al RH, donde se consideraron los caudales obtenidos de literatura y caudales medidos en el periodo de 2017 y 2018 en los sitios de aforo Dren Dos Tubos, UECE #1, UECE #2 y Dren Caimán. Para conocer la importancia del caudal ecológico y el impacto que puede tener en el ecosistema, se realizaron además análisis de imágenes satelitales durante los años 1999 a 2017, teniendo como resultado una correlación entre el aumento del área inundada y la cantidad de aves objetivo del 88%, siendo una prueba de los beneficios que este proyecto puede aportar como herramienta de gestión.

Utilizando la metodología hidrológica enfocada en la generación y mantenimiento de áreas de hábitat óptimo para el desarrollo del Palmoteador de Yumma, se realizaron simulaciones para obtener la superficie disponible que generarían los caudales ecológicos obtenidos, para estas simulaciones hidráulicas se utilizó el software HECRAS 5.0.5, realizando simulaciones en 2D para obtener resultados más realistas. Se obtuvo del análisis caudal para año húmedo de 1.729 m³/s la cual genera una superficie de 713 ha y para año medio un caudal de 1.108 m³/s con una superficie de 598 ha.

Abstract

The Hardy River (RH) can be considered an invaluable heritage of Baja California, located south of the Mexicali Valley, currently the only freshwater source of the Colorado River Delta estuary, maintaining a habitat of fish and birds of paramount importance for this semi-arid region, in addition to this, it maintains an international importance for its contribution to the culture of the Cucapá ethnic group and bordering the river, providing economic resources through fishing and recreational activities.

From an ecological flow perspective, the successive impacts caused to the RH can be analyzed, the degradation of the ecosystem, the colonization of exotic species, the changes in the use of the soil, the loss of water conduction capacity, providing the elements to promote the activities for the conservation of the riparian ecosystem, analyzing the geometric characteristics and flows in the riverbed.

As part of the investigation, several field and office works were carried out, the first was to delimit the catchment of runoff from the RH, including the runoff from the Sierra Cucapá, the agricultural drainage channels and the discharge of the PTAR "Las Arenitas" " Then, the last four episodes of variations in the runoff regime and its impact were analyzed, in the hydrodynamics as well as in the water quality and in the riparian ecosystem, making a historical data base of flows coming from the different agricultural drains that contribute their flow to the RH, where the flows obtained from literature and flows measured in the period of 2017 and 2018 were considered in the gauging sites Dren Dos Tubos, UECE # 1, UECE # 2 and Dren Caimán. In order to know the importance of the ecological flow and the impact that it can have on the ecosystem, satellite image analysis was also carried out during the years 1999 to 2017, resulting in a correlation between the increase in the area of inundad and the number of birds that were targeted. being a proof of the benefits that this project can provide as a management tool.

Using hydrological methodology focused on the generation and maintenance of optimal habitat areas for the development of the Yumma Palmoteador, simulations were carried out to obtain the available surface that would generate the ecological flows obtained, for these hydraulic simulations the software HECRAS 5.0.5 was used. performing 2D simulations to obtain more results. It was obtained from the caudal analysis for a wet year of 1,729 m³ / s, which generates a surface area of 713 ha and for a mean year a flow rate of 1,108 m³ / s with a surface area of 598 ha.

1	Introducción	13
1.2	Objetivo General	14
1.3	Objetivos Específicos	14
1.4	Hipótesis	14
1.5	Justificación.....	14
1.6	Área de estudio	15
2	Antecedentes	17
2.1	Hábitat	19
2.1.1	Aves	20
2.1.2	Peces	20
2.1.3	Mamíferos	21
2.1.4	Vegetación	21
2.2	Origen del Agua.....	22
2.2.1	Distrito de riego	22
2.2.2	Salmuera residual del campo geotérmico de Cerro Prieto.....	25
2.2.3	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Las arenitas”	26
2.2.4	Afectaciones causadas por sismo en 2010: El Mayor-Cucapá.....	28
2.2.5	Hidrodinámica	29
3	Marco teórico	30
3.1	Hidrología	30
3.1.1	Cuenca de escurrimiento	30
3.1.2	Cauces superficiales y tipos de corrientes.....	30
3.1.4	Cuantificación del Caudal	31
3.1.6	Flujo en Canal Abierto.....	32
3.1.7	Drenaje agrícola	33
3.1.8	Coeficiente de rugosidad	33
3.2	Modelación	34
3.2.1	Generalidades	34
3.2.2	Programa HEC-RAS.....	35

3.2.3 Metodología de Cálculo utilizada por el HEC-RAS.....	35
3.2.4 HEC-RAS en 2 dimensiones y en estado transitorio	35
3.2.5 Proceso de Calibración	36
3.3 Caudal Ecológico	36
3.3.1 Definición de caudal ecológico.	36
3.4 Descripción de metodologías para caudales ecológicos.....	39
3.4.1. Metodología Hidrológica.....	40
3.4.2 Metodología Hidráulica	42
3.4.3 Metodología Hidrobiológicas o de simulación de hábitat	44
3.4.4 Metodología Holística.....	45
3.5 Análisis de imágenes satelitales	47
4. METODOLOGÍA	49
4.1 Trabajo de campo.....	49
4.1.1 Topobatimetría.....	49
4.1.2 Medición de flujos.....	51
4.1.3 Instalación de Regletas	54
4.2 Trabajo de gabinete	54
4.2.1 Análisis de imágenes satelitales	54
4.2.2 Estimación de la rugosidad.....	55
4.2.3 Estimación del caudal in situ	60
4.2.4 Conversión de Altura de Regleta a Caudal.	62
4.2.5 Estimación de la superficie inundada.....	66
5 Resultados y Discusión	70
5.1 Flujos de agua.....	70
5.3 Análisis de Imágenes satelitales	74
5.4 Análisis de la población de aves	75
5.5 Modelación de Flujo	77
5.5.2 Caudales seleccionados para caudal ecológico.....	80
5.5.3 Caudales ecológicos propuestos según la metodología.....	80
5.6 Análisis estadístico del caudal propuesto	80
6 Conclusiones	84

7 Bibliografía 85

Índice de Figuras

Figura 1.	Derivación del flujo de agua del RC hacia el RH mediante la laguna de los volcanes. Tomada de (Berumen, 2013).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2.	Distribución de módulos de riego en DR014 .	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3.	Humedal y PTAR “las Arenitas”.....	27
Figura 4.	Delimitación del área de estudio, cuenca Río Hardy	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.	Clasificación metodologías, considerando las cuatro metodologías principales (hidrológica, hidráulica, hidrobiológica y holística) y 2 adicionales (combinadas y otros métodos específicos) (SEMARNAT, 2014).....	40
Figura 6.	Esquema metodológico para el análisis de caudales ecológicos mediante metodología hidrológica, basado en Tennant (1976) y García et. al. (1999). Modificado de SE (2012).	42
Figura 7.	Relación entre descarga y perímetro mojado, donde la respuesta biológica se expresa en términos de medidas tales como el flujo histórico, perímetro mojado y área ponderada utilizada para métodos de hábitat (Arthington et al., 2004).....	44
Figura 8.	Esquema metodológico para el análisis de caudales ecológicos mediante modelación física del hábitat (SE, 2012).....	45
Figura 9.	Ilustración de la BBM (UNESCO, 2017).....	47
Figura 10.	Ubicación de PL y BN.....	50
Figura 11.	Ubicación del BN en el Puente de la carretera estatal #4	¡Error! Marcador no definido.
Figura 12.	Levantamiento topobatimétrico del cauce del RH posicionando el Banco de Nivel (NB) en el Puente 1+490 de la carretera Estatal #4.....	51
Figura 13.	Sitios de aforo.....	52
Figura 14.	Sitio de aforo DDT.....	53
Figura 15.	Sitio de aforo DC.....	53
Figura 16.	Sitio de aforo UECE2.....	53
Figura 17.	Sitio de aforo UECE1.....	53
Figura 18.	Regleta en el sitio de aforo DDT.....	54
Figura 19.	Regleta en el sitio de aforo DC.....	54
Figura 20.	Regleta en el sitio de aforo UECE1.....	54
Figura 21.	Regleta en el sitio de aforo UECE2.....	54
Figura 22.	Procedimiento utilizado para la obtención de áreas inundadas.....	55
Figura 23.	Ejemplos de rugosidad del cauce en diferentes secciones del RH.....	57
Figura 24.	Valores de rugosidad del cauce a lo largo del cauce del RH.....	58
Figura 25.	Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo Dren Dos Tubos.....	63
Figura 26.	Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo Dren Caimán.....	64
Figura 27.	Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo UECE #1.....	64
Figura 28.	Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo UECE #2.....	65

Figura 29.	Descargas en drenes proporcionados por CONAGUA	70
Figura 30.	Base de datos de aforos en la cuenca del RH. Datos tomados de CONAGUA (____-), Trejo-Fernández (2010), etc	71
Figura 31.	Aforos obtenidos en este estudio del Dren Dos Tubos durante el periodo 2017-2 al 2018-2.....	71
Figura 32.	Aforos obtenidos en este estudio del Dren Caimán durante el periodo 2017-2 al 2018-2	72
Figura 33.	Aforos obtenidos en este estudio del sitio UECE1 durante el periodo 2017-2 al 2018-2	72
Figura 34.	Aforos obtenidos en este estudio del sitio UECE #2 durante el periodo 2017-2 al 2018-2	73
Figura 35.	Gráfica caudal-cantidad de aves de marisma en el RH	75
Figura 36.	Gráfica de área inundada-cantidad de aves de marismas en el RH	75
Figura 37.	Correlación del área inundada con la cantidad de individuos de Palmoteador de Yuma.	76

Índice de Tablas

Tabla 1.	Áreas de conservación prioritarias para la zona ecológica del Río Hardy y su tipo de hábitat (Fuente: Zamora-Arroyo et al., 2005)	22
Tabla 2.	Principales drenes aportadores de agua al RH (Fuente: CILA,2013)	25
Tabla 3.	Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan (Chow,1994).....	33
Tabla 4.	Definiciones de caudal ecológico.....	36
Tabla 5.	Características de las bandas del satélite Landsat 8 obtenida de USGS (2016). 48	48
Tabla 6.	Características de las bandas del satélite Landsat 4-5 y 7 obtenida de USGS (2016). 48	48
Tabla 7.	Ubicación de Banco de nivel y Puntos de liga para batimetría en el RH.....	49
Tabla 8.	Valores de rugosidad para el transecto del DDT al UECE1	56
Tabla 9.	Relación de elevación del espejo de agua con el caudal estimado.....	65
Tabla 10.	Resultados del análisis de áreas inundadas en el sitio de interés de aves de marismas. 74	74

1 Introducción

El recurso hídrico a nivel mundial ha sido afectado por el ser humano, con el fin de controlar inundaciones, utilizar el agua en agricultura, generar energía, se ha controlado los ríos mediante grandes presas (Tharme, 2003; UNESCO, 2015), la implementación de infraestructura ha afectado el régimen natural de los ríos lo que ha impactado en los servicios naturales que estos ofrecían a los ecosistemas (Poff et al., 1997), de acuerdo a la UNESCO (2015) se estima que para el año 2030 en el mundo se tendrá un déficit de agua del 40%.

En la actualidad México experimenta un alto grado de presión del recurso hídrico en las zonas centro, norte y noroeste del país. Los ríos en el país son la principal fuente de conducción del agua superficial, fluyendo por ellos el 87% del escurrimiento superficial, brindando una gran cantidad de servicios al medio ambiente y seres vivos (CONAGUA, 2018).

En Baja California se ha presentado una problemática debido a regularización del Río Colorado (RC) que ha afectado directamente las entradas de flujo al Río Hardy (RH), donde además la precipitación a lo largo del año es muy escasa, teniendo una precipitación promedio de 28.6 mm en junio, de acuerdo al servicio meteorológico nacional de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2018, impactando negativamente en los servicios que brindaba al ecosistema rivereño en el valle de Mexicali.

Los caudales ecológico (CE) actualmente son reconocidos como una herramienta para la gestión integrada de recursos hídricos (UNESCO, 2014) enfocado en los sistemas fluviales degradados (Gawne et al., 2018), brindando bienestar a los ecosistemas y al ser humano, establecido mundialmente desde 2007 en la conferencia de Brisbane en Australia (Arthington et al., 2018).

El objetivo general de esta investigación implica determinar el caudal ecológico para el RH, facilitando de esta manera una herramienta para la gestión de agua medioambiental ante las dependencias correspondientes, esperando sea una fuente de información y concientización para la comunidad.

Un caudal ecológico para el RH asegura la biodiversidad del río, propiciando la preservación de la flora y fauna y en general al medio ambiente, asegurando y aumentando indirectamente con el paso del tiempo las fuentes de alimentación y economía de las comunidades aledañas, dentro de las cuales se encuentra la etnia Cucapá con un impacto internacional e histórico.

Mediante la implementación de una simulación hidráulica se permitirá conocer el comportamiento hidrodinámico del flujo a lo largo del cauce del río, entre las variables que se obtienen son: las zonas de inundación, profundidades y la distribución de velocidades para la toma de decisiones en aspectos medioambientales.

Para la generación del modelo hidráulico, se realizó una topo batimetría en el cauce del RH con ayuda del equipo GPS GR-5 y el apoyo del equipo de trabajo, se realizaron medición de flujos en los sitios de aforos durante el periodo de septiembre de 2017 a noviembre de 2018, utilizados para el ajuste y calibración del modelo hidráulico.

A lo largo de la historia se han realizado estudios importantes para conocer el comportamiento, calidad y entorno del RH, como ejemplos particulares sobre estudios de hidrodinámica se encuentran la tesis de Trejo Fernandez (2012) y el estudio de TNC (2014) , una importante diferencia en comparación con otros estudios es la utilización de un modelo Hidrodinámico en Dos Dimensiones (2D) dentro de la modelación en esta tesis, permitiendo una visión más amplia de la distribución del flujo y zonas de inundación en la cuenca del río.

1.2 Objetivo General

Determinar el caudal ecológico para el cauce del Río Hardy en sus condiciones actuales.

1.3 Objetivos Específicos

- Definir la metodología a utilizar para la obtención del caudal ecológico.
- Modelar hidráulicamente el caudal del RH con el apoyo del código HEC-RAS y calibrarlo con mediciones de campo, analizando sus condiciones actuales.
- Analizar el escenario de caudal ecológico que mejore la situación actual del río.

1.4 Hipótesis

La determinación del caudal ecológico aportará pautas para la toma de decisiones sobre el caudal que permita la preservación de la flora y fauna en la zona riparia del RH.

1.5 Justificación

Los caudales ecológicos han sido reconocidos como una herramienta para la gestión integrada de recursos hídricos (Sabaj et al., 2014), siendo de gran importancia para el bienestar de los ecosistemas mundialmente (Arthington et al., 2018), su implementación ha sido adaptada por distintos países, aumentando cada año, en el año 2000 al menos 44 países utilizaron estos enfoques entre los que se encontraba México (Poff et al., 2017).

Un caudal ecológico impactará positivamente en la biodiversidad del RH, trayendo consigo grandes beneficios para el medio ambiente y la comunidad aledaña Creando las bases para estudios que se podrán realizar posteriormente dentro del RH y podrá ser usada como una herramienta de gestión ante las dependencias gubernamentales y privadas. La implementación de una simulación hidráulica en el RH nos permitirá conocer el comportamiento de flujo a lo largo de la cuenca, además nos brindara la información necesaria como lo es las zonas de inundación, profundidades y la distribución de velocidades para la toma de decisiones en aspectos medioambientales.

1.6 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la parte sur del Valle de Mexicali, perteneciente al municipio de Mexicali en Baja California, México. Actualmente el RH inicia en las coordenadas X= 660,717.1715, Y= 3,581,794.1285, estas coordenadas pertenecen al inicio del Dren Dos Tubos (DDT) y terminando en la confluencia con el RC.

La delimitación de la cuenca para el RH se definió utilizando los datos vectoriales de topografía de INEGI 2017 y las redes de drenajes en el valle de Mexicali que se confluyen para conducir el agua de retorno agrícola y agua tratada del complejo Humedal y PTAR “Arenitas”, aportándolas al RH.

El área de estudio está integrada por 74.36 km de cauce y una superficie de 914.3 km², delimitándose al norte en la coordenada X= 662,421.29, Y= 3,589,630.44 y hacia el sur en X=665,373.42, Y=3,553,461.44, dentro del sistema de coordenadas UTM WGS84, Zona 11N. Al Noroeste el volcán de Cerro Prieto y los abanicos aluviales que vienen de la sierra Cucapá conforman su límite; al Noreste la laguna de evaporación del CGCP y la red de drenaje agrícola que fluye hacia el Río Nuevo conforman el límite del escurrimiento hacia el RH; al Este el talud del bordo del Río Colorado es su límite de escurrimiento; al Oeste el parteaguas de la Sierra Cucapá; finalmente hacia el Sur su límite es el poblado del ejido Cucapah El Mayor.

Como se observa en la [figura 1](#) el complejo Humedal Las Arenitas y la PTAR “Las Arenitas” se encuentra fuera del área de estudio, esto debido a que el parteaguas se trazó en estricto cumplimiento a la topografía, quedando ambos cuerpos de agua fuera de la cuenca de escurrimiento del RH. No obstante, el efluente proveniente de la PTAR, después de pasar por el Humedal es descargado al DDT, que se encuentra dentro de la cuenca, considerado como una de las fuentes principales de agua transportada mediante tubería, con un volumen de importación a la cuenca.

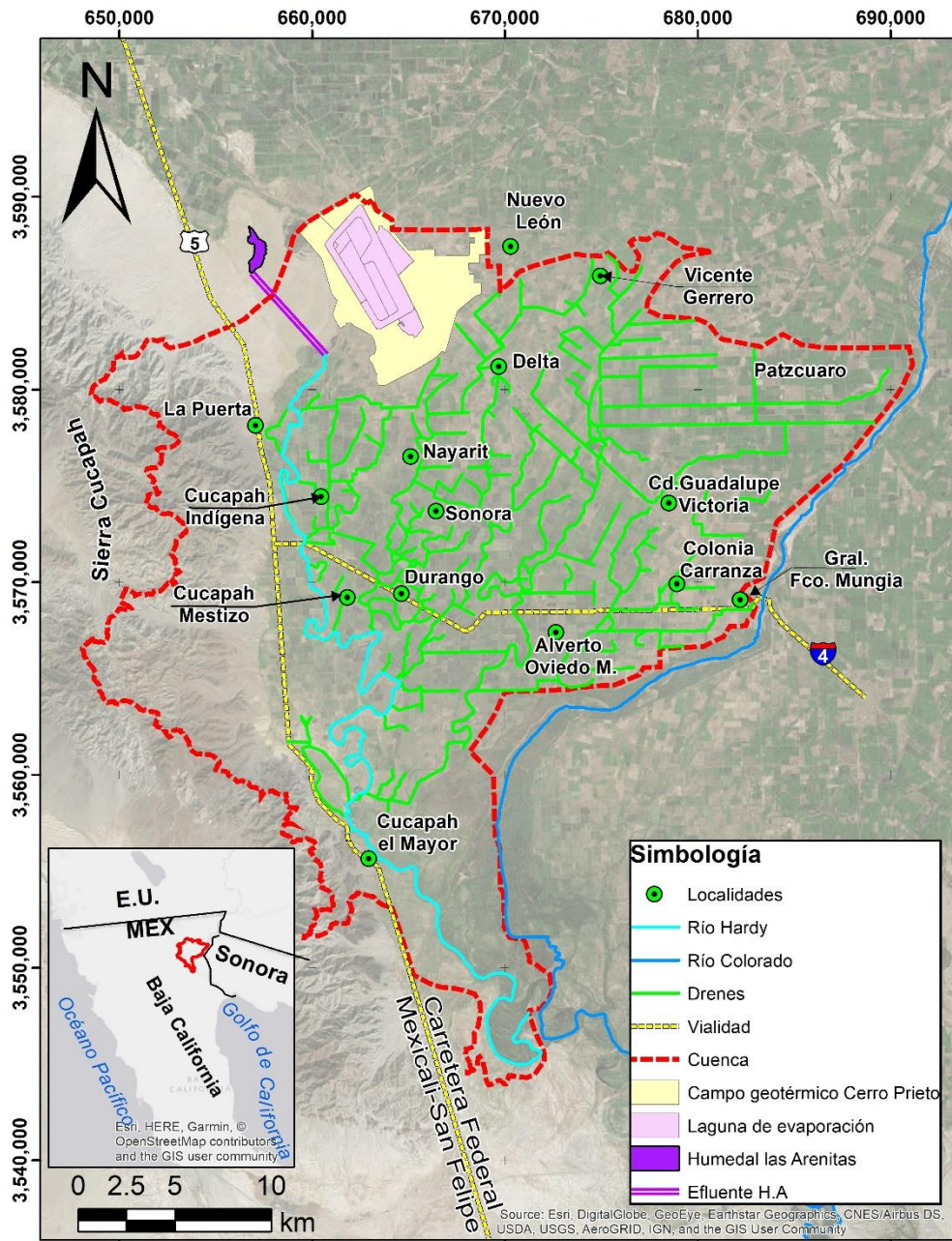


Figura 1. Delimitación del área de estudio, cuenca Río Hardy.

2 Antecedentes

Después de la Independencia de México se permitió la incursión de extranjeros en territorios mexicanos, con lo cual se dio inicio a las exploraciones del Golfo de California. En 1826, el teniente Lieutenant R.W.H. Hardy, oficial de la naval británica, representando la compañía británica General Pearl And Coral Fishery Association, exploró el río naciente de la Laguna de los Volcanes y territorios aledaños, en una pequeña goleta llamada la Bruja, llegando a la desembocadura del Río Colorado el día 20 de julio de 1826 (Sykes, 1937). A esta parte de la cartografía del río hoy se le conoce como Río Hardy (RH) conservando el nombre del teniente (Patterson, 1995).

El RH mantenía un canal permanente formado por la unión de dos afluentes, uno que iba desde el punto de derivación de las laderas de las montañas Cucapá recibiendo los escurrimientos estacionales de estas estribaciones; el otro, confluía con el canal proveniente de la zona de la Laguna de los Volcanes, constituía la fuente principal y permanente de recarga del RH (Sykes, 1937).

La Laguna de los Volcanes se ubicaba en la porción central Oeste del Valle de Mexicali y en el flanco Sur del volcán Cerro Prieto como se muestra en la figura 2. Esta laguna permanecía inundada todo el año como resultado de los flujos de descarga del acuífero que eran conducidos como flujo base por el RH. Adicionalmente a estos flujos subterráneos, la laguna se alimentaba de escurrimientos extraordinarios del RC que eran conducidos hacia la laguna por los ríos Las Abejas y Paredones (Ramírez-Hernández, 1997) dando lugar a un flujo estacional con un caudal mayor al de las aportaciones de flujos subterráneos. El inicio de la explotación del acuífero en los años 60 y con la explotación intensiva del acuífero a finales de los 70, disminuyó la descarga natural del acuífero a la Laguna de los Volcanes, aunado a lo anterior, la nueva configuración geométrica de los canales de drenaje de las tierras agrícolas del Valle de Mexicali utilizando los antiguos cauces del RC, reduciendo en su totalidad el ingreso de agua superficial a la laguna. Sin embargo, la porción al Sur de la laguna, que recibía descargas de aguas geotérmicas profundas, mantuvo una zona de aproximadamente 10 km² con volcancillos de barro, fumarolas y manantiales de agua caliente y salina (Ramírez-Hernández, 1997).

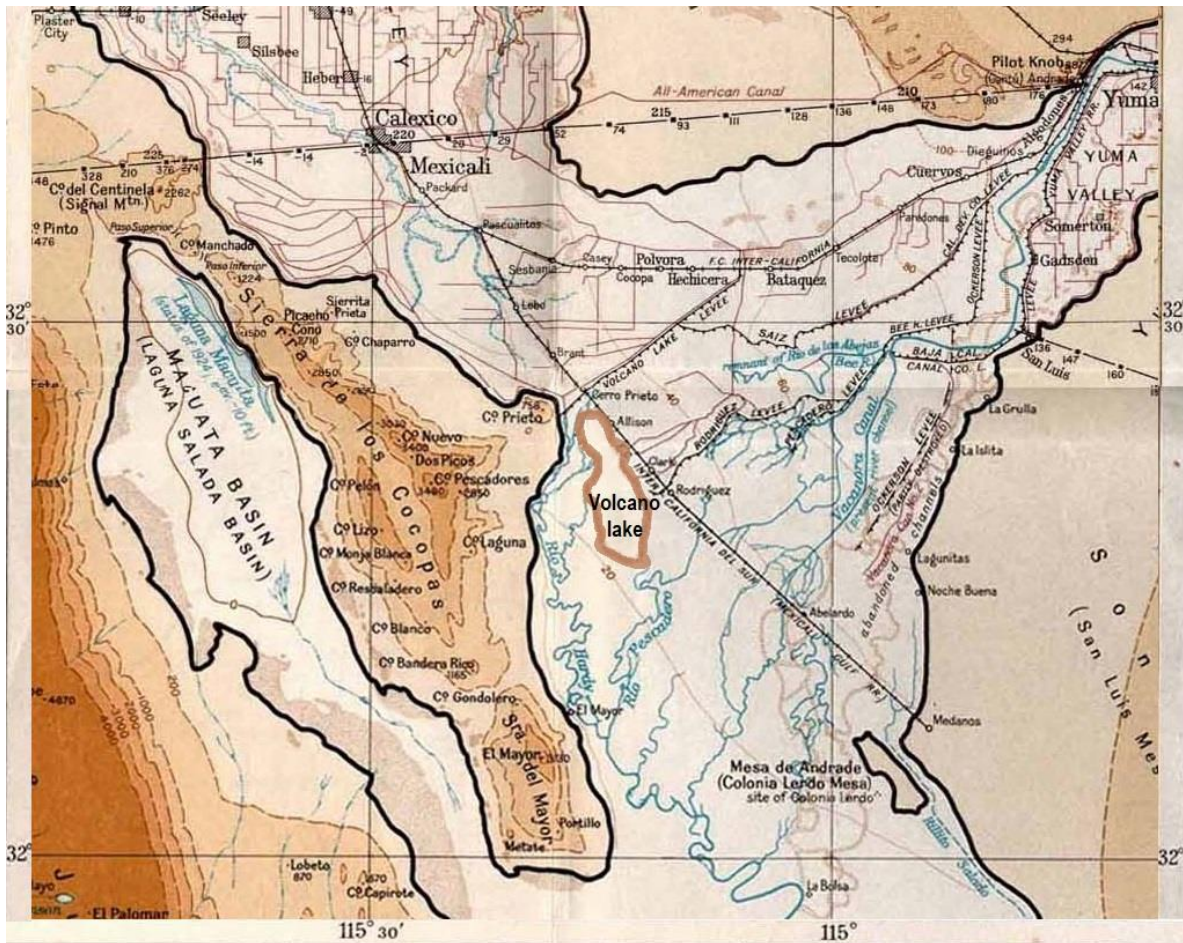


Figura 2. Nacimiento del Río Hardy en la Laguna de los Volcanes. Modificado de Sykes (1937)

Con el inicio de la explotación del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto a mediados de los años 70, la antigua laguna de los Volcanes fue limitada por bordos para formar, en esta depresión topográfica, la Laguna de Evaporación. Esta laguna tiene como función la evaporación de la salmuera geotérmica producto de desecho en la producción de energía eléctrica (Ramírez-Hernández, 1997). Dado que la producción de salmuera era mucho mayor que la capacidad de evaporación de esta laguna de 14 km² de superficie, parte de esta salmuera se infiltraba al acuífero y otra parte era descargada al nacimiento del cauce del RH. A partir de este momento, la fuente principal del RH era la descarga de la salmuera de desecho de origen geotérmico, con una alta mineralización y temperatura mayor a los 40°C y los flujos de retorno de riego. Para el año 1973, el RH cubría aproximadamente 18,210 ha.

Antes de 1983, en la porción cercana a su confluencia con el RC, la existencia de una represa natural en el canal principal del RC aproximadamente a 35 km aguas arriba de la desembocadura, provocó que el agua retrocediera hasta la llanura del RH, creando una zona de agua dulce/salobre. Los escurrimientos excedentes descargados al RC en el año 1983 causaron daños a las estructuras de control, permitiendo que los niveles en el RH cubrieran

más de tres veces su planicie de inundación natural, casi 60,702 ha ([Salton Sea Authority, 2000](#)).

La descarga de salmuera proveniente de la laguna geotérmica se redujo paulatinamente hasta cancelarse totalmente a finales de los años noventa.

Es importante resaltar el valor histórico del río, es un referente irremplazable para la etnia Cucapá, comunidades aledañas y turistas, a lo largo de los bancos del río, hay 16 campos turísticos que son visitados por la comunidad local y foránea, en estos campos se pueden realizar actividades de recreación como pesca deportiva, paseos en kayak, etc. ([Romero, García, Valdez y Vega., 2010](#)).

El régimen hidrológico del RH ha sido modificado intensamente por las actividades antropogénicas desde inicios del siglo XX en al menos cuatro episodios. El primero de ellos se debió al extensivo desarrollo agrícola del Valle de Mexicali que redujo la descarga de agua subterránea y modificó el flujo superficial con la red de canales de drenaje agrícola. El segundo fue la enorme regulación del caudal del Río Colorado por el sistema de presas en los Estados Unidos que hizo crisis en los años 30s con el llenado de la presa Hoover y que dejó prácticamente sin caudal al RC. El tercero, provocado por la descarga de salmuera residual del yacimiento geotérmico y la transformación de la laguna Vulcano en laguna de desecho y evaporación de salmuera. Finalmente, el cuarto episodio se dio con la entrada en operación de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de Mexicali cuyos efluentes han sido vertidos a su cauce. Estas enormes modificaciones deben tenerse en cuenta en la determinación del caudal ecológico del mismo.

2.1 Hábitat

El RH forma a lo largo de su cauce un conjunto de humedales que, en conjunto con los del RC, dan lugar a hábitats remanentes de gran importancia para la vida silvestre, proporcionando refugio durante el invierno a diversas aves acuáticas migratorias, utilizando estos refugios como sitios de anidación, reproducción y crianza para un gran número de especies que incluye aves, mamíferos, peces, invertebrados ([Pronatura Noroeste, 2006](#)).

La afectación al medio ambiente que ha causado el control del flujo en el RC ha permitido que gran cantidad de especies que se encuentran hoy en día en la cuenca baja del Río Colorado sean exóticas, contabilizando más especies de peces introducidas y exóticas que nativas. Algunos de los aspectos que han incrementado estas afectaciones son: modificaciones en los canales del río, balance de sedimentos, la temperatura del agua, calidad y cantidad de agua en el cauce y la composición de la biodiversidad ([Calvo Fonseca, 2010](#)). Debido a estas afectaciones que ha sufrido el río es clasificado como un hábitat altamente alterado ([Zamora-Arroyo et al., 2005](#)).

Conservando un hábitat sano se podría aprovechar el río para el desarrollo de actividades recreativas y disfrute paisajístico, siendo esto posible al asegurar agua para el río, como por ejemplo los flujos provenientes del RC o PTAR “Las Arenitas”, apoyando a las actividades como la pesca, observación de aves, cacería y mantenimiento de áreas limpias, favoreciendo a las condiciones ecológicas del RH (Rivera & Guerrero, 2006).

El RH es un recurso invaluable, gracias a que ha mantenido su flujo en el transcurso del tiempo, la población vecina al río ha sido beneficiada al utilizar sus aguas para riego agrícola, generando una fuente de economía importante, además de crear hábitats favorables que permiten el desarrollo de especies aprovechables como lo es el faisán común en actividades de caza y alimento. Por otro lado, la pesca ha sido y continúa siendo un elemento ~~mu~~ importante en los procesos de organización social y de auto identificación de los miembros del grupo étnico Cucapá, aprovechando la mayoría de los recursos suministrados naturalmente como lo es madera, tierras, pesca, etc. (Navarro Smith, 2008).

2.1.1 Aves

En América del Norte, cerca del 95% de áreas riparias se han visto afectadas por las actividades humanas, estas áreas guardan una gran diversidad de aves en su ecosistema, en lo cual reside la necesidad de su preservación (Hinojosa-Huerta et. al, 2008).

El RC, así como los humedales remanentes entre los cuales se encuentran aquellos pertenecientes al RH, han sido reconocidos como “Área Importante para la Conservación de las Aves” y un sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad decretado por la Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (Conabio) (Valdes-Casillas et al., 1998 citado por Villareal Rosas, 2014).

El delta del RC, incluyendo el alto golfo de California, ha sido reconocido como uno de los ecosistemas más singulares y de mayor valor en América del Norte. La región constituye el hábitat de más de 350 especies de aves y alberga una gran cantidad de especies en peligro de extinción (Hinojosa-Huerta et. al, 2009), en Baja California, especialmente el valle de Mexicali ha sido objetivo de estudios sobre avifauna peninsular, a pesar de que es de gran importancia ecológica y zoogeografía de la región, ha carecido de estudios desde el punto de vista de distribución espacial y temporal (Campos & Meraz, 1997).

Los humedales del RH han sido considerados entre los más importantes del delta, aportando hábitats para especies de aves invernales y residentes tales como: patos, gansos, el Palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), Garcita de Tular (*Ixobrychus exilis*), entre otras (Pronatura Noroeste, 2006).

2.1.2 Peces

Las comunidades de peces en el RH no son únicamente un indicador de salud del ecosistema, sino también, la fuente principal de economía para comunidades aledañas como los Cucapás.

En la cuenca del RC se ha reportado un declive importante en la población de peces nativos, desde 17 especies amenazadas en 1963 a 169 especies en 2003 ([Calvo Fonseca, 2010](#)).

Dentro de la cuenca del RH se encuentra el pez cachorrillo del desierto (*Cyprinodon macularius macularius*), aunque se encuentra fuera del cauce del río, se tienen registros de su presencia en los estanques de aguas residuales de la Geotérmica de Cerro Prieto, estos sistemas de estanques son abastecidos por el agua de infiltración de lo que fue el antiguo Lago Volcán en los inicios del RH. El 95% de la población de cachorrillo se ha perdido, así como las subespecies, en la actualidad solo queda una especie de las seis que existían en la cuenca baja del RC, esto relacionado por las restricciones de los flujos de agua por las presas y el cambio de uso de suelo ([Varela Romero, A., Ruiz Campos, G., Yépez Velásquez, L. M. y J. Alanis García., 1999](#)). Este pez se encuentra enlistado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales, Estados Unidos de América y por el Gobierno Mexicano, clasificándolo como un bio-indicador de gran importancia, aumentando el valor biológico de la cuenca.

Las condiciones en el hábitat acuático se vieron afectadas por las descargas de la planta geotérmica de Cerro Prieto y la bio acumulación de pesticidas órgano clorados y metales pesados en la fauna del RH ([Campos & Meraz, 1997](#)).

2.1.3 Mamíferos

En Baja California se pueden encontrar alrededor de 150 especies de mamíferos terrestres, dentro de las cuales encontramos el Gato Montés (*Lynx rufus baileyi*), Borrego Cimarrón (*Ovis canadensis cremnobates*), Coyote (*Canis latrans*), Zorro (*Urocyon cinereoargenteus scottii*, *Vulpes macrotis*) y Mapache (*Procyon lotor pallidus*), además de alta diversidad de roedores y algunos murciélagos, siendo un Estado de gran importancia ecológica en el cual se han encontrado zonas propensas a ser declaradas Áreas Prioritarias para la Conservación ([SPA, 2015](#)).

Dentro del Valle de Mexicali podemos encontrar distinta fauna silvestre, incluidos mamíferos como mapaches, zorrillos, murciélagos, coyotes, gato montés, conejos, liebres, topos, ratones y ardillas. Algunos son residentes de los humedales que se encuentran en el RH y una comunidad de reptiles que lo utilizan como fuentes de agua y alimentos ([Pronatura Noroeste, 2006](#)).

2.1.4 Vegetación

La principal fuente de agua del RH proviene del drenaje agrícola con una salinidad considerada alta, en promedio de 3.0 ppm (partes por mil) de sólidos totales disueltos (STD), impidiendo que la vegetación nativa se desarrolle. Esto provoca que especies no nativas tales como el pino salado (*Tamarix ramossissima*) cuya capacidad de sobrevivir a este ambiente es mayor, se extiendan sobre el corredor del RH. No obstante, es posible encontrar vegetación

nativa como mezquites en las terrazas altas del río, además de escasos sauces y álamos en las márgenes del río (Zamora-Arroyo et al., 2005).

En octubre del año 2002, se llevó a cabo un taller con el objetivo de identificar las prioridades de conservación del Delta del Río Colorado constituido por organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, donde se delimitaron las áreas prioritarias identificando los tipos de vegetación distribuidas a lo largo de RC, dentro de las cuales se encuentran 5 áreas prioritarias a lo largo del RH.(Tabla 1).

Tabla 1. Áreas de conservación prioritarias para la zona ecológica del Río Hardy y su tipo de hábitat (Fuente: Zamora-Arroyo et al., 2005)

Zona ecológica	Áreas prioritarias para la conservación	Extensión (ha)	Tipo de hábitat
Río Hardy	Alto Río Hardy	1,358	Río perenne con pino salado, parches aislados de mezquite y marismas de tule
	Río Hardy Cucapá	4,337	Pino saldo con tule, carrizo y parches aislados de mezquite; flujos modestos
	Restauración del Campo Mosqueda	21	Vegetación de tierras altas con mezquite y vegetación nativa
	Caimán	280	Drenaje agrícola con carrizo, pino salado y tule
	Campo Sonora-Río El Mayor	195	Drenaje agrícola con carrizo, pino salado y tule

2.2 Origen del Agua

2.2.1 Distrito de riego

Antes del inicio de la agricultura extensiva en el Valle de Mexicali en las primeras décadas del siglo XX y durante los inicios de la incorporación de la superficie agrícola hasta la década de 1940 se reconfiguró el patrón de escurrimientos del RC. El RC durante los eventos de deshielo de la parte alta de la cuenca durante la primavera y el inicio del verano cambiaba el trazo de su cauce principal inundando áreas ya preparadas al cultivo y abandonando cauces azolvados por las descargas (Rivera Pazos & Ruiz Salazar, 2011). De igual forma llenaba los cauces secundarios que descargaban por la margen derecha hacia la Laguna de los Volcanes i.e. río de las abejas y pescaderos, provocando variaciones en los sus cauces. Estos cambios en los cauces, impedía el desarrollo agrícola y el asentamiento de poblados poniendo en constante peligro a sus habitantes. La forma de evitar la deriva de los cauces era la

construcción de bordos de contención para delimitar, en lo posible, las inundaciones, casi anuales. Así, se construyeron los bordos laguna Vulcano, Rodríguez, de las Abejas, Pescaderos, Saiz, Ockerson, entre otros. Esta incipiente rectificación de los cauces dirigió los escurrimientos preferentemente hacia el Sur para confluir con la parte baja del cauce del RC y el RH. Esta es la primera modificación de la cuenca de escurrimiento del RH que se alimentaba de los escurrimientos de la Laguna Vulcano.

El control inicial de los escurrimientos del RC se vió acelerado por dos eventos posteriores. Uno es la necesidad de contar con un sistema de drenaje agrícola que abatiera el nivel freático en las superficies cultivadas por el exceso de riego y que evacuara esta agua (conocida como de retorno agrícola) fuera de la zona de cultivos. El otro, fue la reducción en los escurrimientos del RC durante el llenado de los vasos de las presas Hoover y Glenn Canyon, que provocó una reducción de agua superficial y el aumento de la explotación del acuífero del valle de Mexicali que redujo la descarga del agua subterránea en la Laguna Vulcano.

En los inicios del Valle de Mexicali (VM) solamente existía agricultura en las orillas de los ríos, practicada por temporadas y usada para consumo propio, esta agricultura era practicada por aquellas tribus seminómadas que habitaban en la región del delta ([Mena & Limón, 2005](#)).

En la actualidad se destinan 171.710 ha para la agricultura en el VM, siendo la tercera área agrícola más importante del país, los principales cultivos que se siembran en el valle de Mexicali son: el trigo, algodón y alfalfa. El aumento de la actividad agrícola en el VM ha incorporado una fuente importante de empleo para habitantes de las comunidades del VM, así mismo, abastece a las comunidades de alimentos ([COPLADE, 2017](#)).

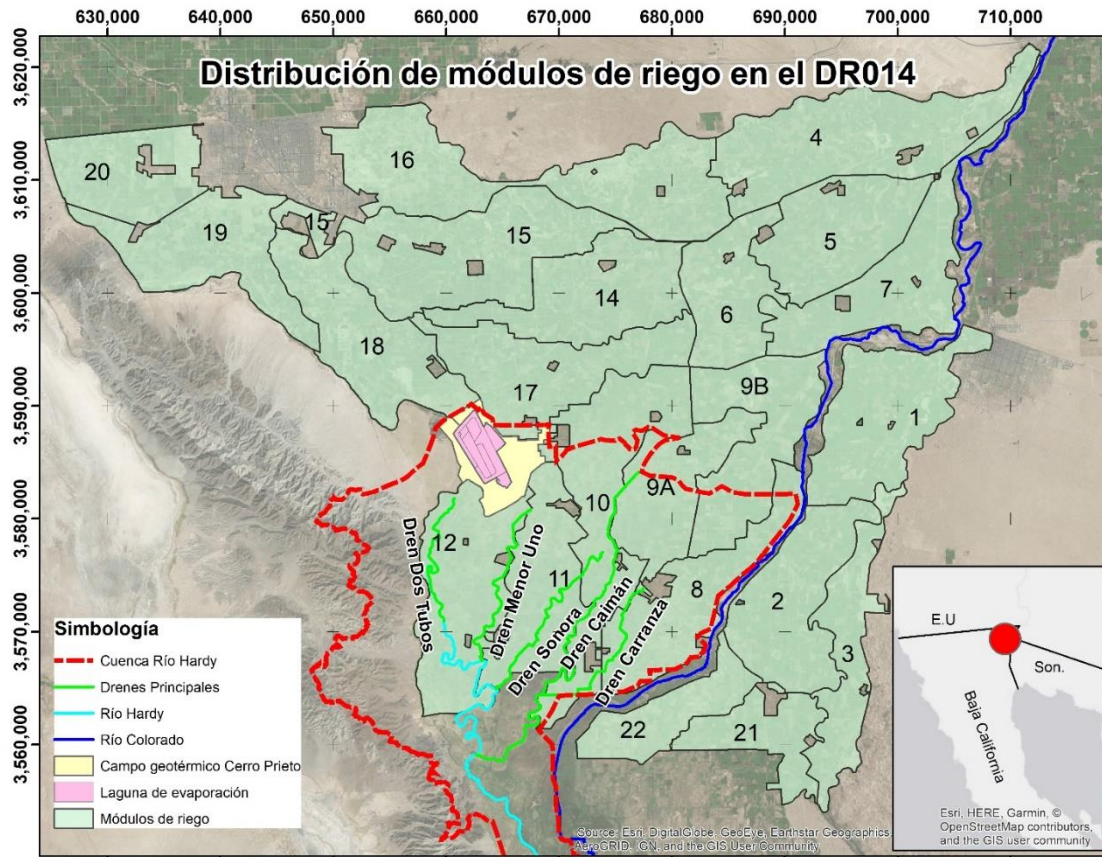


Figura 3. Distribución de módulos de riego en DR014

Actualmente el Distrito de Riego 014 cuenta con una extensión total de 250,000 ha de tierras de cultivo regadas. La distribución del agua superficial en el DR014 se realiza mediante una extensa red de canales, dentro de los cuales están 6 canales principales, los cuales son: Canal Reforma, Canal Revolución, Canal Independencia, Canal Barrote y Canal 27 de Enero (Riezgo, 2016). De acuerdo a CONAGUA (2016) la red de canales cuenta con 1,850 km de canales revestidos y 1,515 km de drenes, mediante los cuales se distribuyen el volumen recibido anualmente por la Lindero Norte en la Presa Derivadora Morelos del RC. El drenado del agua excedente de riego conducido por los canales de drenaje a cielo abierto representa la aportación más importante por su magnitud y por su flujo ininterrumpido, aunque con fluctuaciones, desde los inicios de la irrigación del valle de Mexicali hasta ahora. El RH tiene como fuente principal de flujos la vertiente Sur donde se encuentran 5 drenes (dren Dos Tubos, Menor Uno, Sonora, Caimán y Carranza) que aportan aproximadamente 1,718 L/s, permitiendo el desarrollo de la flora y fauna en el RH (CILA, 2013) cuyos volúmenes de aporte y origen del agua se muestran a continuación (Tabla 2).

En contraposición al aporte del agua de retorno de riego se intensificó la explotación del acuífero del valle de Mexicali alcanzando aproximadamente 717 pozos profundos los cuales tienen concesionados 897,358 hm³/año de agua subterránea (CONAGUA, 2014). Este enorme bombeo redujo los niveles del acuífero provocando la reducción y su total de las descargas subterráneas a la Laguna de los Volcanes que constituía la fuente de nacimiento del RH. Quedando esta zona como una depresión topográfica desierta de vegetación y con una importante acumulación de sales en la superficie. En esta zona solo se observaban las emanaciones de salmueras con altas temperaturas y salinidad de origen geotérmico formando volcancillos de barro, geiseres y pozas de agua (Valette & Esquer-Patiño, 1979).

Tabla 2. Principales drenes aportadores de agua al RH (Fuente: CILA,2013)

Dren	Origen del agua	Gasto promedio (L/s)
Dos Tubos	Efluente de la PTAR Las Arenitas y del drenaje agrícola del módulo de riego #12	420
Menor Uno	Agua de drenaje agrícola	98
Sonora (Colector del Sur)	Drenaje agrícola dentro del Módulo #11	386
Caimán (Principal del Sur)	Drenaje agrícola dentro del Módulo #10	639
Carranza	Retornos agrícolas de los módulos 8, 9 y 10, así como de la PTAR de Ciudad Guadalupe Victoria (Km 43)	175

2.2.2 Salmuera residual del campo geotérmico de Cerro Prieto

En 1964 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inició la perforación de pozos exploratorios en lo que en el área que actualmente corresponde al Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), en 1967 con 18 pozos perforados inicia actividades la primera central denominada Cerro Prieto I, y entró en operación en mayo de 1973. Con el conocimiento del potencial que tenía este yacimiento geotérmico y la gran demanda de energía eléctrica debido al crecimiento demográfico, la CFE en 1998 inició la construcción de la central Cerro Prieto IV entrando en operación en el año 2000, las zonas de Cerro Prieto II y III se descubrieron gracias a trabajos exploratorios al sur de la zona de perforación (Morgado Ruiz, 2009). La naturaleza del flujo de vapor saturado obligo a la CFE a separar el vapor del fluido geotérmico para la producción de energía, este vapor fue desechado a la depresión que formaba la laguna de los Volcanes con una temperatura menor (~80oC) de la que era extraída (~300oC) esta reducción de temperatura y presión al alcanzar la presión atmosférica daba lugar a la precipitación de las sales disueltas, la mayor componente por su volumen es la sílice y muy diversos metales pesados.

El crecimiento en la explotación del campo y el arranque de nuevas centrales de producción requirió construir una red de canales de conducción de salmuera y transformar la Laguna de los Volcanes en un estanque. Este estanque tendría forma de caracol para transportar la salmuera hasta alcanzar la temperatura ambiental y con ello aumentar el tiempo de residencia y por consiguiente su evaporación. Esta laguna se le llamó laguna de evaporación con una extensión de 14 km² para luego ser extendida a 18.4 km², la cual funciona como un depósito temporal para la salmuera que se extrae del yacimiento geotérmico (Portugal and Pal Verma, 2001). Se considera temporal porque desde el inicio de operaciones del CGCP se descargaban los volúmenes excedentes, que no se alcanzaban a evaporar o infiltrar al acuífero somero, al RH (Ramírez Hernández, 1997). La conducción de salmuera geotérmica con altos niveles salinos (STD de 25.0 ppm) fue descarga al cauce de RH desde aproximadamente 1972 hasta 1996 con volúmenes variables, ocasionando un alto impacto en la flora y fauna del RH que no fue cuantificado, pero que provocó tanto la muerte de peces en numerosas ocasiones, como la sustitución de la flora endémica por especies invasoras resistentes a la alta salinidad como el pino salado (*Tamarix ramosissima*).

No se ha documentado una fecha exacta, pero, podría suponerse que a partir del año 1996 se suspende completamente la descarga de salmuera geotérmica al cauce del RH por el Dren Dos Tubos y aunque en este momento no se descarga más salmuera residual al lecho del RH su efecto sigue presente en la vegetación que conforma el corredor ripario.

2.2.3 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Las arenitas”

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y el humedal artificial “Las Arenitas” mostradas en la figura 4, tienen un papel fundamental en el aporte de agua al RH, siendo actualmente una de sus fuentes principales, convirtiendo al RH en un río perenne contando con efluente durante todo el año, debido a que los flujos de drenaje parcelario dependen del régimen de riegos.

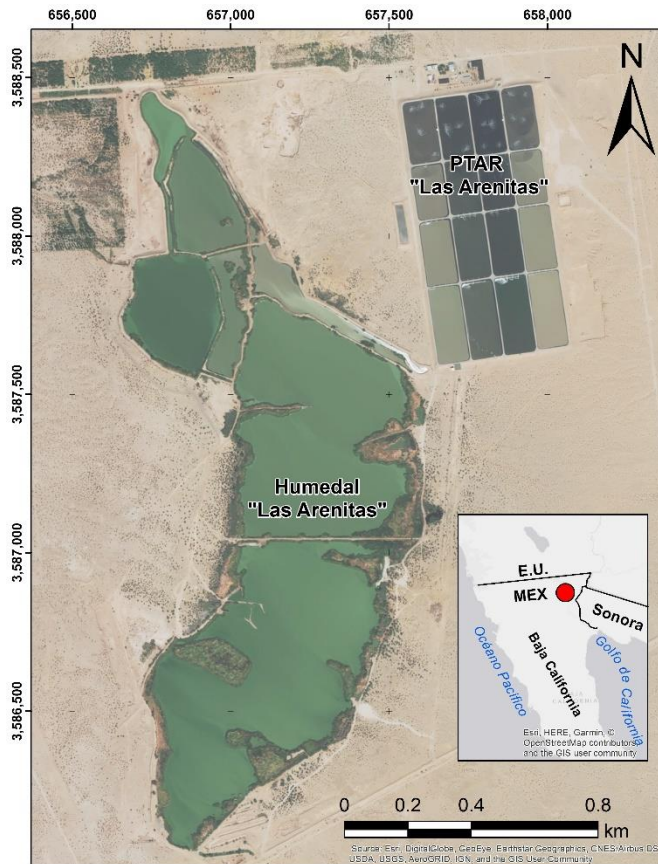


Figura 4. Humedal y PTAR “las Arenitas”.

En el 2007, por un acuerdo entre el gobierno del Estado de Baja California, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) y la CONAGUA con la Asociación Ecológica de Usuarios del Río Hardy-Colorado, A. C. (AEURHYC) y Pronatura Noroeste, el 30% del efluente de la PTAR las Arenitas sería descargado al RH y a la zona Sur del Río Colorado (Poder Ejecutivo del Estado de Baja California, 2007).

El efluente del humedal de la PTAR es descargado al dren agrícola llamado Dren Dos Tubos que constituye el actual nacimiento de RH, desde donde circula para finalmente unirse al RC y llegar al Estero del Delta del RC. Aunque la calidad del agua residual tratada del efluente del humedal es de mejor calidad que la del efluente de la PTAR, el aumento en la cantidad de agua tratada por la PTAR desde el 2007 generó en sus inicios afectaciones en la calidad de agua del RH, ocasionando con ello afectaciones a la flora y fauna silvestre del RH y su corredor ripario, así como a las actividades recreativas y acuícolas, esto dio como resultado el descontento de los usuarios del río. Como respuesta a estos sucesos en el año 2008 la CESPM en conjunto con el Sonoran Institute, Pronatura Noroeste, apoyados de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) realizaron estudios para el diseño del humedal de tratamiento.

El objetivo principal del humedal “Las Arenitas” es brindar un tratamiento adicional a las aguas residuales provenientes de la planta de tratamiento y mejorar la calidad descargada al RH para que este dentro de los límites máximos permisibles especificados por la NOM-001-SEMARNAT-1996 que “establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales” (Zamora-Arroyo y Santiago, 2010) generando un beneficio ecológico, sirviendo de hábitat para las especies de vida silvestre, brindando oportunidades recreativas y de educación ambiental.

Para 2009, el informe del Gobernador del Estado de Baja California reportó que se habían destinado el 25% del efluente durante ese año (Osuna-Millan, 2009). El 70% del volumen restante de la descarga es vendida para su reuso en actividades agrícolas en zonas cercanas al humedal, dado que algunos de estos agricultores no pueden recibir agua del sistema de canales del Distrito de Riego 014 por que sus parcelas están más altas de la cota de los canales (Ramírez-Hernández y Carrera-Villa, 2015).

Aunada a esta reducción de la calidad del agua, en el año 2010 el sismo ocurrido en el Valle de Mexicali destruyó gran parte del sistema de conducción de agua del DR014 lo que obligó a detener la producción agrícola en una parte de la zona drenada por el RH del 2010 al 2016. La CESPM entregó a los usuarios agrícolas mayores volúmenes de agua residual tratada para mantener en regadío una porción de tierras de cultivo sobre la margen derecha del RH por acceso directo del agua del cauce del RH. Lo que trajo consigo la costumbre de bombear agua directamente del cauce del RH para abastecer los riegos de las parcelas cultivables, costumbre que continúa, aun ahora que el abastecimiento ya está completamente regularizado.

2.2.4 Afectaciones causadas por sismo en 2010: El Mayor-Cucapá

Al margen de la reducción de flujo durante 6 años aproximadamente, el Sismo El Mayor-Cucapá ocurrido el 4 de abril de 2010 de magnitud 7.2 grados en la escala de Richter en el Valle de Mexicali, provocó una gran cantidad de daños tanto en elementos estructurales como no estructurales. El sismo tuvo grandes repercusiones directas sobre el RH al cambiar sus características topográficas e hidrológicas, así como, por las afectaciones al sistema de conducción de riego, las parcelas y los drenes del DR014, particularmente a los módulos 10, 11 y 12 y a la economía que el RH representa para las comunidades aledañas (Villareal-Rosas, 2014). La zona de daños por el sismo se concentró en la región de los centros de dispersión de creación de corteza, comprendida entre los lineamientos de las sierras El Mayor-Cucapá y la intensidad del daño en canales y drenes fue en función de la profundidad de las estructuras, las subpresiones hidrodinámicas y las aceleraciones laterales horizontales producidas por el sismo afectando la estabilidad de taludes y terrazas aledañas, a su vez, el fenómeno de licuefacción elevó las plantillas de los canales y drenes con la aportación de arenas (Wong Ortega y Munguía Orozco, 2010) lo que formó cambios de pendiente formando pequeños lagos a lo largo del cauce.

2.2.5 Hidrodinámica

En el RH se han llevado a cabo diversos estudios para conocer el comportamiento hidrodinámico del río, para los cuales ha sido necesario medir en sitio diversas variables hidrológicas y geométricas. En período de 2010-2011, después del sismo del 2010 se obtuvo la batimetría y en general la geometría del RH desde el nacimiento del RH hasta el campo Mosqueda, con el propósito de hacer una simulación hidráulica del río (Trejo-Fernández, 2012). Al comparar una batimetría anterior al sismo con la realizada posteriormente se encontró que en algunas zonas la plantilla del cauce se había elevado, dando lugar a cambios de pendiente, por la presencia de volcancillos de arena en el lecho del RH.

El estudio de Trejo-Fernández (2012) incluyó mediciones mensuales de flujo en cuatro sitios a lo largo del cauce del RH, durante un año hidrológico 2009-2010. Se documentaron diferencias en los caudales antes y después del sismo del 4 de abril del 2010 encontrando que el aumento puntual del caudal fue de 4,000 L/s en las fechas próximas al evento sísmico (Trejo-Fernández, 2012). Además, realizó un modelo hidrodinámico unidimensional utilizando el programa HEC-RAS, calibrándolo mediante el ajuste de los valores de rugosidad de Manning y los caudales medidos, en dicho modelo se consideraron estructuras de compuertas y puentes ubicados a lo largo del tramo modelizado. Los resultados incluyeron la determinación de tirantes de agua, el perímetro mojado, pero fundamentalmente comprobar que las variaciones de los flujos en el cauce del RH están influenciadas por la intensidad de los riegos de las zonas agrícolas aledañas al cauce y el control de las estructuras hidráulicas.

Más tarde en el año 2015, se realizó otra batimetría desde el Puente de la Carretera del Ejido Durango hasta aguas abajo de la terminación de la zona que se conoce como el Riñón (por que los meandros del río asemejan la forma de un riñón). En este levantamiento se adquirieron puntos de la base del río y en su eje a cada 20 m y a cada 150 m se hizo un transecto perpendicular determinando la cota de los taludes y la extensión del cauce. Esta nueva geometría, fue utilizada para realizar una nueva modelación hidrodinámica del RH a lo largo de 40 km del cauce, la cual se llevó a cabo mediante un programa computacional llamado HEC-RAS. Los valores de rugosidad de Manning fueron estimados mediante el esquema de Cowan (1956) que considera: la sinuosidad del cauce, la composición litológica del lecho del río, la forma y tamaño de la sección del río, cobertura de la vegetación y las condiciones del flujo. Este modelo fue calibrado ajustando la elevación del agua observada con la obtenida del modelo mediante la variación de la rugosidad estimada anteriormente. Encontrando que la capacidad del cauce en condiciones actuales naturales, es decir sin estructuras hidráulicas es de hasta 4 m³/s y que la capacidad de desfogue de la alcantarilla 7 tubos es de 4.5 m³/s (TNC, 2015).

3 Marco teórico

A continuación, se documentan los conceptos generales tanto de los aspectos hidrológicos, modelación hidrológica, caudal ecológico y el análisis de imágenes de satélite, utilizados en este trabajo y que será la base metodológica y en la presentación de los resultados.

3.1 Hidrología

Es preciso reseñar algunos conceptos de hidrología que serán utilizados en la definición del caudal ecológico y que permitirán entender el funcionamiento hídrico actual del RH.

3.1.1 Cuenca de escurrimiento

Una cuenca de escurrimiento es definida como una unidad de terreno, delimitada por la división natural de las aguas afectadas por la formación del relieve (CONAGUA, 2015), que transfiere el agua a las partes bajas de la topografía mediante drenaje superficial, concentrándose y descargando a otras cuencas o al océano finalmente (Breña y Jacobo, 2006).

3.1.2 Cauces superficiales y tipos de corrientes

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez constante a lo largo del año, y desemboca en el mar, en un lago o en otro río (González-Villeda, 2015). De acuerdo a su capacidad erosiva y transporte de sedimentos, un río está compuesto por tres partes principales:

- Curso alto: Coincide con las áreas montañosas de una cuenca determinada. Su potencial erosivo es mucho mayor y los ríos suelen formar valles en V al encajarse en el relieve.
- Curso Medio: Suelen alternarse las áreas o zonas donde el río erosiona y donde deposita parte de sus sedimentos, lo cual se debe principalmente a las fluctuaciones de la pendiente y a la influencia que reciben con respecto al caudal y sedimentos de sus afluentes.
- Curso Bajo: Es la parte en donde el río fluye en áreas relativamente planas, donde suele formar meandros. Este es el caso del RH en donde su pendiente es muy suave, forma meandros que le permiten alcanzar su desembocadura al mar y su energía de transporte es muy baja, por lo que el transporte de sedimentos también lo es.

A partir de la duración de la descarga del flujo, los ríos se pueden clasificar en:

Corriente que conduce agua durante todo el año y es denominada como corriente perenne, las corrientes intermitentes son aquellas que conducen el agua durante algunas semanas o meses y por último están las corrientes efímeras las cuales conducen agua después de algún evento hidrológico, es decir por un intervalo de horas o días (Breña y Jacobo, 2006).

De acuerdo a esta clasificación y a las condiciones de recarga del RH, este es considerado un río perenne, debido a que mantiene un flujo de agua a lo largo de su cauce durante todo el año. Es preciso anotar que los ríos perennes alcanzan este régimen de descarga por tres razones principales: a) su cuenca de escurrimiento es muy grande lo que le permite recibir escurrimientos de regiones con distintas precipitaciones, por ejemplo, de eventos de precipitación o deshielo de alta montaña o eventos de origen oceánico en la región costera; b) mantener una conexión directa con el acuífero que le abastezca el flujo base en la época de estiaje de la cuenca.

Como se comentó en el apartado de flujo en canales abiertos, el régimen perenne del RH obedece factores antropogénicos: 1) la descarga de agua de retorno agrícola de la red de drenaje del DR014 en las temporadas de irrigación de cultivos; 2) la descarga de agua residual tratada de la PTAR Las Arenitas de forma continua a lo largo del año; 3) la descarga de agua subterránea desde el acuífero, principalmente por el flujo subterráneo del acuífero y el retorno de riego. La primera le confiere un aumento del caudal de carácter estacional, mientras que la segunda un carácter más permanente que puede semejar el flujo base. La tercera aporta continuamente un flujo no determinado, pero con oscilaciones relacionadas con la irrigación del valle de Mexicali.

3.1.4 Cuantificación del Caudal

Para conocer el significado de caudal ecológico debemos de tener en claro el concepto de caudal, definido como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo de manera continua por una sección transversal determinada de un río ([Aparicio Mijares, 1992](#)), definido por la Organización Meteorológica Mundial ([WMO, 2012](#)) como el “volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo”. La determinación del caudal en cauces se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación utilizada para cualquier flujo ([Chow, 1994](#)):

$$Q = v * A$$

Donde:

- Q , es el volumen por unidad de tiempo (m^3/s)
- v , es la velocidad media
- A , es el área de la sección transversal (m^2)

Esta ecuación permite obtener el caudal en un punto determinado para lo cual es necesario hacer mediciones del área que abarca la sección transversal y hacer mediciones de la velocidad en diferentes posiciones dentro de esta área para cuantificar la velocidad media del cauce.

Sin embargo, debido a que se requiere calcular el caudal en un río a todo lo largo de su recorrido, se necesita la implementación de una ecuación que relacione factores como lo es: rugosidad, perímetro mojado y la pendiente. La ecuación de Manning basada en la fórmula de Chezy se puede utilizar tanto para canales regulares e irregulares (Salcedo-Peredia, 2016).

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}}\sqrt{S}$$

Donde:

- Q, es el volumen por unidad de tiempo (m³/s)
- n, es el coeficiente de rugosidad (adimensional)
- A, es el área hidráulica (m²)
- R, es el radio hidráulico (A/Pm)
- S, es la pendiente (adimensional)
- Pm, es el perímetro mojado (m)

3.1.6 Flujo en Canal Abierto

El flujo en un río se puede simular hidráulicamente como en los canales abiertos, ya que este tiene una superficie libre asemejándose en el comportamiento de caudal (Salcedo Peredia, 2016).

El flujo en la sección de un canal depende de factores como lo es: la forma de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas, estos factores nos determinan la distribución de las velocidades en dicha sección.

En canales abiertos la clasificación de flujos existe en distintos tipos

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

3.1.7 Drenaje agrícola

[SAGARPA en 2013](#) definió al dren agrícola como el conjunto de herramientas para la construcción de obras como lo son las parcelas, cuando existen excesos de agua sobre la superficie, este tendrá el objetivo de desalojar el exceso de agua, para esto se utilizan distintas técnicas como lo es principalmente el drenaje superficial y el drenaje subterráneo.

Los drenes que descargan al río Hardy utilizan la técnica de drenaje superficial, los principales drenes en el valle de Mexicali utilizan el drenaje superficial teniendo 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 ([Cital Morales, 2018](#)).

Los principales drenes que descargan al río Hardy, son el Dren Dos Tubos, transportando la descargas de la PTAR “Arenitas”, así como, el agua de drenaje agrícola de las parcelas aledañas al dren, así mismo se conectan: el dren Caimán, Dren Sonora, Dren Menor Uno y Dren Carranza.

3.1.8 Coeficiente de rugosidad

Debido a que no existe una metodología exacta para determinar su valor, el coeficiente de rugosidad (n) es uno de los componentes físicos del cauce con la mayor dificultad de obtener o estimar ([Rodríguez Burgueño, 2017](#)).

[Chow \(1994\)](#) establece que la rugosidad superficial es representada por el perímetro mojado el cual produce la disminución de la velocidad, la vegetación es un factor importante en el cálculo de la rugosidad la cual es capaz de reducir notablemente la capacidad del canal retardando el flujo, este factor depende de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación del cauce, otros factores que afectan a la rugosidad es el material del lecho del cauce, el grado de irregularidad, las variaciones en la sección transversal, obstrucciones del flujo y el grado de meandros en el cauce.

Las vegetaciones en las laderas de los canales causan importantes efectos en la magnitud del flujo, velocidad y turbulencia ([O'Hare et al., 2010](#); [Douglas Shields, G. Coulton and Nepf, 2013](#)).

El método de Cowan (1956) se basa en la consideración de seis elementos que afectan la resistencia del flujo, integrando estos factores se obtiene un coeficiente final específico para cada sección del río ([Kim et al., 2010](#)).

Para la obtención de los valores (n) se recurre al uso de la tabla 3:

Tabla 3. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante la ecuación de Cowan (Chow, 1994).

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n ₀	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n ₁	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n ₂	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n ₃	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n ₄	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m ₅	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Ecuación Cowan para determinar el valor de n:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

En todos los modelos hidráulicos se requiere ingresar los valores rugosidad en los caudales abiertos (Barnes, 1987; Hatzigiannakis et al., 2014), los modelos deben calibrarse utilizando los perfiles de superficie del agua medidos, así como varias mediciones de nivel de agua y descarga (Braca, 2008).

3.2 Modelación

3.2.1 Generalidades

Los modelos hidrológicos son la representación simplificada de a realidad que relacionan distintas variables y leyes naturales (WMO,2012) proveen información de gran importancia sobre el comportamiento de los ríos (Cital Morales, 2018). La modelación tiene un papel fundamental en los estudios de las avenidas en las cuencas, siendo una herramienta para el análisis y prevención de las inundaciones.

Existen códigos de simulación y software que permiten la simulación del agua superficial como el desarrollado por el centro de ingeniería hidráulica (HEC por sus siglas en inglés) del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, conocido como HEC-RAS, el cual será la base de la simulación en esta investigación.

En el caso de requerir la simulación con una representación más apegada a la realidad, se utiliza la simulación en 2D, la cual tiene una mayor precisión en condiciones geométricas específicas (áreas pequeñas, pendientes bajas y profundidades someras (USACE, 2016).

3.2.2 Programa HEC-RAS

El Sistema de Análisis de Ríos del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (HEC-RAS, por sus siglas en inglés) es un software que tiene la capacidad de realizar simulaciones hidráulicas de flujos unidimensionales (1D) y en su nueva versión HEC-RAS v5 es capaz de simular flujos bidimensionales (2D), este software está diseñado para el cálculo en canales naturales y construidos, áreas de inundaciones, alcantarillas y obstrucciones, etc. (USACE,2016).

Los modelos de HEC-RAS realizan simulaciones computacionales de elevaciones de superficies de agua, descargas de flujos, velocidades promedio, y energía de pendiente en cada sección.

3.2.3 Metodología de Cálculo utilizada por el HEC-RAS

Básicamente el proceso de solución del programa utiliza un esquema numérico de volumen finito implícito utilizado para una malla estructurada, para su proceso se configura mediante el intervalo de tiempos a simular, condiciones de frontera (hidrograma, pendiente normal o profundidad), Mapa de elevaciones, rugosidades, estructuras o alcantarillas y el régimen del flujo a modelar. Las soluciones resultantes de volúmenes finitos generan mayor estabilidad en comparación a otras técnicas (USACE,2016).

3.2.4 HEC-RAS en 2 dimensiones y en estado transitorio

El modelo en 2D, se caracteriza por utilizar una malla a diferencia del modelo en 1D que utiliza secciones transversales, estas áreas son regiones del modelo donde se calcularán los algoritmos. La malla puede ser construida con celdas que van de 3 a 8 lados, realizada automáticamente con el software HEC-RAS (malla uniforme) o CivilGEO (malla adaptativa y malla hexagonal). Los cálculos se realizan por tiempos y caudales, establecidos de acuerdo a los hidrogramas en las condiciones de frontera, convirtiéndolo en un modelo transitorio a diferencia de los modelos que no tienen cambios a lo largo del tiempo como lo son los modelos de 1D (USACE,2016).

3.2.5 Proceso de Calibración

3.3 Caudal Ecológico

Históricamente el concepto de caudal ecológico se comenzó a utilizar en Estados Unidos en el periodo de 1940's, fue sino hasta los años 70's que se comenzaron a utilizar documentos técnicos de metodologías para CE (Arthington *et al.*, 2004), debido a las alteraciones ecológicas generadas por la construcción de grandes presas, dando las pautas para la obtener el CE mínimo (Barrios Ordóñez *et al.*, 2015). También ha sido utilizado en respuesta a la problemática de degradación de los ecosistemas acuáticos en el mundo, principalmente por impactos generados por actividades humanas como sobre explotación y contaminación de ríos (Schmutz and Sendzimir, 2018) pronósticos hidrológicos para inundaciones y la exigencia de la conservación del medio ambiente y el uso sostenible de los recursos (Soares *et al.*, 2015), los cuales tienen como objetivo principal la estimación de un caudal ecológico para reducir los impactos ambientales y el mejoramiento del estado ecológico del río.

3.3.1 Definición de caudal ecológico.

En el trascurso del análisis literario se define el caudal ecológico como el caudal necesario para garantizar la conservación de los recursos hidrológicos, mantener los procesos ecológicos, asegurando la conservación de los ecosistemas asociados y su correcto funcionamiento (Alvarado, 2008; Vélez, 2016), así mismo Soares *et al.*, (2015) lo definen como régimen de caudal ecológico aquel caudal que en cantidad, tiempo y calidad, se requiere para mantener la integridad ecológica de los ecosistemas, así como también comunidades humanas que dependen de los ecosistemas, garantizando los servicios ecosistémicos para las poblaciones humanas.

En este estudio utilizaremos como concepto fundamental la definición de WWF (2010), el cual lo define como el caudal necesario para conservar al menos algunos patrones naturales de los flujos a todo lo largo de un río, de modo que las personas, flora y fauna corriente abajo puedan preservarse y continuar utilizando sus recursos. Su propósito es el uso razonable de los recursos hídricos.

En la Tabla 4 se reseñan algunas de las definiciones y nombres que el caudal ecológico ha recibido y de la consideración de diversos factores; desde los ambientales, ecológicos, hidrológicos, sociales y económicos; considerando diversos tipos de cuerpos de agua, desde los prístinos, pasando por los que poseen flujos regulados, hasta los altamente impactados.

Tabla 4. Definiciones de caudal ecológico.

Referencia	Año	País	Definición de caudal ecológico
------------	-----	------	--------------------------------

Irujo (1994)	1994	España	La cantidad de flujo que garantice la capacidad biogénica potencial de un ecosistema acuático, priorizando el desarrollo de la vida piscícola.
(Dyson, Bergkamp and Scanlon, 2003)	2003	Reino unido	Es un régimen hídrico dentro de un río, humedal o zona, con el objetivo de mantener los ecosistemas y sus beneficios cuando existan regulaciones de flujos.
Arthington et al. (2004)	2004	Australia	La cantidad de flujo para mantener el régimen hidrológico de los ríos en una condición para ofrecer la protección y características del ecosistema, con el objetivo de restaurar características del régimen de regulación previa al flujo modificado.
Castro-Heredia et al. (2006)	2006	Colombia	Es aquel caudal que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural y las funciones ambientales tales como lo es la purificación de aguas, recreación, pesca, entre otros.
(Diez Hernandez and Ruiz Cobo, 2007)	2007	Colombia	Es la cantidad de caudal que mantendrá una corriente en un tramo determinado, garantizando la conservación de los recursos hidrobiológicos y los ecosistemas aledaños al cuerpo de agua.
(Calvo Alvarado et al., 2008)	2008	Costa Rica	Es aquel caudal que busca mantener el carácter, extensión y condición de los hábitats acuáticos y riparios, asegurando sus servicios y procesos ecológicos para mantener recursos para la sociedad.
(Beca, 2008)	2008	Nueva Zelanda	Son los flujos y niveles de agua necesarios para brindar una integridad ecológica para la vegetación y fauna presentes dentro de los cuerpos de agua y sus márgenes. Utilizados para la toma de decisiones y gestión hídrico.
(WWF, 2010)	2010	México	Es un instrumento de gestión que establece la calidad, cantidad y régimen de flujo requerido para

				mantener los procesos y componentes de los ecosistemas acuáticos.
(Snelder, Booker and Lamouroux, 2011)	2011	Nueva Zelanda		Representan una protección para los ecosistemas acuáticos, relacionando la disponibilidad y confiabilidad del recurso hidráulico.
(SE, 2012)	2012	México		cantidad, calidad y variación del gasto o de los niveles del agua reservada para preservar servicios ambientales, componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos y terrestres que dependen de procesos hidrológicos, geomorfológicos, ecológicos y sociales.
(Aguilar-Muñoz, 2012)	2012	Ecuador		Es aquel que relaciona los temas biológicos y ambientales de las especies acuáticas y riverañas en las cuencas hidrográficas, con el manejo de los caudales hídricos, concesiones y su distribución.
(Gallo-vélez, 2016)	2016	Colombia		Es la cantidad mínima de caudal que requiere un ecosistema acuático para su funcionamiento, garantizando la calidad del recurso hídrico para su normal desarrollo, favoreciendo las actividades socioeconómicas y ordenamiento hídrico.
(Ma et al., 2018)	2018	China		Se refiere al flujo que mantiene la salud de los estuarios y ríos, satisfaciendo las necesidades humanas, incluida la cantidad de agua, calidad y la duración, teniendo como principal objetivo la salud de los ecosistemas riveraños.
(Schmutz and Sendzimir, 2018)	2018	Viena, Austria		Es la cantidad o volumen de agua requerida en el tiempo para mantener estado óptimo del río en un determinado estado, teniendo en cuenta consideraciones
(Arthington et al., 2018)	2018	Australia		Es la cantidad, tiempo y calidad de los flujos y niveles de agua dulce requeridos para la subsistencia de los ecosistemas acuáticos, ayudando a su vez a la economía, sustentabilidad, bienestar y la cultura humana.

3.4 Descripción de metodologías para caudales ecológicos

La modificación del régimen hidrológico de los sistemas acuáticos, ha ocasionado la reducción de los caudales, en algunos casos ha provocado impactos ambientales, sociales y económicos sobre los ecosistemas. Esta perturbación a los sistemas ha requerido analizar sus repercusiones desde diversas metodologías y enfoques con el propósito de definir un caudal que bajo algún criterio cumpla con los servicios mínimos al ecosistema. La determinación de caudales ecológicos en los ríos y las necesidades del recurso hídrico para cuerpos de agua, como los humedales, ha tenido gran interés para la sociedad, en la actualidad se existen más de 200 metodologías para CE alrededor del mundo (Ma *et al.*, 2018), aunque solo algunas cumplen con los principios y exigencias derivadas en el marco legal mexicano (Barrios Ordóñez *et al.*, 2011).

Las metodologías han sido clasificadas en distintos grupos de acuerdo a su enfoque y objetivo (Castro-Heredia *et al.*, 2006), en la figura 5 se muestra la división de las metodologías en cuatro grupos principales: metodología hidrológica, metodología hidrobiológica o simulación de hábitat, metodología hidráulica y metodología holística (Tharme, 2003; Castro-Heredia *et al.*, 2006; Ma *et al.*, 2018), además de estos grupos principales ocasionalmente se encuentran metodologías combinadas y otro tipo de metodologías específicas para determinados casos (SEMARNAT, 2014).

Un gran paso realizado en México, fue la creación y publicación de la Norma Mexicana MX-AA-159-SCFI-2012 (NOM-159), la cual “Establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas” y fue publicada oficialmente en el Diario Oficial de la Federación, el día 20 de septiembre de 2012. Dicha norma se logró gracias al interés en el sector ambiental y de la CONAGUA para generar, en combinación con la academia, los estudios conducentes a determinar los caudales e implementarlos para definir metodológicas, regulaciones y lineamientos que contribuyan a la conservación del hábitat en los ecosistemas fluviales (González-Villela y Banderas-Tarabay, 2015).

La elección de la metodología más adecuada está en función de los datos con que se cuente y los que sean posible obtener en corto plazo. No obstante, como bien se muestra en la figura 5, la metodología hidrológica es la más utilizada ya que solo se requieren registros históricos y geométricos del área de estudio, la metodología más completa, según los reportes bibliográficos es la metodología holística, seguida de la hidrobiológica. La metodología holística al ser multidisciplinaria, requiere de análisis exhaustivos de expertos en distintas áreas.

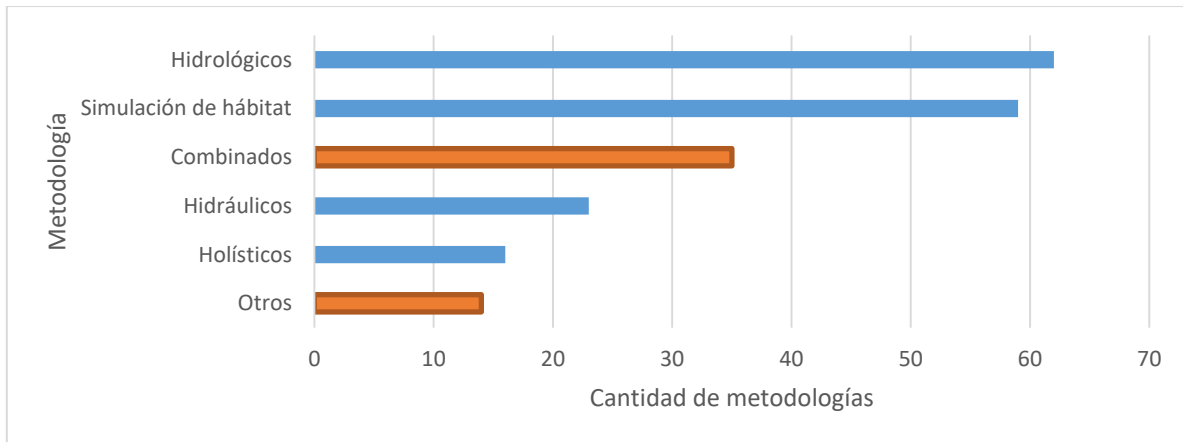


Figura 5. Clasificación metodologías, considerando las cuatro metodologías principales (hidrológica, hidráulica, hidrobiológica y holística) y 2 adicionales (combinadas y otros métodos específicos) (SEMARNAT, 2014).

En base a las revisiones de los requerimientos para cada metodología y considerando la información recopilada durante este estudio se llegó a la conclusión de la metodología hidrológica, siendo esta una de las metodologías más confiables científicamente y utilizadas, comparando los resultados de esta propuesta con la estimación de desarrollo y aumento de la fauna para la especie objetivo que se obtenga en el análisis.

3.4.1. Metodología Hidrológica

Las metodologías hidrológicas son consideradas las propuestas antiguas en la obtención de CE, desarrollándose entre los años 70's y 80's del siglo XX, en Europa y Estados Unidos (Indij, 2018), son consideradas las metodologías simples, debido a la cantidad de recursos y datos necesarios. Se basa en la estimación de los porcentajes anuales, estacionales y mensuales (Poff *et al.*, 2017), utilizando indicadores simples como basas de requisitos históricos de caudales (Castro-Heredia *et al.*, 2006), estos CE son utilizados generalmente en la etapa de planificación de desarrollos de recursos hídricos, asumiendo que los caudales medios permitirán a las comunidades acuáticas y ecosistemas rivereños (Dualiby & Méndez, 2006; Ma *et al.*, 2018).

Los métodos hidrológicos utilizan diversos métodos estadísticos para el tratamiento de los datos de caudales naturales como: Análisis temporal, caudales clasificados, etc. Indicándose los caudales mínimos como un porcentaje de un estadístico de tendencia central, un percentil o una recurrencia definida (Diez Hernandez y Ruiz Cobo, 2007)

El primero en desarrollar la metodología hidrológica fue Tennant en 1976 el cual realizó una calificación de la fauna y diferentes parámetros físicos que representaban el hábitat, siendo este un método general y valido para los ríos dentro de la región de estudio en EE.UU (Pouilly *et al.*, 2014).

4.4.1.1 Método Tennant o Montana

Se conoce también como método de Montana, fue desarrollado en el estudio de 11 corrientes en 3 estados de Estados Unidos, entre los años 1964 y 1974, involucrando aspectos físicos, químicos y biológicos del hábitat acuático (Tennant, 1976).

Es un método utilizado mundialmente, principalmente en América del Norte, fue desarrollado por Tennant en 1976, siendo el investigador líder del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los E.U. (US Fish and Wild Life Service, (USFWS)), es uno de los métodos antiguos y ha sido utilizado para el cálculo en corrientes que no han sufrido regulaciones por infraestructura en su cauce (Castro-Heredia et al, 2006), se basó en los 10 años de experimentación de Tennant en cientos de mediciones y pruebas en campo en 11 corrientes (58 secciones transversales, 38 flujos diferentes) en Nebraska, Wyoming y Montana. Se utilizaron datos hidráulicos empíricos de subsecciones transversales combinados con evaluaciones subjetivas de la calidad del hábitat para definir las relaciones entre el flujo y la idoneidad del hábitat acuático (Barrios Ordóñez et al., 2011; SE, 2012; NIE, 2013).

Este método es utilizado en aquellas corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de la cuenca hidrológica en donde se pretenda conservar su régimen hidrológico natural con la finalidad de reservar un volumen de agua para el uso ambiental o para la conservación ecológica conforme a la Ley de Aguas Nacionales (WWF, 2010). El método de Montana ha sido adoptado en diferentes partes del mundo, como lo es Nueva Zelanda, México, Australia, etc. Es recomendado en la obtención de caudales mínimos (Beca, 2008).

En la figura 6 se indica el procedimiento para la obtención del caudal ecológico mediante la metodología propuesta por Tennant, comenzando con la selección del sitio de interés, adquisición de datos hidrológicos con una serie de datos de 20 años, continuando con el análisis de los datos para la obtención de caudales para años secos, medios y húmedos, terminando con la obtención del régimen de caudal mensual y anual.

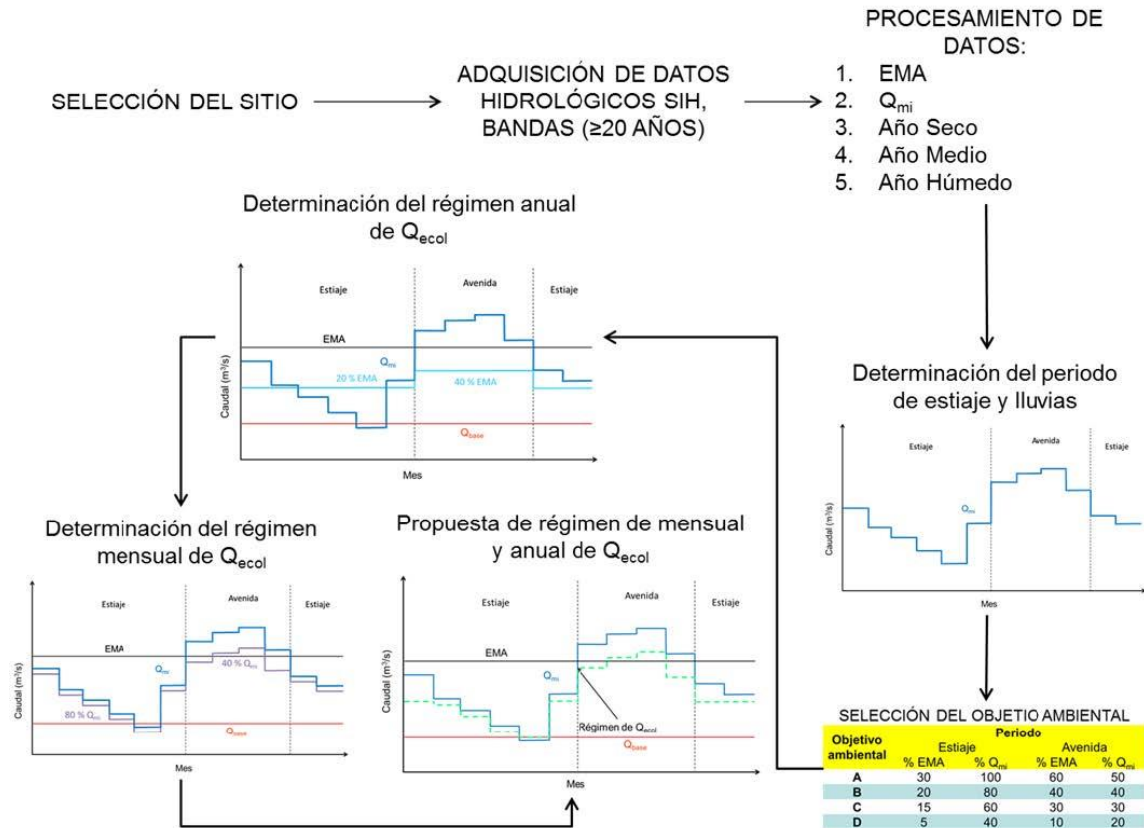


Figura 6. Esquema metodológico para el análisis de caudales ecológicos mediante metodología hidrológica, basado en Tennant (1976) y García et al. (1999). Modificado de SE (2012).

3.4.2 Metodología Hidráulica

Son metodologías en las cuales se utilizan las variables hidráulicas simples, como el perímetro mojado o profundidad máxima, generalmente medida a través de secciones, sustituyendo los factores de hábitat conocidos o asumidos a la biota objetivo (Arthington et al., 2004). Los modelos hidráulicos permiten definir variables físicas como (velocidad, profundidad, etc.) para todo tipo de caudales. Son básicamente una interrelación entre los parámetros hidráulicos del río y su descarga (Baghel et al., 2018).

Las metodologías de calificación hidráulica comúnmente aplicadas y los modelos de simulación hidráulica son utilizados para flujo ambiental, en sus revisiones, describieron solo tres métodos en esta categoría, sin embargo, los métodos hidráulicos no son adecuados para la evaluación de los requisitos de flujo estacional (NIE, 2013).

De acuerdo a Tharme (2003) existen 23 metodologías en la clasificación hidráulica, una de las metodologías utilizada en el mundo hoy en día es el método de perímetro mojado, así

mismo, el método conocido como R2Cross que se basa en la obtención de CE aceptable para una sección del río (Díez-hernández, 2005). Esta metodología ha sido usada en estudios para determinación de caudales ecológicos en centrales hidroeléctricas en los ríos costeros de acuerdo a estudios realizados en Perú (Ure, 2012).

3.4.2.1 Método de perímetro mojado

Este método fue desarrollado a principios de los años 70 por el Departamento de Pesca, Vida Silvestre y Parques de Montana, E.U., este método es utilizado como un índice de disponibilidad de alimento para los peses, es cual basa esta teoría en que al aumentar el perímetro mojado supondrá un aumento de alimento y hábitat utilizable (Castro-Heredia et al, 2006), es un método de clasificación hidráulica de flujo, basado en la relación que tiene el flujo y el perímetro mojado de un río mediante secciones transversales del tramo de estudio (Arthington et al., 2004).

Para su cálculo desarrolla la variación entre las variables hidráulicas y el caudal en las secciones transversales, principalmente de los cambios bruscos de pendientes, en las cuales caracteriza por un ser un punto de inflexión, donde se obtiene el caudal mínimo (Díez-hernández, 2005; Brown Manrique et al., 2016), el caudal en este punto de inflexión es el recomendado, considerándose como el caudal óptimo, dando por hecho que aguas debajo de este punto el caudal mínimo cumplirá con los requerimientos óptimos del ecosistema (Dualiby & Méndez, 2007). Una descarga óptima favorecerá en el desarrollo del ecosistema acuático, como lo es el desove de peces o la producción alta de invertebrados (Baghel et al., 2018).

Como se muestra en la figura 7, el perímetro mojado es la distancia a lo largo del fondo y los lados de una sección transversal del canal de la corriente en contacto con el agua, éste aumenta o disminuye dependiendo de la variación que tenga el flujo. El punto de inflexión o punto de máxima curvatura es donde el cambio de perímetro mojado se vuelve pequeño y este se tomará como el requisito del flujo mínimo para el hábitat.

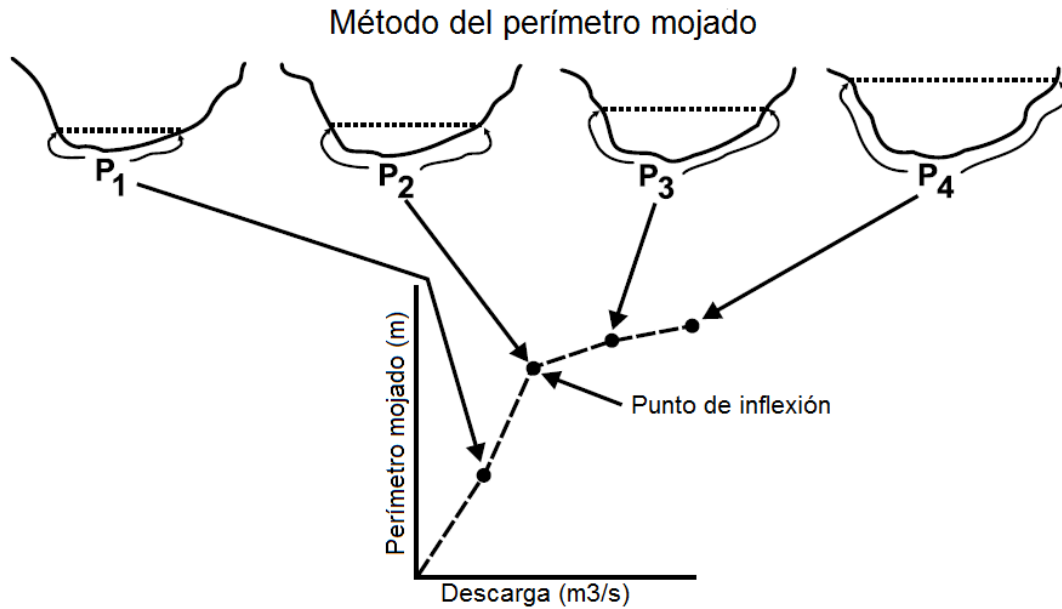


Figura 7. Relación entre descarga y perímetro mojado, donde la respuesta biológica se expresa en términos de medidas tales como el flujo histórico, perímetro mojado y área ponderada utilizada para métodos de hábitat (Imagen modificada de Arthington et al., 2004).

3.4.3 Metodología Hidrobiológicas o de simulación de hábitat

También llamadas métodos de simulación de hábitat, sus comienzos se describieron formalmente en 1976, por la USFWS, ante una necesidad para ríos, iniciando con un modelo informático llamado PHABSIM (Physical Habitat Simulation) (Dyson *et al.*, 2003), estas metodologías analizan las respuestas de determinadas especies a los cambios en el régimen hidrobiológico utilizando la relación hidráulica de hábitat-descarga (Arthington *et al.*, 2004; WWF, 2011).

Este método ofrece una mejor en la gestión de los recursos hídricos, permitiendo establecer un pronóstico cuantitativo de la calidad del hábitat (Pouilly *et al.*, 2014), mediante la incorporación de una especie objetivo, para lo cual es necesario el muestreo de especies indicadoras, combinando un modelo hidráulico y un modelo biológico para obtener el área preferencia (Baghel *et al.*, 2018).

Para la aplicación de esta metodología, se proyecta el hábitat físico y sus cambios en función del caudal, seleccionando las preferencias de hábitat de las especies o de alguna en particular, que generalmente son peces, los cuales se toman como objetivo con base en variables hidráulicas que auxilian a la conectividad de los ríos, sus inundaciones y las capacidades del cauce (SE, 2012).

3.4.3.1. Metodología IFIM

La metodología IFIM (Instream Flow Incremental Methodology) fue desarrollada por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de E.U. (USFWS, por sus siglas en Ingles) a finales de la década de 1970, siendo considerada como una de las metodologías con mayor soporte científico y legalmente defendibles para evaluar caudales ambientales, se basa en una variedad de aproximaciones desarrolladas para la evaluación de los efectos de la variación de caudales en los cauces (Tharme, 2003; SE, 2012), especialmente en aquellos que sufren modificaciones ante presas y obstrucciones (Dyson et al, 2003).

El procedimiento que se sigue en el análisis de esta metodología, se divide en cuatro etapas, las cuales son: selección de los sitios de estudio, selección de especies objetivo representativas del sitio de estudio, generación de curvas de preferencia de micro hábitat como elemento esencial en la generación de los modelos de hábitat, los trabajos de campo destinados a la construcción o recopilación de datos de la especie y calibración de los modelos de hábitat (Baghel et al., 2018).

Esta metodología supone que la especie indicadora refleja el funcionamiento ecológico global del río, con el objetivo de priorizar el ecosistema óptimo para la especie objetivo (Pouilly et al., 2014), indicando que el caudal ecológico resultante será aquel que represente la relación entre la capacidad de hospedaje de especie y el caudal.

En la figura 8 se esquematizan los procedimientos que se tienen en cuenta para cada fase.

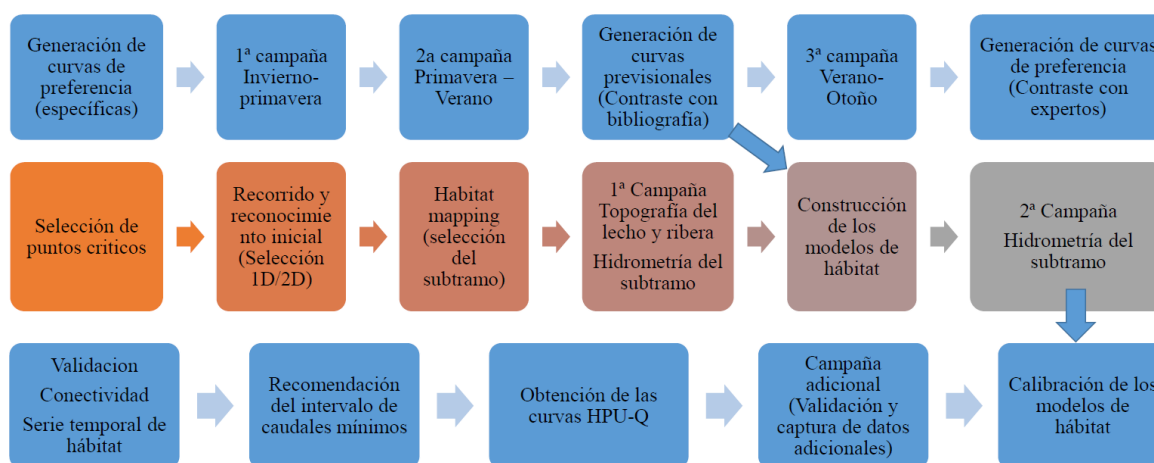


Figura 8. Esquema metodológico para el análisis de caudales ecológicos mediante modelación física del hábitat. Modificado de (SE, 2012).

3.4.4 Metodología Holística

En 1996, Tharme introduce el término “métodos holísticos” los cuales representan el 8% de las metodologías utilizadas a nivel mundial, marcando una alternativa en la evaluación de

caudales ambientales, su uso se ha centrado principalmente en Australia y Sudáfrica (Tharme, 2003).

Las metodologías holísticas se enfocan en reconocer los eventos hidrológicos importantes o críticos del patrón del flujo, por lo que requieren información de tipo multidisciplinaria, integrando información de expertos en áreas de: hidrología, hidráulica, calidad de agua, geohidrología, vegetación, etc. (Alonso-EguíaLis, Gómez Balandra, & Saldaña-Fabela, 2007; SE, 2012).

Las metodologías holísticas consideración la influencia de procesos que perturban la regulación del flujo, así mismo, proponen medidas de mitigación, basándose en escenarios de flujo en todo el ecosistema ribereño, es importante resaltar que estas metodologías tienen como objetivo el mantener o restaurar el flujo relacionado con componentes biofísicos y ecológicos (Arthington *et al.*, 2004). Dentro de las metodologías holísticas, la metodología Building Block Methodology (BBM) es la más conocida en este grupo y aplicada.

3.4.4.1 Building Block Methodology (BBM)

Esta metodología está basada en el concepto de jerarquizar algunos flujos sobre otros, en función del mantenimiento que brindan, los cuales serán descritos conforme a su magnitud, duración, tiempo y frecuencia. Se originó durante el desarrollo de dos importantes talleres especializados sobre caudales ambientales en Sudáfrica, ha sufrido cambios y se ha estado actualizando constantemente, con el objetivo del desarrollo de los recursos hídricos (King, Tharme y De Villiers, 2008)

La BBM se desarrolla bajo la hipótesis de que las especies fluviales dependen de elementos del régimen de caudal, conservando la dinámica de sedimentos y estructura geomorfológica del río. Además de la incorporación de un grupo multidisciplinario (hidrología, química, hidrogeología, biológica, etc.), se incorporan factores tanto sociales como económicos relacionados directamente por el recurso hídrico (Vastro *et al.*, 2006). En la figura 9 se muestra la construcción de los bloques que forman esta metodología, en cada bloque se deben de analizar el tipo de sustrato, vegetación y micrófitas. Además de información hidrológica y entradas subterráneas (Chaves *et al.*, 2017).

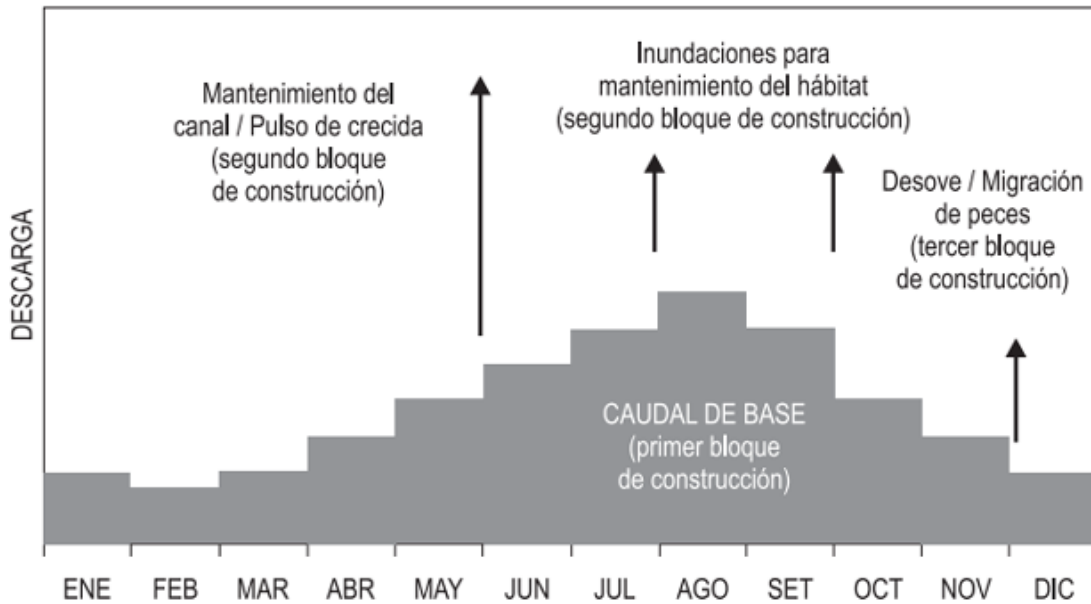


Figura 9. Ilustración de la BBM (UNESCO, 2017)

3.5 Análisis de imágenes satelitales

Tener un análisis histórico de las áreas inundadas en la planicie del río Hardy y ver como es la relación del incremento del área inundada con el incremento de las aves de marismas nos permitirá tener un panorama más amplio del impacto ambiental que tiene la variación de los flujos, por esto se optó por un análisis de imágenes satelitales dentro del periodo de 1999 a 2017.

Las imágenes satelitales contienen un conjunto de bandas, mediante las cuales es posible obtener y resaltar el índice de área inundada.

La utilización de imágenes satelitales tiene como objetivo el identificar zonas y o localización, ocupadas por distintos tipos de coberturas del terreno, discriminados o suministrados por el algoritmo de clasificación (Da Silva, Insaurralde y Cardozo, 2014).

Para la obtención de índice modificado del índice de diferencia de agua normalizado (MNDWI) se emplean las bandas Verde (cobertura) y SWIR (Infrarrojo medio), aplicando la siguiente ecuación:

$$MNDWI = \frac{Verde - SWIR}{Verde + SWIR}$$

Se utilizaron las tablas 5 y 6 para determinar cuál es la banda que se utilizaría en el cálculo del índice, debido a que los satélites difieren en el orden de las bandas.

Tabla 5. Características de las bandas del satélite Landsat 8 obtenida de USGS (2016).

Banda	longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 – Coastal Aerosol	0.435 - 0.451	30
Banda 2 – Azul	0.452 - 0.512	30
Band 3 - Verde	0.533 - 0.590	30
Band 4 - Rojo	0.636 - 0.673	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.851 - 0.879	30
Band 6 - Short-wave Infrared (SWIR) 1	1.566 - 1.651	30
Band 7 - Short-wave Infrared (SWIR) 2	2.107 - 2.294	30
Band 8 - Panchromatic	0.503 - 0.676	15
Band 9 – Cirrus	1.363 - 1.384	30
Band 10 – TIRS 1	10.60 – 11.19	100
Band 11 – TIRS 2	11.50 - 12.51	100

Tabla 6. Características de las bandas del satélite Landsat 4-5 y 7 obtenida de USGS (2016).

Banda	longitud de onda (μm)	Resolución (m)
Band 1 - Azul	0.45 - 0.52	30
Band 2 - Verde	0.52 - 0.60	30
Band 3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
Band 4 - Near Infrared	0.77 - 0.90	30
Band 5 - Short-wave Infrared	1.55 - 1.75	30
Band 6-Thermal Infrared	10.40 - 12.50	120
Band 7 - Short-wave Infrared	2.09 - 2.35	20
Band 8 - Panchromatic (Landsat 7 only)	0.52 - 0.90	15

El índice MNDWI en comparación a otros índices, permite que el agua tenga mejores resultados positivos, la vegetación y suelo tendrán valores negativos debido a que reflejan la luz, dando como resultado una extracción más óptima de las características del agua (Xu, 2006; Guo et al., 2017).

4. METODOLOGÍA

4.1 Trabajo de campo

4.1.1 Topobatimetría

Para la generación del modelo geométrico, se realizó la topobatimetría de aproximadamente 16 km sobre el cauce del RH, iniciando en el puente de la carretera estatal número 4 en el km 1+490 y finalizando en el inicio del DDT, para la realización de esta topobatimetría se utilizó el equipo de Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) de la marca TOPCON, modelo GR5.

Con el fin de tener un sistema de referencia confiable, se utilizó un Banco de Nivel (BN) ubicado en el puente sobre la carretera estatal #4 como se muestra en la figura 10, así mismo, a lo largo del cauce se colocaron Puntos de Liga (PL) mostrados en la figura 11, los cuales nos permitieron tener un mayor alcance del equipo, debido a la gran cantidad de vegetación la cual interfería con la señal del equipo, fue necesario apoyarse con estos PLs. Las coordenadas están en el sistema de referencia UTM WGS 1984 Zona 11N, en la tabla 7 se detallan las ubicaciones del BN y PL utilizados.

Tabla 7. Ubicación de Banco de nivel y Puntos de liga para batimetría en el RH

Nombre	Coordenadas		Elevación
	X	Y	Z
BASE Durango (BN)	659,542.8650	3,571,997.1140	8.550
PL1	659,200.7950	3,572,813.6020	7.527
PL2	658,650.9324	3,573,722.2870	7.609
PL3	658,687.4366	3,575,789.9830	9.425
PL4	658,753.8598	3,577,622.2750	9.136
PL5	658,842.1591	3,579,100.2330	9.575



Figura 10. Ubicación del BN en el Puente de la carretera estatal #4

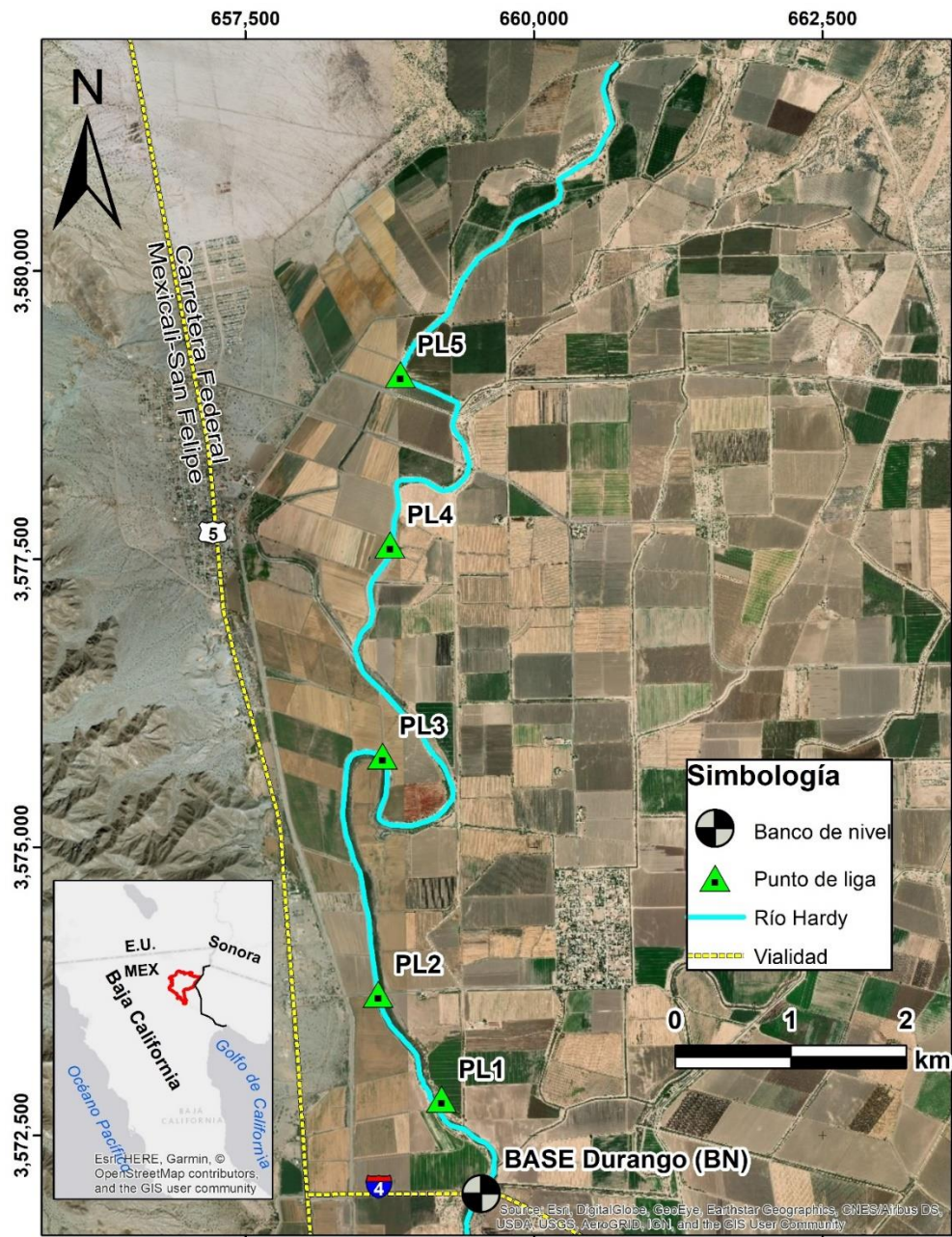


Figura 11. Ubicación de PL y BN

En el trabajo de topobatimetría se realizó el levantamiento de bordos laterales al cauce del río, con el fin de detallar los taludes del RH, dentro del cauce se realizaron secciones transversales a cada 250 m de separación a lo largo del eje, a pesar de las dificultades por vegetación predominante, en el transcurso del levantamiento se encontró una mojonera

(figura 12), identificada como PL5, la cual se levantó para tener una referencia permanente, para ser utilizada en proyectos futuros.



Levantamiento de bordos

Levantamiento de cauce

Nivelación de mojonera

Figura 12. Levantamiento topobatimétrico del cauce del RH posicionando el Banco de Nivel (NB) en el Puente 1+490 de la carretera Estatal #4

4.1.2 Medición de flujos

Se efectuaron a lo largo del cauce del RH mediciones mensualmente durante un año hidrológico, iniciando las mediciones en septiembre del 2017 y concluyendo en noviembre del 2018 para ser utilizados en la calibración y la comparación con la simulación hidráulica. Para los aforos se seleccionaron 4 sitios, de los cuales 3 se encuentran sobre el cauce del RH y 1 se encuentra en el Dren Caimán, debido a que aporta su efluente que procede del drenaje agrícola al río.

- DMS Dren Dos Tubos (DDT): se ubica en la descarga del efluente del humedal las arenitas al Dren dos tubos, este tiene un ancho de canal de 7 m aproximadamente (figura 14).
- DMS Dren Caimán (DC): se ubica en la lateral de la laguna al campo Mosqueda, tiene un ancho de 15 m aproximadamente (figura 15).
- UECE #1 (UECE1): se encuentra sobre el cauce del río Hardy aproximadamente a 0.44 km aguas abajo del puente sobre la carretera estatal #4, se estableció en un estrechamiento del cauce debido a las obstrucciones de vegetación aguas arriba, el ancho del cauce en este punto es de 14.7 m aproximadamente (figura 16).

- UECE #2 (UECE2): este sitio de aforo se encuentra sobre el cauce del RH a la altura del rancho MID, cercas del ejido cucapah mayor, con un ancho aproximado de 21 m (figura 17).

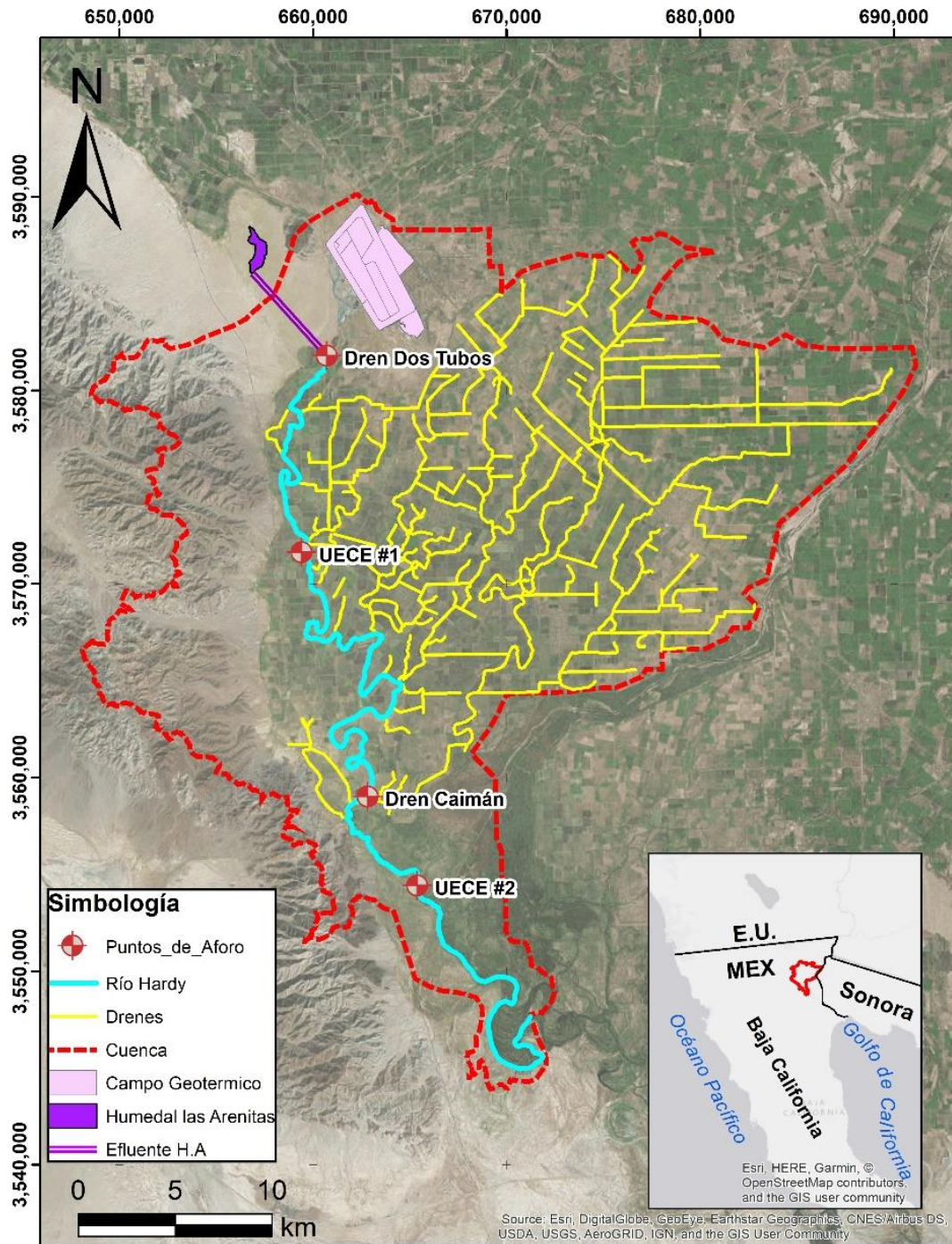


Figura 13. Sitios de aforo a lo largo del cauce del RH



Figura 14. Sitio de aforo DDT.



Figura 15. Sitio de aforo DC.



Figura 16. Sitio de aforo UECE2.



Figura 17. Sitio de aforo UECE1.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando el equipo FlowTracker el cual utiliza la tecnología Doppler acústica para medir flujo 2D o 3D en un pequeño volumen de muestreo situado a una distancia fija (10 cm) de la sonda. Los resultados en las mediciones de velocidad del agua se registran a una velocidad de una vez por segundo, además, genera reportes donde indica el caudal total medido (SonTek/YSI, 2007)

4.1.3 Instalación de Regletas

En cada punto de aforo se instaló una regleta para la medición de los tirantes de agua y obtener una relación entre el caudal obtenido y el tirante, como se muestra en las figuras 18, 19, 20 y 21.



Figura 18. Regleta en el sitio de aforo DDT.



Figura 19. Regleta en el sitio de aforo DC.



Figura 20. Regleta en el sitio de aforo UECE1



Figura 21. Regleta en el sitio de aforo UECE2

4.2 Trabajo de gabinete

4.2.1 Análisis de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes satelitales obtenidas del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS; <http://www.usgs.gov/>), en el apartado de Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), con una resolución de píxeles de 30m x 30m.

Debido al rango de datos, en la base de datos de cada uno de estos satélites, se utilizó landsat 5 para los años de 1999 a 2011 y landsat 8 para los años de 2013 a 2017, completando así la serie de datos.

La exclusión del satélite landsat 7 fue necesaria, debido a que se presentaron inconsistencias en los datos obtenidos, presentando pixeles sin valores lo cual nos impide realizar el análisis con exactitud.

Se tomó en consideración el análisis de los índices MNDWI y NDVI, con el objetivo de observar la correlación que estos tienen con los avistamientos de aves de marismas y los caudales registrados durante el periodo de 1999 a 2017. Se procesaron las imágenes con ayuda del software ArcGIS Pro siguiendo los pasos indicados en la figura 22, permitiendo aplicar este índice de una forma más optimizada.

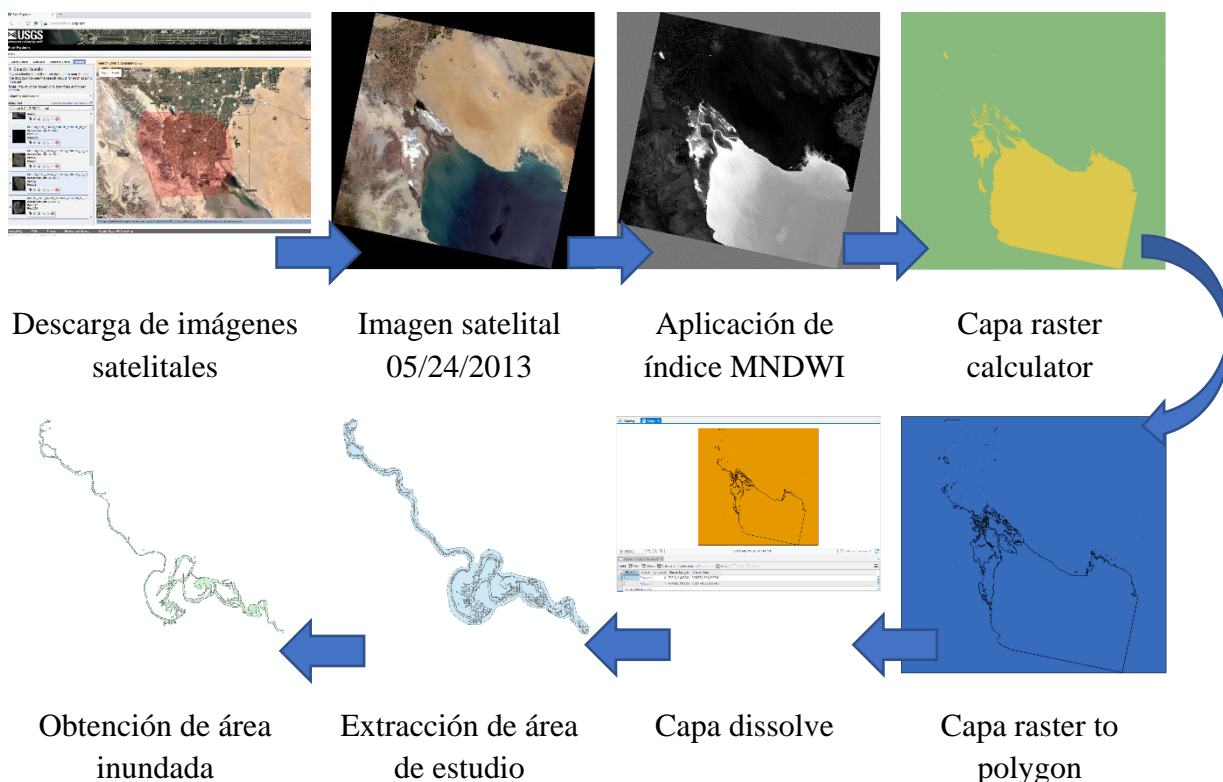


Figura 22. Procedimiento utilizado para la obtención de áreas inundadas.

4.2.2 Estimación de la rugosidad

La rugosidad en el cauce está definida por la cobertura vegetal del mismo y taludes del Río Hardy, por consiguiente, se realizó un sobrevuelo con un vehículo no tripulado (DRON) durante los días 4 y 5 de octubre del 2018.

Se utilizó un dron Phantom 4 pro plus de la compañía DJI, la cual tiene equipada una cámara modelo FC6310 con Sensor CMOS de 20 megapíxeles y GPS, con lo cual nos permite georreferenciar las imágenes para ser procesadas. Las fotografías fueron tomadas a una altura constante de 80 m, a esta altura alcanzaba a tomar la sección transversal completa del cauce y bordes como se muestra en la figura 23.

En base a la ofotogrametría adquirida se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 8, los cuales se muestran como polígonos en la figura 24 y 25.

Tabla 8. Valores de rugosidad para el transecto del DDT al UECEI

Rugosidad							
Sección	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	m_5	n(compuesta)
0+000	0.02	0.01	0.005	0	0.01	1.1	0.0495
1+000	0.02	0.01	0.005	0.02	0.1	1	0.155
2+000	0.02	0.01	0.005	0.01	0.01	1	0.055
3+000	0.025	0.01	0.005	0.025	0.025	1	0.09
4+000	0.02	0.01	0.005	0.015	0.025	1	0.075
5+000	0.02	0.005	0	0.03	0.025	1	0.08
6+000	0.02	0.01	0.005	0.015	0.015	1	0.065
7+000	0.02	0.01	0.005	0.025	0.03	1	0.09
8+000	0.02	0.01	0.005	0.03	0.05	1	0.115
9+000	0.02	0.01	0.005	0.02	0.03	1	0.085
10+000	0.02	0.01	0.005	0.01	0.01	1.15	0.063
11+000	0.02	0.01	0.005	0.015	0.025	1	0.075
12+000	0.02	0.01	0.005	0.02	0.035	1	0.09
13+000	0.02	0.02	0.01	0.06	0.1	1	0.21
14+000	0.02	0.02	0.01	0.03	0.035	1	0.115
15+000	0.02	0.01	0.005	0.02	0.04	1	0.095

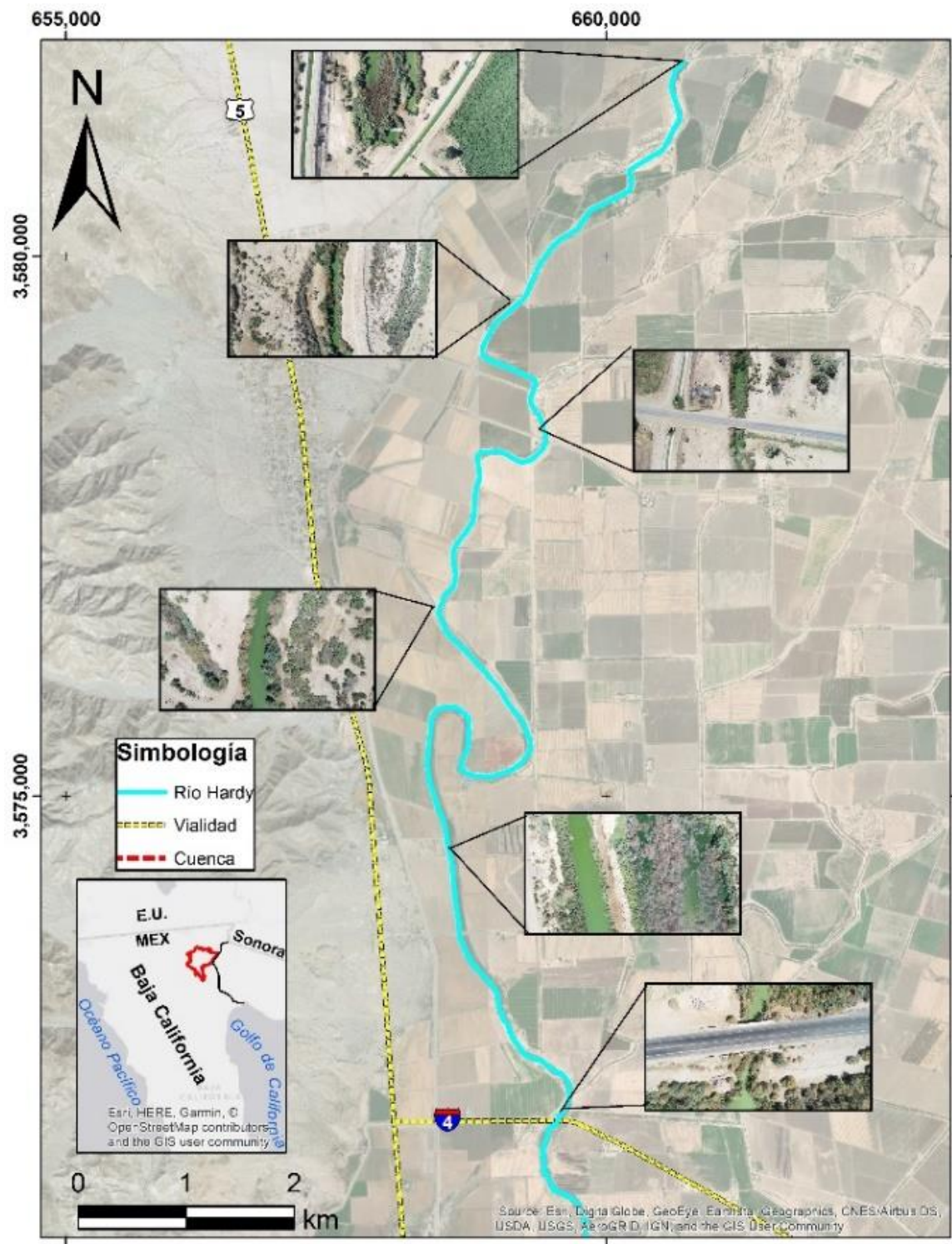


Figura 23. Ejemplos de rugosidad del cauce en diferentes secciones del RH.

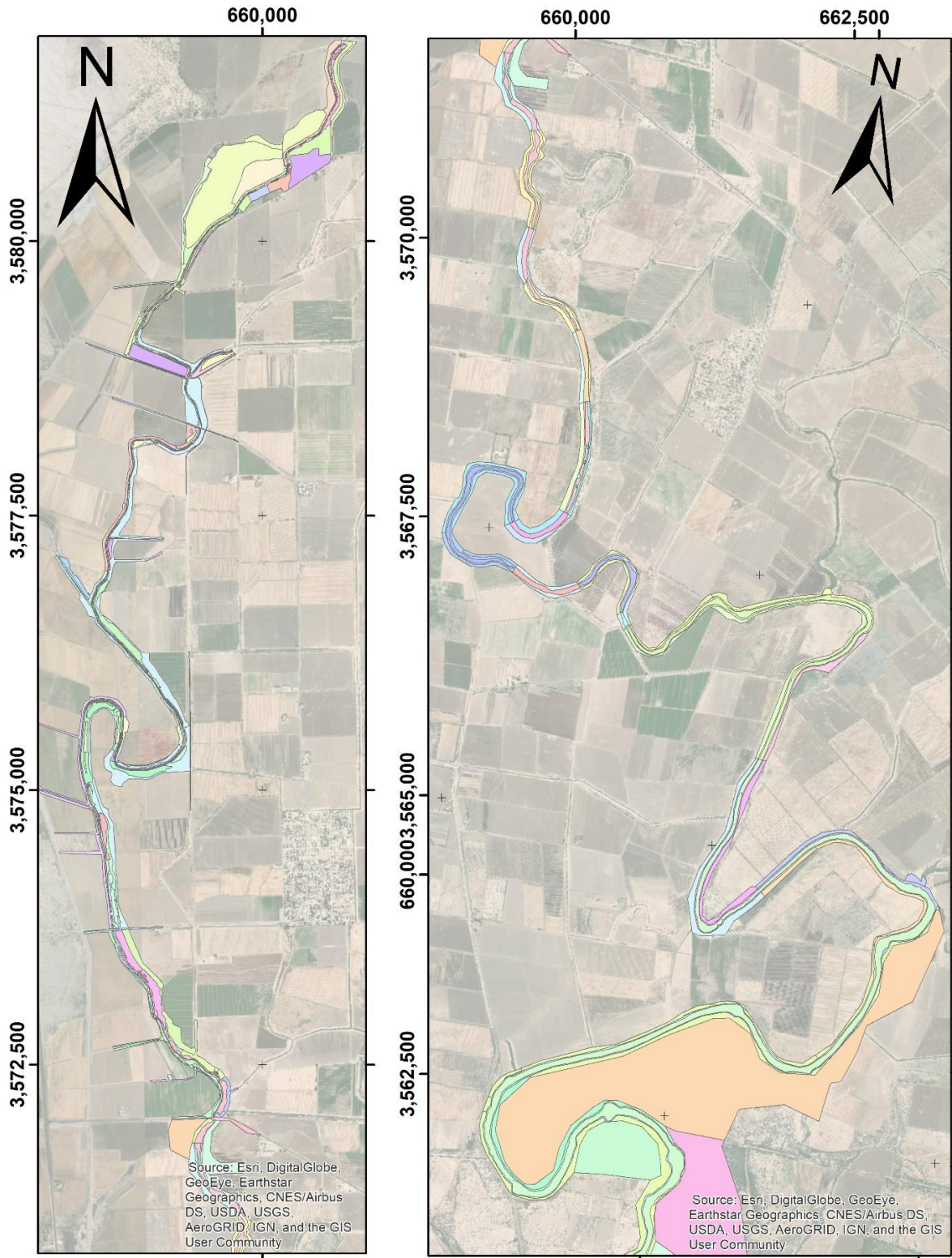


Figura 24. Polígonos de rugosidad del cauce a lo largo del cauce del RH.

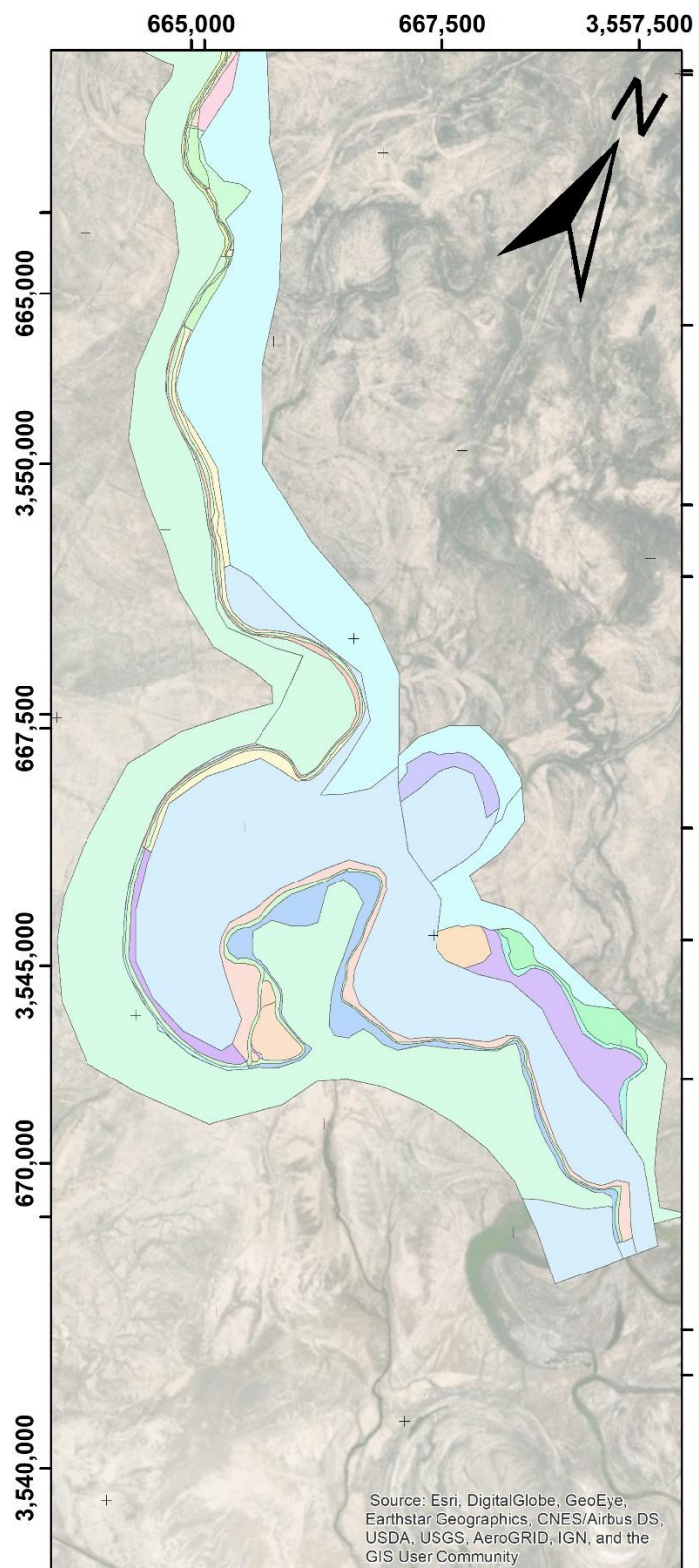
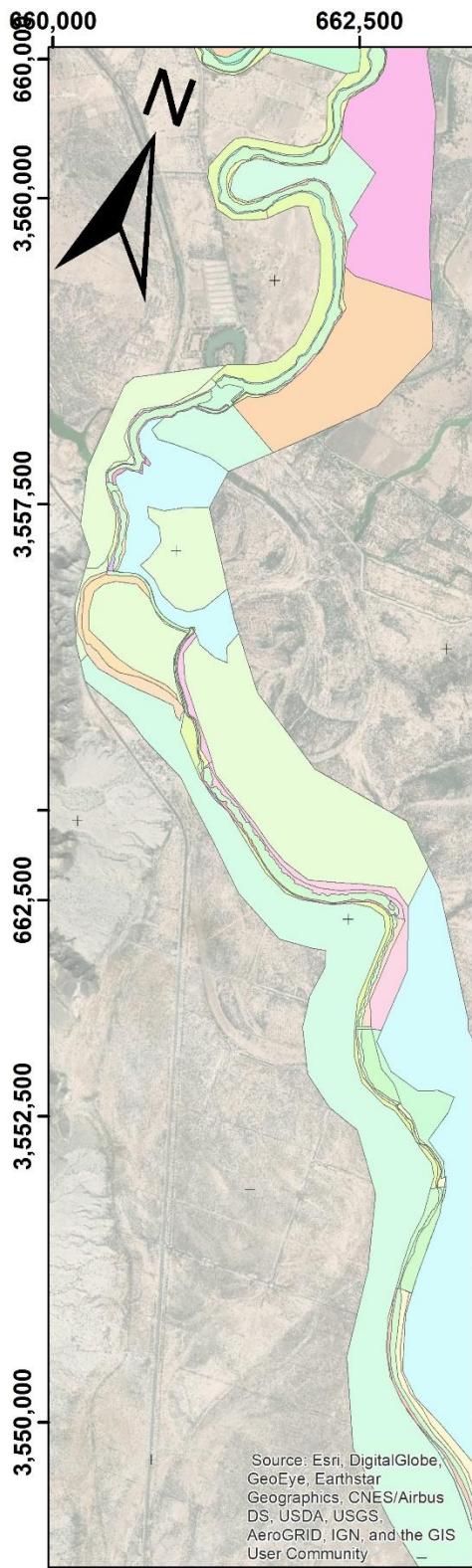


Figura 25. Polígonos de rugosidad del cauce a lo largo del cauce del RH.

4.2.3 Estimación del caudal in situ

Para la estimación del Caudal en los sitios de foros, se utilizó el equipo de medición tipo Velocímetro Doppler Acústico (ADV por sus siglas en inglés) Flowtraker (SonTek, 2007), el cual fue diseñado para una variedad de aplicaciones de monitoreo como lo son:

- Mediciones de descarga fluvial
- Mediciones de flujo de canal abierto
- Mediciones actuales en tuberías grandes.
- Encuestas rápidas, multipunto
- instalaciones de tratamiento de agua.

Para esta investigación se utilizó la ecuación de sección media como método de cálculo del equipo de medición (Figura 25).

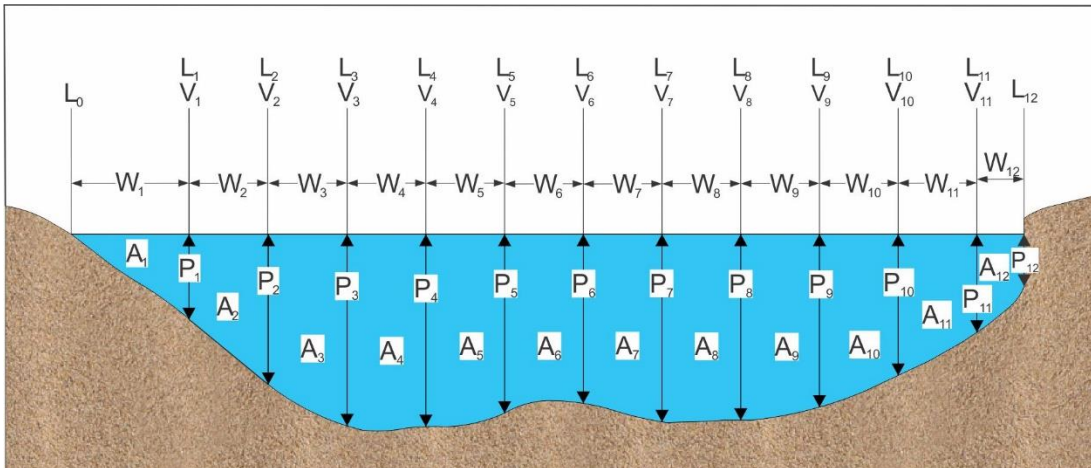


Figura 26. Elementos para estimación de caudal por el método de sección media, modificado de SonTek/YSI. (2007)

Donde:

- W , es el ancho de la subsección
- P , es el tirante de agua
- A , es el área mojada de la subsección
- V , es la velocidad medida por el Flowtraker
- L , es la posición del Flowtraker en la sección transversal

El caudal puede ser estimado con las siguientes ecuaciones indicadas en el manual de usuario de Flowtraker (SonTek/YSI, 2007), las cuales son utilizadas automáticamente por el equipo, dándonos como resultado el caudal en la subsección.

Cálculos de borde (ecuación inicial y final)

$Q_0 = W_0 = Area_0 = 0.0$	Borde de estación inicial
$i = B$	Borde de la estación
$W_i = L_i - L_{i-1}$	Ancho de subsección
$Area_i = W_i * \frac{D_i + D_{i-1}}{2}$	Área de subsección
CF_i	Factor de corrección
$V_i = CF_i * V_{i-1}$	Velocidad de subsección
$Mean V_i = \frac{V_i + V_{i-1}}{2}$	Velocidad promedio de subsección
$Q_i = Area_i * V_i$	Caudal en subsección

Cálculos en aguas superficiales abiertas

$W_i = L_i - L_{i-1}$	Ancho de subsección
$Area_i = W_i * \frac{D_i + D_{i-1}}{2}$	Área de subsección
$V_{promedio} = \frac{V_i + V_{i-1}}{2}$	Velocidad promedio de subsección
$Q_i = Area_i * V_{promedio}$	Caudal en subsección
$Q_T = \Sigma Q_i$	Caudal total

Para realizar las mediciones en los sitios de aforos (figura 26), se siguió el protocolo propuesto la USGS para el uso de Flowtraker, por el cual establece los siguiente:

1. Colocar dos estacas fijas en cada margen del sitio de aforo, el cual debe de ser perpendicular posible a la dirección del flujo.
2. Se coloca una cinta métrica en las estacas, que serán utilizadas para ir registrando la estación en el Flowtraker.
3. Para conocer la distancia entre estaciones, se divide el ancho total de la sección en 20 transectos, los cuales deberán de tener una distancia mayor a 20 cm.

4. En cada estación se coloca el tirante de agua y el sitio en la que se encuentra el equipo, comenzando en la margen establecida inicialmente en el equipo.
5. Nivelando el equipo se tomarán las mediciones de velocidad, si se tiene un tirante menor a 50 cm se tomará solamente una medida al 60% de la profundidad, si es mayor el tirante se tomarán dos mediciones, al 20% y al 80%, en caso de tener una discrepancia considerable, el equipo solicitará tomar una tercera medición al 60%.

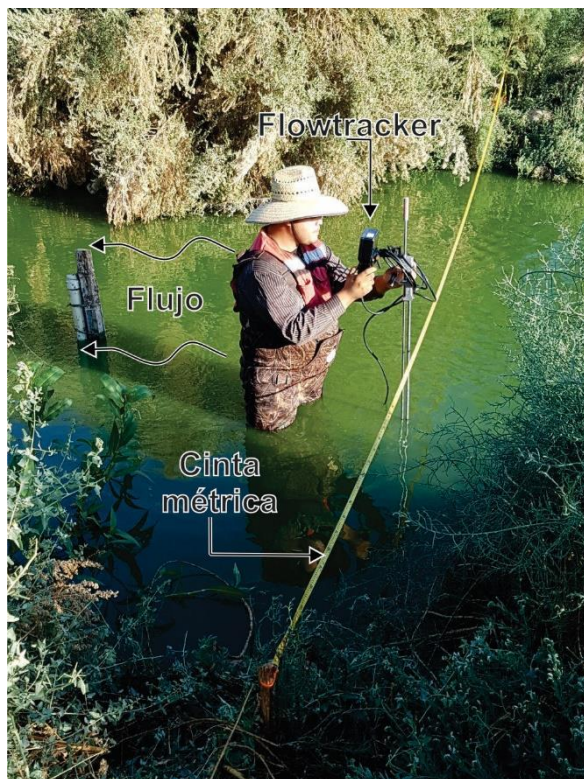


Figura 27. Procedimiento de aforo en el sitio DDT

Al terminar las mediciones, el equipo estima el caudal automáticamente utilizando el método anteriormente señalado y mostrando los resultados en el sistema métrico, así mismo nos indica cuando existe algún problema, como lo puede ser obstrucciones, indicándolo como picos, en el caso de tener más de 3 picos esto causaría incertidumbre en los resultados.

Para obtener los reportes generados por el equipo, este debe de conectarse a una computadora y a través del software SonTek FlowTraker® se interpretan los datos y se descargan a la computadora.

4.2.4 Conversión de Altura de Regleta a Caudal.

En las figuras 28, 29, 30 y 31 se muestra la relación de caudal-tirante de agua, que se obtuvieron de las mediciones realizadas en los puntos de aforo establecidos dentro de la

cuenca del río Hardy, en base a estas relaciones se obtuvieron las ecuaciones de correlación que permiten realizar una regresión y obtener los caudales en cualquier tiempo dentro de este periodo.

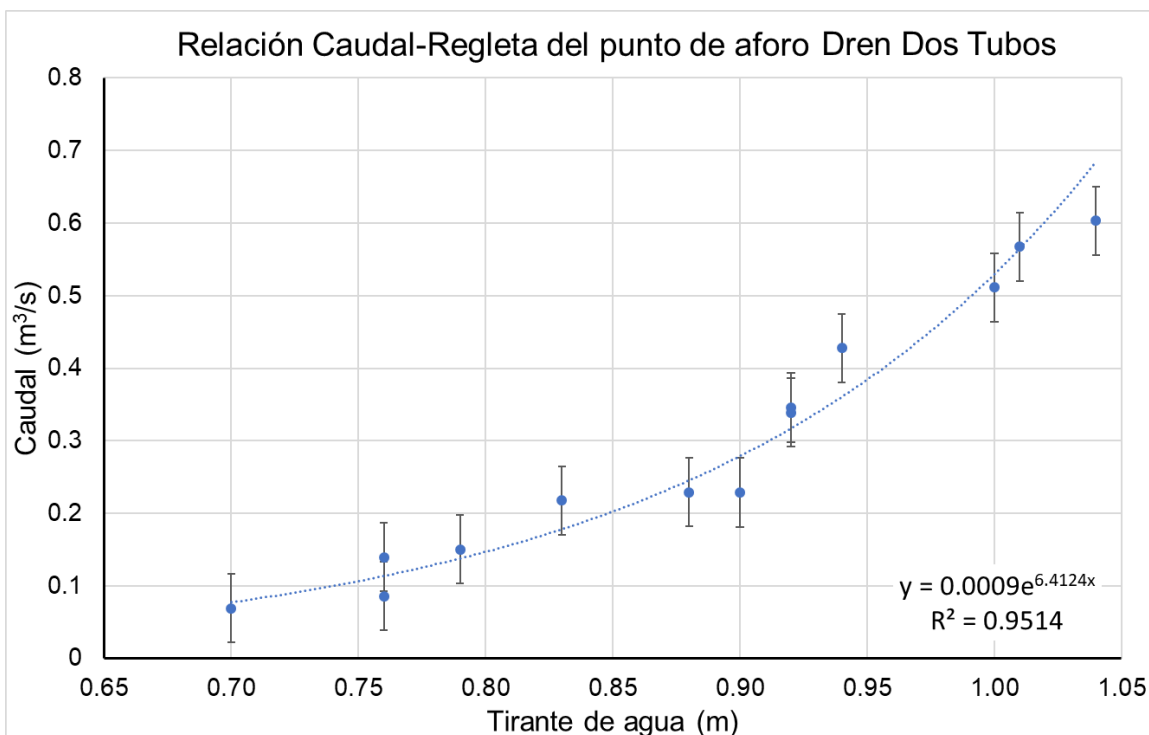


Figura 28. Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo Dren Dos Tubos

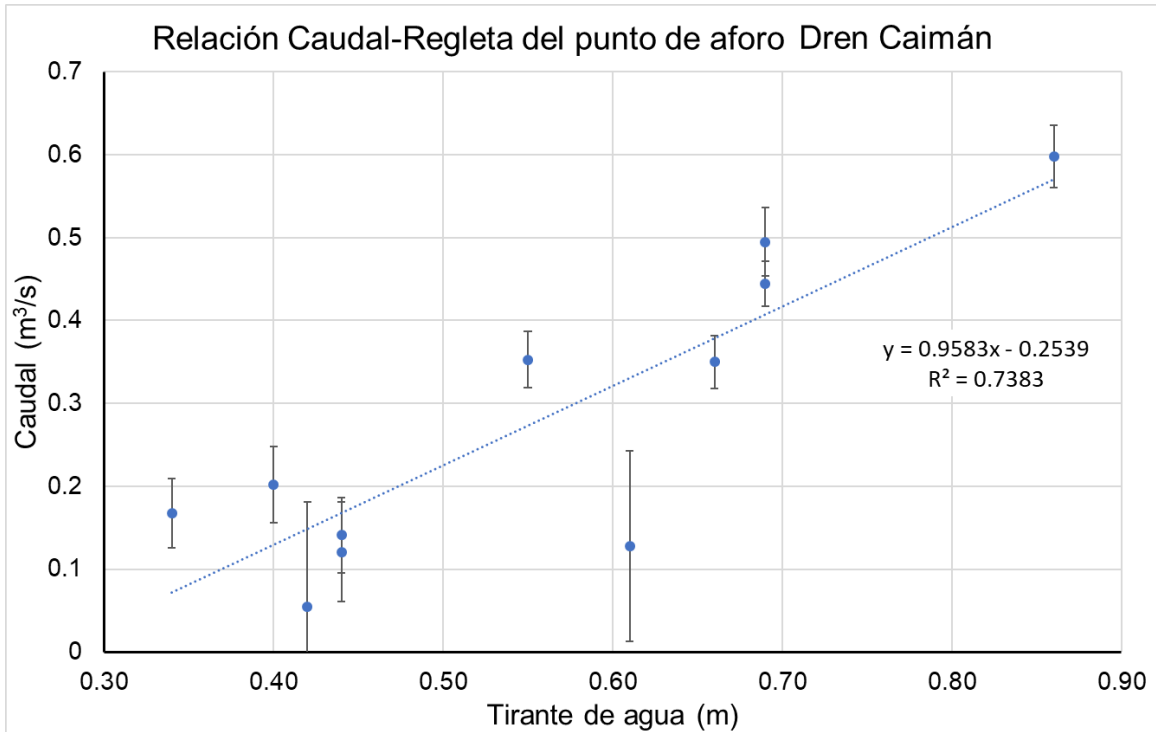


Figura 29. Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo Dren Caimán

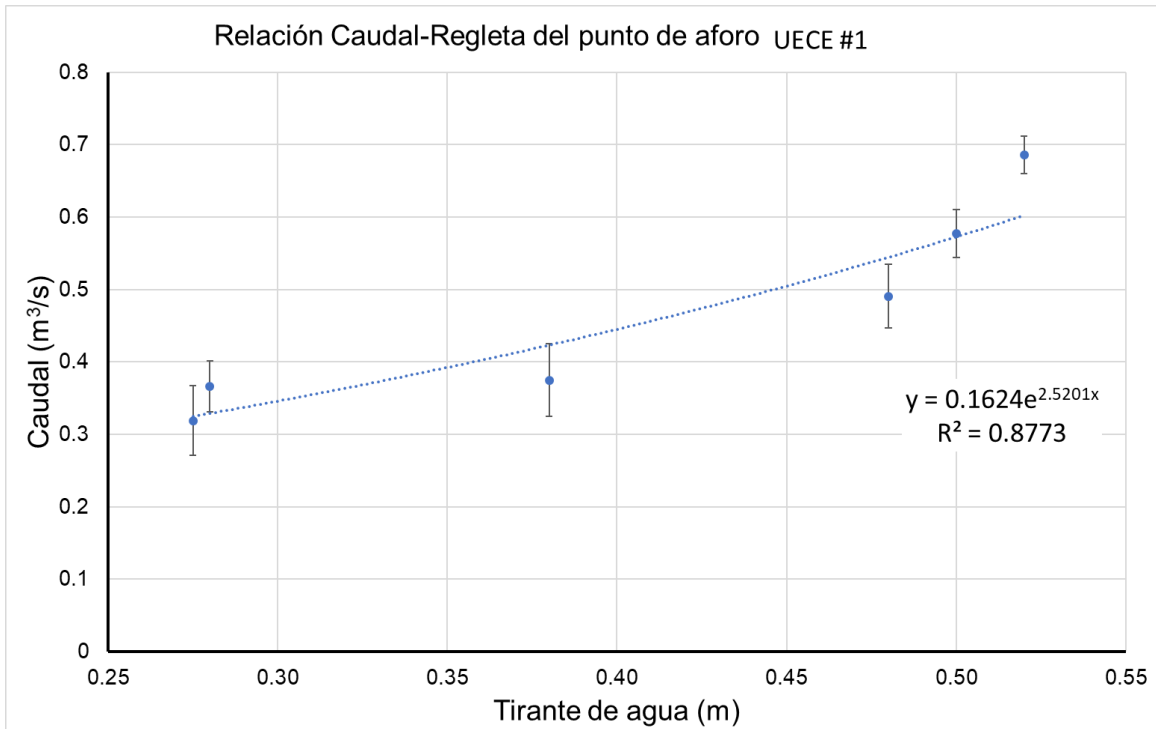


Figura 30. Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo UECE #1

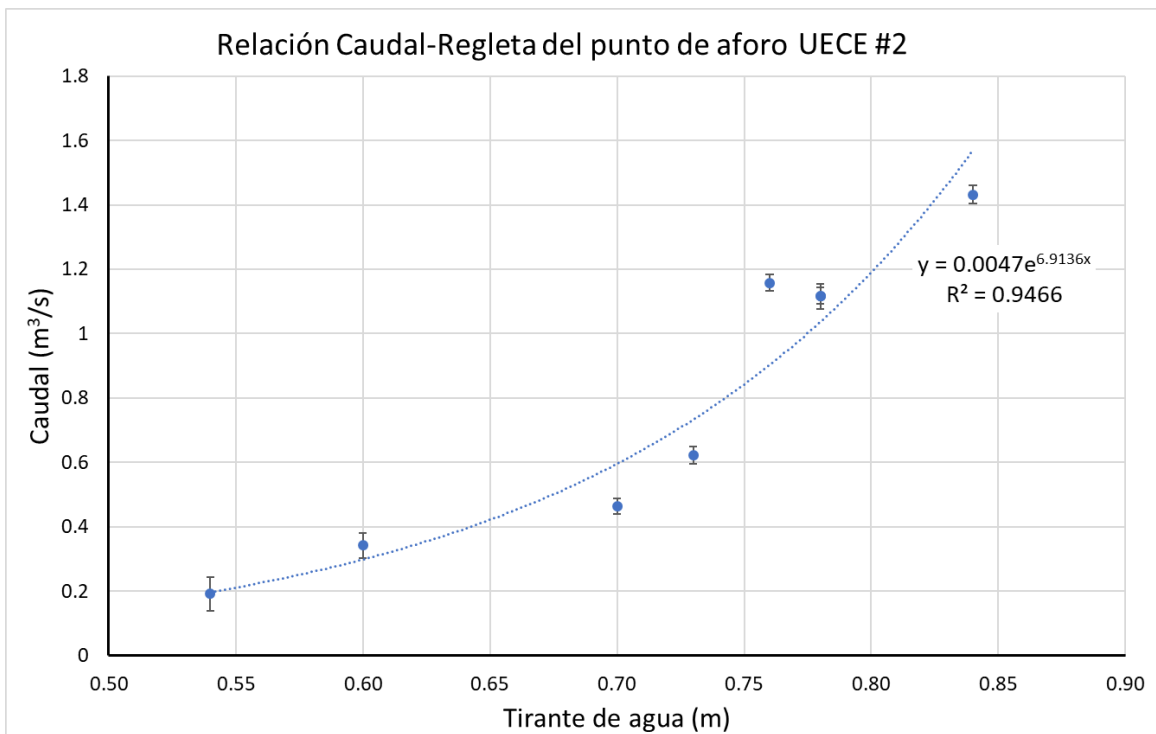


Figura 31. Relación Caudal-regleta en el sitio de aforo UECE #2.

Tabla 9. Relación de elevación del espejo de agua con el caudal estimado.

Dren dos tubos		Dren Caimán (Mosqueda)	
Regleta	Estimación de Caudal	Regleta	Estimación de Caudal
1.00	0.48	0.33	0.203
0.76	0.112	0.31	0.203
0.70	0.077	0.44	0.203
0.94	0.333	0.59	0.184
0.90	0.261	0.69	0.438
0.88	0.231	0.66	0.41
0.76	0.112	0.69	0.438
0.79	0.134	0.86	0.598
0.92	0.295	0.55	0.306
0.92	0.295	0.4	0.165
1.01	0.51	0.34	0.109
0.83	0.171	0.44	0.203
1.04	0.612	0.61	0.363
1.02	0.542	0.42	0.184
		0.68	0.429

UECE #1	
Regleta	Caudal
0.5	0.576
0.52	0.605
0.38	0.428
0.48	0.548
0.31	0.359
0.14	0.236
0.28	0.334
0.285	0.338
0.29	0.342
0.275	0.329
0.36	0.407

UECE #2	
Regleta	Caudal
0.78	1.057
0.76	0.925
0.78	1.057
0.84	1.578
0.73	0.757
0.6	0.318
0.54	0.213
0.53	0.199
0.54	0.213
0.7	0.62
0.64	0.415

Con el fin de tener una serie de datos completa se estimó el caudal en el sitio de aforo, utilizando la ecuación obtenida de la correlación entre el tirante de agua medido en las regletas y el caudal real medido en el sitio mostrada en la tabla 9.

4.2.5 Estimación de la superficie inundada

Para la estimación de la superficie de inundación (figura 32), se utiliza la geometría (Malla, líneas de corte, estructura y condiciones de fronteras).

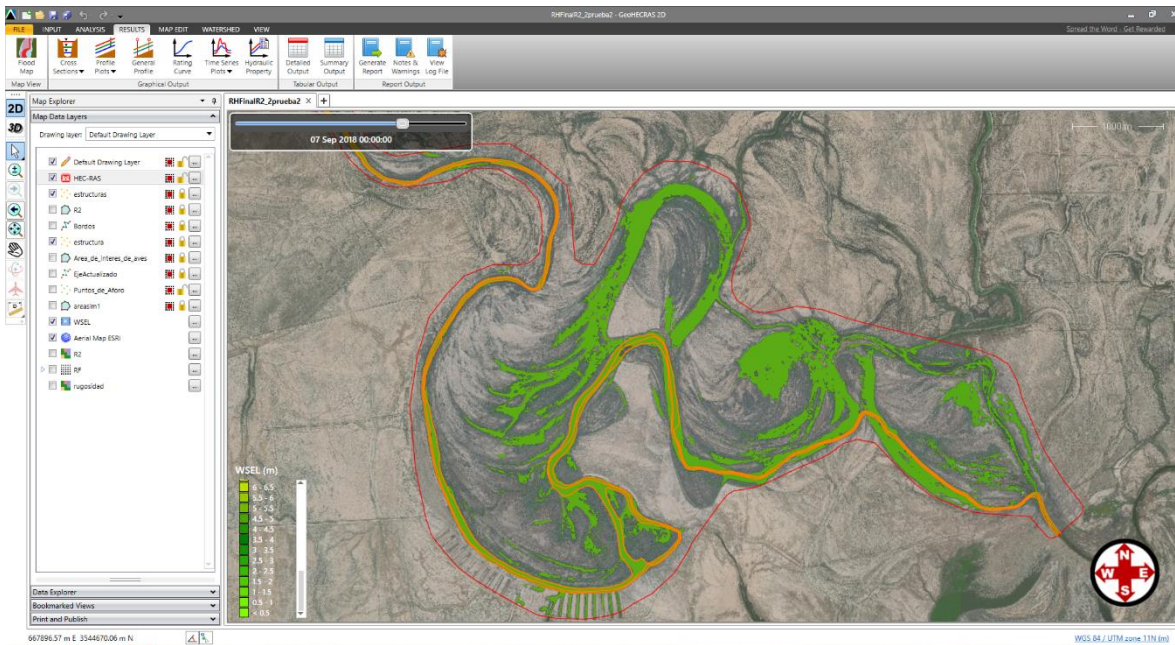


Figura 32. Superficie inundada mostrada en el programa de simulación GeoHECRAS

Aunado a los elementos geométricos se requiere la incorporación de hidrogramas utilizados en el caso de esta tesis como las condiciones de frontera. Los resultados obtenidos incluyen:

niveles de profundidad de agua, velocidades y trayectoria de vectores de velocidad y áreas inundadas delimitadas por el polígono del mallado.

4.2.5.1 Generación del modelo geométrico para HECRAS-2D

La modelación en 2D, emplea una malla en comparación a la simulación en 1D que utiliza secciones transversales. El software HEC-RAS genera el mallado de forma estructurada o no estructurada, las celdas de las mallas pueden ser triángulos, rectángulos, cuadrados, limitándose a un máximo de 8 vértices y se realiza de forma manual (Brunner, 2016), GeoHecRas® facilita una configuración extra, llamada malla adaptativa mostrada en la figura 32, la cual es recomendada cuando tienes áreas y el polígono es irregular, creando polígonos de distintos tamaños de acuerdo a las secciones transversales, esta malla puede ser refinada mediante líneas de corte como se muestra en la figura 33, haciendo el modelo más estable y permitiendo una ejecución más rápida (CivilGEO, 2019).

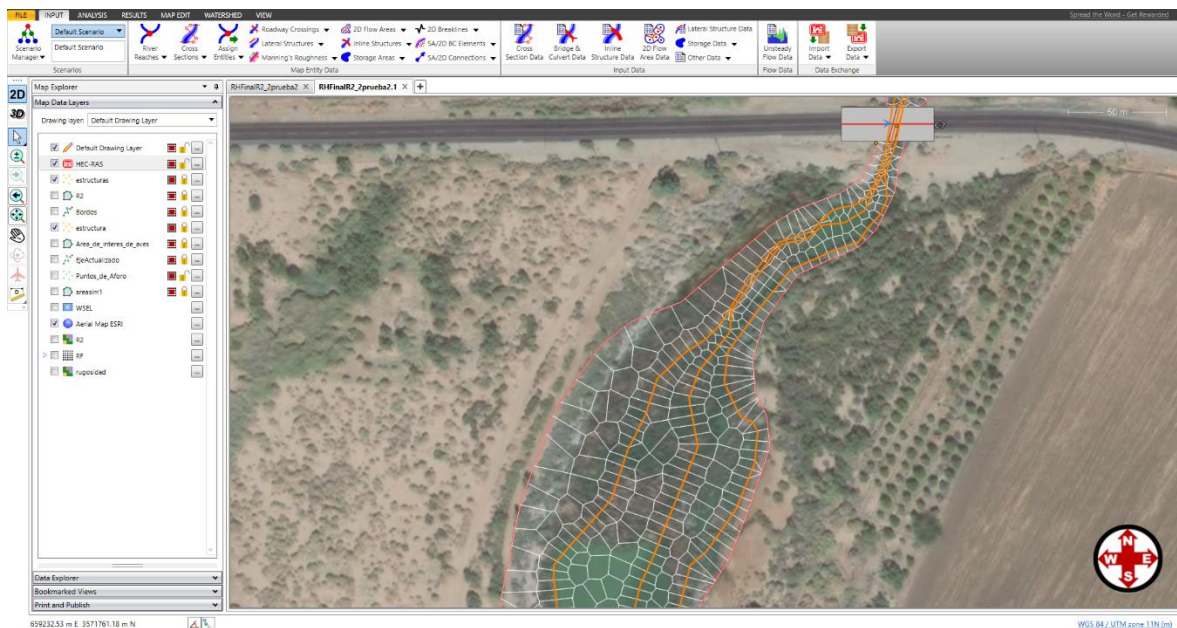


Figura 33. Malla adaptativa generada en el software GeoHecRas®

GeoHecRas® tiene la opción de agregar estructuras hidráulicas al modelo en formas de: caja, circulares, elipsoidales, utilizados como alcantarillas, como se muestra en la figura 34, permitiendo modificar el valor de rugosidad en consideración del material con el cual está hecha la estructura (concreto, metal, pvc).

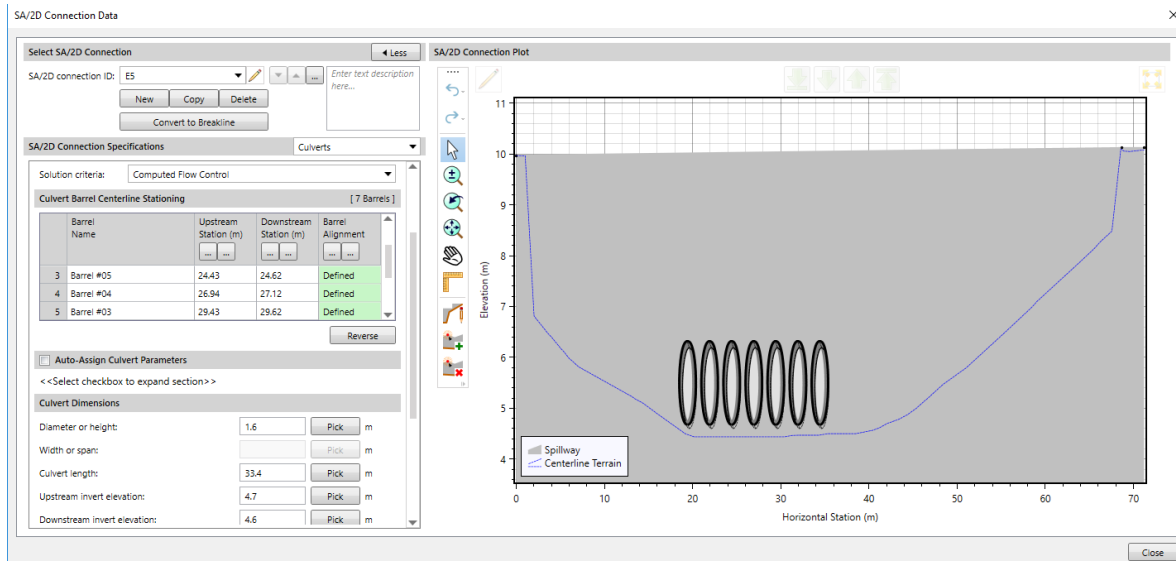


Figura 34. Estructura hidráulica con 7 alcantarillas ubicadas en el cauce del RH

4.2.5.2 Condiciones de Frontera

En el programa GeoHecRas utilizado como interfaz para la simulación hidráulica 2D, admite utilizar como opción de condición de frontera el hidrograma de flujo, generado mediante las mediciones realizadas durante un año, se colocaron estas condiciones en los sitios de aforos, únicamente como condición de frontera al final de cauce se utilizó la pendiente del canal, debido a la falta de datos hidrológicos.

4.2.5.3 Ejecución del Modelo

El proceso de simulación (figura 35), integra todos los componentes antes mencionados, GeoHecRAS, corre el código de HECRAS para realizar el cómputo, el cual se ejecuta en la figura 34, corriendo los modelos de 2 dimensiones en estados transitorios considerando la componente de tiempo en su proceso.

El tiempo duración de la simulación es definida por:

- Longitud o área del modelo.
- Tiempo de computación.
- Intervalo de tiempo simulado (periodo del hidrograma).
- Estructuras hidráulicas.

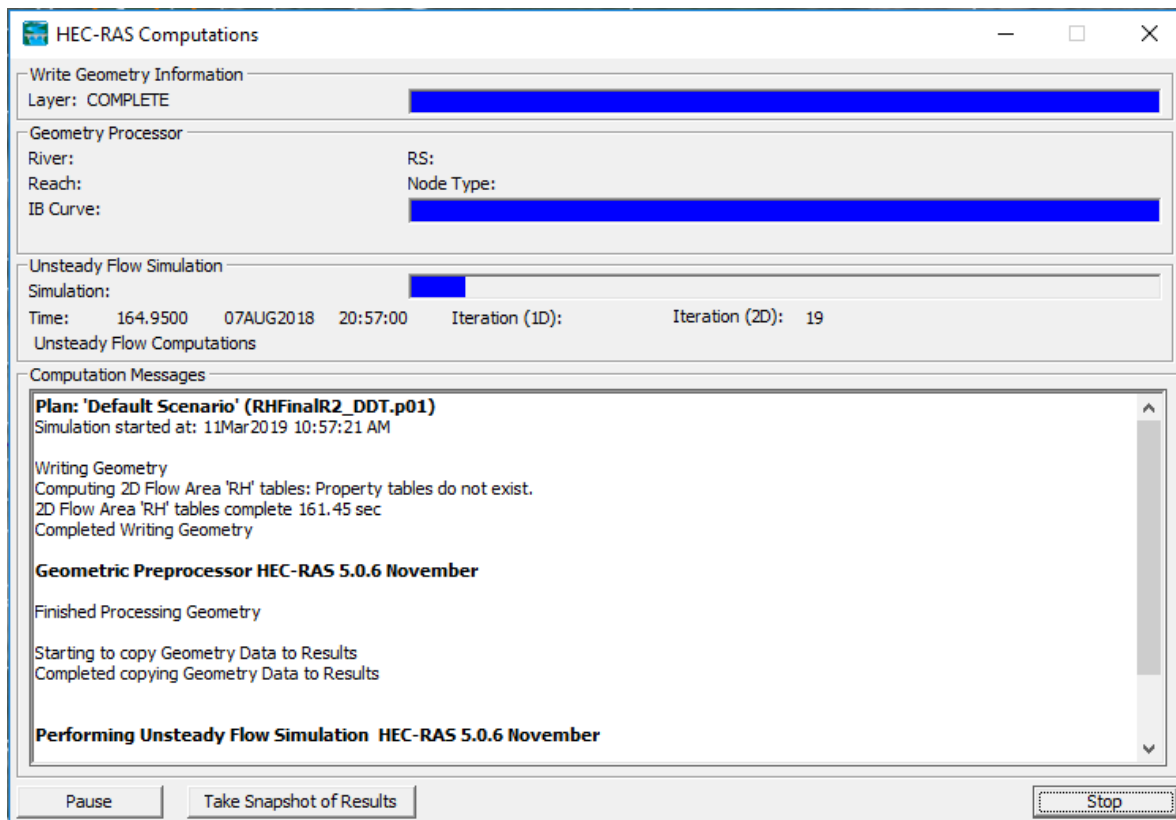


Figura 35. Proceso de computación de simulación hidráulica 2D en HECRAS

4.2.5.4 Calibración del Modelo

La calibración del modelo se realizó mediante la modificación de la variable de rugosidad obtenida de acuerdo a la literatura, para este proceso se realizaron simulaciones con los caudales obtenidos en campo en los sitios de aforos (DDT, UECE1 y UECE2), en los cuales se compararon los resultados de tirante o profundidad de agua, con las mediciones en las regletas instaladas, ajustando la diferencia reduciendo o aumentando la rugosidad hasta tener un error menos a 10 cm.

5 Resultados y Discusión

A continuación, se analizaron los resultados obtenidos de los aforos realizados en los drenes aledaños al río Hardy pertenecientes al distrito de riego 014.

5.1 Flujos de agua

El organismo de cuenca de la península de baja california de CONAGUA, mediante el departamento de ingeniería de riego y drenaje, realizaban los aforos en los drenes que se conectan al RH, los aforos se realizaban sobre la carretera estatal número 4, durante el periodo de 1999 al 2015, en la figura 36 se muestran los resultados de caudal promedio anual.

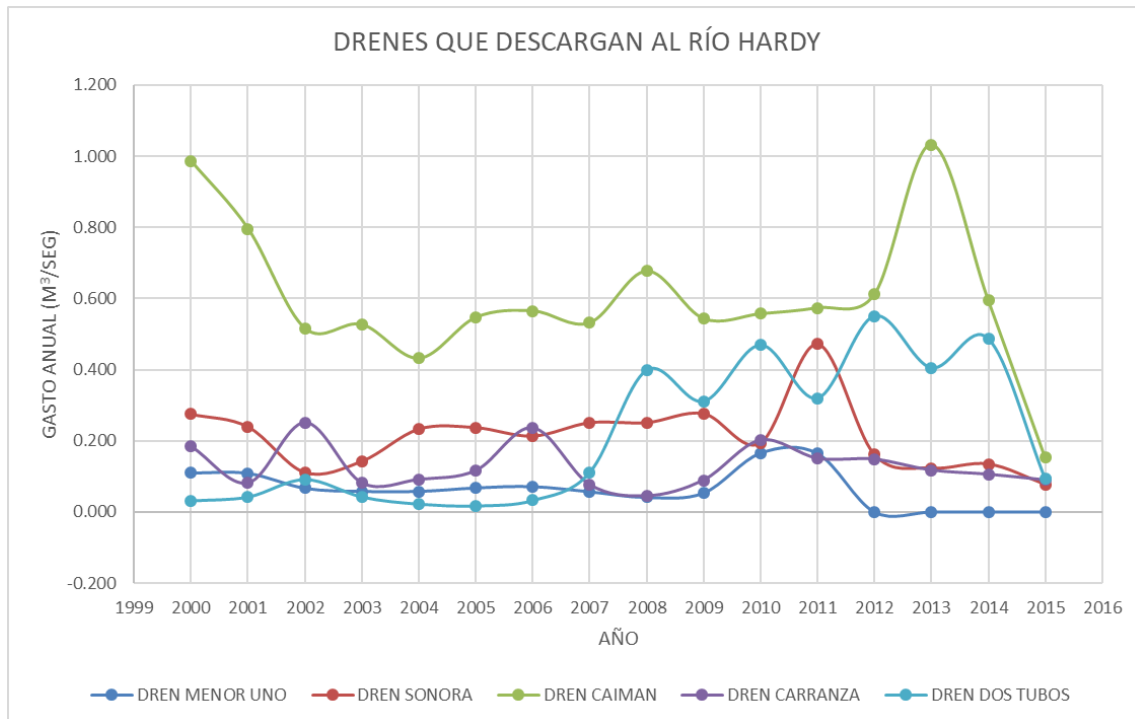


Figura 36. Descargas en drenes proporcionados por CONAGUA

Además de la información generada por CONAGUA, se realizó una base de datos con todos los aforos realizados dentro del mismo periodo, esta información se recopiló de literatura, dependencias, y aforos actuales. La figura 37 muestra los aforos puntuales en el RH.

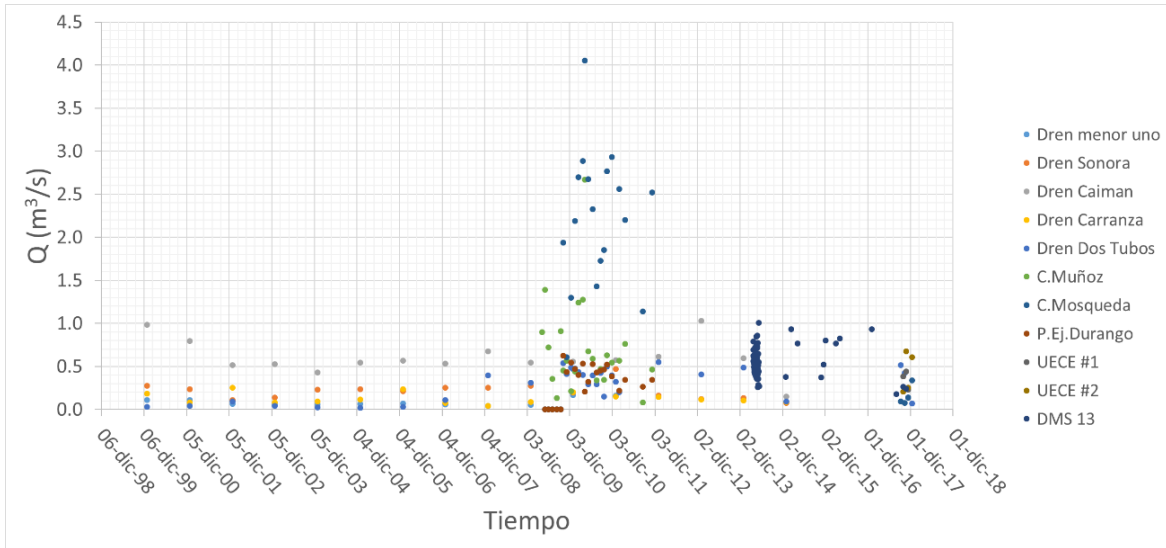


Figura 37. Base de datos de aforos en la cuenca del RH. Datos tomados de Trejo-Fernández (2010), UABC (2011,2014), Sonoran Institute (2018) CONAGUA (2018), García (2018).

Los resultados mostrados en la figura 38 son los caudales obtenidos en el periodo 2017-2 al 2018-2 en el sitio de aforo DDT, las mediciones se realizaron mensualmente por lo que se ilustran de manera puntual, para cada medición se añade la barra de error del equipo de medición que se obtuvo en la medición.

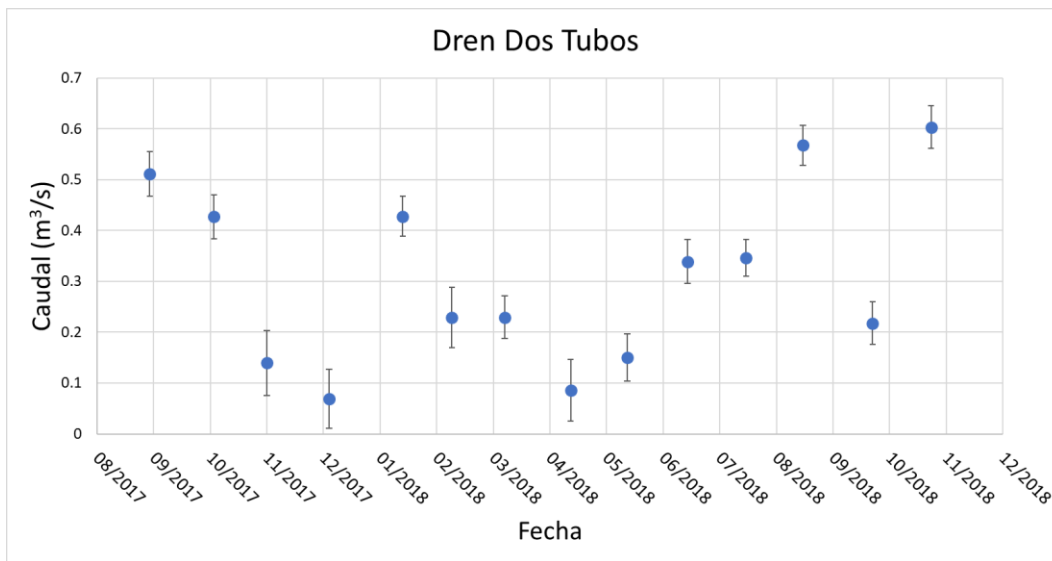


Figura 38. Aforos obtenidos en este estudio del Dren Dos Tubos durante el periodo 2017-2 al 2018-2

Se observó basado en los resultados que en las mediciones que se descargó poco flujo este influyo en el error del equipo, teniendo los menores flujos en el periodo de noviembre-

diciembre del año 2017 y abril-mayo del año 2018, Comparando los datos obtenidos de noviembre 2017 y 2018 se obtuvieron datos muy diferentes, atribuyéndose esto a alguna reducción de descarga en los días que se aforó.

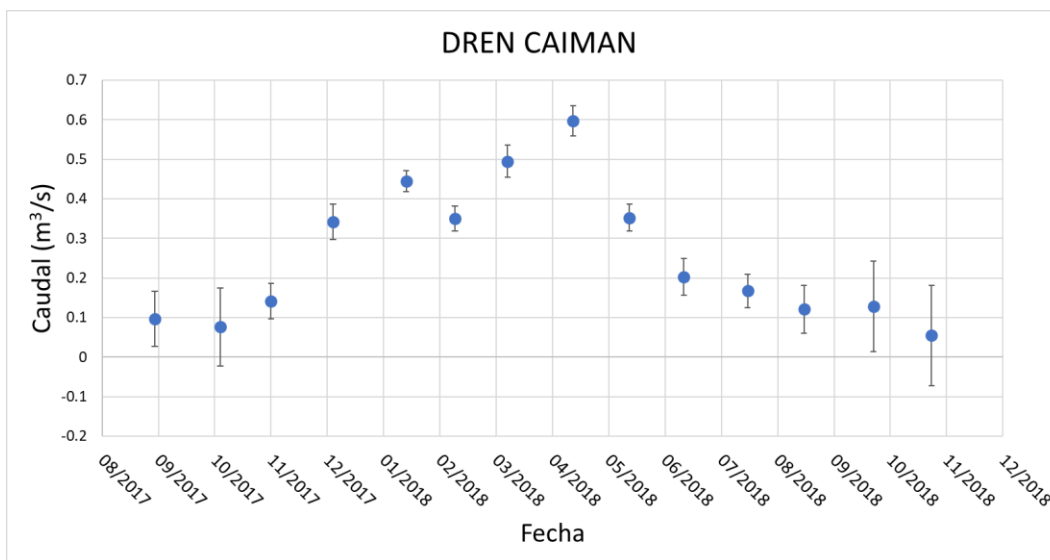


Figura 39. Aforos obtenidos en este estudio del Dren Caimán durante el periodo 2017-2 al 2018-2

En la figura 39 muestra los valores puntuales de las mediciones en el DC, obteniendo flujos considerables de hasta 600 m³/s en el mes de abril, de igual manera que en el DDT se observa que en los caudales menores se tiene un mayor error de medición.

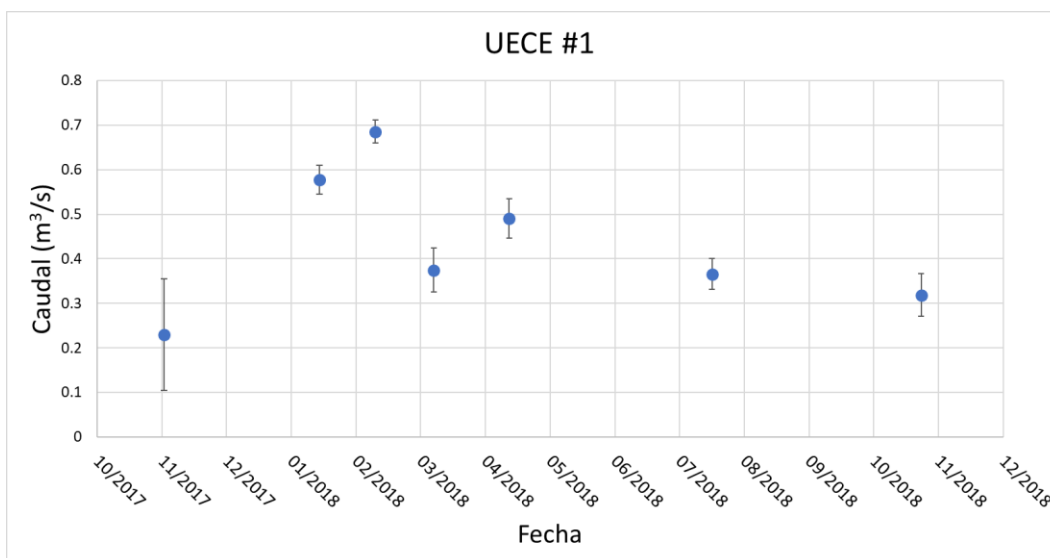


Figura 40. Aforos obtenidos en este estudio del sitio UECE1 durante el periodo 2017-2 al 2018-2

La figura 40 se muestran los aforos en la unidad de estudio de caudal ecológico (UECE) #1 ubicado sobre el eje del cauce del río Hardy, donde se encontró gran cantidad de material orgánico en el fondo del cauce, principalmente tule y las obstrucciones vegetales nos generaron errores en el equipo de medición, debido a esto en algunos meses se observó una mínima circulación del flujo evitando la correcta medición.

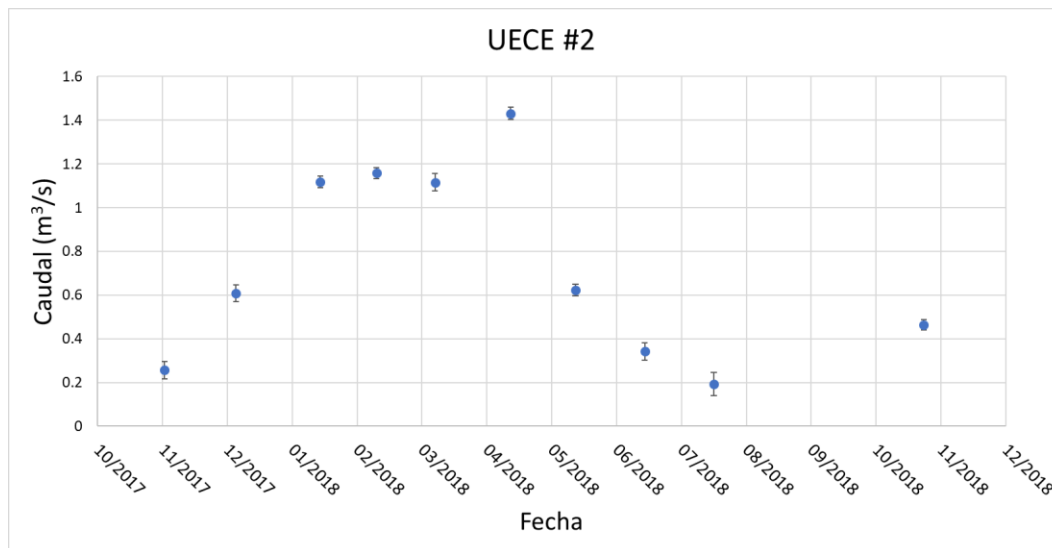


Figura 41. Aforos obtenidos en este estudio del sitio UECE #2 durante el periodo 2017-2 al 2018-2

En comparación con el UECE #1, en el punto de aforo UECE #2 se obtuvieron mediciones con menor cantidad de errores mostrados en la figura 41, debido a que en este punto las obstrucciones y la vegetación muerta en el fondo del cauce, es mínima. se puede considerar que estas mediciones se logran estabilizar de una manera más óptima debido a un caudal más alto por la integración de flujo proviene de los drenes conectados aguas arriba del cauce.

5.3 Análisis de Imágenes satelitales

En la figura 42 y 43 se muestran los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes satelitales, divididas en dos periodos, esto se realizó por el alcance en años de la base de datos del USGS para cada satélite. Para estandarizar el valor del rango de sensibilidad para el índice se realizaron calibraciones y comparaciones, que pudieran representar mejor la realidad.

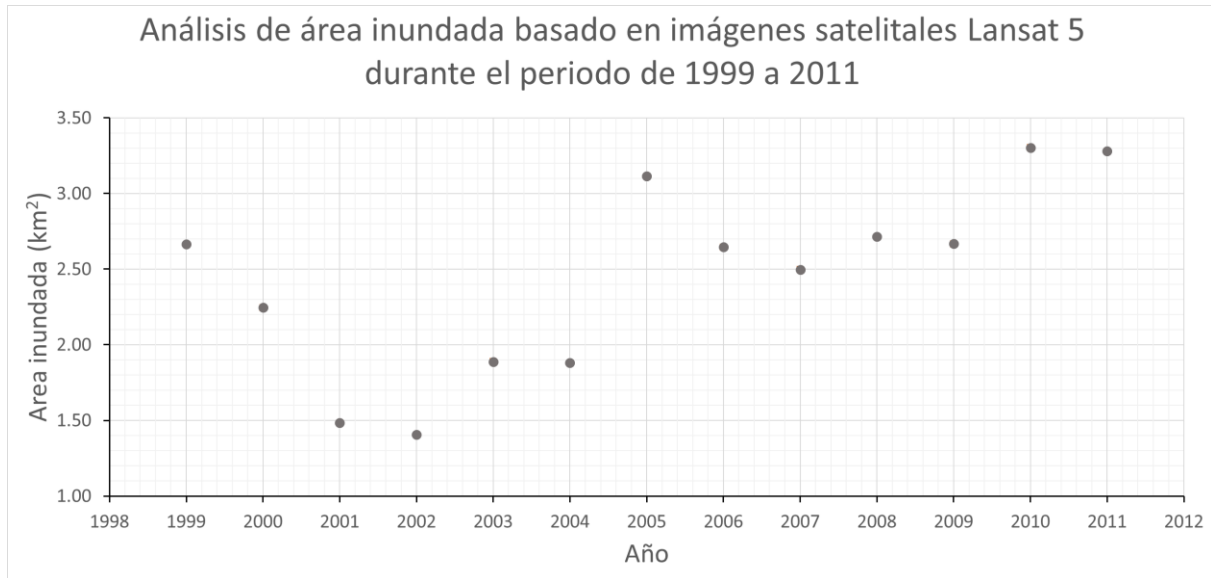


Figura 42. Grafica de resultados de área inundada obtenida mediante el procesamiento de imágenes satelitales para el periodo de 1999 a 2011 (mayo)

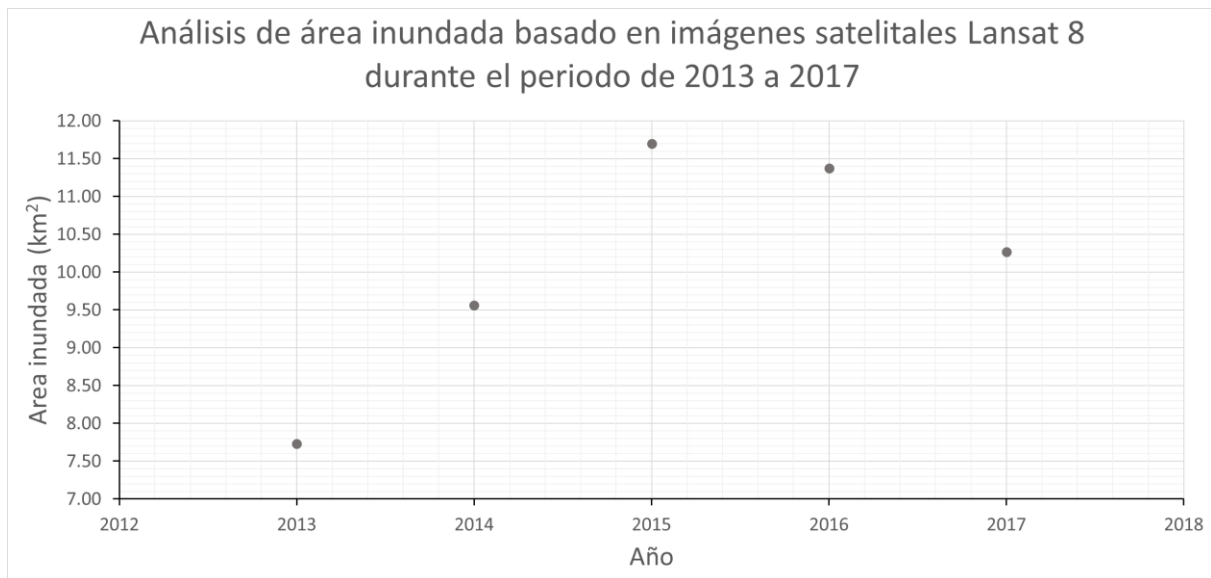


Figura 43. Grafica de resultados de área inundada obtenida mediante el procesamiento de imágenes satelitales para el periodo de 2012 a 2017 (mayo)

5.4 Análisis de la población de aves

Con el objetivo de observar el impacto y la correlación de los datos obtenidos en el análisis de imágenes satelitales y los datos de conteo de aves registrados hasta el año 2017 se graficó la información obtenida, mostradas en las figuras 44 y 45, donde deduce que históricamente ha incrementado la cantidad de aves correlacionado al aumento del área de inundación, esto es un factor importante para el estudio, indicándonos que manteniendo o aumentando esta área inundada podremos mantener el número de aves objetivo, como se muestra en la figura 46 dando una correlación óptima del 88%.

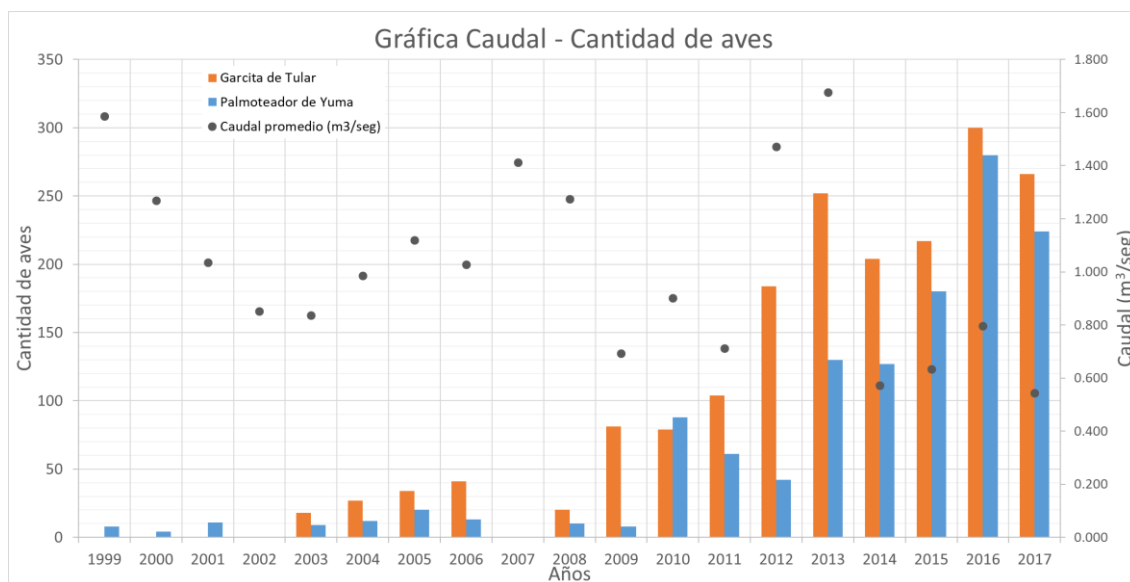


Figura 44. Gráfica caudal-cantidad de aves de marisma en el RH

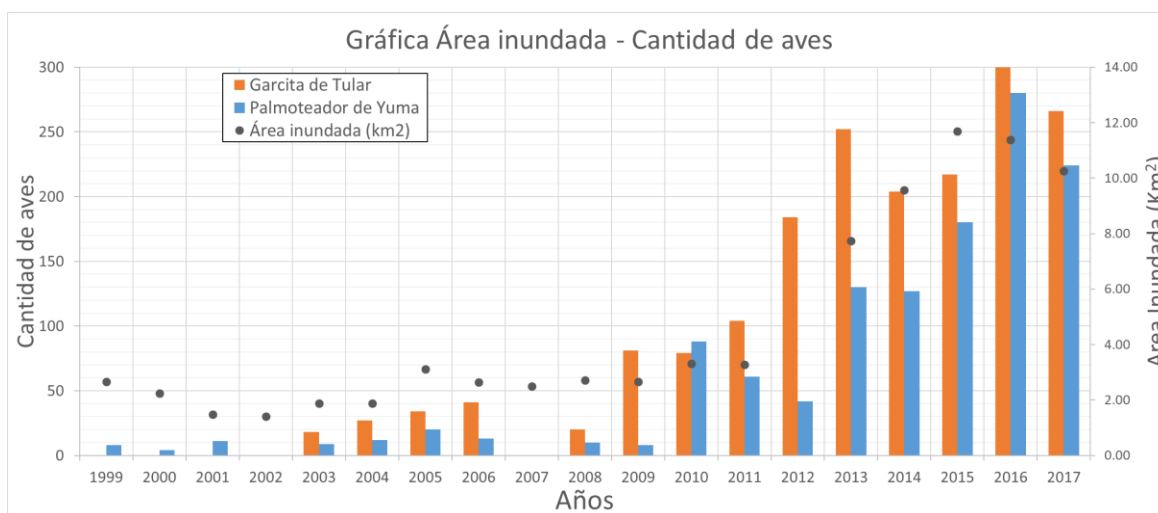


Figura 45. Gráfica de área inundada-cantidad de aves de marismas en el RH

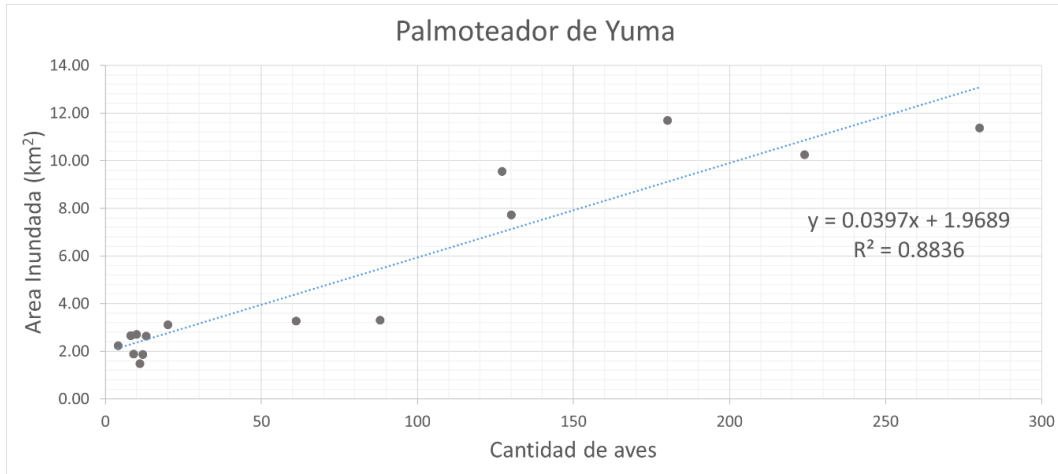
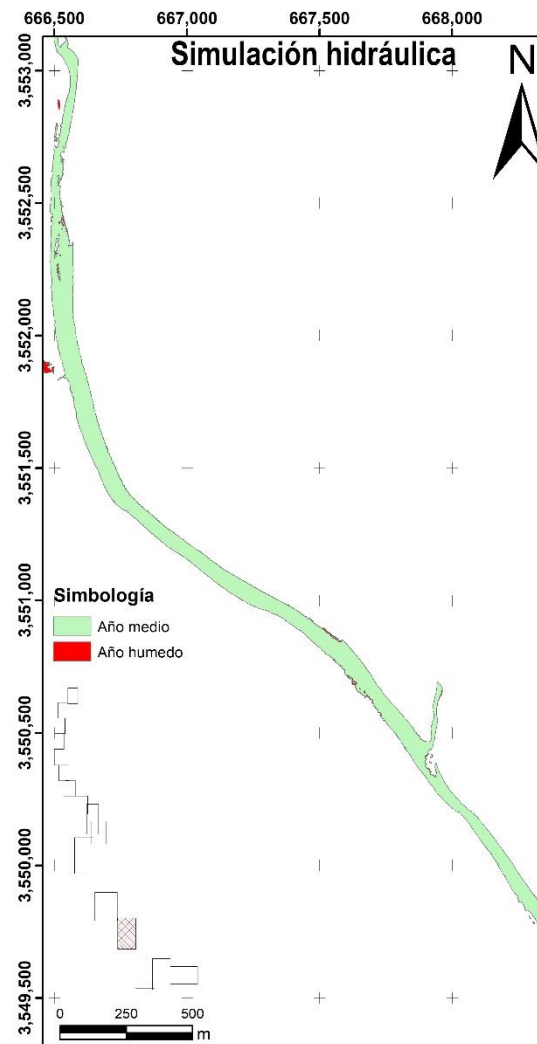
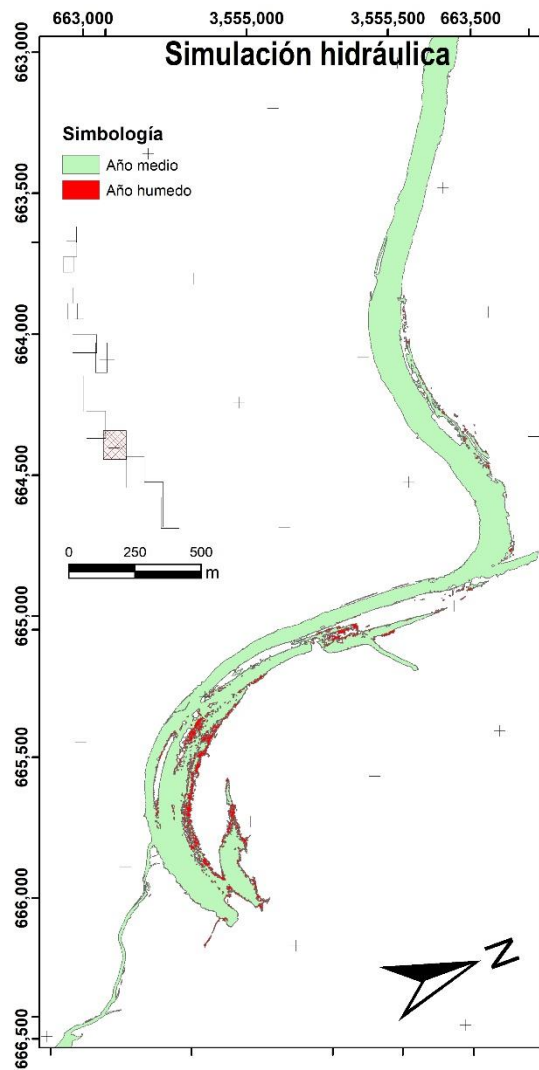
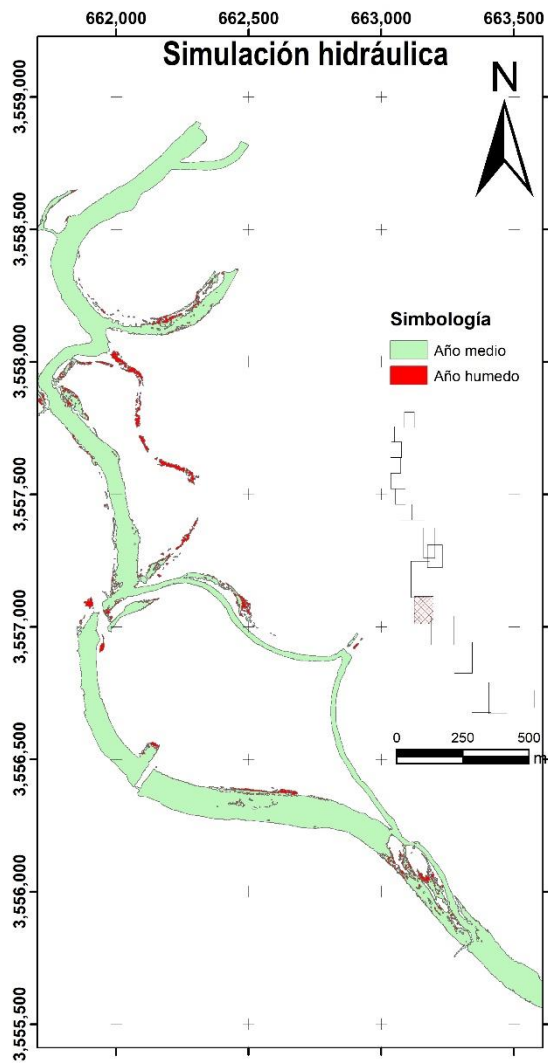
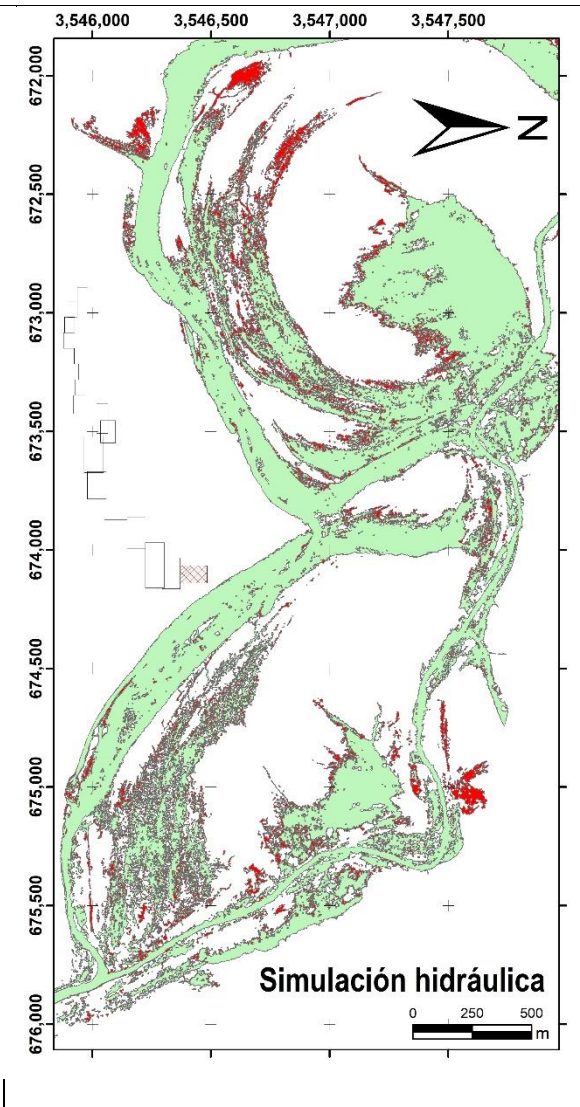
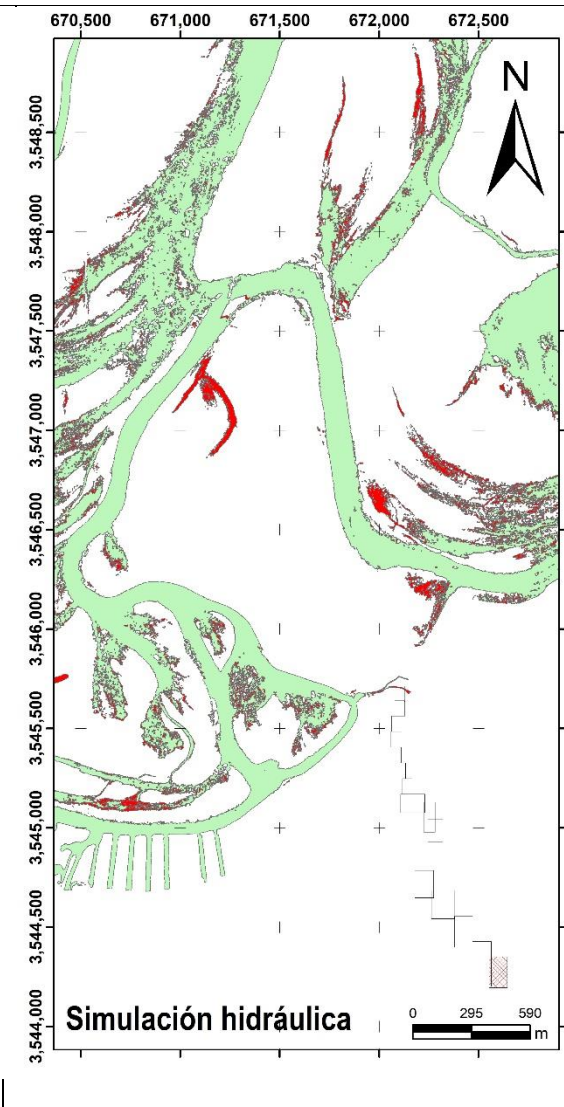
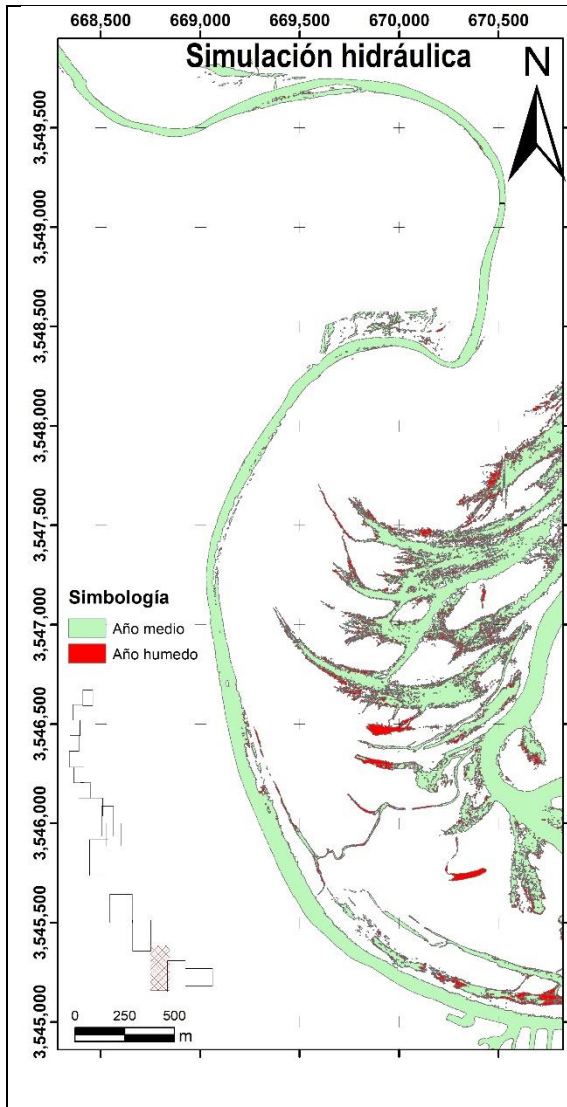


Figura 46. Correlación del área inundada con la cantidad de individuos de Palmoteador de Yuma.

5.5 Modelación de Flujo





5.5.2 Caudales seleccionados para caudal ecológico

Con motivo de tener una mayor área inundada se propone utilizar los caudales del año húmedo con 713 ha o año medio con 598 ha de área inundada dentro del área de interés para aves de marismas, esto permitirá en un futuro gestionar los volúmenes de agua ante las dependencias correspondientes.

5.5.3 Caudales ecológicos propuestos según la metodología

Escenarios	Caudales ecologicos propuestos (m3/s)	
	Anidación	Estiaje
Muy Seco	0.583	0.338
Seco	0.921	0.526
Medio	1.108	0.648
Humedo	1.729	1.164

5.6 Análisis estadístico del caudal propuesto

De acuerdo a lo establecido en la norma para caudal ecológico (NMX_AA_159_SCFI_2012) en el apéndice normativo D que establece la metodología hidrológica para determinar el régimen de caudal ecológico en corrientes o cuerpos de agua nacionales a nivel de cuenca hidrológica, utilizado para obtener el régimen anual de caudales en el Río Hardy.

Se realizó una aproximación hidrológica detallada, la cual es utilizada en aquellos cauces que existan obras hidráulicas que afectan el régimen hidrológico como lo es el represo en el campo Mosqueda, donde se establece que se determinará el régimen de caudales ecológicos ordinarios para 4 condiciones hidrológicas, año seco, muy seco, medio y húmedo.

En base al resultado de la recopilación de mediciones de caudales mostrada en la tabla 10 y figura 47, realizada en este proyecto se utilizarán los caudales medios mensuales disponibles:

Tabla 10. Promedios mensuales de la base de datos de caudales históricos medidos en el RH

Promedios mensuales												
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2000	1.896	2.039	2.130	2.416	1.985	0.976	0.744	0.922	0.954	1.100	1.527	2.138
2001	1.956	1.971	2.163	2.131	1.395	0.971	0.995	0.593	0.736	0.719	0.632	0.691
2002	0.933	2.246	0.975	1.181	0.978	0.639	0.524	0.532	0.886	0.597	0.572	0.800
2003	0.907	1.214	0.958	1.180	0.752	0.692	0.725	0.518	0.834	0.837	0.737	0.620
2004	0.797	0.875	1.042	1.232	1.087	0.764	0.849	0.449	0.639	0.646	0.647	0.646
2005	1.026	1.151	1.509	1.525	1.135	0.679	0.983	0.707	0.654	0.644	0.702	0.968
2006	1.180	1.344	1.177	1.226	1.197	1.167	1.094	0.662	0.810	0.453	0.596	2.290
2007	0.919	1.388	1.113	1.252	1.328	0.709	0.589	0.703	0.538	0.579	1.010	1.620
2008	1.493	1.529	1.125	1.594	1.174	1.429	1.546	1.387	1.445	1.070	1.220	1.371
2009	1.623	1.574	2.095	1.153	1.348	1.049	1.138	1.133	1.087	0.898	0.745	1.126
2010	1.366	2.397	2.255	1.187	0.723	1.441	1.265	0.997	1.254	1.016	0.746	1.135
2011	0.863	1.488	1.806	2.196	2.842	2.380	1.087	0.906	1.161	1.199	1.402	1.408
2012	2.398	1.677	1.527	1.875	1.586	1.755	0.879	1.847	1.279	0.997	0.794	1.039
2013	1.596	1.740	1.961	1.814	1.751	1.497		0.912	2.552	1.166	1.405	2.053
2014	2.144	1.722	1.604	1.895	1.184	1.073	0.845	0.582	0.683		2.008	0.668
2015	0.370	0.264	0.649	0.795	0.633	0.214	0.135	0.167				
2016			0.768	0.825								
2017	0.932								0.410		0.257	0.608
2018	1.118	1.158	1.116	1.432	0.623	0.342	0.192			0.464		

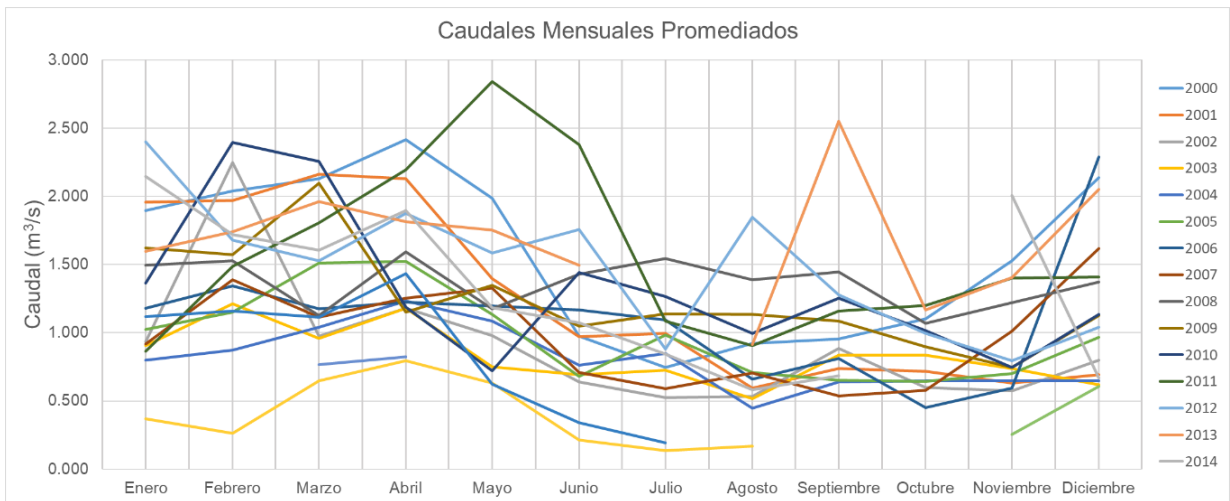


Figura 47. Gráfico de base de datos de mediciones histórica promediados mensualmente

Para continuar con la metodología y obtener el régimen hidrológico del RH, los caudales mensuales se organizan en años naturales, calculándose para cada mes del año los percentiles 75, 25, 10 y 0, los cuales nos indican las condiciones hidrológicas de acuerdo a la siguiente tabla 11 y sus resultados indicados en la tabla 12 y gráfico.

Tabla 11. Criterios para la elección del régimen de caudales ordinarios estacionales para años con diferentes condiciones hidrológicas

Condiciones Hidrológicas	Percentil
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años húmedos	75
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años medios	25
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años secos	10
Régimen de caudales ordinarios estacionales para años muy secos	0

Tabla 12. Resultados de cálculos estadísticos para la obtención de percentiles para cada condición hidrológica

Percentiles							
Percentil	Condición Hidrológica	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
0	Muy Seco	0.370	0.264	0.649	0.795	0.623	0.214
10	Seco	0.843	1.040	0.901	1.055	0.687	0.520
25	Medio	0.922	1.214	1.059	1.183	0.978	0.692
75	Humedo	1.617	1.740	1.922	1.860	1.395	1.429

Percentiles							
Percentil	Condición Hidrológica	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	Muy Seco	0.135	0.167	0.410	0.453	0.257	0.608
10	Seco	0.358	0.483	0.589	0.510	0.584	0.633
25	Medio	0.691	0.570	0.676	0.621	0.643	0.685
75	Humedo	1.089	0.941	1.184	1.043	1.265	1.461

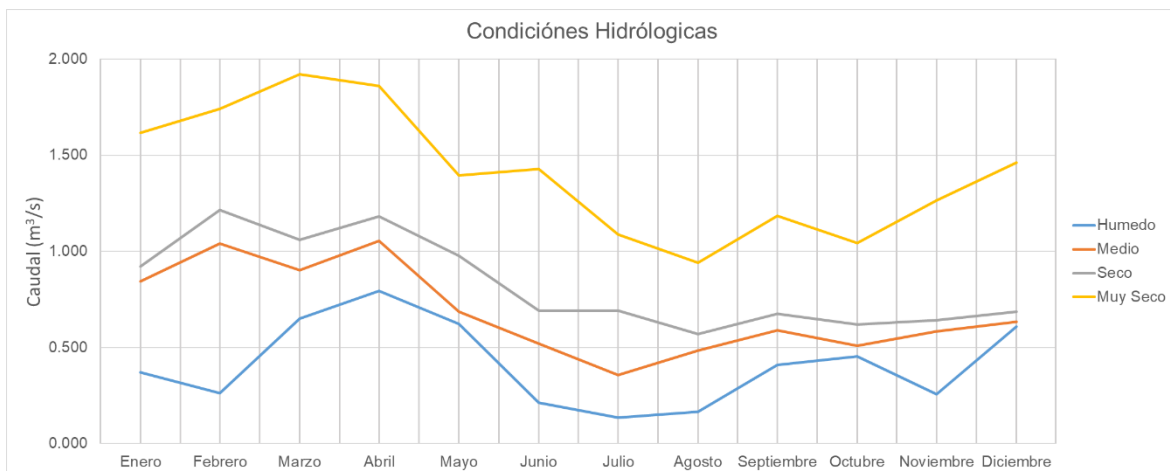


Figura 48. Grafica de valores de percentiles para propuesta de régimen de caudal ecológico para el RH

En base a una mejor distribución y manejo del agua, así como de la gestión, se divide la propuesta en dos temporadas para las aves objetivo lo que se puede observar en la figura 49, temporada de estiaje y temporada de anidación, lo que impactaría en su hábitat la temporada más importante para la subsistencia de la especie.

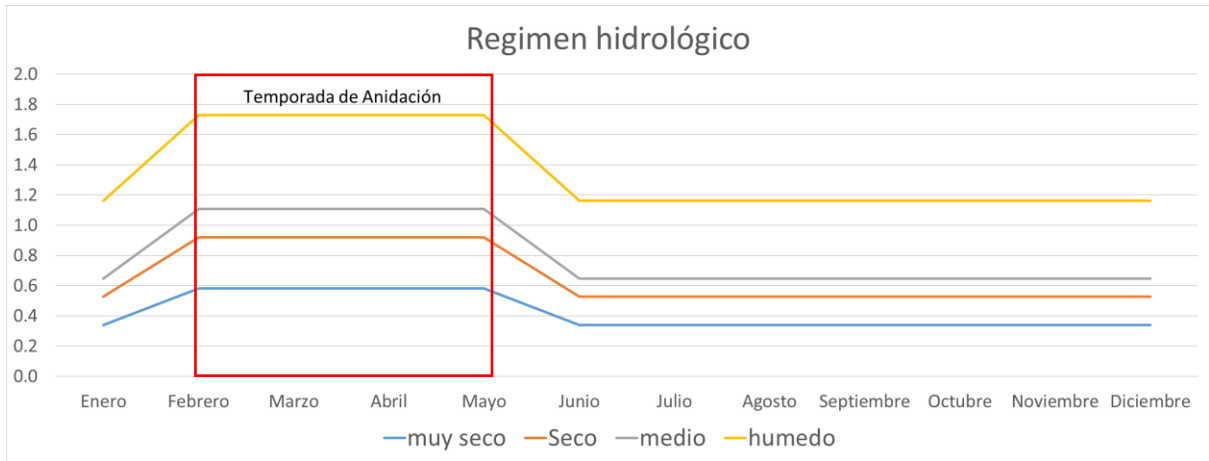


Figura 49. Régimen hidrológico obtenido para CE

6 Conclusiones

1. De acuerdo a los resultados de la simulación los caudales más óptimos para años húmedos que generan 713 ha de área inundada tienen la capacidad de mantener a una población de 130 ejemplares de palmoteador de yuma
2. Los caudales obtenidos no dieron una correlación tan precisa con respecto al área inundada, presentando un desfase en el cambio de satélite, esto puede significar a caudales entrantes de drenes aguas abajo del último punto de medición, de los cuales no se tiene registro o a un desfase entre el día de medición y el día de la imagen satelital.
3. Una modelación hidráulica en 2D conlleva un mayor tiempo de simulación, pero aporta una mejor aproximación comparándola con una simulación en 1 dimensión
4. La modelación hidrodinámica en 2D permitió conocer el funcionamiento hidráulico del RH, así como la superficie que se vería afectada y podrían ser áreas óptimas de hábitat para el Palmoteador de Yuma

7 Bibliografía

- Aguilar Muñoz, J. R. (2012). Desafíos en la implementación de caudales ambientales para la gobernanza y administración de los recursos hídricos: un estudio de caso en la subcuenca del río El Ángel, Carchi. Quito: FLACSO Sede Ecuador.
- Alonso-EguíaLis, P., Gómez Balandra, M., & Saldaña-Fabela, P. (2007). Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México: Jiutepec, Morelos: IMTA-Alianza WWF/FGRA-PHI/UNESCO-Semarnat.
- Alvarado, J. (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. Kurú: Revista Forestal, 13.
- Aparicio, M. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. Ciudad de México, DF: Editorial Limusa.
- Arthington, A., Tharme, R., Brizga, S., Pusey, B., y Kennard, M. (2004). Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. Paper presented at the Proceedings of the second international symposium on the management of large rivers for fisheries.
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., . . . Capon, S. (2018). The Brisbane declaration and global action agenda on environmental flows (2018). *Frontiers in Environmental Science*, 6.
- Baghel, D. S., Gaur, A., Karthik, M., y Dohare, D. (2018). Global Trends in Environmental Flow Assessment: An Overview. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 1-7.
- Barnes, H. H. (1967). Roughness characteristics of natural channels: US Govt. Print. Off.
- Barrios Ordóñez, J., Navarro, S., Rodríguez, S., Pineda, R., Mora, G., Almaraz, G., . . . Antoniocoaut, J. (2011). Guía para la determinación de caudal ecológico en Méxicosistematización de experiencias de la Alianza WWF\U+ 2013\Fundación Gonzalo Río Arronte IAP.
- Barrios Ordóñez, J. E., Rodríguez, S. A. S., Martínez, A., Pérez, M. L., Bracamonte, R. A. V., Ángeles, F. R., . . . Alcalá, C. (2015). Programa Nacional de Reservas de Agua en México.
- Beca. (2008). Draft guidelines for the selection of methods to determine ecological flows and water levels (pp. 145): Ministry for the Environment Wellington.
- Berumen, M. Á. (2013). La conquista del agua y del imaginario. Mexicali y Valle Imperial, 1901-1916: México: Cuadro x Cuadro, Consejo Nacional para la Cultura y las Artes.
- Braca, G. (2008). Stage-discharge relationships in open channels: Practices and problems: Univ. degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico. 287 p.
- Brown Manrique, O., Gallardo Ballat, Y., Harriote, W., Patricio, W., y Torres Martínez, Y. (2016). Caudal ecológico del río Chambas en la provincia Ciego de Ávila. Ingeniería

hidráulica y ambiental, 37(1), 58-71.

- Calvo-Alvarado, J., Jiménez, J. A., González, E., Pizarro, F., y Jiménez, A. (2008). Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(13), ág. 1-18.
- Calvo-Fonseca, A. (2010). Comparación de las comunidades icticas en el Río Hardy y el estuario del Río Colorado a través del hidroperíodo del 2008. (Master in Science), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México.
- Castro Heredia, L. M., Carvajal Escobar, Y., y Monsalve Durango, E. A. (2006). Enfoques teóricos para definir el caudal ambiental. *Ingeniería y Universidad*, 10(2).
- Chaves, A., Fallas, J., Rojas, K., y Quesada, F. (2017). Caja de herramientas para la determinación de caudal ambiental. París, Francia: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Criado, M. C. G., Pérez, P. P. L., y Cabañes, J. L. C. (2007). El régimen de caudales medioambientales. Su calculo en la cuenca del guadiana. *OP*, 51.
- Chow, V. T. (2000). *Hidráulica de canales abiertos*: McGraw Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D., y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*: McGraw-Hill.
- 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. In C. I. d. L. y. Aguas (Ed.), *Reporte Interno*. Mexicali, Baja California: Comisión Internacional de Límites y Aguas.
- Cital-Morales, F. (2018). Modelización hidrodinámica del dren agrícola Ayala para evaluarlo como proveedor del servicio ecosistémico de depuración del agua durante el año hidrológico 2016-2017. (Maestría en Ingeniería), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C.
- CONAGUA. (2014). Numero de usuarios, superficie con derecho de riego y volumen asignado por fuente de abastecimiento ciclo agrícola (2014-2015). *Aquí en el Valle*, 174.
- CONAGUA. (2015). Atlas del agua en México 2015 S. d. M. A. y. R. Naturales (Ed.) Consultado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>. Consultado el día 27 de febrero del 2019.
- CONAGUA. (2016). Modernización Red de Riego Agrícola Red de Riego Canal “ 4 de Abril ” Reservorios.
- CONAGUA. (2018). Estadísticas del Agua en Mexico 2018. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Consultado de: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/eam_2018.pdf. Consultado el día 27 de febrero del 2019.
- COPLADE (2017). Actualización del programa estatal de desarrollo agropecuario 2015-

2019. Comité de planeación para el desarrollo del estado. Baja California, México.
- Da Silva, C. J., Insaurralde, J. A., & Cardozo, O. D. (2014). Cartografía de coberturas del suelo mediante sensores remotos, de la ciudad de Resistencia, Argentina (2013).
- Díez-Hernández, J. M. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2).
- Diez Hernández, J. M., & Ruiz Cobo, D. H. (2007). Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*, 10(1).
- Dyson, M., Bergkamp, G., & Scanlon, J. (2003). *Flow: the essentials of environmental flows*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 20-87.
- Duabily, Y. d. C. A., & Méndez, C. E. C. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestión*, 3(1).
- Economía, S. d. (2012). Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas NMX (Vol. 2012, pp. 123). México: México.
- ESRI. (2017). ArcMap. from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>
- Gallo-Vélez, D. (2016). Consideraciones para la aplicación del método hidráulico R2CROSS para estimar caudales ecológicos en Colombia. *Intropica*, 111-126.
- Gawne, B., Capon, S., Hale, J., Brooks, S., Campbell, C., Stewardson, M., . . . Everingham, P. (2018). Different conceptualisations of River Basins to inform management of environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 111.
- González-Villeda, R., & Baderas-Tarabay, A. (2015). Metodologías para el cálculo de caudales ecológicos y ambientales en ríos regulados por presas. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Guo, Q., Pu, R., Li, J., & Cheng, J. (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38(19), 5430-5445.
- Hatzigiannakis, E., Pantelakis, D., Hatzispiroglou, I., Arampatzis, G., Ilias, A., & Panagopoulos, A. (2014). Variation of the Manning roughness coefficient in the river Strymonas in Northern Greece. Paper presented at the Proceedings of the 12th International Conference on Protection and Restoration of the Environment, Greece.
- USACE. (2016). HEC-RAS River Analysis System user's manual version 5.0. US Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources (USACE), Hydrologic Engineering Center (HEC). Computer Program Documentation (CPD) No. 68. Davis, CA.
- Hinojosa-Huerta, O., Iturribarria-Rojas, H., Zamora-Hernández, E., y 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.a
- Hinojosa-Huerta, O., Guzmán Olachea, R., Butrón, J., Juan Butrón, J., & Calvo Fonseca, A. (2009). Caracterización de la avifauna del río Hardy, Baja California, delta del río Colorado. Pronatura Noroeste y Sonoran Institute.

- Indij, D. (2018). Diagnóstico del grado de desarrollo del enfoque de caudales ambientales en países de Latinoamérica: Inter-American Development Bank.
- Irujo, A. E. (1994). Usos del agua e impacto ambiental: evaluación de impacto ambiental y caudal ecológico. *Revista de administración pública*(134), 109-154.
- Keeffe, J., & Le Quesne, T. (2010). Cómo conservar los ríos vivos. Guía sobre los caudales ecológicos. World Wildlife Fund for Nature–WWF, 4-32.
- Kim, J.-S., Lee, C.-J., Kim, W., & Kim, Y.-J. (2010). Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering*, 3(2), 217-232.
- King, J. M., Tharme, R. E., De Villiers, M., y Malan, C. (2008). Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology: Water Research Commission Pretoria.
- Ma, L., Zhang, X., Wang, H., & Qi, C. (2018). Characteristics and Practices of Ecological Flow in Rivers with Flow Reductions Due to Water Storage and Hydropower Projects in China. *Water*, 10(8), 1091.
- Mena, José A. Moreno & Limón, Mercedes G. López (2005). Desarrollo agrícola y uso de agroquímicos en el valle de Mexicali. *Estudios Fronterizos*, Vol. 6, No 12, pp.119-153. Mexicali, Baja California, México.
- Morgado Ruiz, P. (2009). Contrucción y perforación de pozos geotermicos en el área de cerro prieto Mexicali, Baja Califirnia. (Licenciatura), Instituto Politécnico Nacional, Mexico, D.F.
- Manuel, D. H. J., y Hernán, R. C. D. (2007). Determinación de caudales ambientales confiables en Colombia: el ejemplo del río Palacé (Cauca). *Gestión y Ambiente*, 10, 14.
- Navarro Smith, A. (2008). Cucapás, derechos indígenas y pesca. Dilemas del sistema productivo pesquero vis a vis las políticas de conservación de las especies en el Golfo de California. *Revista Chilena de Antropología Visual*, 12(2), 172-196.
- NIE. (2013). Environmental Flows. An Introduction for Water Resources Managers. New Delhi: National Institute of Ecology New Delhi.
- Ordóñez, J. E. B., Rodríguez, S. A. S., Pérez, M. L., Bracamonte, R. A. V., Ángeles, F. R., Gilbert, A. G., y Navarro, R. S. (2015). Programa Nacional de Reservas de Agua en México: Experiencias de caudal ecológico y la asignación de agua al ambiente. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Osuna-Millan, J. G. (2009). Informe de Gobierno del Estado de Baja California 2009. Mexicali, Baja California, México: Edo. de Baja California.
- Patterson, J. B. (1995). Breve descripción de la comunidad Cucapá del río Hardy, Baja California. *Estudios fronterizos*(35), 239-263.
- Poder Ejecutivo del Estado de Baja California. (2007). Convenio de Concertación para Establecer las Descargas del Efluente de la PTAR Las Arenitas al Río Hardy. Ciudad de Mexicali, Baja California, México: Poder Ejecutivo del Gobierno del Estado de Baja California.
- Poff, L. N., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., . . .

- Stromberg, J. C. (1997). The Natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Poff, N. L., Tharme, R. E., & Arthington, A. H. (2017). Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies *Water for the environment* (pp. 203-236): Elsevier.
- Portugal, E., & Verma, M. P. (2001). Hidroquímica de la laguna de evaporación en Cerro Prieto, Baja California, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 16(2), 153-174.
- Pouilly, M., Ibañez, C., Zepita, C., Gutiérrez, R., Aguillera, G., & Aguirre, M. (2014). Caudal ambiental: perspectivas de evaluación en el sistema TDPS. La Paz, Bolivia: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales, UICN.
- Pronatura Noroeste. (2006). Plan municipal de desarrollo rural sustentable del sur del valle de Mexicali. Baja California, México.
- Ramírez-Hernández, J. (1997). Estudio de las Relaciones Hidrogeológicas del Acuífero Superior del Valle de Mexicali con Aguas Geotermicas Superficiales. (Ph. D.), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.
- Ramírez-Hernández, J., y Carrera-Villa, E. J. (2015). El humedal artificial Las Arenitas (Baja California, México): funcionamiento hidrológico-ecológico y su potencial lúdico. In I. A. D. C. Antonio Sastre Merlín, Jorge Ramírez-Hernández (Ed.), *Gestión de humedales españoles y mexicanos. Apuesta conjunta para su futuro* (Vol. Obras Colectivas Ciencias 15). Alcalá de Henares, España: Universidad de Alcalá.
- Riezgo, C. R. O. (2016) Necesidades De Infraestructura Y Cambios En El Manejo Del Agua En El Distrito De Riego 014. Mexicali, Baja California, México.
- Rivera Pazos, Norman E. & Salazar Ruiz, Enriqueta (2011). Análisis de modificaciones del caudal en el Río Colorado debido al cambio climático, y repercusiones en el Valle de Mexicali. Instituto Tecnológico de Mexicali. XV Congreso internacional de ingeniería de proyectos, Huesca, España.
- Rodríguez-Burgueño, E. (2017). Efectos Hidrológicos de los Flujos Pulso y Base en la Zona Riparia del Delta del Río Colorado. (Ph. D.), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C.
- Romero, S., García, J., Valdez, B., y Vega, M. (2010). Calidad del Agua para Actividades Recreativas del Río Hardy en la Región Fronteriza México-Estados Unidos. *Información tecnológica*, 21, 69-78.
- Ruiz Campos, G. y Rodríguez Meraz, M. (1997). Composición taxonómica y ecológica de la avifauna de los ríos El Mayor y Hardy, y áreas adyacentes en el Valle de Mexicali, Baja California, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Zoología*, 68(2), pp.291-315.
- Sabaj, V., Rodríguez-Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., . . . Conde, D. (2014). Qué son los Caudales ambientales y cuál es la perspectiva de su aplicación en Uruguay. Montevideo, Uruguay: UNESCO.
- SAGARPA. (2013). Drenaje Superficial en Terrenos Agrícolas.
- Salcedo-Peredia, A. T. (2016). Simulación Hidráulica del Flujo Pulso (2014) en el Corredor

- Ripario del Delta del Río Colorado. (Master Eng. Manuscript), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California.
- Salton Sea Authority. (2000). Salton sea restoration project environmental impact statement/ environmental impact report. La Quinta, CA.
- Sanjurjo Rivera, E. y Carrillo Guerrero, Y. (2006). Beneficios económicos de los flujos de agua en el delta del Río Colorado: consideraciones y recomendaciones iniciales. *Gaceta Ecológica*, (80), pp.51-62.
- Schmutz, S., & Sendzimir, J. (2018). *Riverine Ecosystem Management: Science for Governing Towards a Sustainable Future* (Vol. 8): Springer.
- SE. (2012). Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. México, D.F.: Secretaría de Economía. Estados Unidos Mexicanos.
- SEMARNAT. (2014). *Ríos Libres y Vivos (Caudal Ecológico y Reservas de Agua)*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Shields Jr, F. D., Coulton, K. G., & Nepf, H. (2017). Representation of vegetation in two-dimensional hydrodynamic models. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(8), 02517002.
- Snelder, T., Booker, D., & Lamouroux, N. (2011). A Method to Assess and Define Environmental Flow Rules for Large Jurisdictional Regions 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(4), 828-840.
- Soares, L., Santos, H., Martínez-Capel, F., Callisto, M., Tupinambás, T., Castro, D., . . . Alves, C. (2015). Metodología para la propuesta de caudales ecológicos en función de restricciones ambientales y de gestión. *Aqua-LAC*, 7, 17-28.
- SonTek/YSI. (2007). *FlowTracker Handheld ADV Technical Manual*.
- SPA. (2015). Programa Estatal de Protección al Ambiente de Baja California 2015-2019. Mexicali, B.C.: Secretaría de Protección al Ambiente.
- Sykes, G. (1937). *The Colorado Delta*. Washington, D.C.: Carnegie Institution.
- Tennant, D. L. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*, 1(4), 6-10. doi: 10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19, 397-441.
- TNC. (2015). Modelación hidrológica del Río Hardy Reporte Interno realizado por Enviro Terra Soluciones S.C. para The Nature Conservancy. Mexicali. B.C.
- Trejo-Fernandez, J. (2012). Determinación de las variaciones hidrodinámicas e hidroquímicas del Río Hardy bajo su actual régimen de flujo durante un año hidrológico. (Maestría en Ingeniería), Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México.

- USGS. (2019). What are the band designations for the Landsat satellites?, Mapping, Remote Sensing, and Geospatial Data. from <https://www.usgs.gov/science-explorer-results?es=Mapping,+Remote+Sensing,+and+Geospatial+Data>
- Varela Romero, A., Ruiz Campos, G., Yépiz Velásquez, L. M. y J. Alanis García.(1999). Evaluación de la situación actual de las poblaciones del pez cachorrito del desierto (*Cyprinodon macularius macularius*) en la Cuenca del Bajo Río Colorado, Sonora-Baja California, México. Universidad de Sonora Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H126. México D. F.
- Vélez, D. G. (2016). Consideraciones para la aplicación del método hidráulico R2CROSS para estimar caudales ecológicos en Colombia. *Revista Intropica*, 11, 111-126.
- Villanueva-Ure, R. (2012, 16 a 19 de agosto del 2011). Procedimientos para determinar el caudal ecológico en las centrales hidroeléctricas ubicadas en los cauces de los ríos costeros del Perú. Paper presented at the XIX CONIMERA. Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Ramas Afines, Lima, Perú.
- Villarreal-Rosas, J. (2014). Efectos de la degradación del Río Hardy en los modos de vida en El Mayor Cucapá, 1950-2014. (Maestría), Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, B.C.
- WMO, U. (2012). International glossary of hydrology: World Meteorological Organization Geneva. WMO-No. 385.
- Wong-Ortega, V., & Munguia-Orozco, L. (2010). El sismo de Baja California (MW7.2) del 4 de abril de 2010. Paper presented at the Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Vallarta, Jalisco.
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033.
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., . . . Parra, I. (2005). Conservation Priorities in the Colorado River Delta, Mexico and the United States (pp. pp. 103). Tucson, Arizona, USA: 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.
- Zamora-Arroyo, F., & Santiago, E. (2010). Diseño de un humedal artificial para tratamiento del efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Las Arenitas, Mexicali, Baja California. In R. Final (Ed.), *Elaborado por Sonoran Institute para la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza*. Mexicali, Baja California, México: Sonoran Institute

8 Anexos

