

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



***“ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CAUDALES AMBIENTALES PARA EL HÁBITAT
RIBEREÑO DE LA ZONA LIMÍTROFE DEL RÍO COLORADO”***

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MARCO ROMARIO VALENZUELA SARABIA

DIRECTOR: DR. JORGE RAMÍREZ HERNÁNDEZ

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

MARZO 2022

Dedicatoria

A mi madre, por darme su amor y apoyo incondicional

Agradecimientos

Gracias a mi madre y Oyuki, que siempre estuvieron ahí para brindarme su amor y apoyo, por su paciencia y cariño, por motivarme a seguir adelante.

A mis compañeros en el laboratorio Ciencias de la Tierra, que siempre me brindaron su apoyo y conocimiento, así como su apoyo durante los trabajos de campo de esta investigación, por los momentos de risas que vivimos, al M. C. Héctor Molina por todo su conocimiento técnico que me brindó.

Al Dr. Jorge Ramírez, por guiarme en esta investigación, por todo el conocimiento que me aportó, por su paciencia y aceptarme como su alumno.

A la Dra. Eliana Rodríguez, por ser una excelente mentora, por todo el conocimiento que me compartió y su paciencia.

A CONACYT, por otorgarme la beca con el número 987568.

A mis amigos y familiares por siempre brindarme su apoyo.

RESUMEN

El Río Colorado en México en su tramo limítrofe y hasta su descarga en el Golfo de California no conduce agua del escurrimiento natural ya que toda su agua es derivada para usos consuntivos. Sin embargo, aproximadamente 17 kilómetros de su cauce aguas abajo de la Presa Derivadora Morelos (PDM) presentan agua producto de las filtraciones de la presa e infiltraciones de los canales próximos, mientras que la porción Sur del cauce esté completamente seca en alrededor 43 km de río. Dada la importancia ecológica de los humedales remanentes del Delta del Río Colorado desde hace más de veinte años se han impulsado acciones de conservación y restauración del hábitat del corredor ribereño del río. Como parte de las acciones de restauración y la unión de voluntades entre México, Estados Unidos y organizaciones de la sociedad civil derivados en acuerdos binacionales plasmados en las actas 319 y 323 del Tratado Internacional de Aguas de 1944, desde 2012 se ha descargado agua destinada al ambiente denominada como flujos ambientales. Los efectos hidrológicos de estos flujos, en el río y el acuífero Valle de Mexicali, han sido documentados por diferentes autores, algunos de los cuales generaron modelos que permitieron conocer el comportamiento hidráulico y geohidrológico del río y el acuífero en distintas zonas. El estudio del funcionamiento hidráulico del río fue uno de los objetivos de análisis para conocer los efectos de los flujos ambientales y para determinar zonas susceptibles para restauración, para ello el Grupo de Trabajo Ambiental del Acta 319 consideran los siguientes elementos, desde la perspectiva hidrológica, para establecer los tipos de hábitats a restaurar: la superficie inundada y la profundidad al nivel freático.

Durante 2019, del 5 de septiembre de 2019 al 5 de enero de 2021 se realizaron trabajos de mantenimiento en el dren Wellton Mohawk el cual se encuentra paralelo al cauce del río, en la zona limítrofe en la sección de Estados Unidos. Por lo anterior, las descargas provenientes del WM se derivaron hacia el cauce del río, este evento fue de gran importancia para evaluar el comportamiento hidrológico y geohidrológico del tramo limítrofe bajo flujos de 6.3 a 8.5 m³/s.

En este trabajo se analizan la evolución de las aguas subterráneas y superficiales a partir de una intensa campaña de monitoreo durante los eventos de descarga de flujos de WM en la zona limítrofe del RC. Lo anterior, a través de la modelización hidráulica de los flujos con el uso del programa HEC-RAS en dos dimensiones y en estado transitorio, como resultado se generaron escenarios de flujos para analizar la inundación del cauce con caudales de 5, 7 y 10 m³/s. Las superficies inundadas estimadas y resultado de las simulaciones en el cauce del RC, así como las superficies del nivel freático fueron analizadas considerando los criterios de restauración resultando en la propuesta de nueve áreas susceptibles para restauración dentro del corredor ribereño, a partir de los criterios hidrológicos referidos. Las áreas propuestas servirán como referencia para el diseño de sitios de restauración por las organizaciones encargadas de las acciones de restauración dentro del corredor del RC.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	12
1. 1. OBJETIVOS	15
1. 1. 1. OBJETIVO GENERAL	15
1. 1. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN	16
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	18
CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO	24
4. 1. HIDROLOGÍA	24
4. 1. 1. HIDRÁULICA.....	24
4. 1. 2. TIPOS DE FLUJO	25
4. 1. 3. RUGOSIDAD.....	27
4. 2. MODELO HIDRÁULICO.....	27
4. 2. 1. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE FLUJO.....	29
4. 3. INTERACCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y AGUA SUPERFICIAL	30
4. 4. VEGETACIÓN RIBEREÑA	30
4. 5. REGIMEN HIDROLÓGICO	30
4. 5. FLUJOS AMBIENTALES	31
4. 6. TIPOS DE RESTAURACIÓN	32
CAPÍTULO 5. ÁREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO	33
5. 1. ÁREA DE ESTUDIO	33
5. 2. HIDROLOGÍA	34
5. 3. GEOLOGÍA.....	36
5. 4. CLIMA	36
5. 5. FLORA Y FAUNA.....	37
CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA	39
6. 1. SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO	39
6. 1. 1. AGUA SUPERFICIAL	39
6. 1. 2. AGUA SUBTERRÁNEA.....	41
6. 2. MONITOREO	43

6. 2. 1. AGUA SUPERFICIAL	43
6. 2. 2. AGUA SUBTERRÁNEA	45
6. 3. ANÁLISIS DE DATOS	45
6. 3. 1. AGUA SUPERFICIAL	45
6. 3. 2. AGUA SUBTERRÁNEA	46
6. 4. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA.....	46
6. 4. 1. MODELO GEOMÉTRICO.....	47
6. 4. 2. ELABORACIÓN DE PROYECTO.....	47
6. 4. 3. CALIBRACIÓN.....	48
6. 4. 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	48
6. 4. 5. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
6. 5. ZONAS SUSCEPTIBLES A RESTAURACIÓN	48
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
7. 1. AGUA SUPERFICIAL.....	50
7. 2. AGUA SUBTERRÁNEA	63
7. 3. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA.....	71
7. 3. 1. MODELO GEOMÉTRICO.....	71
7. 3. 2. PROYECTO	73
7. 3. 3. CALIBRACIÓN.....	76
7. 3. 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	79
7. 3. 5. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
7. 4. ZONAS SUSCEPTIBLES A RESTAURACIÓN	94
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	107
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXO I.....	117

Índice de figuras

Figura 1.	Distribución geográfica de las principales cuecas y ríos en el mundo	12
Figura 2.	Zona limítrofe del Río Colorado	22
Figura 3.	Área de estudio dentro de la zona limítrofe.....	34
Figura 4.	Distribución de los sitios de aforo y limnímetros instalados en la zona limítrofe del RC	40
Figura 5.	Instalación de antena base	41
Figura 6.	Nivelación de limnómetro DMS-4	41
Figura 7.	Distribución de la red piezométrica localizada en la zona limítrofe (C, M: Datos continuos y manuales, M: Datos manuales).....	42
Figura 8.	Instalación de antena base	44
Figura 9.	Armado de equipo RiverSurveyor	44
Figura 10.	Medición de caudal en sitio de aforo.....	44
Figura 11.	Medición de la profundidad del nivel freático en el piezómetro N6.....	45
Figura 12.	Obtención de datos de transductores en piezómetro N4.....	45
Figura 13.	Sitio de aforo DMS-1, evolución del tirante y sección transversal de sitio	51
Figura 14.	Sitio de aforo DMS-2, evolución del tirante y sección transversal de sitio	52
Figura 15.	Sitio de aforo DMS-3, evolución del tirante	53
Figura 16.	Sitio de aforo DMS-3A, evolución del tirante y sección transversal de sitio.....	54
Figura 17.	Sitio de aforo DMS-3A, evolución del tirante y sección transversal de sitio.....	55
Figura 18.	Comparación de datos continuos de convertidos a metros columna de agua en los sitios de aforo DMS-3 y DMS-3A.....	56
Figura 19.	Sitio de aforo DMS-3A y evolución del tirante durante las campañas de monitoreo con datos anexados del sitio de aforo DMS-3	57
Figura 20.	Descargas medidas en los sitios de aforo y obra de desvío MODE 3	58
Figura 21.	Relación caudal – tirante en la sección DMS-1.....	59
Figura 22.	Relación caudal – tirante DMS-2.....	59
Figura 23.	Relación caudal – tirante DMS-3A	60
Figura 24.	Relación caudal – tirante DMS-4.....	60
Figura 25.	Evolución del tirante e hidrogramas en los sitios de aforo	61
Figura 26.	Volumen acumulado descargado en los sitios de aforo	62
Figura 27.	Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros N1, N2, N3, N4, BD34 y BD41.....	64

Figura 28. Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros N5, N7, N8, N9, N10, BD47 y BD52	66
Figura 29. Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros MA12, P15 y BD57	67
Figura 30. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) antes del 5 de septiembre de 2019.....	68
Figura 31. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) 30 días posteriores al inicio de las descargas de canal WM..	69
Figura 32. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) 60 días posteriores al inicio de las descargas de canal WM	70
Figura 33. Eje del cauce del RC y la evolución del agua subterránea en intervalos de 30 días.....	71
Figura 34. Sección transversal DMS-1	71
Figura 35. Sección transversal DMS-2	71
Figura 36. Zona inundada durante recolección de datos para construcción de MDE posterior al evento Flujo Pulso 2014	72
Figura 37. Modelo digital de elevaciones del área de estudio	73
Figura 38. Distribución del tipo de cobertura en la zona limítrofe	74
Figura 39. Configuración de la malla utilizada en el modelo hidráulico	75
Figura 40. Ubicación de condiciones de frontera de entrada (zona 1) y salida (zona 2)	76
Figura 41. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-1	77
Figura 42. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-2	78
Figura 43. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-3A	79
Figura 44. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-1.....	80
Figura 45. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-2.....	80
Figura 46. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-3A	81
Figura 47. Distribución de las zonas inundadas y de los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 2 y 4 km aguas abajo de la PDM	83
Figura 48. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 5 y 6 km aguas debajo de la PDM.....	84
Figura 49. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 7 y 8 km aguas debajo de la PDM.....	85
Figura 50. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 9 y 10 km aguas debajo de la PDM.....	86

Figura 51. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 11 y 12 km aguas debajo de la PDM.....	88
Figura 52. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 13 y 14 km aguas debajo de la PDM.....	89
Figura 53. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 15 y 16 km aguas debajo de la PDM.....	91
Figura 54. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 17 y 18 km aguas debajo de la PDM.....	92
Figura 55. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 19 y 20 km aguas debajo de la PDM.....	93
Figura 56. Áreas susceptibles a restauración dentro del segmento norte.....	95
Figura 57. Áreas susceptibles a restauración dentro del segmento sur	96
Figura 58. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 3 y 4 aguas debajo de la PDM	117
Figura 59. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 5 y 6 aguas debajo de la PDM	118
Figura 60. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 7 y 8 aguas debajo de la PDM	119
Figura 61. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 9 y 10 aguas debajo de la PDM	120
Figura 62. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 11 y 12 aguas debajo de la PDM	121
Figura 63. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 13 y 14 aguas debajo de la PDM	122
Figura 64. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 15 y 16 aguas debajo de la PDM	123
Figura 65. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 17 y 18 aguas debajo de la PDM	124
Figura 66. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 19 y 20 aguas debajo de la PDM	125

Índice de tablas

Tabla 1.	Profundidad del nivel freático para cada tipo de hábitat de acuerdo a los lineamiento del Acta 323.....	49
Tabla 2.	Valores de rugosidad utilizados en el modelo hidráulico	76
Tabla 3.	Ancho de la extensión de inundación y tirante 2.2, 3 y 4 km aguas debajo de la PDM	82
Tabla 4.	Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 5, 5.2 y 6 km aguas debajo de la PDM	83
Tabla 5.	Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 7 y 8 km aguas debajo de la PDM	85
Tabla 6.	Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 9 y 10 km aguas debajo de la PDM	86
Tabla 7.	Ancho de la extensión de inundación y el tirante máximo en los 11 y 12 km aguas debajo de la PDM.....	87
Tabla 8.	Ancho de la extensión de inundación y tirante máximo en los 13 y 14 km aguas debajo de la PDM.....	88
Tabla 9.	Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para los 15 y 16 km aguas debajo de la PDM	90
Tabla 10.	Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para los 17 y 18 km aguas debajo de la PDM	91
Tabla 11.	Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para el 19 y 20 km aguas debajo de la PDM.....	92
Tabla 12.	Profundidades del nivel freático para cada tipo de hábitat de acuerdo con los lineamientos del Acta 323.....	94
Tabla 13.	Tipo de hábitat y evolución de su área durante los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 1.....	97
Tabla 14.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 2.....	98
Tabla 15.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 3.....	99
Tabla 16.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 4.....	100
Tabla 17.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 5.....	101
Tabla 18.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 6.....	102
Tabla 19.	Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 7.....	103

Tabla 20. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 8	104
Tabla 21. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 9	105
Tabla 22. Áreas inundadas y elevaciones del espejo de agua máximas para los diferentes escenarios modelizados	106

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad del ser humano de contar con una fuente segura de agua siempre ha sido primordial, esto se ha observado con el establecimiento de civilizaciones antiguas y modernas cerca de los cuerpos de agua, además de la generación de obras hidráulicas para poder asegurar el acceso al agua que se destina a la agricultura, industria y uso doméstico. Los límites de cuencas y acuíferos ya estaban consolidados antes de que el ser humano propusiera sus límites administrativos, creando así, acuíferos y cuencas transfronterizas (Figura 1). Existen 263 cuencas transfronterizas de lagos y ríos, las cuales cubren casi la mitad de la superficie terrestre (UN-Water, 2008).

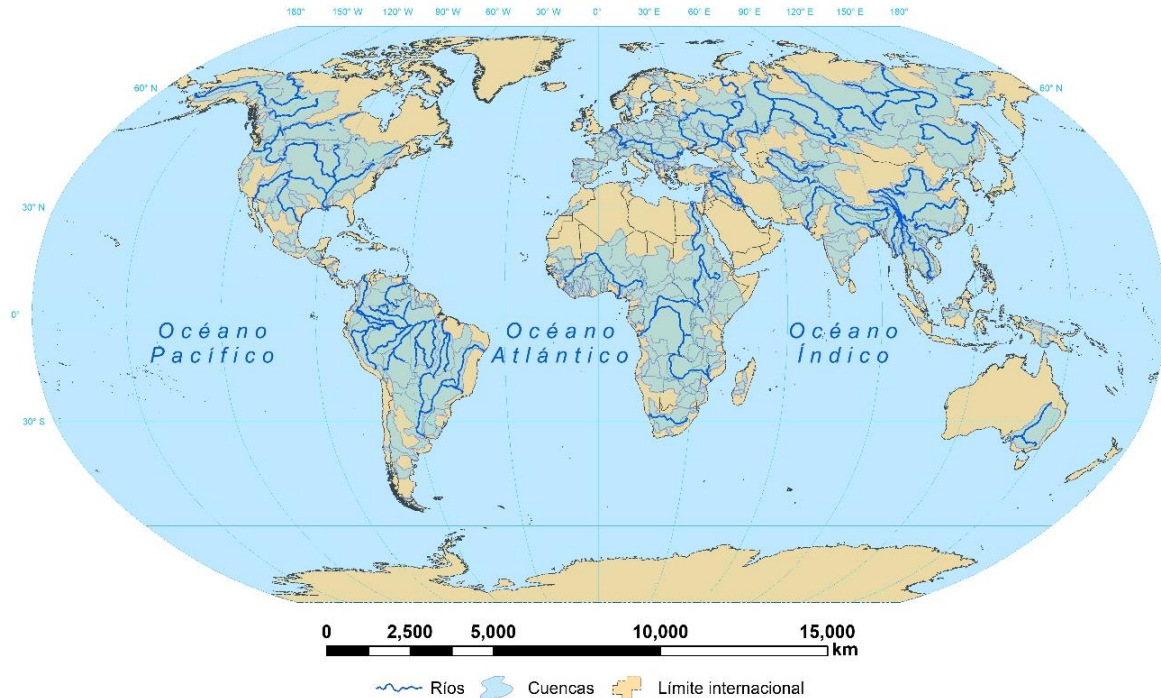


Figura 1. Distribución geográfica de las principales cuencas y ríos en el mundo

Todos los cuerpos de agua transfronterizos han creado una dependencia hidrológica, social y económica entre comunidades (UN-Water, 2008), la cual se da debido a la demanda de agua para los diferentes usos que le da el ser humano: agrícola, industrial y urbano; además, con el crecimiento poblacional se ejerce una presión aun mayor sobre este recurso, obligando al ser humano a crear obras hidráulicas que alteran el régimen de flujo natural de los ríos, haciendo que solo las especies capaces de adaptarse a un flujo alterado puedan sobrevivir y que especies no nativas se establezcan (Palmer & Ruhi, 2019).

México cuenta con una red hidrográfica de 633,000 km de longitud, compuesta por ríos y arroyos. De esta red hidrográfica, destacan 51 ríos, los cuales son considerados como los principales, en estos, fluye el 87% del escurrimiento superficial del país, donde el 76 % del volumen concesionado es utilizado para uso agrícola, el 14.38% para abastecimiento público, el 4.86% para uso industrial y el 4.72% para la generación de energía eléctrica (CONAGUA, 2018). Algunos ríos mexicanos fluyen parcialmente o nacen en países vecinos. Con Estados Unidos se tiene firmado el Tratado de 1944,

donde, particularmente se le garantiza que, Estados Unidos entregará a México un volumen de 1,850 hm³ provenientes del Río Colorado (RC) (CILA, 1944).

El Río Colorado, es un río trasfronterizo que nace en las montañas Rocallosas, donde se aporta el 70% del escurrimiento total anual que conduce el cauce del río, este aporte es debido a las capas de nieve que se forman en el sistema montañoso, debido a las tormentas invernales (Christensen et al., 2004). La cuenca del RC drena parte de siete estados en Estados Unidos y dos en Mexico, donde su escurrimiento es regulado por las 12 principales presas, las cuales son utilizadas para el almacenamiento de agua, control de inundaciones y generación de electricidad. El flujo anual desde 1906 hasta 2000 mostró un mínimo de 6,500 hm³ (hectómetros de metros cúbicos), un máximo de 29,600 hm³ y un promedio de 18, 600 hm³ (Christensen et al., 2004), además, éste mantenía un caudal promedio diario de 600 m³/s, e inclusive, durante el periodo de 1905 a 1936, se presentaron caudales que excedían los 5,000 m³/s. (Mueller et al., 2017). Las descargas históricas del RC hacia su desembocadura crearon a su paso un vasto Delta que al cabo de los años por el manejo hidráulico del río se vio disminuido a solo el 10% de su superficie original. Actualmente, el Delta está ocupado por más de 485,000 ha de cultivos del Valle de Mexicali, Yuma y San Luis Río Colorado, y alrededor de 24,000 ha de zonas ribereñas (Nagler et al., 2005; Cital et al., 2022). Además de la creación del Delta, el río formó un importante acuífero adyacente, el denominado acuífero del Valle de Mexicali, el cual provee de agua a la agricultura, zonas urbanas y rurales, y a la vegetación ribereña del río, la cual es de tipo freatófita. Aún, con la disminución de su extensión, el Delta es un hábitat de importancia internacional ya que alberga a especies nativas, endémicas y en peligro de aves, de mamíferos y de vegetación

El Delta es parte del Corredor Migratorio del Pacífico Americano, provee de refugio y alimentos a más de 400 especies de aves migratorias. Sin embargo, el RC en su tramo limítrofe entre México y Estados Unidos, los estados de Baja California y Arizona, respectivamente y hasta su desembocadura en el Golfo de California no conduce agua del escurrimiento natural ya que toda el agua que llega al Lindero Internacional Norte (LIN) es derivada mediante la Presa Derivadora Morelos (PDM) en territorio mexicano para usos consuntivos (Ramírez-Hernández et al., 2015). Esto provoca que únicamente los primeros kilómetros de la porción Norte del tramo limítrofe contengan una pequeña cantidad de agua producto de las pérdidas de la PDM, las infiltraciones de los canales más próximos y flujos de retorno agrícola, en contraste con la porción Sur del cauce que está completamente seco (Ramírez-Hernández et al., 2013).

El deterioro del hábitat del Delta ha sido estudiado desde los años 90, y fue impulsado como una prioridad binacional por su importancia ecológica desde las organizaciones de la sociedad civil y la academia. Para los años dos mil, se iniciaron los esfuerzos de incidencia en la política pública binacional por parte de las organizaciones de la sociedad civil, logrando que el Delta entrará a la agenda binacional, y destinando fondos para la creación de sitios de restauración con el apoyo del sector privado y algunas instancias de gobierno (Pitt & Kendy, 2017)

Para el 2012, se logra el primer acuerdo binacional entre dos naciones y organizaciones de la sociedad civil, a nivel mundial, para destinar agua ambiental con fines de conservación y restauración del hábitat ribereño del Delta, la denominada Acta 319 del Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos. Los acuerdos estipulados en esta Acta permitieron la descarga aproximadamente 195 hm³ en el Delta del Río Colorado para propósitos ambientales, de los cuales

130 hm³ fueron entregados como un flujo pulso desde la PDM y dos estructuras hidráulicas aguas debajo de ésta (CILA, 2018). Además, en dicha acta se estipulaba que se analizarían los efectos hidrológicos y biológicos de las descargas de flujos ambientales, para esto se estipularon grupos de trabajo liderados por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) de México y Estados Unidos, entre ellos el Grupo de Trabajo Ambiental y el Grupo Binacional de Ciencia.

Después del término del Acta 319, que contemplaba una duración de 5 años, en el 2013, se firma el Acta 323, la continuación de los acuerdos sobre la restauración del hábitat del Delta y descarga de flujos ambientales. Particularmente, el Acta 323 considera la descarga de flujos ambientales, un volumen de 55 hm³ promedio anual como meta durante 9 años, para mantener los sitios existentes de restauración y también para beneficiar otros sitios en el corredor ribereño del Delta del RC y su estuario. Además, se han identificado oportunidades de expandir las 435 hectáreas existentes de hábitat nativo restaurado a 1,700 hectáreas (CILA, 2017). Los efectos de estos flujos en el río y el acuífero han sido documentados anteriormente por diferentes autores, los que han generado modelos e investigaciones que permiten conocer el comportamiento hidráulico y geohidrológico del RC en distintas zonas (Ramírez-Hernández et al., 2013; Salcedo-Peredia, 2014; Mueller et al., 2015; Kennedy et al., 2017; Nelson et al., 2017; Ramírez-Hernández et al., 2017; Rodríguez-Burgueño et al., 2017).

La importancia de analizar el comportamiento hidráulico recae en que el conocimiento del funcionamiento hidráulico de un río durante el transcurso de una descarga controlada es fundamental para la resolución de una gran variedad de problemas de ingeniería hidráulica y dinámica fluvial, como delimitación de zonas inundables, diseño de encauzamientos y estructuras hidráulicas, estabilización de márgenes, proyectos de rehabilitación de ríos y de restauración de zonas ribereñas. Por otro lado, el régimen de flujo de un río es el principal modificador de un ecosistema ribereño, las variaciones en volúmenes y tiempos controlan el desarrollo de la vegetación tanto en distribución como en crecimiento y reclutamiento. Alterar el régimen natural, altera el ecosistema y puede llegar al grado de modificarlo por completo (Poff et al., 1997; Lytle & Poff, 2004; Palmer & Ruhi, 2019).

Esta investigación consistió en el análisis de la respuesta hidrológica y geohidrológica del río y el acuífero a las descargas de flujo derivadas del evento del Welton-Mohawk durante 2019, mediante el monitoreo de una red piezométrica en la zona limítrofe y cuatro sitios de aforo en el cauce del río Colorado. Además, este trabajo incluyó el desarrollo de un modelo hidráulico calibrado, el cual fue utilizado para generar tres escenarios con diferentes caudales, para evaluar las variaciones en las zonas de inundación y tirantes de agua en el cauce. Una vez analizada la información de las campañas de monitoreo y de los escenarios simulados, se propusieron una serie de áreas susceptibles a restauración en el corredor ribereño de la zona limítrofe, las cuales, están sustentadas de acuerdo con los lineamientos propuestos por el Grupo Binacional de Trabajo Ambiental del Acta 323.

1. 1. OBJETIVOS

1. 1. 1. OBJETIVO GENERAL

Analizar y modelizar los caudales descargados en el corredor ribereño en el RC, por trabajos de mantenimiento realizados al canal WM, como flujos ambientales y su efecto en la profundidad del nivel freático del acuífero y, consecuentemente, para el hábitat ribereño a lo largo de la zona limítrofe del RC.

1. 1. 2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Cuantificar en al menos tres sitios a lo largo en la zona limítrofe del RC los caudales descargados aguas abajo de la PDM y su efecto en el tirante de agua. Así como monitorear en la profundidad del nivel freático en el acuífero.
2. Evaluar los efectos hidrológicos de los caudales descargados en la zona limítrofe del RC sobre el nivel freático del acuífero, tanto en extensión como en profundidad, así como la superficie inundada.
3. Modelizar en dos dimensiones y en estado transitorio los eventos de descargas de flujos por trabajos de mantenimiento realizados en el canal Wellton Mohawk.
4. Establecer zonas cuyas condiciones hidrológicas y geohidrológicas permitan la restauración con los diferentes tipos de hábitats ribereños de acuerdo con los tipos de restauración propuestos por el Grupo de Trabajo Ambiental del Acta 323 entre México y Estados Unidos.

CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN

En los años 1982 a 1984, en 1997, 2001 y 2010 se produjeron descargas denominadas como extraordinarias (adicionales a lo estipulado en el Tratado de Aguas Internacionales de 1944) al Delta, derivadas de eventos de precipitación en la cuenca alta del RC debido a diversos eventos climatológicos, como El Niño, y volúmenes excedentes de agua no utilizada por los usuarios agrícolas (Ramírez-Hernández et al., 2013; Mueller et al., 2017). Nagler et al., 2008 demostraron en su investigación que esos flujos descargados en el Delta del RC mejoraron el ecosistema ribereño, germinando nuevos álamos y sauces, creando hábitat para las aves y otros animales. Las descargas extraordinarias generaron grandes extensiones de inundación y estaban principalmente relacionadas con la germinación de la semilla de las especies del corredor ribereño, sin embargo, la supervivencia de estas especies no estaba relacionada con los flujos de inundación, sino a la recarga proveniente de la irrigación de los campos agrícolas (Luecke et al., 1999). No obstante, después de los flujos de 1997, se sugirió que flujos anuales de 4.1 hm³ descargados desde la PDM, podrían sostener la vegetación ribereña de la zona limítrofe (Luecke et al., 1999). Los flujos registrados posteriores a la construcción de las obras hidráulicas superaron la capacidad del cauce, alcanzaron las planicies de inundación del río, modificaron la geometría del cauce y mostraron una mejoría en el hábitat del corredor ribereño (Luecke et al., 1999; Nagler et al., 2008; Ramírez-Hernández et al., 2013; Ramírez-Hernández et al., 2015 Jarchow et al., 2017; Mueller et al., 2017; Nelson et al., 2017; Pitt & Kendy, 2017; Ramírez-Hernández et al., 2017) pero el sustento del hábitat ribereño a largo plazo no podía depender de estos, dado que la vegetación nativa es dependiente del agua subterránea y las especies de animales residentes y migratorios del Delta requieren de hábitats no solamente vegetativos sino de cuerpos de agua abierta y fluyendo, ambos hábitats conectados entre sí y en varios sitios dentro del corredor.

Por lo anterior, la importancia del Delta debía de ser reconocida a nivel binacional, por lo que organismos de la sociedad civil, la académica y organizaciones gubernamentales han trabajado desde hace más de veinte años en la conservación, la restauración parcial, el estudio del ecosistema y la política pública binacional para devolver al Delta un poco de agua para generar grandes beneficios ambientales. Los organismos de la sociedad civil y algunas instituciones gubernamentales iniciaron trabajos de restauración en el Delta mediante la compra de derechos de agua mediante un fideicomiso, y la obtención de concesiones de zonas federales dentro del corredor ribereño para la creación de sitios de restauración. Después de más de 15 años de esfuerzos, se logra el primer acuerdo binacional entre México, Estados Unidos y organizaciones de la sociedad civil para la implementación de flujos ambientales y la restauración de hábitat ribereño en el Delta, el Acta 319 firmada en noviembre del 2012.

En el Acta 319 se incluye la implementación de proyectos binacionales para restaurar la zona ribereña del RC, mediante el uso de flujos ambientales. Esta acta define los acuerdos para la descarga de 195 hm³ en un periodo de 5 años en dos eventos; un evento de una sola descarga denominado Flujo Pulso y otro denominado Flujo Base, este último dividido en descargas anuales liberadas en sitios de restauración clave. El primero tuvo lugar del 23 de marzo al 18 de mayo del 2014 con un volumen de descarga total de 130 hm³, el cual tenía por objeto simular las descargas naturales de primavera causadas por el deshielo en la parte alta de la cuenta y beneficiar la germinación de la vegetación nativa, estas descargas fueron liberadas en la PDM y una fracción de este volumen fue derivado a través de los vertedores de los canales de riego denominados Km 18 y Km 27. Por otro lado, durante las descargas del flujo base se destinó un volumen de 71.074 hm³ hacia los sitios de restauración dentro del corredor ribereño denominados como Miguel Alemán, El Chausse, Laguna Grande y hacia

el cauce del Río Colorado; durante el término del Acta 319, hasta el 31 de diciembre de 2017 (CILA, 2018). Ramírez-Hernández et al., 2017 concluyeron que el 91% del volumen derivado durante el flujo pulso se infiltró debido a que las zonas inundadas fuera del canal principal, donde el agua se evaporó o infiltró y no proporcionó un beneficio para la vegetación ribereña, además de las altas tasas de infiltración en la zona seca del río (alrededor de 42 km) donde la profundidad al nivel freático era de alrededor de 15 m. El flujo pulso produjo un incremento del 17% del reverdecimiento a lo largo del corredor ribereño en el 2014 en comparación con el 2015, además de esto, se registró un crecimiento en la abundancia de aves del 20% y su diversidad creció un 42% en la planicie aluvial del Río Colorado. Asimismo, se propuso descargar caudales por debajo de la capacidad del cauce, para poder reducir las pérdidas por infiltración (CILA, 2018).

Debido a la sobreasignación, a la demanda actual de agua por los usuarios y a la actual hidrología regional de la cuenca que ha causado la disminución de los niveles en los vasos de almacenamiento en las presas de Estados Unidos, es poca la probabilidad de acceder a una descarga de la magnitud del Flujo Pulso. El enfoque de implementación de flujos ambientales se modificó de acuerdo con los resultados obtenidos durante el Acta 319, la optimización de las entregas de agua y su uso en generar el mayor beneficio ambiental ha conllevado a priorizar entregas con menores volúmenes de agua y en sitios específicos del corredor. Por lo que evaluar la respuesta hidrológica ante una descarga con caudales de rango 6.3 a 8.5 m³/s como los liberados durante las obras de mantenimiento en el canal Wellton Mohawk puede aportar información que permita generar zonas susceptibles de restauración según los esquemas establecidos por el Grupo Binacional de Trabajo Ambiental del Acta 323 y optimizar los beneficios de las descargas en zonas con potencial de conservación y restauración, así como para la propuesta de futuros hidrogramas de entregas desde la PDM.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

El agua es fundamental para el desarrollo económico, social y ambiental. Específicamente, es esencial para mantener la salud, cultivar alimentos, generar energía, proteger el ambiente y crear empleos (Banco Mundial, 2019). Durante miles de años, los seres humanos se han percatado de la importancia de tener fuentes de agua, por ello se han asentado cerca de los cuerpos de agua (UNESCO, 2015). No obstante, el crecimiento urbano y el desarrollo industrial han llevado a las ciudades a buscar cada vez más lejos el agua que necesitan, a menudo tomando esta agua de otros usuarios a los que quizá se perjudica, como es el caso de la naturaleza (UNESCO, 2015). Aunado a lo anterior, las modificaciones llevadas a cabo para el aprovechamiento de los recursos hídricos (las presas, los sistemas de riego, la extensión urbana, la acuicultura, entre otras) tienen consecuencias importantes para los principales componentes y/o procesos ecológicos de los ríos, lagos, llanuras aluviales y humedales. En 2005, de los 292 sistemas fluviales más grandes del mundo (que representan el 60 % de la esorrentía mundial), más de un tercio (105) se consideraron sumamente afectados por la fragmentación de estos y 68 moderadamente afectados. Algunos ecosistemas desaparecen cuando se regulan los ríos o se almacenan sus aguas, debido a la alteración de su comportamiento hidráulico y a la presencia de nuevas barreras que dificultan o impiden el movimiento de especies migratorias (UNESCO, 2015).

Las barreras no solo suelen ser estructuras hidráulicas, también existen fronteras que dividen administrativamente los territorios, sin embargo, los cauces naturales, como los ríos, no están sujetos a este tipo de delimitaciones geopolíticas por lo que pueden cruzar más de dos territorios o naciones, categorizándose como transfronterizos. En el mundo existen 263 cuencas transfronterizas de lagos y ríos que cubren casi la mitad de la superficie de la Tierra, 145 países tienen territorio en estas cuencas, y 30 países se encuentran totalmente dentro de ellas (UN-Water, 2008), por lo que es esencial que exista una cooperación entre las diferentes partes que integran estos sistemas fluviales transfronterizos.

A medida que la calidad del agua se degrada o la cantidad disponible de la misma tiene que satisfacer demandas cada vez mayores, la competencia entre los usuarios del agua se intensifica (ONU, 2014) por lo que la cooperación transfronteriza es un reto. En ningún lugar esta situación es más desestabilizadora que en las cuencas de los ríos que atraviesan fronteras políticas (ONU, 2014). Sin embargo, a través de la historia se ha reconocido que esta situación se puede mitigar cuando las diferentes partes que comparten una cuenca crean instrumentos que permiten gestionar de una manera efectiva el recurso hidráulico. Mientras que la mayoría de las cuencas son compartidas por dos países, existen 13 cuencas en el mundo compartidas entre cinco a ocho países, otras cinco cuencas de los ríos Congo, Níger, Nilo, Rin y Zambeze se comparten entre nueve y once países. El río que atraviesa el mayor número de países es el Danubio, que fluye a través del territorio de 18 naciones (ONU, 2014).

México cuenta con una red hidrográfica de 633,000 km de longitud, compuesta por ríos y arroyos. De esta red hidrográfica, destacan 51 ríos, los cuales son considerados como los principales, en estos, fluye el 87% del escurrimiento superficial del país, donde el 76 % del volumen concesionado es utilizado para uso agrícola, el 14.38% para abastecimiento público, el 4.86% para uso industrial y el 4.72% para la generación de energía eléctrica (CONAGUA, 2018). Algunos ríos mexicanos fluyen parcialmente o nacen en países vecinos. Con Estados Unidos se tiene firmado el Tratado de 1944,

donde, particularmente se le garantiza que, Estados Unidos entregará a México un volumen de 1,850 hm³ provenientes del Río Colorado (RC) (CILA, 2019).

Uno de los ríos trasfronterizos más controlados hidráulicamente en todo el mundo se encuentra en el hemisferio occidental, el Río Colorado (RC) que conduce un flujo anual promedio de 18,500 hm³, su cuenca cubre un área de 630,000 km², desde su nacimiento en las Montañas Rocallosas en los Estados Unidos, donde se produce el 80% de la precipitación de la cuenca. El río viaja 2,300 km, desde una elevación de 4,200 metros, siguiendo una dirección Suroeste a través de los estados de Wyoming, Colorado, Utah, Arizona y California, cruzando después a los estados de Baja California y Sonora en México, donde forma el Delta del RC y desemboca en el Golfo de California (Pitt et al., 2015).

Históricamente, el RC se consideraba como uno de los ríos más poderosos del mundo, con flujos máximos de 6,200 m³/s y con alta turbidez (Adler, 2007), con un importante arrastre de sedimentos que aportaban una cantidad de nutrientes para la flora y fauna del lugar. En el delta, el RC mantenía 600,000 ha de bosques ribereños y humedales, conformando una de las regiones más importantes para la vida silvestre en el continente (G. G. Sykes, 1937).

El delta del RC se desarrolló y estuvo controlado por dos procesos geológicos contrastantes, por un lado, el arrastre de sedimentos (se depositaban un promedio anual de entre 98.67 hasta 138.15 hm³ de sedimentos) y un régimen de mareas provenientes del Golfo de California con corrientes de mareas muy fuertes, la interacción entre estos dos procesos constructivos y destructivos produjeron este hábitat diverso (Sykes, 1926; Carriquiry & Sánchez, 1999).

Antes de la construcción de las grandes presas para manejar los flujos del río, el Delta del RC consistía en extensos bosques de sauces y álamos, ciénegas y otros ecosistemas costeros mantenían una gran abundancia y diversidad de animales y plantas (Zamora et al., 2005). Algunas excursiones realizadas entre 1904 y 1920 describen al delta como un vasto bosque de álamos (*Pupulus fremontii*) y sauces (*Salix gooddingii*) en la zona Norte, intercalado con humedales que contenían tule (*Typha domingensis*) y *Phragmites australis* en las zonas bajas y bosques de mezquites (*Prosopis glandulosa* y *Prosopis pubescens*) en las terrazas altas (Glenn et al., 2001). El delta era de vital importancia para las especies de aves residentes y migratorias, las cuales encontraban alimento y refugio (Zamora et al., 2005). Los periodos de flujos máximos y las inundaciones de las terrazas bajas correspondían a los periodos de gran actividad para el crecimiento de la vegetación ribereña, haciendo que el canal se mantuviera en su cauce principal debido este proceso (Sykes, 1926).

Con el crecimiento demográfico, el establecimiento de ciudades y pueblos que demandaban agua para su uso urbano e industrial y la conversión del Delta en campos de cultivo (Glenn et al., 2001) el RC se convirtió en uno de los ríos más regulados y con más procesos legales en el mundo. Con la premisa de controlar al río y optimizar sus beneficios durante los últimos 100 años se realizaron grandes esfuerzos en la cuenca para controlar, almacenar y derivar sus flujos, los cuales de 1905 a 1936 eran descargas máximas que podían exceder los 5,000 m³/s, con descargas diarias promedio de 600 m³/s. (Mueller et al., 2017). Lo anterior, mediante la construcción de alrededor de veinticinco presas principales y cientos de proyectos de derivación en el cauce principal y tributarios, aumentando la capacidad de almacenamiento a más de cuatro veces el volumen anual de escurrimiento (Morrison et al., 1996).

Con la construcción de la presa Glen Canyon y otras más en la cuenca alta del RC se redujeron drásticamente los flujos hacia el Delta, hasta quedar virtualmente eliminados (Mueller et al., 2017). Las obras hidráulicas de mayor tamaño, como lo son la presa Hoover, y la presa Parker, se encuentran en territorio estadounidense, sin embargo, la Presa Derivadora Morelos (PDM) es la última obra hidráulica en el curso del RC para entregar a México los 1,860 hm³ anuales derivados del Tratado de Aguas Internacionales entre México y Estados Unidos firmado en 1944 (Tratado de 1944), el agua es desviada por completo hacia el sistema de canales de riego para usos consuntivos en México (Ramírez-Hernández et al., 2017).

A partir de 1964, el Delta del RC quedó completamente seco después de que se completó la construcción de la presa Glen Canyon (Nagler et al., 2008). Actualmente, el régimen hidrológico del río ha sido fuertemente modificado, alterando así el dinamismo de flujos y sedimentos que existían en el río, mayormente en la zona del Delta y el alto Golfo de California, incluyendo la zona limítrofe, afectando el hábitat y a diversas especies de flora y fauna que dependían de estos, las áreas influencia se han visto reducidas hasta casi extinguirse (Pitt et al., 2015).

Dado los cambios en el régimen de flujo natural del RC, el Delta ha quedado reducido a un 10 % de su tamaño original, la alteración, la fragmentación y la destrucción de los hábitats han resultado en una pérdida de biodiversidad (Valdés-Casillas et al., 1998) como consecuencia de 65 años de un intenso control y manejo del agua para satisfacer las necesidades agrícolas, industriales y urbanas en Estados Unidos y México (Zamora et al., 2005). Las especies vegetativas y de fauna remanentes en el Delta han tenido que adaptarse a las nuevas condiciones hidrológicas, sin embargo, especies invasoras como el pino salado (*Tamarix ramosissima*) se han convertido en la especie vegetal dominante. Aun así, algunas especies nativas como el álamo (*Populus fremontii*), sauces (*Salix gooddingii*) y mezquites (*Prosopis* spp) han sobrevivido gracias a algunos eventos de descargas aislados (Nagler et al., 2008).

Después de 1981, se produjeron descargas extraordinarias (volúmenes no contabilizados en la entrega normal estipulada en el Tratado de 1944), de entre 100 y 800 m³/s, al Delta y Golfo de California durante el evento climatológico conocido como El Niño durante 1983 a 1988, en 1993 y de 1997 a 2000, además de pequeños derrames administrativos de 2 a 5 m³/s de agua para uso agrícola que no se utilizó (Nagler et al., 2008). Estos flujos mejoraron el ecosistema ribereño germinando nuevos álamos y sauces, propiciando el mejoramiento del hábitat para las aves y otros animales salvajes, además de controlar la salinidad en el suelo y el acuífero, este último es el que normalmente sostiene las necesidades de agua de la vegetación ribereña apoyado de los flujos de retorno agrícola (Nagler et al., 2008).

Después de algunas investigaciones sobre los efectos que tuvieron las descargas extraordinarias al cauce del RC y las nuevas corrientes del pensamiento por restaurar el hábitat que ha sido alterado antropogénicamente, en 2012 se firmó el Acta 319 del Tratado de 1944 entre México y Estados Unidos, asignando 195 hm³ de agua para flujos ambientales hacia el Delta del RC, durante un periodo de cinco años (2013 a 2017). De los 195 hm³, se estableció que un volumen de 130 hm³ fuesen destinados en un evento denominado como flujo pulso que intentaba recrear la forma del hidrograma natural de primavera durante el periodo de germinación de las especies vegetativas nativas para promover el transporte y reclutamiento de semillas. Además, se destinaron 65 hm³ para flujos base, los cuales serían para el mantenimiento y conservación de los sitios de restauración establecidos.

Durante estos eventos, se logró una conectividad longitudinal a lo largo de todo el corredor ribereño del río hasta conectarse con el Golfo de California (Ramírez-Hernández et al., 2017). Durante este evento el 91% del flujo pulso se infiltró debido a las zonas de inundación fuera del canal principal, donde el agua se evaporó o se infiltró, además de las tasas de infiltración de la zona seca del río con profundidades al nivel freático de alrededor de 15 m, lo cual no proporcionó un beneficio para la vegetación ribereña. A partir de estos resultados se propuso que el diseño de descargas ambientales futuras fuera con caudales menores a la capacidad de conducción del cauce principal para minimizar las pérdidas por infiltración (Ramírez-Hernández et al., 2017).

Al término del Acta 319, se firmó el Acta 323 como una continuación de la implementación de flujos ambientales en el Delta, la cual estipuló como meta un volumen promedio anual de 55 hm³, además del objetivo de expandir las 435 ha existentes de hábitat nativo restaurado 1,700 ha de hábitat. Esta Acta tiene una duración de 9 años, de 27 de septiembre del 2017 a 31 de diciembre 2026 (CILA, 2012).

Actualmente, el RC y su corredor ribereño, desde la PDM hasta el Golfo de California se encuentran secos en la mayoría de su recorrido, con la excepción de la parte superior del corredor ribereño, en la zona limítrofe, en esta zona el cauce se encuentra inundado hasta 17 km aguas debajo de la PDM producto del retorno agrícola, las pérdidas de la presa y canales adyacentes. Otro segmento inundando del Río Colorado, se encuentra 75 km aguas abajo de la PDM, esta inundación se extiende por 22 km, la cual es producto del retorno agrícola del Valle de Mexicali (Ramírez-Hernández et al., 2013). Desde los años 2000, organismos de la sociedad civil e instancias gubernamentales han implementado varios esfuerzos para conservar y restaurar secciones del corredor ribereño como sitios de hábitat nativo para especies de aves nativas y migratorias, así como de mamíferos, reptiles e insectos. Lo anterior, con apoyo de la academia realizando investigaciones científicas que proporcionaran información importante como elementos de diseño de los sitios. A partir de las investigaciones científicas antes mencionadas se determinaron sitios prioritarios y potenciales de restauración, ubicados a lo largo del corredor incluyendo la zona limítrofe del RC. De 2004 a 2018 se han creado zonas de restauración en la zona ribereña del Río Colorado con una extensión total de 446 ha: 1) Miguel Alemán, ubicado en la zona limítrofe del RC a 28 km aguas abajo de la PDM, 2) Chausse y 3) complejo Laguna Grande, estos dos últimos ubicados en alrededor de 75 km aguas abajo de la PDM (CILA, 2020).

La zona limítrofe ha sido estudiada e incluida en investigaciones por diferentes investigadores: Tetra Tech, Inc. (2004), Tiegs et al. (2005), Glenn et al. (2008), Ramírez-Hernández et al. (2013), Mueller et al. (2015), Mueller et al. (2017), Rodríguez-Burgueño et al. (2017) y Gómez-Sapiens et al. (2020), entre otros. Esta zona constituye los primeros 30 kilómetros del RC, que se encuentran dentro del Lindero Internacional Norte (LIN) y el Lindero Internacional Sur (LIS) (Figura 2). Para esta investigación, la zona limítrofe iniciará desde la PDM hasta el puente que cruza el RC para conectar las ciudades de San Luis Río Colorado, Sonora y Mexicali, Baja California. Esta zona esta confinada dentro de los bordos de contención construidos a ambos márgenes del RC en Estados Unidos y México para conducir flujos extraordinarios y evitar inundación fuera de estos bordos con una altura de 6 metros (Zamora-Arroyo et al., 2001; Nagler et al., 2008; Ramírez-Hernández et al., 2013). Las terrazas de inundación entre los bordos varían entre segmentos menores a 1 km hasta mayores de 4 km (Mueller et al., 2017), además de contar con varios meandros, la construcción de los bordos de

contención se diseñaron para una descarga máxima de $3,960 \text{ m}^3/\text{s}$, sin embargo esta capacidad se ha ido disminuyendo por la modificación de la geometría interna del corredor (Glenn et al., 2008).

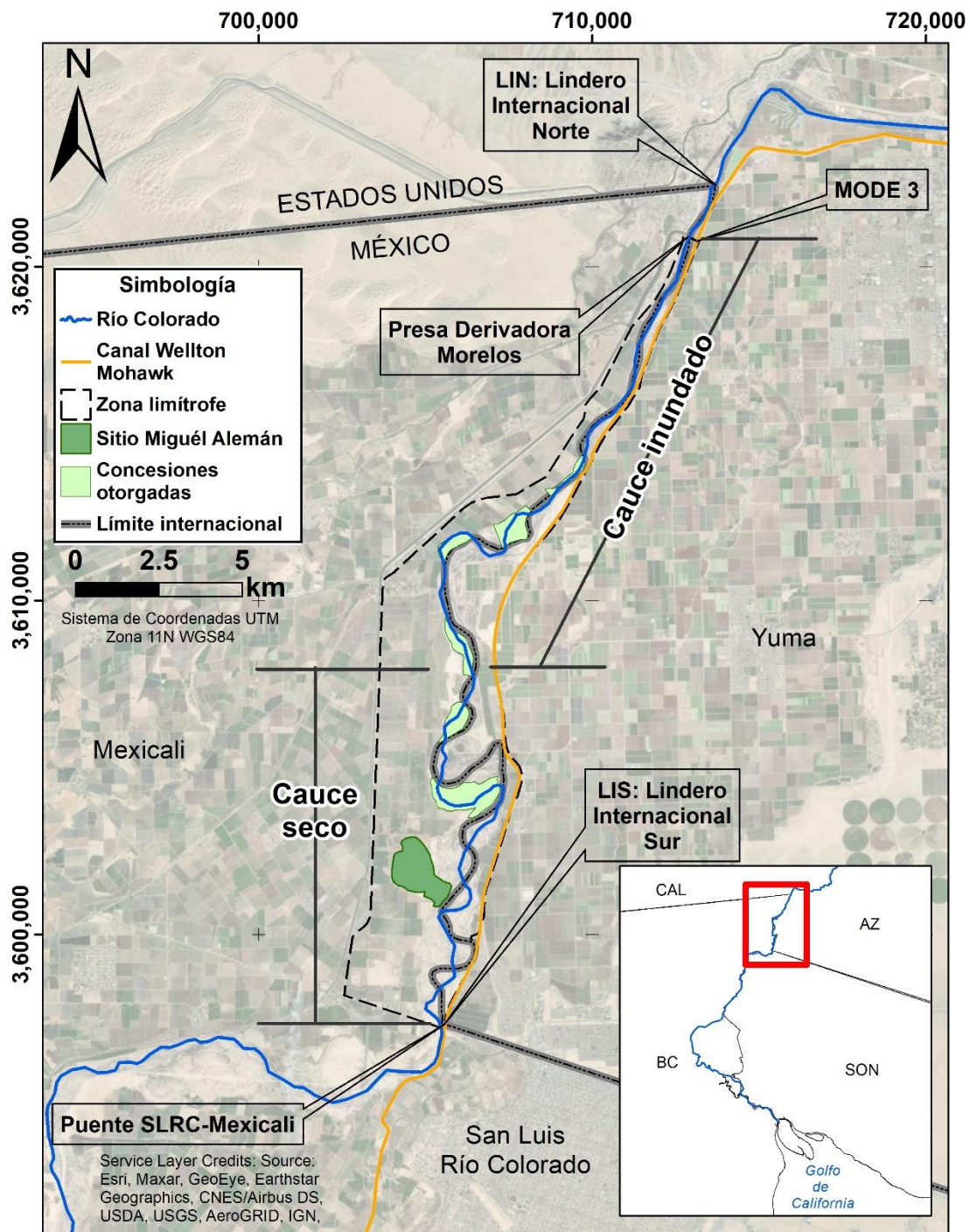


Figura 2. Zona limítrofe del Río Colorado

Algunos trabajos de investigación anteriores en el corredor ribereño del Río Colorado se han centrado en realizar modelos de flujo superficial buscando proporcionar datos para la restauración ribereña como lo es el área máxima inundada con el menor gasto posible (Quezada, 2007; Salcedo-Peredia, 2014), proponiendo caudales de entre 4 a 7 m³/s, sin embargo, se han limitado a modelos en estado estacionario, lo cual, no permite observar el comportamiento del flujo a través de un determinado tiempo. Se han realizado diseños de un canal piloto con una capacidad de conducción de hasta 425 m³/s (TetraTech, 2004) sin embargo solo fue propuesto como medida de seguridad ante el desfogue en la PDM por excedentes. De igual manera, se han realizado modelos acoplado el comportamiento del agua superficial y subterránea (Rodríguez-Burgueño, 2017), utilizando el modelo MODFLOW-DFW (onda difusa) en la zona seca del Río Colorado (posterior al kilómetro 21 aguas de abajo de la PDM aproximadamente) donde se creó un hidrograma constante que permitiera mantener inundado el cauce en la zona de puente SLRC-Mexicali, además de identificaron zonas donde la infiltración es mayor que el algunas otras del corredor ribereño.

Se han realizado diferentes investigaciones sobre la respuesta del corredor ribereño ante una descarga proveniente de la PDM, donde el comportamiento que tiene el acuífero de recarga y abatimiento en la zona limítrofe durante largos periodos de tiempo, fue afectado por las descargas ocurridas en 2009 y 2010 en la PDM y extracciones de agua subterránea de la zona (Ramírez-Hernández et al., 2013). Por su parte, el acuífero mostrará un comportamiento en paralelo a una descarga proveniente de la PDM, como el Flujo Pulso en el 2014, además de esto, la zona seca, posterior al kilómetro 17 aguas abajo de la PDM, mostrará un mayor cambio con respecto a la zona húmeda (Kennedy et al., 2017).

La respuesta ecológica también ha sido documentada, sin embargo, posterior al Flujo Pulso se encontraron hallazgos de la descarga de flujos ambientales, donde se infería que un caudal como el del Flujo Pulso, no impulsaría un evento significativo de reclutamiento de *P. fremontii* y *S. goodingii*, al menos que previo a las descargas, se realizara un mantenimiento al corredor ribereño, como lo es la remoción de vegetación y clasificación de la tierra a utilizar por diferentes hábitats, ya que es necesario un suelo desnudo y húmedo para la germinación de semillas, y que se necesitaría mantener una profundidad del nivel freático menor a dos metros para para el crecimiento y supervivencia de álamos y sauces (Shafroth et al., 2017).

Analizar la respuesta hidrológica y geohidrológica ante flujos de entre 6 y 8.5 m³/s durante un intervalo de tiempo de dos meses puede generar información esencial para el diseño y administración de sitios de restauración futuros en el corredor ribereño de la zona limítrofe.

Generar un modelo que describa el comportamiento de un flujo con descargas controladas de entre 5 y 10 m³/s, las cuales están limitadas a la capacidad de conducción del Río Colorado, es de vital importancia para estimar el área inundada, la cual es vital para la flora y fauna acuática nativa y migratoria.

CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO

4. 1. HIDROLOGÍA

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos (Chow, 1964).

Ha sido dividida tradicionalmente para el estudio de los procesos hidrológicos en los continentes en:

- Hidrología superficial: describe la relación entre lluvia y escurrimiento lo cual es de importancia para los diversos usos del agua, ya sea doméstico, urbano, agrícola o industrial, así como para el control de inundaciones, la generación de energía eléctrica, el diseño de los sistemas de drenaje rural y urbano y el comportamiento del flujo del agua en canales abiertos-naturales como son los ríos y canales artificiales. Describe la dinámica de flujo del agua en sistemas superficiales (ríos, canales, corrientes, lagos, etc.) (Chow, 1964).
- Hidrología subterránea: Estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y resecas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación (Mijailov, 1985).

4. 1. 1. HIDRÁULICA

Esta es la rama de la física que se encarga del estudio de fluidos que se encuentran en reposo o en movimiento, el cual puede estar en movimiento en un conducto completamente cerrado sujeto a la presión ejercido por este o en uno con superficie libre sujeto a la presión atmosférica (Giles, 1991; Chow & Saldarriaga, 1994).

El cauce de un río natural, los canales de riego, los drenes agrícolas son algunos de los ejemplos de conductos con superficie libre, en los cuales, el fluido es impulsado debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del fluido está en contacto con la atmósfera. En los conductos sometidos a la presión atmosférica, la posición de la superficie libre puede modificarse con el tiempo y el espacio (French, 1988; Chow, 1994). De acuerdo con su origen se clasifican en:

- Canales naturales: Son todos aquellos que se han generado por acción de la naturaleza y donde los efectos antropogénicos son mínimos, estos varían en tamaño, y presentan una geometría irregular, algunos ejemplos de estos son los arroyos, ríos y estuarios de mareas (French, 1988; Chow, 1994). La sección transversal de un canal natural es generalmente de forma muy irregular y variable durante su recorrido, presenta diferentes cambios de dirección y las características de rugosidad también son variables longitudinal y transversalmente (Ruíz, 2008).
- Canales artificiales: Son todos aquellos diseñados y construidos antropogénicamente, tales como; canales de riego, control de inundaciones, alcantarillado pluvia, etc. Las variables geométricas de estos canales suelen ser controladas (French, 1988; Chow, 1994).

4. 1. 2. TIPOS DE FLUJO

La clasificación de un flujo está determinada por diferentes variables (cambios de tirante con respecto al tiempo y espacio, viscosidad, gravedad y fuerzas de inerciales) que influyen en el comportamiento de éste (French, 1988; Giles, 1991; Chow & Saldarriaga, 1994).

Al utilizar el tiempo como criterio, el flujo puede clasificarse como *flujo permanente* y *flujo no permanente*. Un flujo es considerado *permanente* cuando el tirante no cambia durante el intervalo de tiempo considerado. El flujo es *no permanente* si el tirante cambia con respecto al tiempo.

Si el espacio es utilizado como criterio, el flujo es clasificado como *flujo uniforme* si el tirante no varía en cada sección de un canal o como *flujo variado* (también llamado flujo no uniforme) donde el tirante varía en cada sección de un canal.

Chow (1994) resumió la clasificación de flujo utilizando la variabilidad del tirante con respecto al tiempo y espacio de la siguiente manera:

A. Flujo Permanente

1. Flujo uniforme
2. Flujo variado
 - a. Flujo gradualmente variado
 - b. Flujo rápidamente variado

B. Flujo no permanente

1. Flujo uniforme no permanente
2. Flujo no permanente (flujo variado no permanente)
 - a. Flujo gradualmente variado no permanente
 - b. Flujo rápidamente variado no permanente

El comportamiento de un flujo dentro de un canal abierto está gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo, utilizando esos criterios, el flujo puede considerarse como *laminar* si las fuerzas viscosas son mayores en relación a las fuerzas inerciales. El flujo es considerado *turbulento* si las fuerzas viscosas son menores en relación con las fuerzas inerciales. La base para esta clasificación es un parámetro adimensional conocido como número de Reynolds, definido por:

$$R = \frac{V * Rh}{\nu}$$

Donde:

V = Velocidad promedio

Rh = Radio hidráulico, el cual es considerado como la relación entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado de la misma

ν = Viscosidad cinemática

Para fines prácticos, en rango de los comportamientos se propone:

$R \leq 500$	Flujo laminar
$500 \leq R \leq 2000$	Flujo en transición
$R \geq 2000$	Flujo turbulento

El efecto de la gravedad también juega un papel importante en la clasificación del tipo de flujo, el efecto de la gravedad se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * D}}$$

Donde:

V = Velocidad promedio

g = aceleración de la gravedad

D = Profundidad hidráulica, la cual está definida como el área de la sección transversal del canal dividida por el ancho de la superficie libre

Si F es menor que uno, el flujo es considerado como un *flujo subcrítico*, aquí la velocidad es baja y se describe como un flujo tranquilo y lento. Cuando F es igual a uno, el flujo es considerado como *flujo crítico*. Si F es mayor que uno, el flujo es considerado como *supercrítico* y el flujo se describe como rápido.

[Chow \(1994\)](#) propuso una clasificación combinando el efecto de la viscosidad y de la gravedad.

- 1) Subcrítico-laminar: cuando F es menor que uno y R está en el rango laminar.
- 2) Supercrítico-laminar: cuando F es mayor que uno y R está en el rango laminar.
- 3) Subcrítico-turbulento: cuando F es menor que uno y R está en el rango turbulento.
- 4) Supercrítico-turbulento: cuando F es mayor que uno y R está en el rango turbulento.

4. 1. 3. RUGOSIDAD

Una de las variables que más influye en el movimiento del agua en canales abiertos es la rugosidad, ya que produce pérdidas de energía en el fluido. Esta variable depende del tipo de material del cauce del río, de la cantidad de vegetación que existe en él y la existencia de meandros. Los coeficientes de rugosidad representan la resistencia del movimiento en los cauces y llanuras de inundación (Brunner, 2020).

4. 2. MODELO HIDRÁULICO

La modelización hidráulica permite analizar la conducta hidráulica de un río a partir de caudales de entrada, en condiciones de régimen crítico o supercrítico, dando información sobre el nivel del agua, su profundidad, velocidades, las zonas de desbordamiento, entre otros. De este modo se puede prever cuáles sectores del río son incapaces de transportar seguramente el caudal correspondiente a eventos extremos de precipitación y escurrimiento y/o zonas de inundación (Solís et al., 1991).

Uno de los principios físicos más aplicados para estudiar el comportamiento de un flujo en la hidráulica de canales es el de conservación de la masa o ecuación de continuidad, el cual puede ser utilizado para una sección transversal dada la siguiente fórmula (Chow et al., 1988).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0$$

Donde:

$\frac{\partial Q}{\partial x}$ = Cambio de caudal a través de la dirección "x"

$\frac{\partial A}{\partial t}$ = Cambio en el área de la sección transversal respecto al tiempo

q = flujo lateral

Otra ecuación fundamental aplicada en el estudio de la hidráulica de canales es la ecuación de momento, la cual es derivada de la segunda Ley de Newton.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e \right) - \beta q v_x + W_f B = 0$$

Donde:

Q = Gasto en la sección transversal

A = Área de la sección transversal

β = Coeficiente de momento, el cual está dado por la distribución de velocidades del flujo en la sección transversal

g = Aceleración de la gravedad

S_f = Pendiente de energía derivada de la fricción generada entre el flujo y las paredes del conducto

S_e = Pendiente de energía derivada por las pérdidas de energía por contracción y expansión

W_f = Factor de la fuerza del viento

h = Elevación del espejo de agua

q = Flujo lateral entrante
 v_x = Velocidad en dirección "x"
 B = Ancho del espejo de agua

Las ecuaciones anteriores son las que gobiernan el comportamiento para un flujo transitorio, en una dirección y sujeto a la presión atmosférica (Chow et al., 1988), y asumen que las fuerzas actuante en el cuerpo de agua predominan en la dirección "x" y las fuerzas verticales son pequeñas en comparación con la dirección "x" y pueden ser despreciables (Brunner, 2020).

Los principios descritos anteriormente han sido ampliamente utilizados en modelos hidráulicos que simulan el comportamiento hidráulico en un evento de descarga en la dirección longitudinal al cauce (Horritt & Bates, 2002; Zellou & Rahali, 2017; Gordillo et al., 2019; Garambois et al., 2020; Zainalfikry et al., 2019), de igual manera, se han desarrollado modelos que pueden simular el comportamiento longitudinal y transversal que tiene un río ante un evento de descarga (Quiroga et al., 2016; Farooq et al., 2019; Rangari et al., 2019; Kumar et al., 2020; Alen et al., 2021; Zeiger & Hubbart, 2021). El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*) desarrolló el programa HEC-RAS 6.0, un programa que permite realizar modelos hidráulicos realizando cálculos en una dimensión con flujo constante o variable y, cálculos de flujo bidimensionales con flujo inestable, el cual utiliza los principios de conservación de masa y ecuación de momento (Brunner, 2020). En esta investigación se optó por utilizar dicho programa para realizar un modelo bidimensional de flujo inestable que simule el comportamiento que tendrá el cauce del Río Colorado en la zona limítrofe durante un evento de descarga.

HEC-RAS 6.0 utiliza las ecuaciones de continuidad y momento para realizar los cálculos longitudinales, verticales y transversales, donde las fuerzas que actúan en el cuerpo de agua predominan a través del cauce del río y lateralmente hacia las llanuras de inundación (Brunner, 2020). El grupo de ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations) asumen que el flujo es incompresible con una densidad y presión hidrostática uniforme. Estas ecuaciones son escritas en forma de ecuaciones diferenciales parciales:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} - q = 0$$

Ecuación de momento en dirección X

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

Ecuaciones de momento en dirección Y

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

Donde:

h = Tirante del espejo de agua

u = Velocidad en la dirección “x”

v = Velocidad en la dirección “y”

y = Distancia en la dirección lateral (plano “y”)

H = Elevación del espejo de agua

ν_t = Coeficiente de viscosidad horizontal Eddy

c_f = Coeficiente de fricción

f = Parámetro de Coriolis

Los términos del lado izquierdo representan la aceleración del fluido, mientras que los términos del lado derecho representan las fuerzas internas y externas que actúan en el fluido (Brunner, 2020).

HEC-RAS también ofrece una simplificación en la resolución de este sistema de ecuaciones, utilizando la aproximación de difusión de onda, de tal manera que solo los términos de aceleración son los que se introducen en las ecuaciones de momento (cambios en la velocidad con respecto al tiempo y espacio), esta forma de ecuación solo contiene la aceleración de gravedad, las pérdidas de energía por fricción y las fuerzas de presión hidrostática, además de que los tiempos de cómputo se disminuyen en comparación con el proceso de resolución de las ecuaciones de momento (Brunner, 2020; Quiroga et al., 2016).

4. 2. 1. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA DE FLUJO

El modelado en dos dimensiones de HEC-RAS permite utilizar el esquema de solución de volumen finito para la resolución de las ecuaciones utilizadas en el desarrollo del modelo, este algoritmo fue desarrollado para utilizarlo en una malla estructurada, la cual puede ser de 3 a 8 lados por celda con el dimensionamiento que el usuario considere mejor, además esta malla puede ser refinada utilizando las herramientas que están integradas en el programa. Las caras de cada celda son las que controlan el movimiento de flujo de una celda a otra y en el centro de cada celda se calcula la elevación de la superficie del agua para cada celda.

HEC-RAS procesa el modelo digital de elevaciones y la malla para desarrollar relaciones de elevación-volumen para cada celda y curvas de propiedades hidráulicas para cada cara de celda (elevación vs perímetro mojado, área y rugosidad).

Las condiciones de frontera son las que dominan el comportamiento del modelo en los límites de la malla y que proporcionan la información con la cual trabajara éste. Existen cuatro tipos de condiciones de frontera que se pueden utilizar en HEC-RAS:

- Hidrograma de flujo
- Hidrograma de nivel del espejo de agua
- Profundidad normal (normal depth)
- Curva de gastos (Rating curve)

Las dos primeras condiciones son utilizadas en el límite de la malla en donde ingresará el flujo, mientras que las últimas dos condiciones solo pueden ser utilizadas en ubicaciones donde el flujo saldrá de la malla.

Cuando se utiliza la condición de *profundidad normal*, el programa requiere que el usuario ingrese una pendiente de fricción para esa área. La pendiente de fricción no se conoce por lo que se puede ingresar la pendiente del terreno. La pendiente de fricción se utiliza en la ecuación de Manning para calcular la elevación de la superficie de agua.

Para la condición *curva de gastos* el usuario debe ingresar la elevación de la superficie del espejo de agua versus el caudal descargado (Brunner, 2020).

4. 3. INTERACCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y AGUA SUPERFICIAL

Las aguas superficiales y subterráneas no son componentes aislados del ciclo hidrológico, estos interactúan entre sí, comparten la fisiografía y clima. Esta interacción está gobernada por la posición de los cuerpos de agua superficial con respecto al sistema de flujo del agua subterránea, las características geológicas del fondo de ríos, lagos y humedales, y el tipo de clima de la región. Además el flujo del agua superficial, depende en gran medida de las características hidrogeológicas del material del que está compuesto el cauce y las llanuras de inundación, así como de su topografía (Sophocleous, 2002).

Las interacciones entre el agua superficial y el agua subterránea se dan a través de un flujo subterráneo lateral, a través del suelo no saturado, ya sea debido a eventos de precipitación y escurrimiento superficial donde el nivel del agua superficial incrementa, infiltrando el agua en las orillas propiciando la recarga en el acuífero. El volumen de esa recarga depende de la duración, la altura y la forma del hidrograma. Caso contrario, en las temporadas secas, el acuífero, debido al nivel de agua subterránea, puede descargar agua al cauce del río (Sophocleous, 2002), a esta descarga se le conoce como flujo base, el cual se mantiene por un tiempo prolongado con cierta regularidad (Custodio & LLamas, 1983; O'Brien, 1980).

4. 4. VEGETACIÓN RIBEREÑA

Se refiere a la vegetación establecida a lo largo de las márgenes y riberas de los ríos, así como las terrazas altas que se encuentran afectadas por el régimen hidrológico. Esta vegetación que se desarrolla cerca de los ríos está influenciada por las variaciones en el nivel freático y la ocurrencia de inundaciones. La extensión superficial de las zonas ribereñas puede variar enormemente de 3 a 50 metros en ambos lados de los cuerpos de agua (Ye et al., 2013; Bettinger et al., 2016; Vesipa et al., 2017).

La mayor parte de la vegetación ribereña se mantiene de las aguas subterráneas poco profundas disponibles en las márgenes de los ríos. A este tipo de vegetación se le conoce como freatófita (sujeta a los niveles freáticos) y conforman los ecosistemas dependientes del agua subterránea. (Hultine et al., 2020).

4. 5. REGIMEN HIDROLÓGICO

Los ríos tienen un régimen de flujo natural, que es el encargado de definir, organizar y controlar el ecosistema, los componentes críticos para la estructura de un ecosistema ribereño son: la magnitud de descarga, refiriéndose a esta como el volumen total que atraviesa por un punto en determinado

tiempo, la frecuencia con la que esto ocurre, la duración de los eventos de descarga, los tiempos en lo que lleva a cabo dichos eventos y la tasa de cambio que existe entre un evento y otro (Poff et al., 1997; Lytle & Poff, 2004; Palmer & Ruhi, 2019).

Las actividades humanas han modificado los regímenes de flujo de los ríos afectando los patrones establecidos de variación hidrológica natural, alterando así la dinámica del hábitat y creando nuevas condiciones a las cuales la biota nativa no está acostumbrada y puede derivar en la evolución de especies, extinción o intrusión de especies no nativas (Poff et al., 1997). Existen diferentes maneras en que el ser humano ha alterado los regímenes naturales de los ríos (Poff et al., 1997), sin embargo, tres son las principales y que más impactos negativos han causado a la biota ribereña: la construcción de presas, la urbanización y la extracción de agua subterránea (Poff et al., 1997; Palmer & Ruhi, 2019).

Las presas son construidas para el manejo de los flujos de un río, por ejemplo, para detener los caudales máximos. En presas hidroeléctricas, al operar los ciclos de generación de energía eléctrica, pueden crear patrones de flujo que varían rápidamente dependiendo de la demanda de energía. Además, las presas pueden alterar la temperatura del agua, así mismo reducen o detienen por completo los volúmenes de sedimentos aguas abajo, por mencionar los más importantes efectos que pueden ocasionar (Poff et al., 1997; Palmer & Ruhi, 2019).

La urbanización también trae consigo efectos negativos en los patrones de los ríos creando grandes extensiones de superficie impermeable y dependiendo de la distribución de la cuenca puede traer consigo grandes eventos de descarga a los cuales la estructura de los ríos no está adaptada, además la precipitación que escurre en las manchas urbanas adquiere diferentes contaminantes, así como un cambio de temperatura por estar en contacto con los diferentes materiales del suelo y las construcciones (Poff et al., 1997; Palmer & Ruhi, 2019).

Una extracción excesiva del agua subterránea tiende a bajar los niveles del manto acuífero, si este no tiene algún tipo de recarga de agua o la recarga es menor a la extracción. En zonas donde la vegetación es de tipo freatófita esta profundización del nivel freático puede generar estrés en la vegetación ribereña, debido a que las raíces no alcanzan la profundidad del agua, ocasionado la degradación de su ciclo biológico (Poff et al., 1997; Ye et al., 2013; Vespa et al., 2017; You & Liu, 2018; Hultine et al., 2020).

4. 5. FLUJOS AMBIENTALES

De acuerdo con la cooperación binacional entre México y Estados Unidos para la restauración, conservación y mantenimiento del hábitat ribereño del río Colorado considera a los flujos ambientales como aquel volumen de agua entregado con propósitos ambientales, los cuales son principalmente mantener los sitios de restauración ambiental y beneficios otros sitios en el corredor ribereño del Delta del Río Colorado y su estuario, mejoramiento de la vegetación y de la vida silvestre, generar beneficios sociales y de recreación (CILA, 2012). En esta investigación se utilizó como un mismo concepto los flujos ambientales y caudales ambientales.

4. 6. TIPOS DE RESTAURACIÓN

Las organizaciones no gubernamentales son las encargadas de administrar los sitios de restauración existentes del Delta del Río Colorado. La selección de un sitio de restauración implica un conjunto de trabajos realizado por un grupo multidisciplinario (IBWC, 2018), para esta investigación, solo se seleccionaron las variables hidrológicas como elementos de diseño de tipos de restauración, analizando el comportamiento del agua superficial y subterránea debido a las descargas del evento analizado en este trabajo.

El Grupo de Trabajo Ambiental está constituido por expertos de México y Estados Unidos, bajo los lineamientos de la Acta 323, el análisis de investigaciones del hábitat del Delta, así como las propias experiencias aprendidas por los grupos encargados de administrar los sitios de restauración existentes han propuesto tipos de hábitat de acuerdo con el tipo de especies de plantas nativas (IBWC, 2018):

- Llanuras de inundación y lagunas: Terrazas inundadas debidas a la acción de la marea en el Delta.
- Marismas: humedales de agua dulce y salobre con vegetación emergente.
- Cuerpos de agua: humedales de agua dulce con vegetación emergente
- Bosque de mezquite: Bosques ribereños donde la vegetación predominante son las especies de mezquites, mezquite de miel (*Prosopis glandulosa*) y mezquite tornillo (*Prosopis pubescens*), con presencia de arbustos en menor densidad como el sauce de filtración (*Baccharis salicifolia*), sauce baccharis (*Baccharis salicina*) y saltbush (*Atriplex spp.*).
- Bosque de Sauces y Álamos: Bosques ribereños donde la vegetación predominante son las especies de álamo (*Populus fremontii*), sauce (*Salix gooddingii*), sauce coyote (*Salix exigua*), y en menor densidad de sauce rezumadero (*Baccharis salicifolia*), sauce baccharis (*Baccharis salicina*), y otras especies arbustivas y herbáceas nativas.
- Terrazas altas: Vegetación ribereña en terrazas superiores que pueden incluir la vegetación anterior descrita pero que dominan las especies como el palo verde (*Parkinsonia spp.*), Wolfberry (*Lycium spp.*) Y / o saltbush (*Atriplex spp.*).

Para la sección del tipo de restauración, el Grupo de Trabajo Ambiental ha propuesto cuatro métodos de restauración, los cuales dependen de los trabajos a realizar y de las condiciones previas a la restauración del lugar (IBWC, 2018).

- Tipo I: proyectos que incluyen entregas de agua al cauce principal del río y/o áreas de remanso para mejorar la vegetación existente.
- Tipo II: proyectos que incluyen la restauración Tipo I, más la eliminación de vegetación no nativa y la plantación de estacas.
- Tipo III: proyectos que incluyen restauración Tipo II más instalación de infraestructura de riego, nivelación topográfica y nivelación de terrazas, plantación de esquejes y/o estacas y/o siembra y mantenimiento de vegetación mediante riegos.
- Tipo IV: proyectos que incluyen restauración de Tipo III más excavación y/o dragado del sitio para rehabilitar ríos y meandros abandonados, además de la instalación de estructuras de control de para tirantes mayores a 0.5 m.

CAPÍTULO 5. ÁREA DE ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

5. 1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es particularmente importante en el Delta del Río Colorado por su ubicación geográfica. Por un lado, debido a que se encuentra el límite territorial entre México y Estados Unidos, por lo que representa un sitio de interés para ambos países; además se estima que por esta zona ingresan aproximadamente 152.6 hm³ anuales como recarga subterránea horizontal al Acuífero Valle de Mexicali, el cual presenta un déficit de 265.12 hm³ (CILA, 2020). Por otro lado, La zona limítrofe se encuentra dentro del sitio Ramsar Sistema de Humedales Remanentes del Delta del Río Colorado, declarado desde 2008, en la cual se tiene humedales ribereños y zonas de inundación asociadas al corredor ribereño donde se desarrolla zonas arboladas de vegetación ribereña, las cuales brindan zonas de anidación y descanso para especies de aves migratorias y residentes, de las cuales se tiene un registro aproximado de 350 especies, algunas protegidas por México y Estados Unidos. La vegetación y los cuerpos de agua brindan un hábitat único para las especies migratorias como descanso (Ramsar, 2008).

Para este proyecto de investigación el área de estudio comprende una porción de la zona limítrofe, en el extremo Norte su límite es la Presa Derivadora Morelos y en el extremo Sur termina en el puente SLRC-Mexicali, el cual cruza el cauce del Río Colorado. El polígono de estudio se determinó de tal manera que su área comprende (1) aproximadamente 35 kilómetros del cauce principal del Río Colorado entre las coordenadas 712,857 Este, 3'620,866 Norte en su extremo Norte y 705,448 Este, 3'597,196 Norte UTM WGS84 Zona 11 N en el extremo Sur, (2) las márgenes del río, (3) las planicies de inundación y las terrazas medias, acotadas entre las zonas de terrazas altas que actualmente se utilizan como parcelas para la agricultura, (figura 3).

Durante el año 2019 se realizaron actividades de mantenimiento en el canal Wellton Mohawk que conduce agua de retorno agrícola de Yuma, Arizona, por lo que fue necesario desviar estos flujos hacia el cauce del Río Colorado. La descarga se realizó a través de la estructura de desvío MODE 3 (*Main Outlet Drain Extension*) (figura 3), las descargas iniciaron el 5 de septiembre de 2019 y culminaron el 5 de enero de 2020 (USBR, 2019).

La construcción del canal Wellton Mohawk fue realizada para la conducción del agua de desecho agrícola desde la planta desalinizadora de Yuma, Arizona y posteriormente enviar los flujos hacia México por el LIN, para que el volumen que conducía formara parte del volumen de agua pactada en el Tratado de 1944 (Furnish & Ladman, 1975). Posteriormente, el flujo del canal Wellton Mohawk no formaría parte del Tratado de 1944, por lo que se construyó una extensión en territorio mexicano, el cual conduciría los flujos hasta el Delta del Río Colorado (Cohen, 2006). Las descargas de estos flujos generaron el crecimiento de densos tulares, lagunas y planicies lodosas, extendiendo el humedal conocido como Ciénega de Santa Clara (Zengel et al., 1995; Zamora-Arroyo et al., 2005).

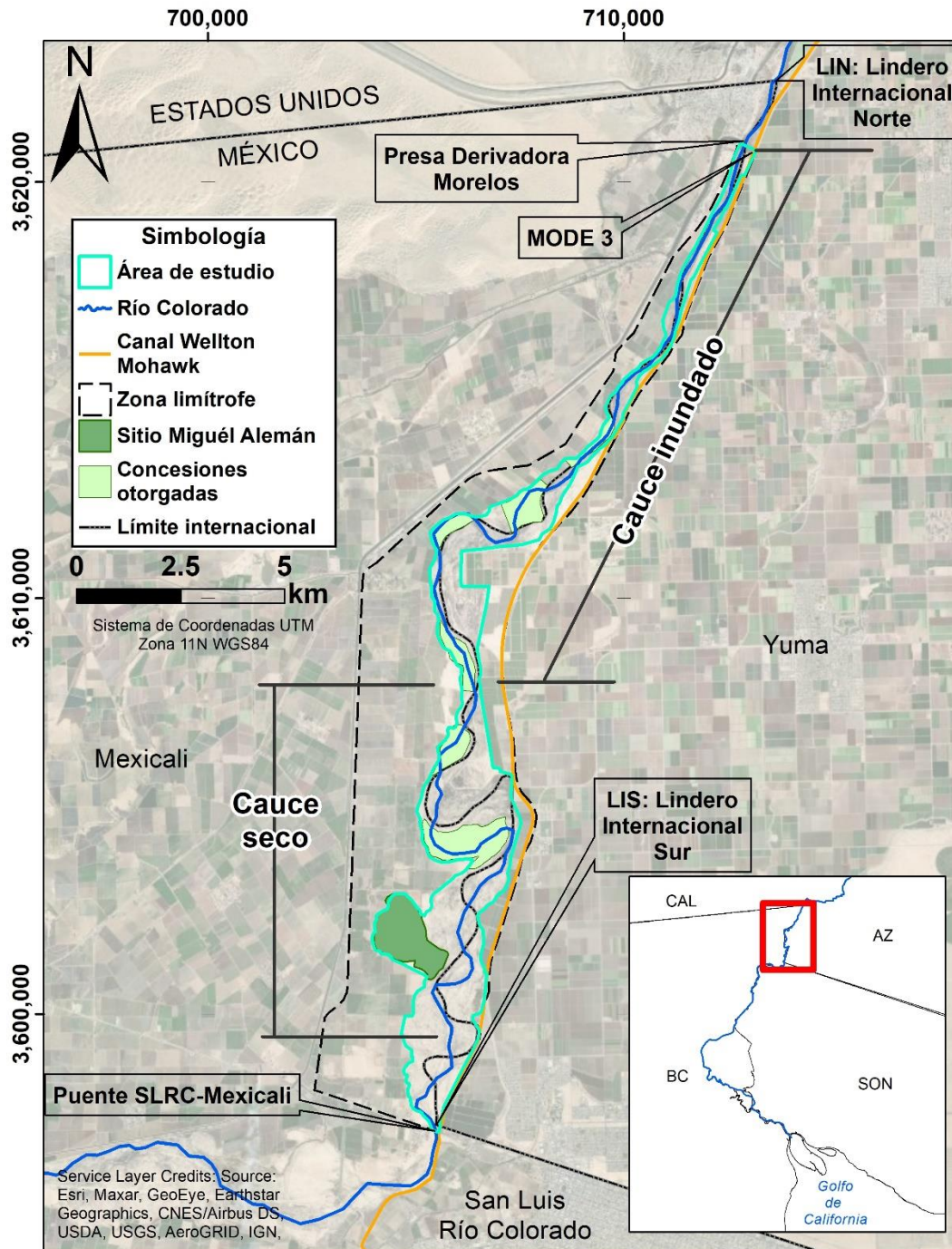


Figura 3. Área de estudio dentro de la zona limítrofe

5. 2. HIDROLOGÍA

Previo a la construcción de las presas en el cauce del Río Colorado y sus tributarios, éste mantenía un caudal promedio diario de 600 m³/s, e inclusive, durante el periodo de 1905 a 1936, se presentaron caudales que excedían los 5,000 m³/s. En las décadas de 1930 a 1960 se presentó un cambio en el régimen de flujo del Río Colorado, este de origen antropogénico. La construcción de las presas

Hoover, Imperial, Parker, Headgate Rock, Morelos, Davis, Palo Verde y Glen Canyon permitieron el desvío y almacenamiento de del agua captada en la cuenca, abasteciendo así los valles agrícolas, ciudades e industrias (Mueller et al., 2017)

La Presa Derivadora Morelos finalizó su construcción en 1950, esta presa no cuenta con un vaso almacenador, por lo que cualquier flujo que exceda la capacidad de conducción de su desviación fluirá aguas abajo de ésta. Durante 1950 a 1963 se registró un caudal promedio de 93 m³/s, además de un caudal máximo diario de 581 m³/s registrado el en LIS (figura 3), el flujo de agua en esta sección solo se interrumpió durante 14 días (de 1950 a 1963), estas inundaciones provenían de flujos que se presentaban en primavera, debido al deshielo de las capas de nieve acumuladas en la parte alta de la cuenca durante el invierno (Mueller et al., 2017). Posterior a 1963 con la finalización de la construcción de la presa Glen Canyon y otras obras hidráulicas en la cuenca alta del Río Colorado, la descarga promedio diaria en el LIS se redujo a 15 m³/s (Mueller et al., 2017).

Durante los inviernos de 1982, 1983 y 1984 se produjeron escorrentías importantes debidas al deshielo de las capas de nieve en la cuenca alta, las cuales, produjeron la liberación de volumen en todas las presas del Río Colorado, estas descargas llegaron al Delta (Tiegs & Pohl, 2005). Durante estas temporadas, en un sitio de monitoreo de flujos cercano al puente SLRC-Mexicali se registró un caudal máximo de 934 m³/s el 20 de agosto de 1983, además, mantuvo una descarga de más de 500 m³/s durante más de 250 días consecutivos. Después de abril de 1983, se mantuvo una descarga diaria promedio de 150 m³/s durante cuatro años consecutivos (Mueller et al., 2017). Posterior a los eventos antes descritos, la zona limítrofe entró en un periodo seco, el cual culminaría en 1993, donde el caudal máximo registrado en el LIS fue de 646 m³/s, el 7 y 8 de marzo del mismo año (Mueller et al., 2017).

Durante los finales de la década de 1990 y principios de la década de 2000, se presentaron flujos en la zona limítrofe, estos debido a una gran escorrentía en el río Gila y descargas de control en el embalse del lago Mead, el caudal registrado en el LIS superó los 200 m³/s, conectado el Río Colorado con el Golfo de California. Durante 2000 y 2001 el caudal máximo promedio diario superó los 100 m³/s (Mueller et al., 2017).

A finales de 2009 e inicios de 2010, se realizaron descargas controladas en el Río Colorado, provenientes de la PDM, se descargó un volumen total de 60.49 hm³, distribuido en ocho eventos de descarga, durante el periodo del 21 al 25 de enero de 2010, se liberó un caudal máximo de 156 m³/s en la PDM, registrando en el LIS solamente 6.9 m³/s. Posterior a esta descarga se liberaron 20.2 y 30.5 m³/s durante el periodo del 10 al 13 de marzo y durante el 9 al 17 de abril, respectivamente, lo cual permitiría que en el LIS se registrara caudales de 5.4 y 11.6 m³/s, respectivamente (Ramírez-Hernández et al., 2013).

En 2014, se realizaron descargas provenientes de la PDM con fines ambientales, estas descargas consistieron en dos eventos, uno denominado Flujo Pulso, el cual trató de imitar los flujos picos debido al deshielo de las capas de nieve acumuladas por las tormentas invernales (Pitt & Kendy, 2017). En el cual se liberaron 130 hm³ durante el 23 de marzo al 18 de mayo de 2014. El caudal máximo descargado durante el flujo pulso fue de 120 m³/s, siete días después de iniciadas las descargas, sin embargo, la descarga máxima registrada en el LIS fue de 71 m³/s (Mueller et al., 2017). El otro evento, denominado flujo base se descargaron 12 hm³, liberados de octubre del 2013 a

septiembre del 2014, el cual consistía en la descarga de flujos con caudales menores a 20 m³/s (Jarchow et al., 2017; Pitt & Kendy, 2017).

Actualmente, 17 km aguas debajo de la PDM se encuentran inundados, esto debido a las pérdidas de la propia presa, perdidas en el Canal Reforma y recarga por los campos agrícolas en ambos márgenes del Río Colorado (México y Estados Unidos). Posteriormente el cauce se encuentra seco hasta puente SLRC-Mexicali, siendo este un tramo de 18 km de cauce seco.

El nivel freático referido al nivel medio del mar en la zona húmeda del corredor ribereño de la zona limítrofe se encontraba a 28.81 m en promedio previo a las descargas provenientes del canal WM. Mientras que la zona seca tenía una elevación de 14.164 m en promedio. La diferencia entre los niveles anteriormente mencionado es de 14.646 m.

En la zona húmeda, el cauce del Río Colorado se comporta como un río ganador, donde el acuífero en los primeros cinco kilómetros descarga al cauce, posteriormente, el río invierte su comportamiento, donde el río descarga al acuífero. En el kilómetro 17 aguas abajo de la PDM, el acuífero se desconecta del Río Colorado. En esta zona seca, el acuífero tiene el comportamiento del acuífero regional, el cual es de Noroeste a Suroeste.

5. 3. GEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra dentro del Delta del RC, esta zona ha experimentado una serie de cambios en su configuración debido a tres eventos geológicos principales: 1) un periodo inicial de extensión y hundimiento, 2) una etapa intermedia de sedimentación marina y, 3) una etapa posterior de llenado de sedimentos, dominado en gran medida por el depósito de sedimentos del Río Colorado, y, en menor medida por depósitos aluviales provenientes de los márgenes de la cuenca (Pacheco et al., 2006). El Delta del RC se formó durante el Pleistoceno, cuando se depositaban sedimentos provenientes de la cuenca del RC por la zona Norte y ocurrían transgresiones del Golfo de California por la parte Sur (Van de Kamp, 1973)(Van de Kamp, 1973). Los sedimentos que se encuentran en la actualidad en la superficie son aluviones que transportaron los ríos Colorado y Gila, los cuales consisten en su mayoría en arenas intercaladas con lentes de arcilla. Esta unidad estratigráfica pertenece a la edad del Holoceno (Olmsted et al., 1973).

La morfología del cauce principal de la zona limítrofe ha sido relativamente estable durante los últimos 150 años, con algunas ligeras modificaciones en los meandros (Tiegs et al., 2005). Se infiere que las características de los depósitos fluviales bajo la cuenca y el lecho principal del Río Colorado se mantienen constantes hasta una profundidad aproximada de 5 km (Sumner, 1972).

5. 4. CLIMA

La clasificación del clima está basada en los datos de precipitación, de temperatura y de evaporación. La zona de estudio se caracteriza por tener un clima muy seco muy cálido a cálido con temperaturas medias anuales mayores a 22° C, señalado como BW(h') en la clasificación de Köppen modificada (García, 2004). En esta zona se presentan temperaturas promedio extremas de entre 38 a 50° C y tiene una extrema aridez, las temperaturas más cálidas se presentan durante el verano, además de contar con una precipitación media anual de 6 cm. La baja precipitación y las altas temperaturas que se

presenta, dan como resultado tasas de evaporación de entre 2 y 3.9 m anuales (Tiegs & Pohl, 2005; Ramírez-Hernández et al., 2015; Gómez-Sapiens et al., 2020).

5. 5. FLORA Y FAUNA

Las comunidades de flora que existen actualmente dentro de la zona de estudio se encuentran dominadas por una especie invasora, el pino salado (*Tamarix ramosissima*), reduciendo las áreas de cobertura de especies nativas como el álamo (*Populus fremontii*), sauce (*Salix gooddingii*), mezquites (*Prosopis* spp.) y el matorral, característicos de la zona, como la cachanilla (*Pluchea sericea*) (Pitt, 2001; Vandersande et al., 2001; Nagler et al., 2008; Hinojosa-Huerta et al., 2013; Pitt & Kendy, 2017; Gómez-Sapiens et al., 2020). Los 18 kilómetros aguas abajo de la PDM se encuentra permanentemente inundados debido a las filtraciones de agua que se dan por los campos agrícolas en ambos márgenes del Río Colorado (México y Estados Unidos), filtraciones provenientes del Canal Reforma ubicado en el territorio mexicano y filtraciones desde la PDM (Ramírez-Hernández et al., 2017) generando parches de vegetación densos en los márgenes del río de *Arundo donax*, *Phragmites australis*, *Typha* spp. y *Schoenoplectus* spp. (Gómez-Sapiens et al., 2020). Posterior a los 17 km, el río se encuentra totalmente seco y el nivel freático se encuentra a una profundidad que propicia que los árboles nativos se encuentren dispersos, en esta sección del río la vegetación se compone mayormente de *Tamarix ramosissima*, *Pluchea sericea* y *Prosopis* spp. (Gómez-Sapiens et al., 2020).

La zona cuenta con una gran diversidad de fauna, desde mamíferos, reptiles, aves residentes y migratorias, algunas de estas especies se encuentran protegidas a nivel nacional e internacional. En la fauna característica de mamíferos se pueden encontrar coyotes (*Canis latrans*), zorros (*Urocyon cinereoargenteus* y *Vulpes macrotis*) y *Lepus* spp. (CONABIO, 2020). También existe una variedad de reptiles y anfibios como las iguanas del desierto (*Callisaurus draconoides*, *Dipsosaurus dorsalis sonoriensis*), el monstruo de Gila (*Heloderma suspectum*), *Phrynosoma solare*, *Bufo alvarium*, *Kinosteron sonorense* y *Rana yavapaiensis*, la presencia de estos últimos tres es un indicador de la calidad del agua superficial (CONABIO, 2020; Zamora et al., 2005).

Existe una mayor diversidad de aves residentes y aves migratorias debido a que la zona se encuentra dentro de la franja de la Ruta Migratoria del Pacífico en América (*Pacific flyway*). Se tienen más de 250 especies de aves registradas en toda la zona deltaica del Río Colorado, algunas de las especies más destacables son: cernícalo americano (*Falco sparverius*), Codorniz chiquiri (*Callipepla gambelii*), Ralito negro (*Laterallus jamaicensis coturniculus*), Palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), Chorlito tildío (*Charadrius vociferus*), Tecolote llanero (*Athene cunicularia*), Chotocabras menor (*Chordeiles acutipennis*), Mosquero saucero (*Empidonax traillii*), Copeton grojiceno (*Myiarchus cinerascens*), Tordo sargento (*Agelaius phoeniceus*), Aguillilla coliroja (*Buteo jamaicensis*), Gorrion sabanero (*Ixobrychus exilis*), Garza (*Egretta thula*), entre otras muchas más. Algunas de estas especies se encuentran protegidas tanto por las leyes de México como por Estados Unidos (Pitt, 2001; Ochoa, 2003; Zamora et al., 2005; Hinojosa-Huerta et al., 2013; Jarchow et al., 2017).

5. 6. ESFUERZOS DE RESTAURACIÓN

Dentro del corredor ribereño de la zona limítrofe se encuentra el sitio de restauración Miguel Alemán, administrado por la organización Pronatura-Noroeste, la construcción de este sitio de restauración inicio en 2010. Actualmente cuenta con 135 ha restauradas con vegetación ribereña, de las cuales 14 corresponden a hábitat ribereño, 64 a bosque de mezquite y 57 a hábitat de terraza alta, donde se han plantado especies de álamos, sauces, mezquite dulce, palo verde mexicano, palo verde azul, palo verde amarillo y palo verde brea, las cuales crean un hábitat para más de 122 especies de aves (Pronatura Noroeste, 2021). En 2019 Pronatura plantó 12,250 árboles nativos (Pronatura Noroeste, 2019). Este sitio de restauración se encuentra 28 km aguas abajo de la PDM, en la margen derecha del Río Colorado.

CAPÍTULO 6. METODOLOGÍA

Durante este proyecto de investigación se realizaron monitoreos de la respuesta hidrológica a las descargas realizadas del 5 de septiembre del 2019 al 5 de enero del 2020 al lecho del río desde el canal Welton Mohawk (WM), ubicado al Este del RC (figura 4). Este evento se llevó a cabo debido a la realización de los trabajos de mantenimiento en el canal WM, lo que requirió que se desviarán sus flujos hacia el cauce del RC por medio del sitio de desfogue MODE 3. Lo anterior, permitió evaluar la después hidrológica del río y el acuífero bajo condiciones de flujo bajo, antes hipotetizadas y recomendadas para la descarga de flujos ambientales. Los flujos descargados fueron de 6.3 a 8.5 m³/s, flujos por debajo de la capacidad de conducción del cauce principal del RC.

La metodología de esta investigación se dividió en los subcapítulos de agua superficial, de agua subterránea y la modelización hidráulica, en los cuales se explican los procesos realizados para el monitoreo, análisis, interpretación, modelización de las aguas superficiales y Propuestas para las zonas susceptibles a restauración.

6. 1. SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO

6. 1. 1. AGUA SUPERFICIAL

Antes y durante las descargas de flujo del WM se realizaron campañas de monitoreo de agua superficial en cuatro sitios del tramo limítrofe. Estos sitios de aforo, son denominados DMS (*Discharge Measurement Sites*) por convención con los protocolos de monitoreo hidrológico de las Acta 319 y 323. Los DMS-1, DMS-2, DMS-3 y DMS-4 (figura 4) se seleccionaron geográficamente siguiendo los lineamientos establecidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (Rantz, 1982).

En cada sitio de aforo se instaló un limnómetro en el cauce del RC para obtener la altura y profundidad del nivel del agua superficial, estos se ubicaron en los mismos sitios de aforo (figura 4) para poder realizar una relación tirante-caudal. Al limnómetro se le instaló un tubo de PVC ranurado con un transductor de presión marca HOB0 modelo U20-0001-01, el cual fue programado a una frecuencia de registro de 5 minutos para obtener datos continuos de las variaciones del agua superficial. Además del limnómetro instalado, se coloraron dos ángulos en las márgenes del cauce, con la finalidad de instalar un cable, el cual tuvo la función de servir como guía para obtener una medición de caudal transversal al eje del cauce.

Los limnómetros instalados se nivelaron con ayuda de un GPS diferencial Topcon modelo GR5 en modo de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK), el cual tiene una precisión de hasta 1 cm + 1 ppm horizontal y 1.5 cm + 1 ppm vertical. El método diferencial considera la ubicación de una antena sobre un punto con coordenadas conocidas (sitio base) y la otra antena en el punto en el que se desean conocer las coordenadas (sitio en movimiento, rover), en este caso los limnómetros. Las dos antenas reciben tanto información de los satélites con una antena, como entre ellas, vía radio. Esta doble señal brinda una mejor localización del sitio y permite, en modo cinemático (en movimiento) permanecer solo algunos minutos en el mismo sitio para alcanzar las precisiones referidas.

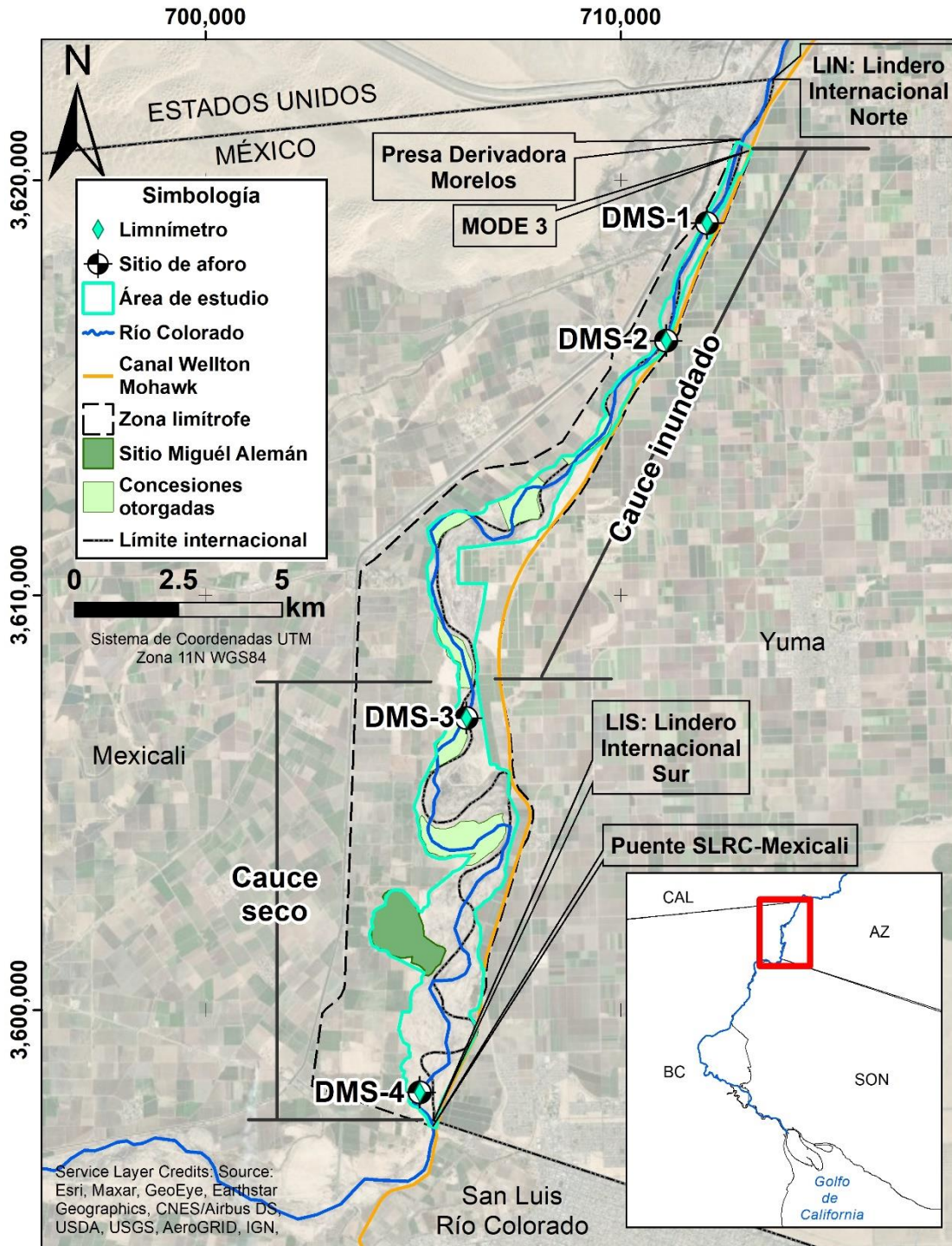


Figura 4. Distribución de los sitios de aforo y limnímetros instalados en la zona limitrofe del RC

En las figuras 5 y 6 se muestra el proceso de nivelación de la regleta instalada en la sección de aforo DMS-4. Los puntos utilizados como bases fueron los piezómetros ubicados en la zona de estudio ya que se contaba con la información espacial. En algunos casos fue necesario definir puntos de liga

(PL) cuando la señal del radio entre antenas no era lo suficiente intensa para poder realizar el registro de datos directamente en el limnómetro.



Figura 5. Instalación de antena base



Figura 6. Nivelación de limnómetro DMS-4

6. 1. 2. AGUA SUBTERRÁNEA

Dentro del área de estudio se encuentra una red piezométrica para el monitoreo del agua subterránea, construidos por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y por Pronatura Noroeste organización de la sociedad civil. En esta investigación se monitorearon 13 piezómetros semanalmente durante el periodo del evento de descargas del Wellton Mohawk. Este monitoreo consistió en medir la profundidad del nivel freático con una sonda electroacústica y el registro continuo de las variaciones del nivel freático con transductores para medir presión instalados en 8 de los 13 piezómetros.

Los piezómetros monitoreados fueron: N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10, MA3, MA4, MA12. Fuera la zona de estudio se encuentran los piezómetros P14 y P15, aguas abajo del puente SLRC-Mexicali, los cuales también fueron monitoreados, sin embargo, estos solo fueron utilizados como piezómetros auxiliares para interpretar la evolución del agua subterránea, a los piezómetros N2, N3, N4, N8, N9, N10 y MA12 se les instaló un transductor de presión marca HOBBO modelo U20-0001-01, programado con una frecuencia de registro de 5 minutos. Además, se instaló un transductor en el piezómetro N5, fuera del nivel del agua, para registrar la presión barométrica, un Barologger Modelo 3001 marca Solinst sincronizado y programado a la misma frecuencia de registro que los demás transductores. Para complementar las secciones piezométricas al Este del corredor ribereño se utilizó información recaba por el Buro de Reclamaciones de Estados Unidos (*United States Bureau of Reclamation*) en 5 pozos de monitoreo ubicados paralelamente al cauce del RC, los cuales fueron: BD34, BD41, BD47, BD52 Y BD57, la información fue obtenida de la página <https://usbr.gov/lc/yuma/> y la periodicidad de las mediciones fue mensual. La distribución geográfica de los piezómetros es en secciones transversales a diferentes distancias dentro del corredor ribereño (figura 10).

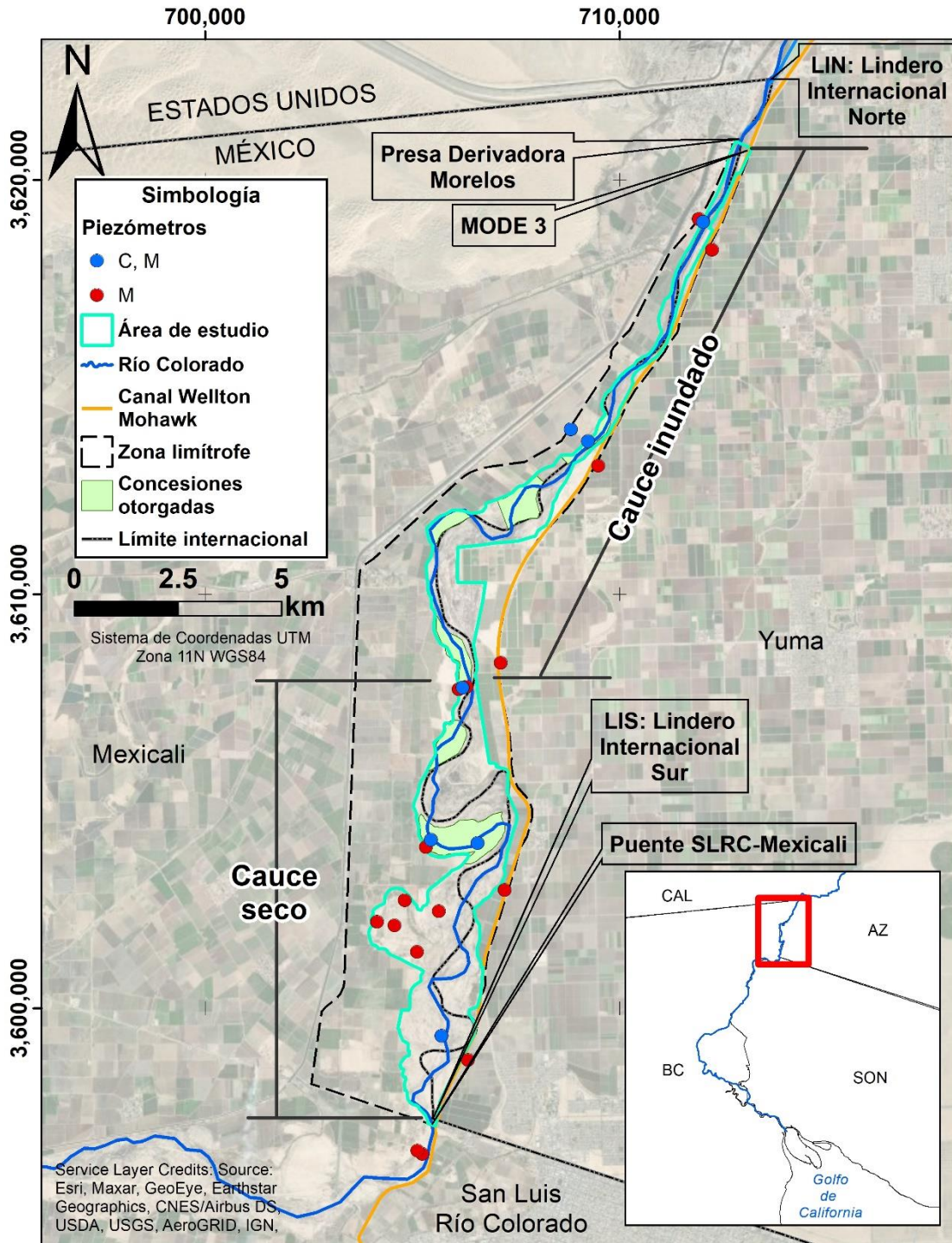


Figura 7. Distribución de la red piezométrica localizada en la zona limítrofe (C, M: Datos continuos y manuales, M: Datos manuales)

6. 2. MONITOREO

6. 2. 1. AGUA SUPERFICIAL

El proceso para la obtención de los datos continuos de nivel de agua superficial en el cauce se realizó mediante la instalación de transductores, como se mencionó anteriormente, los cuales fueron instalados antes del evento de descarga y se monitoreaban semanalmente obteniendo la información mediante un dispositivo de lectura y una computadora.

Para la medición del caudal en las secciones de aforo se utilizó un equipo llamado RiverSurveyor M9 (RSM9) de la marca Sontek, el cual realiza la medición de caudal mediante el método de la sección media, el cual consiste en dividir el área de la sección transversal del sitio de aforo en celdas, en las cuales, el equipo realiza la medición de la profundidad y velocidad promedio de cada una de las celdas para posteriormente realizar la suma de las áreas de cada celda y promediar las velocidades de cada una de ellas para el cálculo del caudal (SonTek, 2016). Este equipo cuenta con un sistema de alta precisión que utiliza el principio físico del efecto Doppler acústico para realizar mediciones de caudales en ríos, velocidades, profundidad, batimetrías y temperatura. La precisión en la medida de velocidad del agua es de ± 0.2 cm/s y tiene un alcance de medición de hasta 80 m de profundidad (SonTek, 2016). El RSM9 cuenta con un sistema de nueve haces de sonido (cuatro transductores de 3.0 MHz, cuatro transductores de 1.0 MHz y uno de 0.5 MHz).

El equipo RSM9 cuenta un sistema GPS de doble frecuencia que mantiene una antena fija fuera del agua y una antena móvil, ubicada sobre la embarcación, que hace el recorrido de la sección hidráulica a medir. Cuenta con dos componentes principales, una relacionada con determinar la posición del barco en la sección hidráulica y otra en obtener las mediciones requeridas para obtener el flujo total. El sistema de medición se comunica con una computadora con varias opciones, una es con cable de comunicación físico y otra inalámbrica a través de la tecnología bluetooth. El programa de comunicación RiverSurveyor Live para la adquisición de datos, tanto con el GPS como con el sensor fue desarrollado por el mismo fabricante, en este trabajo se utilizó la versión M9.

El procedimiento para recolectar información de las descargas consiste en instalar un cable graduado en los ángulos situados en ambos márgenes del río, armar el equipo, instalar la base de la antena, establecer la conexión entre la base antena, la embarcación y la computadora portátil. Una vez establecida la conexión se configura la medición para el sitio. Los valores requeridos para la medición son: salinidad, declinación magnética del lugar, profundidad del transductor y la distancia del margen al punto de inicio de la medición, entre otros. En las [figuras 8, 9 y 10](#) se muestra el procedimiento para la medición de caudal.



Figura 8. Instalación de antena base



Figura 9. Armado de equipo RiverSurveyor

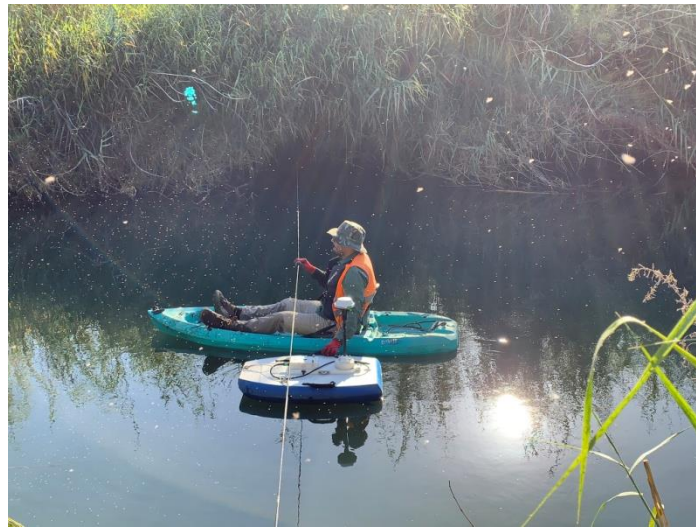


Figura 10. Medición de caudal en sitio de aforo

Las mediciones se realizaron de acuerdo con el protocolo de medición de descargas del USGS (Mueller & Wagner, 2009), el cual indica el orden de calidad de los datos dependiendo de las mediciones resultantes, así como de las condiciones físicas del sitio. Así mismo, el protocolo indica un mínimo de dos mediciones por sección que comprenden ida-vuelta e ida-vuelta hacia ambos márgenes del río. Si en las mediciones realizadas se obtuvo un coeficiente de variación menor al 5% se procede a terminar la medición en el sitio. Una vez en oficina, se procesaron los archivos obtenidos de las mediciones de caudal en el programa RiverSurveyor Live para estimar el caudal promedio de la sección, estos datos se integraban en un formato de reporte según el protocolo de base de datos del Acta 319.

6. 2. 2. AGUA SUBTERRÁNEA

Para medir la profundidad al nivel freático se utilizó una sonda electroacústica 107 TLC marca Solinst. El procedimiento consistió en encender el equipo e introducir la sonda dentro del piezómetro, la sonda posee un cable con dos conductores que llevan la corriente eléctrica proporcionada por una pila, cuando las puntas de estos conductores, conocidas como electrodos, entran en contacto con el agua se cierra el circuito eléctrico y la sonda emitirá un sonido indicando que a esa profundidad se encuentra el nivel freático. El cable de la sonda está graduado en metros, lo que permite identificar la profundidad a la que se encuentra el espejo de agua. En seguida, se registra la medición anotándola en una hoja de campo con un formato de acuerdo con protocolo de monitoreo de agua subterránea del Acta 319 (figura 11).

Para obtener la información recolectada por los transductores instalados se utilizó un lector con interfase para la computadora y mediante los programas Levelogger y HOBOWare se descargaron los datos continuos (figura 12).



Figura 11. Medición de la profundidad del nivel freático en el piezómetro N6



Figura 12. Obtención de datos de transductores en piezómetro N4

6. 3. ANÁLISIS DE DATOS

6. 3. 1. AGUA SUPERFICIAL

El conjunto de datos observados en los limnómetros instalados y los registrados por los transductores de presión, se procesaron para obtener las variaciones de nivel de agua durante el periodo del evento de descarga. Los datos obtenidos por los registrados automáticos instalados sitios de aforo se corrigieron extrayendo la presión atmosférica de la presión absoluta registrada por los transductores para así determinar la columna de agua registrada por el sensor. Posteriormente, se realiza una corrección por deriva, la cual consiste en correlacionar los datos continuos con los datos observados en los limnómetros utilizando las pendientes generadas por las observaciones. Este proceso se realizó de acuerdo con el protocolo de monitoreo hidrológico del Acta 319.

Para obtener un hidrograma continuo de descarga se realizó una correlación entre las descargas puntuales medidas y los valores observados en los limnómetros instalados, es decir, una relación tirante-caudal. Después, a la relación tirante-caudal se le aplicó una regresión para obtener una ecuación con un coeficiente de correlación entre 1 y 0.7 propuestos por [Di Baldassarre & Montanari, 2009](#) y el Grupo de Trabajo Ambiental del Acta 319. Obteniendo la ecuación de cada sitio de medición se determinaron los caudales continuos, aplicando la ecuación a los registros de tirante continuos.

6. 3. 2. AGUA SUBTERRÁNEA

Los transductores automáticos instalados en la columna de agua del piezómetro registraron la presión total, por lo cual es necesario obtener la presión hidrostática sustrayendo la presión atmosférica de los registros, una vez obtenida la presión hidrostática esta se multiplica por un factor de conversión de presión a metros columna de agua. Dado que la presión atmosférica es temporalmente variable, se utiliza el registro de un transductor barométrico.

De igual manera, a las series de datos que se obtienen se les aplica una corrección por deriva, la cual consiste en ajustar los datos de los transductores automáticos con las mediciones manuales utilizando las pendientes generadas por las mediciones manuales. Esta corrección considera que la variación entre las profundidades tanto manuales como automáticas de un tiempo a otro se realizó de forma continua y lineal.

Los datos de variación del nivel piezométrico manuales y continuos fueron graficados con respecto del tiempo para cada piezómetro, las variaciones de las fluctuaciones del nivel freático fueron analizadas junto con la información del agua superficial.

Además del análisis anterior descrito, se generarán tres superficies de contornos piezométricos (isolíneas) utilizando la información de los piezómetros monitoreados, así como los registros de elevación del agua en el río durante las descargas provenientes del canal WM, estas superficies se realizarán con información previa a la descarga, uno y dos meses posteriores de iniciadas las descargas. Las superficies se realizarán utilizando el programa ArcMap 10.8. Realizando un análisis geoestadístico probando diferentes tipos de interpolación.

6. 4. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

La modelización hidráulica del río se realizó en el programa HEC-RAS, el proceso para realizar el modelo hidráulico consistió en tres fases, la primera es el desarrollo del modelo geométrico, la siguiente es la elaboración del proyecto en HEC-RAS y el tercero es la calibración del modelo. El desarrollo del modelo geométrico consistió en importar el modelo digital de elevaciones de la zona a la interfaz de HEC-RAS utilizando la opción de RAS mapper. En la segunda fase se creó el archivo del proyecto, se integraron los datos de flujo (condiciones de frontera e iniciales), se importó el modelo geométrico y la capa de rugosidades y se procedió a crear la malla del modelo. En la última fase, se simulan los flujos establecidos en los datos de flujo, se obtienen los resultados y se revisan los datos simulados con los datos medidos, si la diferencia de lo observado y simulado es aceptable se termina el ciclo, si no, se realiza el proceso de calibración modificando los valores de rugosidad

del modelo y de las condiciones de flujo hasta que los resultados se acerquen a los valores medidos. A continuación, se desarrollan las partes del proceso de la modelización.

6. 4. 1. MODELO GEOMÉTRICO

la topografía del modelo de la zona de estudio del Río Colorado (longitud de 35 km) se obtuvo desde un modelo digital de elevaciones del corredor ribereño elaborado con tecnología LiDAR obtenida durante 2015 y un levantamiento batimétrico del río, lo cual facilitó los trabajos de campo al contar con esta información. Sin embargo, desde la PDM hasta aproximadamente 18 kilómetros aguas abajo, el cauce se encontraba inundado, debido a esto, el modelo digital no contaba con los datos topobatemétricos del cauce, ya que mostraba los datos de elevación del espejo del agua. Dada la inseguridad del tramo límite no fue posible realizar un levantamiento del cauce en la zona inundada. Como medida alterna, para obtener los valores de la topografía del fondo del lecho del río en el tramo inundado, se procedió a estimarla considerando lo siguiente:

1. Se cuenta con la geometría del lecho del río en las secciones de aforo DMS-1 y DMS-2, estas secciones de aforo se encuentran dentro de la zona inundada.
2. Se interpolaron los datos conocidos en las secciones de aforo y la zona seca utilizando el programa AutoCAD Civil 3-D construyendo una nube de puntos que delinea la dirección del cauce.
3. Se delimitó la zona inundada de la imagen LiDAR con un polígono. De este polígono se extrajo la información del modelo digital de elevaciones que correspondía a la superficie del agua. Después, se utilizó para crear el modelo de elevaciones del cauce con ayuda de la nube de puntos interpolados creado anteriormente. Esta nube de puntos se integró al modelo digital de la zona límite.

6. 4. 2. ELABORACIÓN DE PROYECTO

Una vez integrado el modelo digital de elevaciones al programa HEC-RAS, es necesario integrar la rugosidad de la zona de estudio. Se utilizaron como base los valores de rugosidad propuestos y calibrados por [Salcedo-Peredia \(2014\)](#) para iniciar la calibración de este modelo. Se creó una capa de polígonos con valores de rugosidad en formato de sistema de información geográfica para integrarla al modelo mediante importación de capa dentro del programa HEC-RAS. Los valores fueron modificados durante la calibración para lograr el ajuste entre los valores observados y los simulados, tanto de caudal como de tirante de agua.

El trazado de la malla se realizó manualmente trazando un polígono y asignando la dimensión de las celdas en la interfaz del programa de HEC-RAS en la opción de RAS Mapper. Se utilizó el polígono del área de estudio como base para generar el polígono de la malla, en la cual está integrada el cauce principal, las llanuras de inundación y algunas de las terrazas altas que en la actualidad son utilizadas como campos agrícolas. Una vez creado el polígono de la malla, es necesario ingresar el tamaño de la malla, la cual, estará siendo modificada para optimizar el tiempo de procesamiento de HEC-RAS. Además de esto, se pueden ingresar líneas de quiebre donde se requiera una afinación de la malla, con la cual, facilita al programa la resolución de las ecuaciones.

La creación de las condiciones de frontera fueron realizadas en el opción de Editor de geometría, utilizando la herramienta de trazado de líneas de condiciones de frontera, donde, se trazaron dos

líneas, una el sitio de aforo DMS-1, la cual fungió como la condición de frontera de entrada, y otra en el sitio de aforo DMS-4, que fue la condición de frontera de salida. Posteriormente, la selección del tipo de condición de frontera se realizó en la opción de Editor de flujo transitorio, donde se puede seleccionar alguna de las opciones de condiciones de frontera descritas en la sección de Modelo hidráulico del capítulo 4.

Utilizando la opción de Desarrollo de una simulación en estado transitorio, se seleccionó el periodo de tiempo de la simulación, así como los intervalos de tiempo de proceso de computo de los datos ingresados, del hidrograma y resultados del modelo. Además, dentro de esta opción, se seleccionó el conjunto de ecuaciones con las cual el modelo fue resuelto.

Los resultados del modelo fueron visualizados en la opción de RAS Mapper, donde estos fueron importados como un archivo ráster, en la cual se puede visualizar la inundación máxima, mínima, la dirección de las partículas, así como el comportamiento del flujo de agua durante todo el periodo analizado por el modelo.

6. 4. 3. CALIBRACIÓN

El proceso de calibración se realizó mediante la modificación de algunas variables sensibles del modelo (rugosidad y la selección del tipo de condición de frontera de salida *Normal depth*) hasta que los hidrogramas resultantes en los sitios de aforo DMS-1, DMS-2, DMS-3 y DMS-4 mostraran diferencias menores a 0.5 m comparándolos con los hidrogramas obtenidos durante el análisis de datos de la información recopilada durante las campañas de monitoreo.

6. 4. 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para realizar el análisis de sensibilidad del modelo hidráulico del modelo a 2 parámetros se modificaron los valores de rugosidad y la condición de frontera de salida Normal Depth donde:

1. se analizó la sensibilidad del modelo aumento en un ± 20 y 30 % los valores calibrados de rugosidad, los cuales son de los principales modificadores del comportamiento hidráulico de un flujo.

6. 4. 5. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez calibrado el modelo, se generaron 3 escenarios, simulando el comportamiento que se mostrará si se realizara una descarga de 5, 7 y 10 m³/s con una duración igual a la del periodo monitoreo de las descargas provenientes del canal WM. La selección de los caudales mencionados anteriormente, fueron realizadas considerando la capacidad de conducción que tiene el cauce principal Río Colorado y las recomendaciones realizadas por las investigaciones realizadas durante el evento del Flujo Pulso en 2014. Se compararon las áreas inundadas máximas de cada escenario para identificar la mayor extensión de inundación posible, con el menor caudal modelado.

6. 5. ZONAS SUSCEPTIBLES A RESTAURACIÓN

Se construyeron tres superficies de contornos piezométricos utilizando la información de los piezómetros monitoreados, así como los registros de elevación del agua en el río durante las descargas y la información de cinco pozos de monitoreo que se encuentran en Estados Unidos próximos al cauce del río, información proporcionada por el Buro de Reclamación de Estados Unidos. Estas superficies

se crearon con los registros obtenidos previo a la descarga y, uno y dos meses iniciadas las descargas provenientes del canal WM. Las superficies se generaron utilizando el programa ArcMap 10.8. Después de realizar un análisis geoestadístico y probar diferentes métodos de interpolación, se optó por utilizar el método de Kriging Ordinario que fue el que mostró un mejor ajuste.

Para la propuesta de zonas susceptibles a restauración, de acuerdo a los lineamientos establecidos por el Grupo de Ciencia del Acta 323, es necesario conocer las profundidades del nivel freático. Utilizando los tres contornos piezométricos, obtenidos de la red piezométrica de la zona limítrofe y el Modelo Digital de Elevaciones posterior al flujo pulso, se crearon superficies de contornos de profundidad utilizando la herramienta de operaciones algebraicas para archivos rasters del programa ArcMap 10.8.

Una vez obtenidos los contornos de profundidad, se realizó una reclasificación de la información, la cual, será clasificada de acuerdo a los hábitats propuestos por el Grupo de Ciencia del Acta 323. En la [tabla 1](#) se muestra la clasificación de los tipos de hábitats.

Tabla 1. Profundidad del nivel freático para cada tipo de hábitat de acuerdo a los lineamiento del Acta 323

Tipo de hábitat	Profundidad del agua subterránea (m)
Cuerpo de agua	menores a 0
Marisma	0 - 0.5
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5
Ribereño mixto denso	1.5 - 2
Ribereño de baja densidad	2 - 2.5
Mezquite	2.5 - 3.5
Terrazas altas	mayores a 3.5

Las zonas seleccionadas se basaron en los resultados de [Shafroth et al., 2017](#), donde sugiere que la profundidad máxima del agua subterránea debe mantenerse en un umbral de dos metros, por lo cual, las zonas seleccionadas serán aquellas donde esta situación se cumpla, además, las zonas deberán contar con una zona que incluya el cauce del Río Colorado, de tal manera, que el sistema acuático del corredor ribereño sea incluido.

CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describen los principales resultados de esta investigación, se dividió en subcapítulos de acuerdo con la metodología descrita anteriormente. Se muestran los resultados obtenidos del monitoreo de agua superficial y subterránea, de la modelización del tramo de estudio en HEC-RAS y de la determinación de las zonas susceptibles a restauración de acuerdo con los criterios hidrológicos anteriormente descritos.

7. 1. AGUA SUPERFICIAL

Concluidas las campañas de monitoreo y el procesado de la información, se obtuvieron datos puntuales y continuos que muestran la evolución de las elevaciones del tirante de agua referidas al nivel medio del mar.

El sitio de aforo DMS-1 mostró al inicio de las descargas (5 de septiembre de 2019) un tirante de 29.575 m, teniendo una tasa de incremento de 0.103 m/día calculado hasta el día 11 de septiembre de 2019, donde se observó un tirante de 30.195 m. Posteriormente la tasa de incremento fue menor a un centímetro por día hasta finalizar el periodo de monitoreo (14 de noviembre de 2019), donde se observó un tirante de 30.212 m. La máxima elevación del tirante que se mostró en el hidrograma del sitio de aforo DMS-1, fue debido a las descargas extraordinarias al cauce del RC provenientes de la PDM, las cuales se originaron por un evento de precipitación extraordinario, esa misma respuesta en la forma del hidrograma se observa en las secciones DMS-2 y DMS-3A. En la [figura 13](#) se muestra el comportamiento del tirante en el sitio de aforo DMS-1

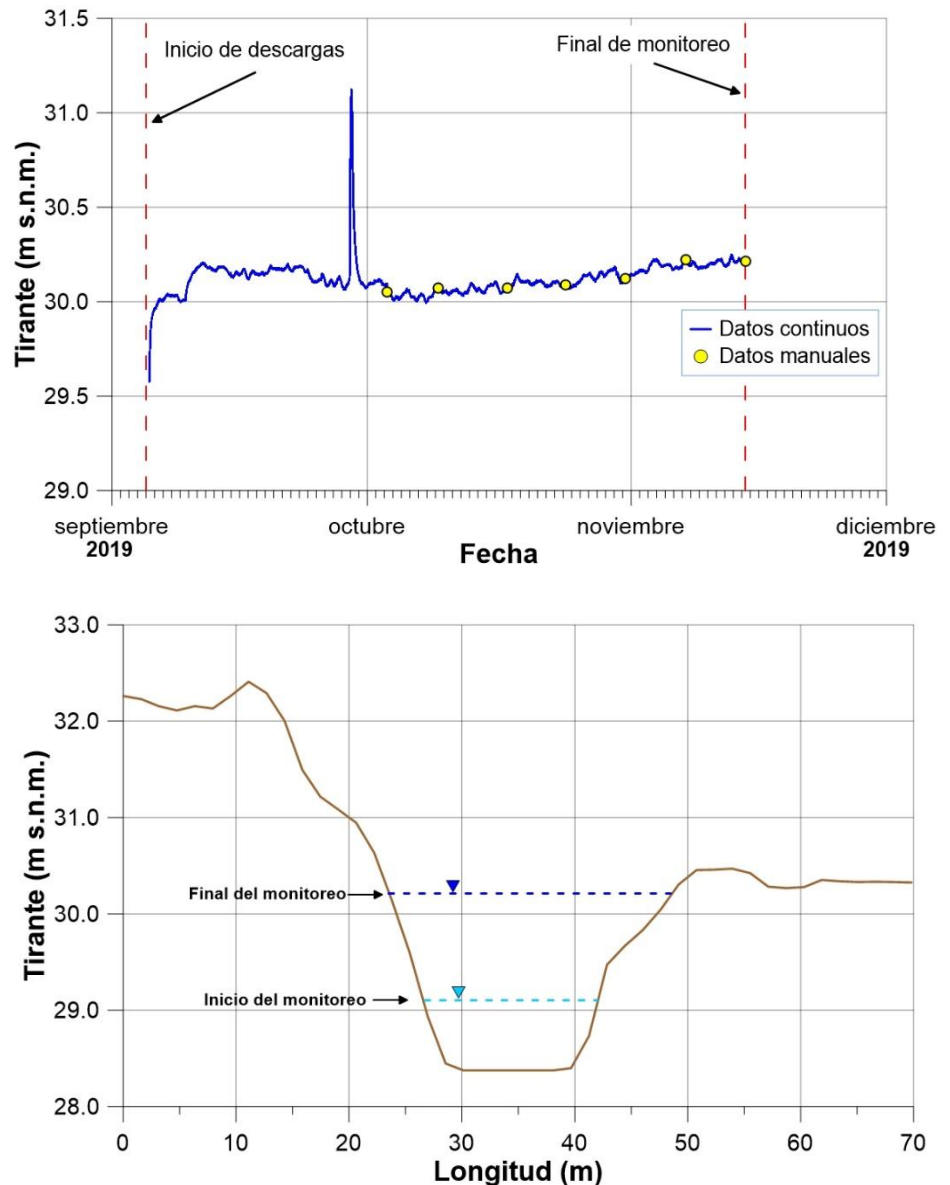


Figura 13. Sitio de aforo DMS-1, evolución del tirante y sección transversal de sitio

El sitio de aforo DMS-2 presentó al inicio de las descargas un tirante de 28.465 m. Posteriormente, el 12 de septiembre de 2019 se observó una tirante de 28.935 m, calculándose una tasa de incremento de 0.07 m/día. Después, la tasa de incremento calculado mostro un valor menor a un centímetro por día hasta finalizar el monitoreo el 14 de noviembre, donde se observó un tirante de 29.16 m. En la figura 14 se observa el comportamiento del tirante en el sitio de aforo durante las descargas provenientes del canal WM.

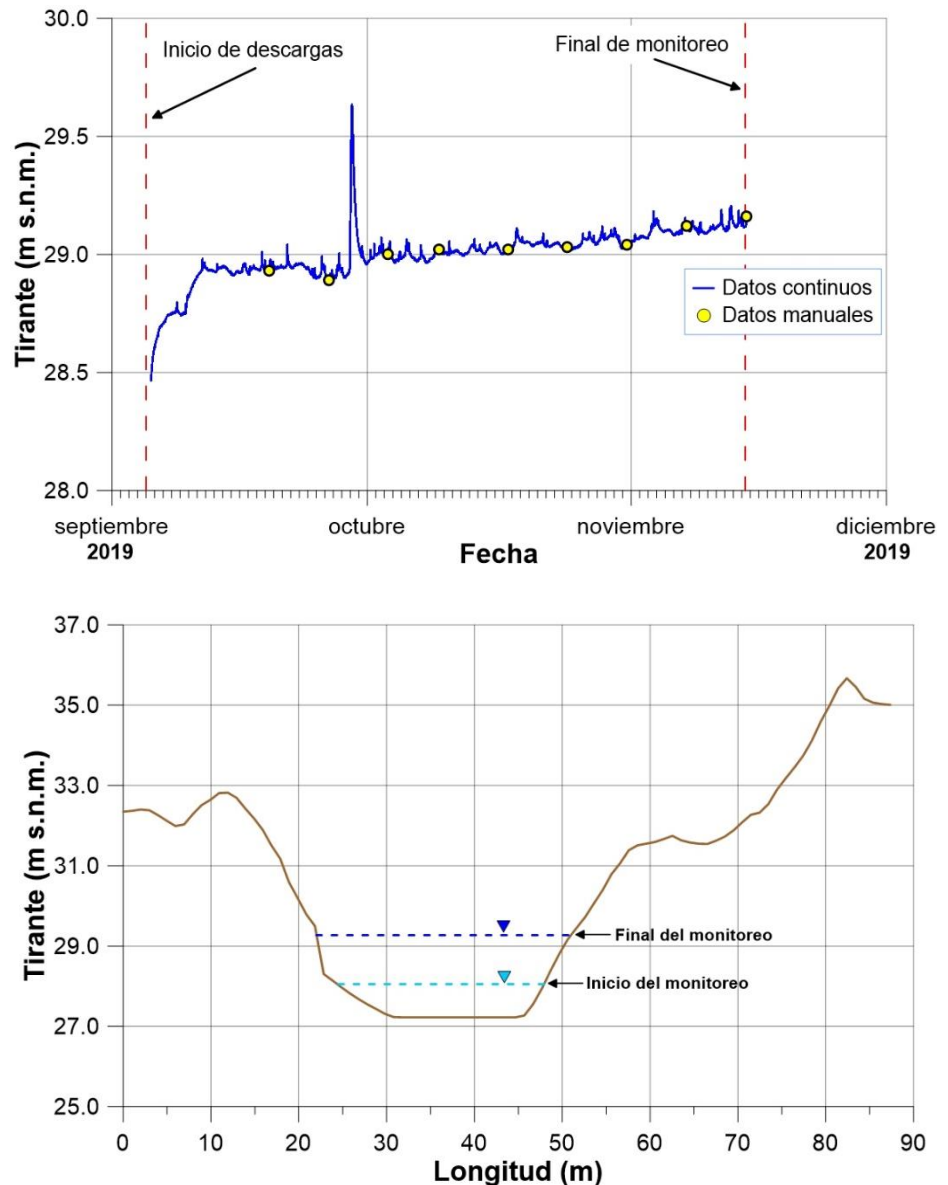
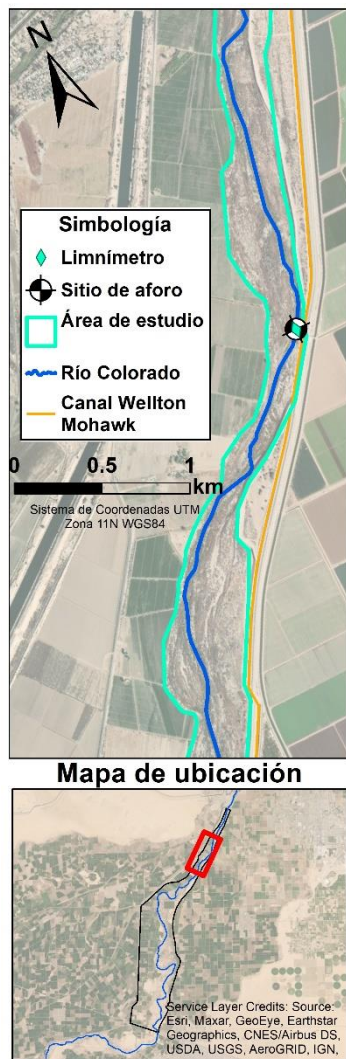


Figura 14. Sitio de aforo DMS-2, evolución del tirante y sección transversal de sitio

El sitio de aforo DMS-3 presentó un desbordamiento en el cauce, inundando las terrazas bajas, donde se encontraba vegetación ribereña, por lo cual, el sitio de aforo, además de esto, el limnómetro instalado en el sitio, quedó por debajo del tirante, haciendo imposible el monitoreo visual del mismo. Sin embargo, el registrador automático continuó realizando mediciones de presión desde la llegada del frente del agua (9 de septiembre de 2019), hasta el final del periodo de monitoreo (14 de noviembre de 2019), esta información fue utilizada posteriormente. La tasa de incremento del tirante en este sitio de aforo fue de 0.12 m/d, calculado desde la llegada del frente del agua, hasta el 24 de septiembre, posteriormente, la tasa de incremento fue menor a un centímetro por día, calculado hasta el final del monitoreo. En la figura 15 se observa el comportamiento del tirante en el sitio de aforo DMS-3, el cual no está referido al nivel medio del mar debido a que este sitio no se monitoreó.

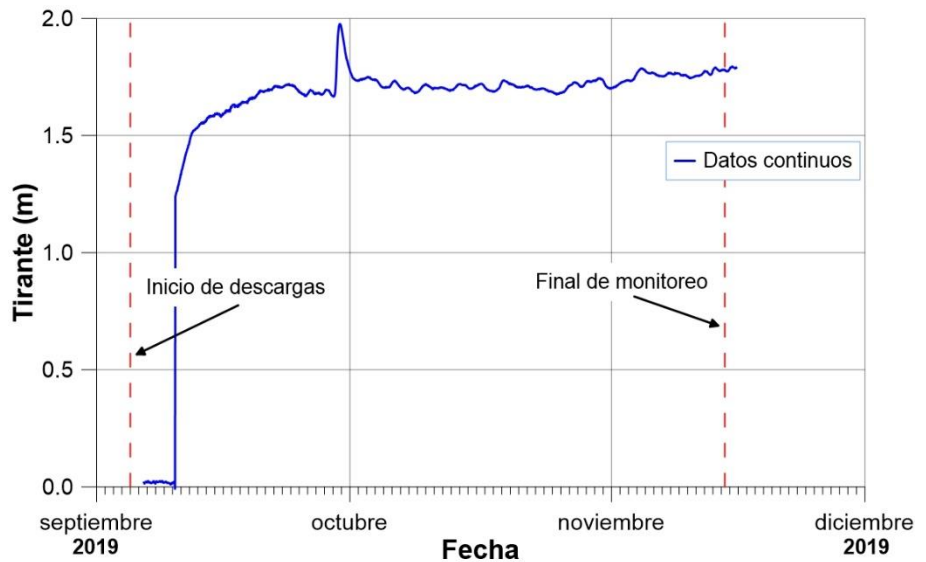
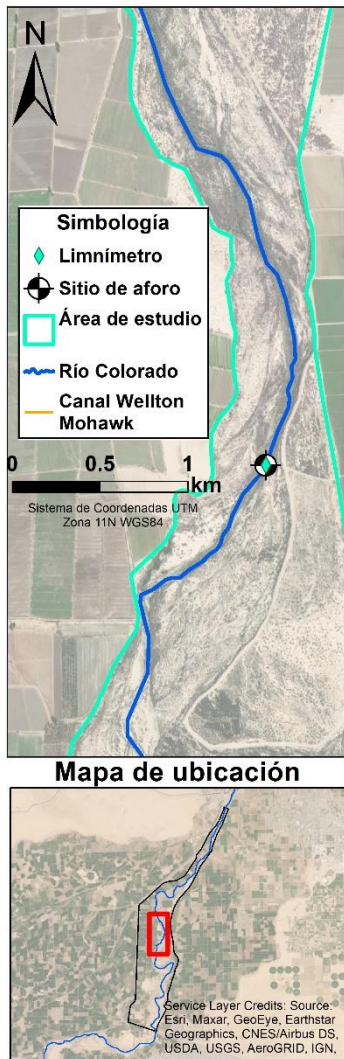


Figura 15. Sitio de aforo DMS-3, evolución del tirante

El sitio de aforo DMS-3A se encontraba seco previo a las descargas del canal WM, sin embargo, este no se contemplaba en el monitoreo, por lo que el monitoreo comenzó hasta el 9 de octubre de 2019, cuando el sitio ya se encontraba inundado. En este sitio, el tirante incrementó 1.46 m, observado al final del monitoreo. La tasa de incremento del tirante durante el periodo registrado por el transductor instalado en el sitio de aforo DMS-3A (del 9 de octubre al 14 de noviembre de 2019) fue menor a un centímetro por día. La figura 16 muestra la evolución del tirante se presentó en el sitio de aforo DMS-3A durante el periodo de monitoreo.

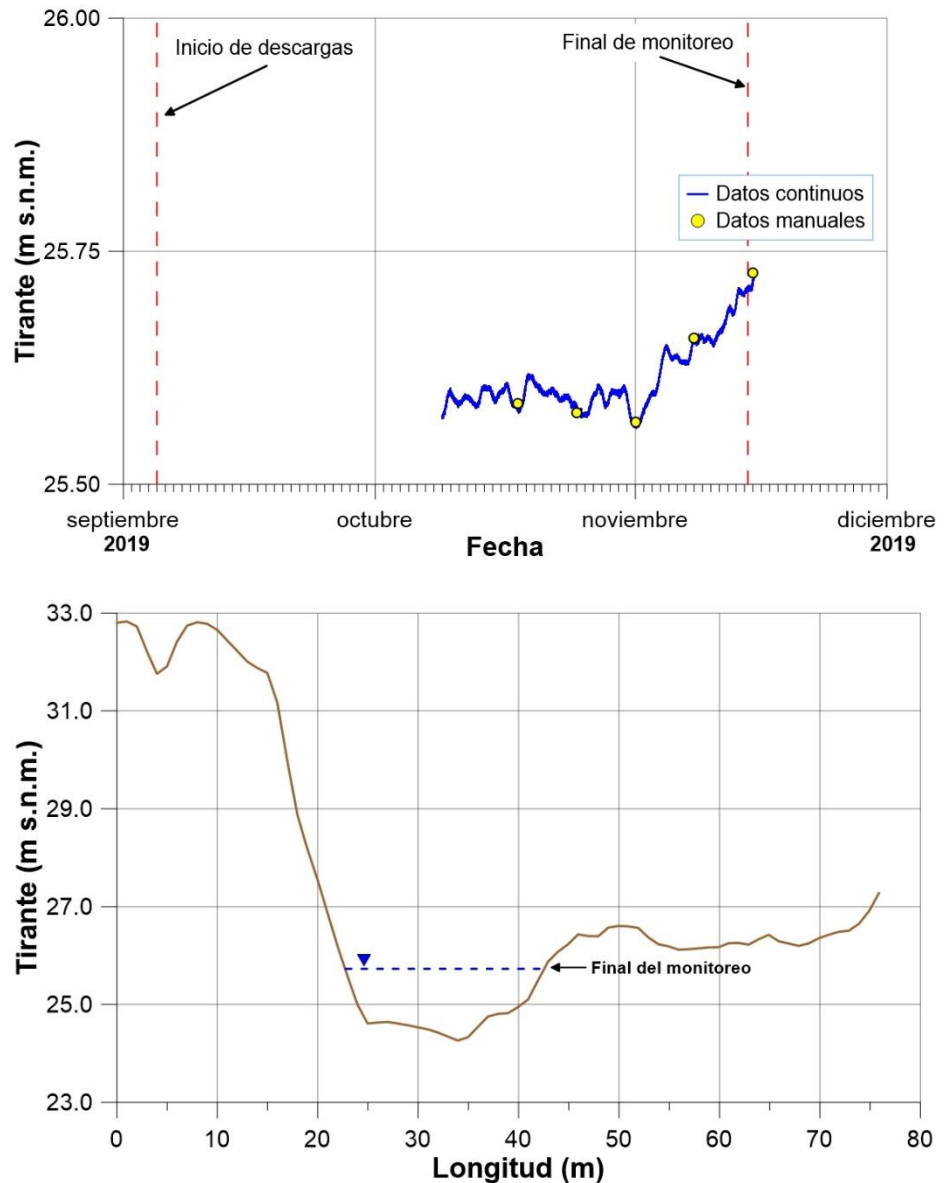
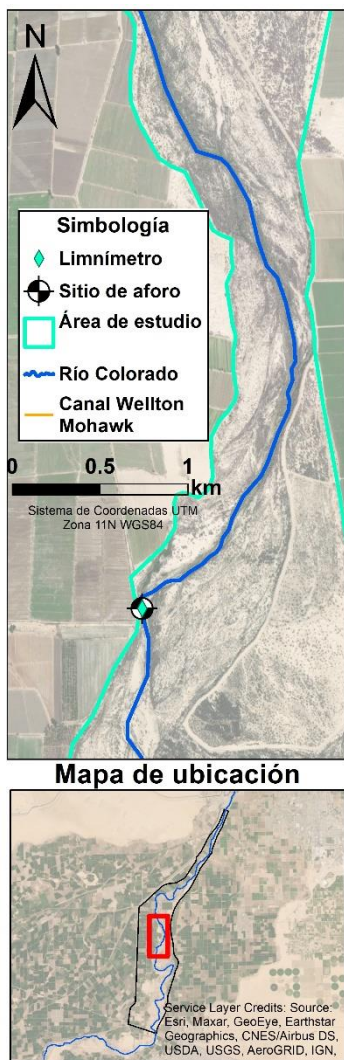


Figura 16. Sitio de aforo DMS-3A, evolución del tirante y sección transversal de sitio

Por otra parte, el sitio de aforo DMS-4 también se encontraba seco. Por seguridad del equipo no se instaló el limnómetro ni el transductor previo al evento, sino hasta que se observó el frente del agua en el sitio de aforo, aproximadamente el 28 de octubre de 2019, donde se observó un tirante de 22.076 m. La tasa de incremento del tirante desde ese momento hasta al final del monitoreo fue de 0.019 m/d. El tirante al finalizar el monitoreo fue de 22.421 m. En la [figura 17](#) se muestra la evolución del tirante referido al nivel medio del mar durante el monitoreo realizado.

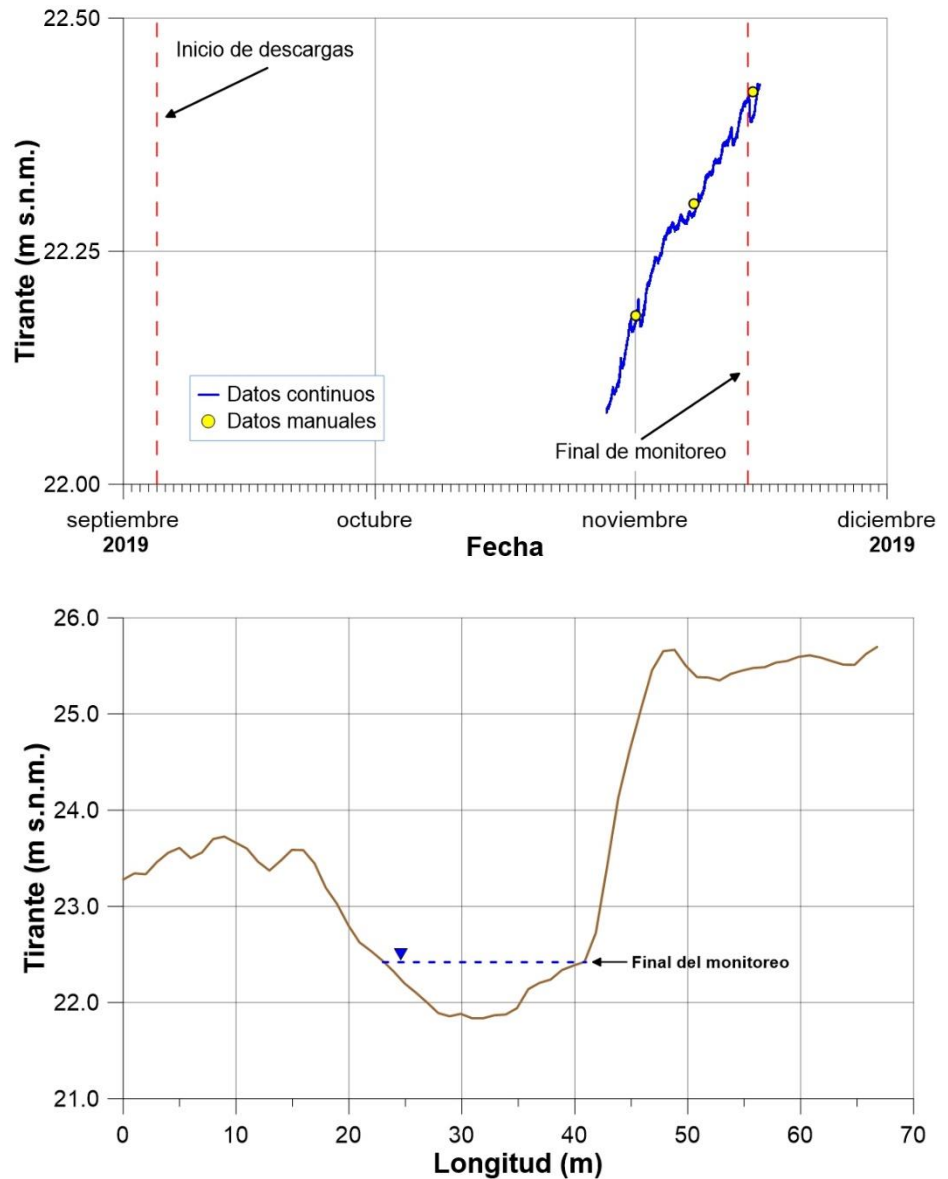
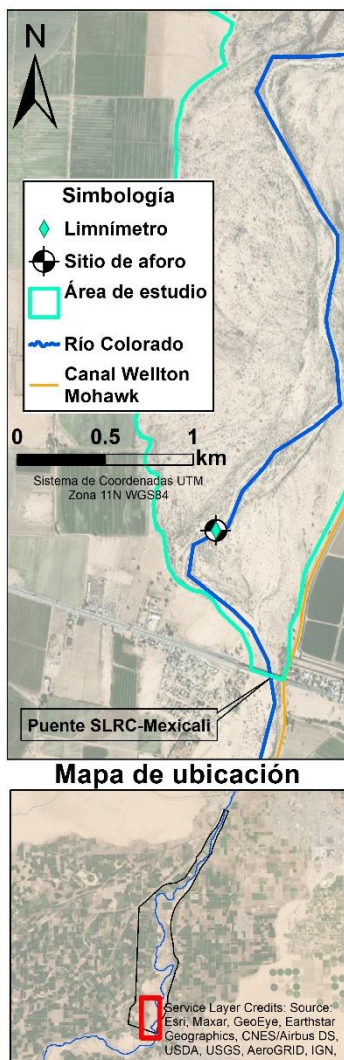


Figura 17. Sitio de aforo DMS-3A, evolución del tirante y sección transversal de sitio

Como se mencionó anteriormente, el sitio de aforo DMS-3 no se utilizó como tal, debido a los problemas que presentó. Sin embargo, si se instaló el sensor de presión, por lo que se contó con registros continuos de nivel de agua. Debido a que se quería contar con una serie de datos en la sección DMS-3A, se analizó el comportamiento que se obtuvo de los transductores automáticos y se realizó una relación entre ellos para extender la serie de datos de la sección DMS-3A del 11 de septiembre al 15 de noviembre del 2019. En la figura 18 se muestran las variaciones de nivel de agua que se registraron en ambos sitios DMS durante el periodo del 9 de octubre al 15 de noviembre del 2019, se observa una respuesta similar, teniendo variaciones entre ellas de 0.017 m en promedio. Esta similitud permitió utilizar los valores registrados por el transductor instalado en el DMS-3 y ajustarlos con los registros en el sitio DMS-3A.

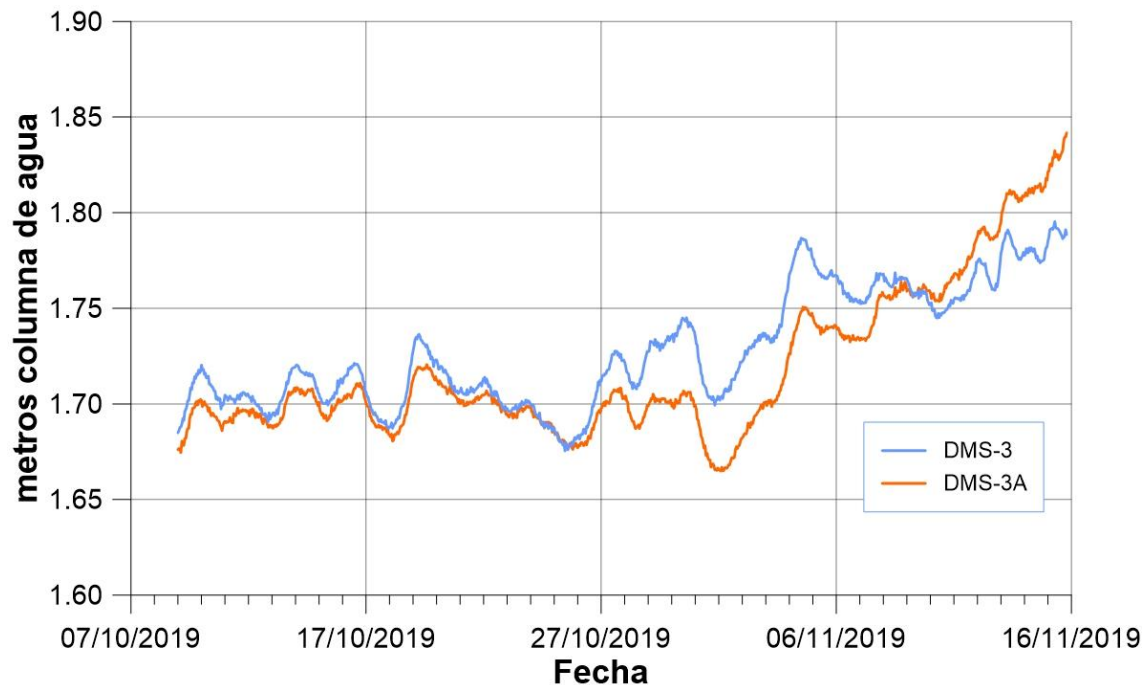


Figura 18. Comparación de datos continuos de convertidos a metros columna de agua en los sitios de aforo DMS-3 y DMS-3A

Durante las campañas de monitoreo se presentaron algunas situaciones que no se tenían previstas, por lo que se requirió de realizar algunas adecuaciones a las actividades o a los sitios de monitoreo. El sitio de aforo DMS-3 contó con registros continuos hasta el día 14 de noviembre de 2019, sin embargo, presentó inundaciones en terrazas que presentaban vegetación. Lo anterior, provocó que en ese sitio no se pudieran realizar aforos, por tal motivo, se reubicó el sitio a 1.17 km aguas abajo del DMS-3, y se denominó como DMS-3A, este sitio presentó un monitoreo constante. Ambos sitios de aforo contaban con limnímetros, así como un transductor para el registro de presión. Las ubicaciones del sitio DMS-3 y del DMS-3A se muestran en la [figura 19](#). En la misma se muestra el resultado de ajustar los valores continuos del transductor instalado en el sitio DMS-3 con los registrados en el sitio de aforo DMS-3A, creando un continuo de datos.

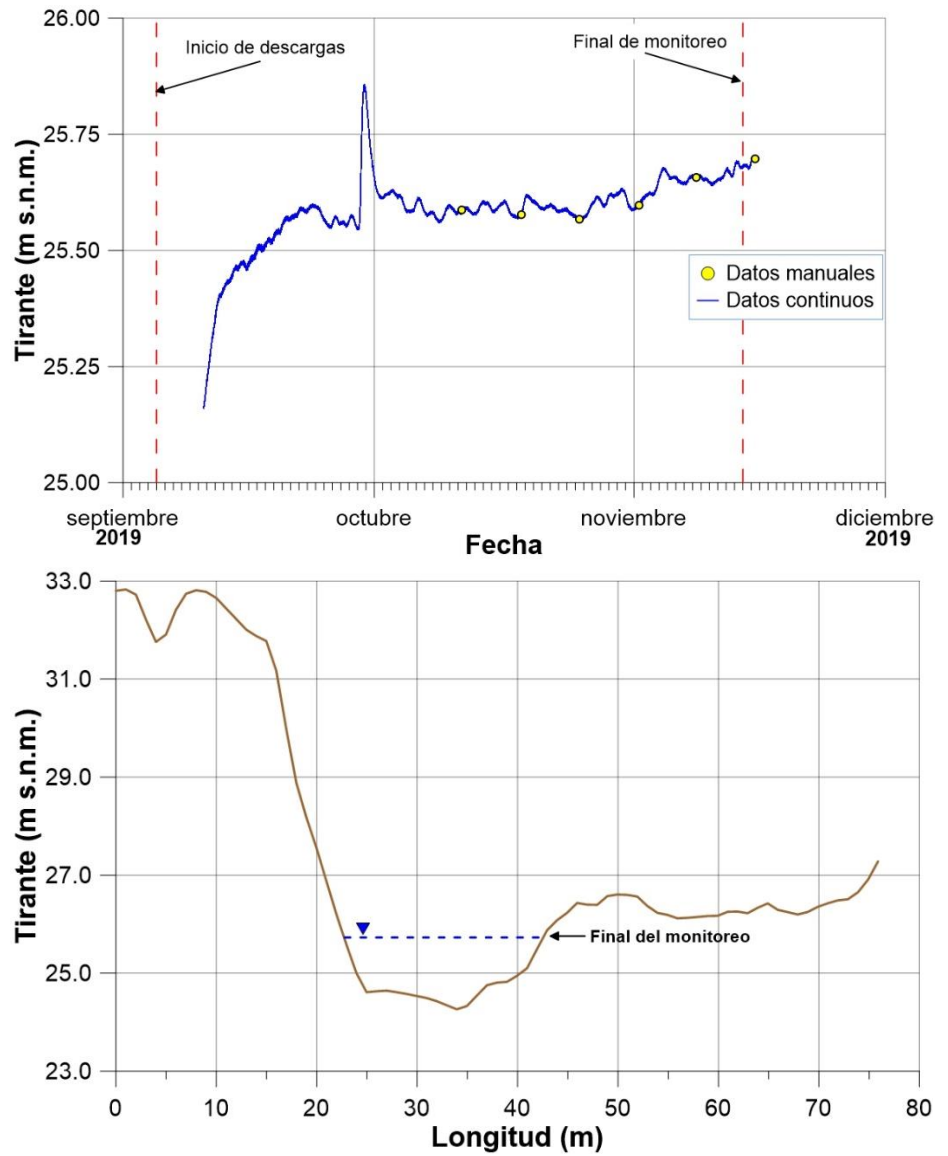
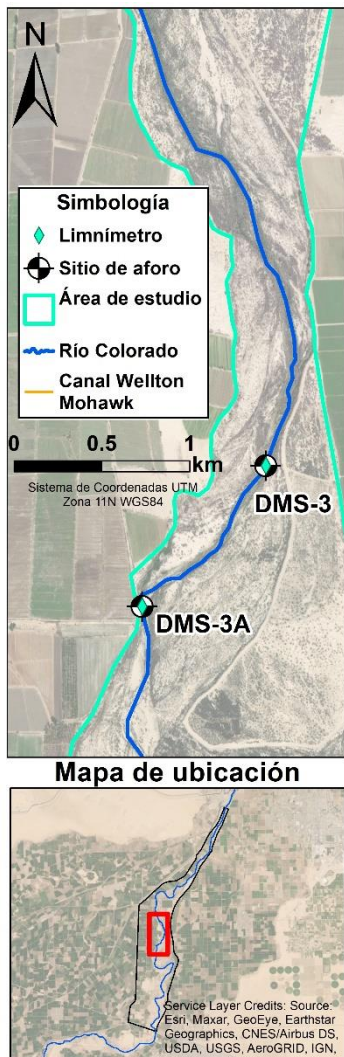


Figura 19. Sitio de aforo DMS-3A y evolución del tirante durante las campañas de monitoreo con datos anexados del sitio de aforo DMS-3

En la figura 20 se muestran las descargas medidas para los diferentes sitios de aforo (DMS), así como las descargas que reportó la Comisión Internacional de Límites y Aguas de Estados Unidos (*International Boundary Water Commission, IBWC*), las descargas iniciaron el 5 de septiembre de 2019, liberadas desde el canal MODE 3. En la estación de medición de la IBWC (MODE 3) se presentó un flujo promedio de $7.59 \text{ m}^3/\text{s}$ con una descarga máxima registrada de $8.33 \text{ m}^3/\text{s}$. En la sección de aforo DMS-1 se midió una descarga promedio de $8.37 \text{ m}^3/\text{s}$ y un caudal máximo de $9.33 \text{ m}^3/\text{s}$. En el DMS-2 se registró una descarga promedio de $8.84 \text{ m}^3/\text{s}$ y un flujo máximo de $9.64 \text{ m}^3/\text{s}$. Para la sección DMS-3A el caudal promedio fue de $5.52 \text{ m}^3/\text{s}$ y una descarga máxima medida de 6.35

m³/s. La sección DMS-4 registró un caudal promedio de 1.04 m³/s y un caudal máximo de 1.15 m³/s. La sección DMS-2 mostró una descarga mayor que la sección DMS-1, con una diferencia de 0.33 m³/s en promedio entre las dos secciones, esto pudo deberse a la interferencia de la vegetación cuando se realizaban las mediciones, a alguna descarga no identificada entre ambas secciones o una bifurcación del flujo. En la sección de aforo DMS-3A, el frente del agua superficial llegó 14 días después, mientras que en la sección DMS-4 tardó 56 días en arribar. El comportamiento observado en los sitios de aforo DMS-1, 2 y 3A muestra una similitud en el comportamiento de las descargas provenientes de la obra de desviación MODE 3, donde, el 22 de septiembre fue el caudal máximo registrado en el MODE 3, los caudales máximos en los sitios de aforo fueron medidos el 19 de septiembre de 2019, para posterior iniciar con un decremento en el caudal proveniente del MODE 3, hasta el 1 de noviembre, donde se observa un aumento en los caudales provenientes del MODE 3. Este mismo comportamiento se observa en los sitios de aforo DMS-1, 2 y 3A.

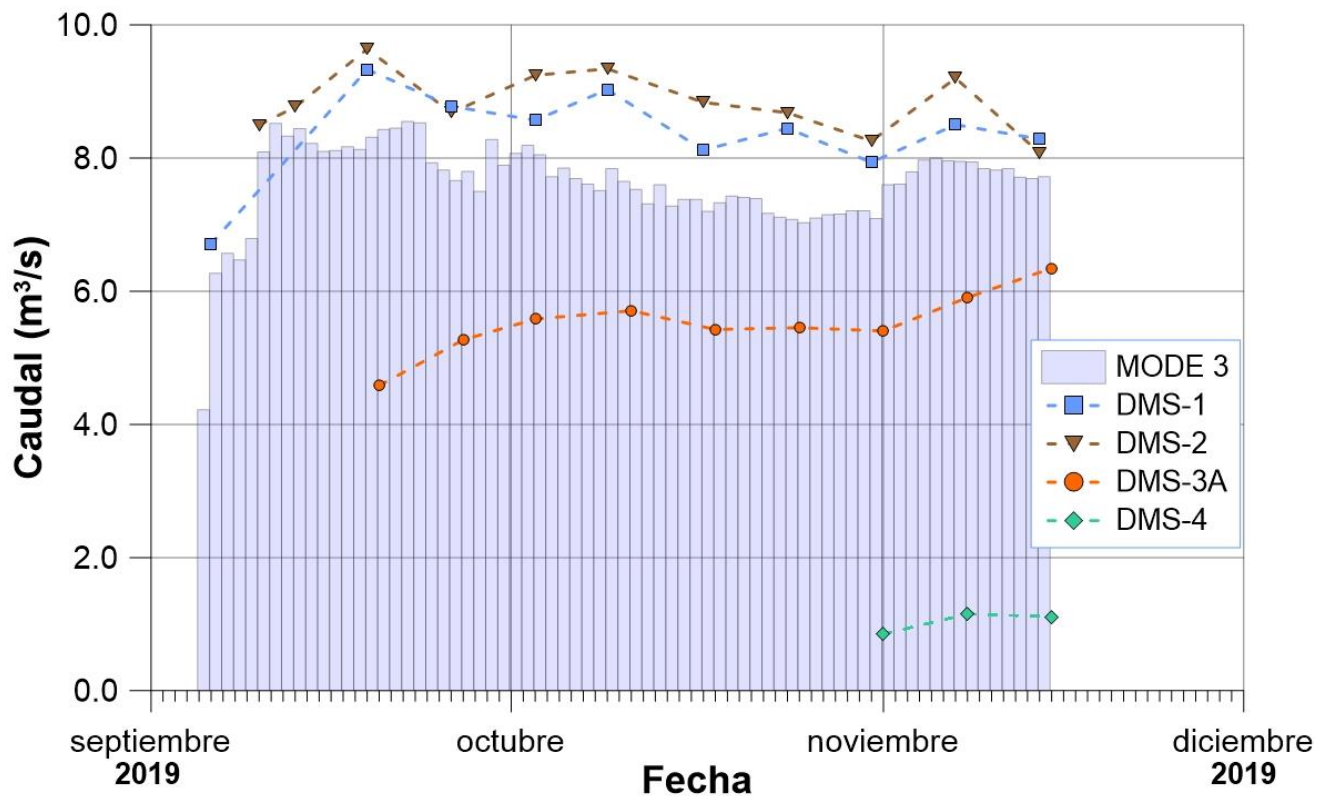


Figura 20. Descargas medidas en los sitios de aforo y obra de desvío MODE 3

La relación caudal – tirante en la sección de aforo DMS-1 mostró un comportamiento de ajuste lineal, obteniéndose un coeficiente de correlación (R^2) de 0.815 (figura 21). La ecuación de regresión lineal fue utilizada para la generación del hidrograma continuo, como se indicó en la metodología.

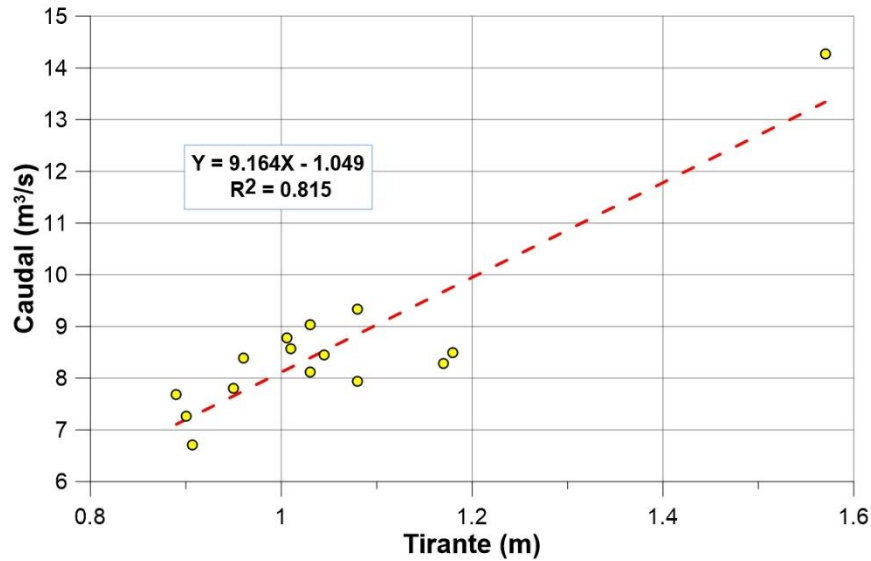


Figura 21. Relación caudal – tirante en la sección DMS-1

La relación caudal-tirante en el sitio DMS-2 mostró un comportamiento errático, ya que el mejor ajuste que se encontró fue el lineal y este solo mostró una correlación 0.677, por lo que el hidrograma resultante de la ecuación no representará el comportamiento mostrado en el sitio de aforo DMS-2 con la suficiente incertidumbre. El comportamiento y la ecuación obtenida de la regresión lineal para el DMS-2 se muestran en la [figura 22](#), en donde se puede observar que los valores de caudal están ubicados entre 8 y 10 m³/s y un caudal pico de 17.5 m³/s, el cual, si era removido, la correlación disminuía.

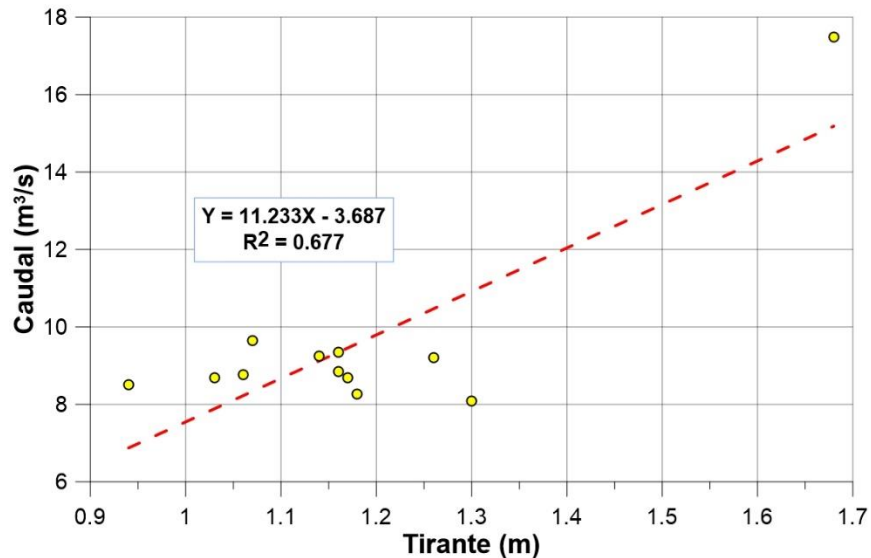


Figura 22. Relación caudal – tirante DMS-2

En la [figura 23](#) se observa la ecuación de ajuste resultante de la regresión lineal y el coeficiente de determinación (R^2) de 0.825, lo que indica que es un ajuste aceptable, considerando un ajuste lineal.

Es preciso señalar que en este caso se tienen caudales medidos que van desde los 4.6 m³/s hasta los 6.4 m³/s, se midieron caudales diversos dentro de ese intervalo durante el periodo de monitoreo.

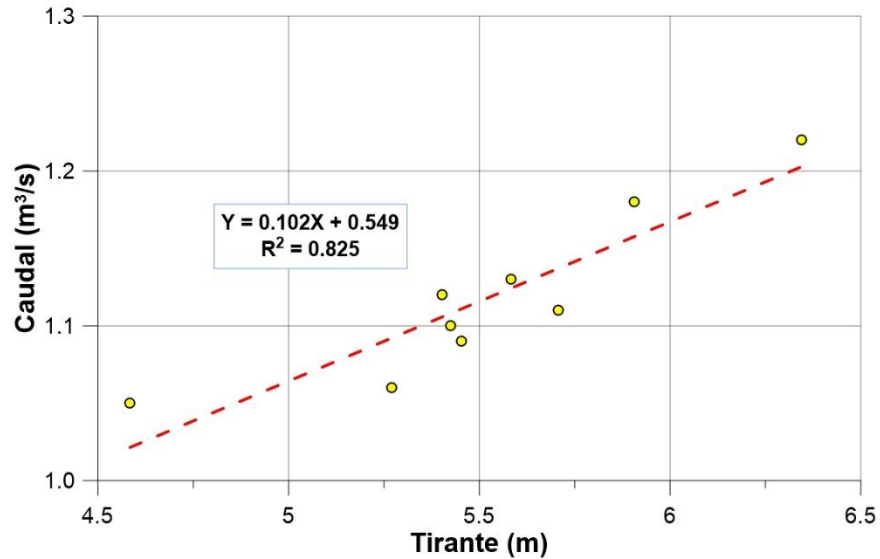


Figura 23. Relación caudal – tirante DMS-3A

La relación entre caudales y tirantes medidos en el sitio de aforo DMS-4 mostró un ajuste lineal, el cual está dado por la ecuación mostrada en la figura 24, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.871. Dado que el R^2 de esta relación es considerado como aceptable, la ecuación fue utilizada para la obtención del hidrograma continuo.

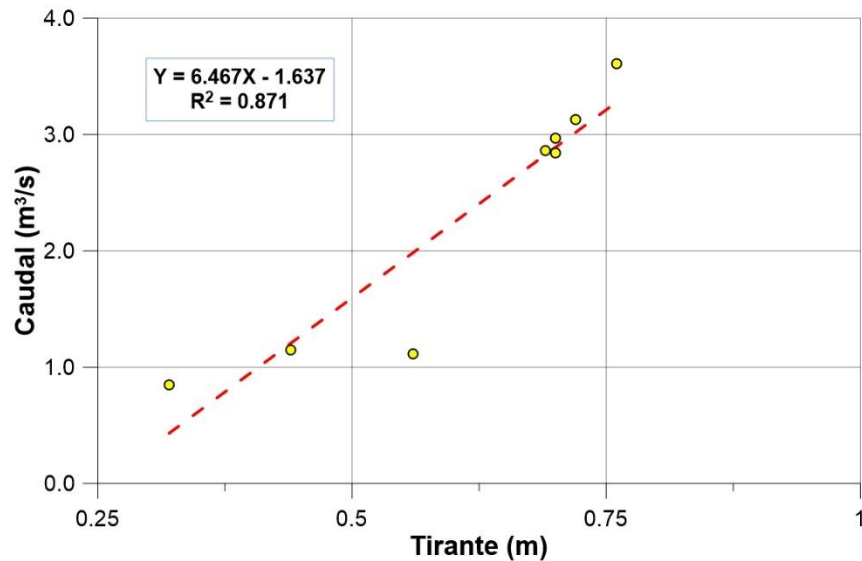


Figura 24. Relación caudal – tirante DMS-4

En la [figura 25](#) se muestran las evoluciones del nivel del agua en las cuatro secciones de aforo durante el período de monitoreo, además de los hidrogramas continuos obtenidos a partir de las ecuaciones resultantes de las relaciones caudal-tirante. La atenuación del pico mostrado en el tirante del agua y del caudal en los DMS-1 y DMS-2 con respecto a los DMS-3 y DMS-4, es debido a las pérdidas por infiltración del cauce, evaporación y evapotranspiración.

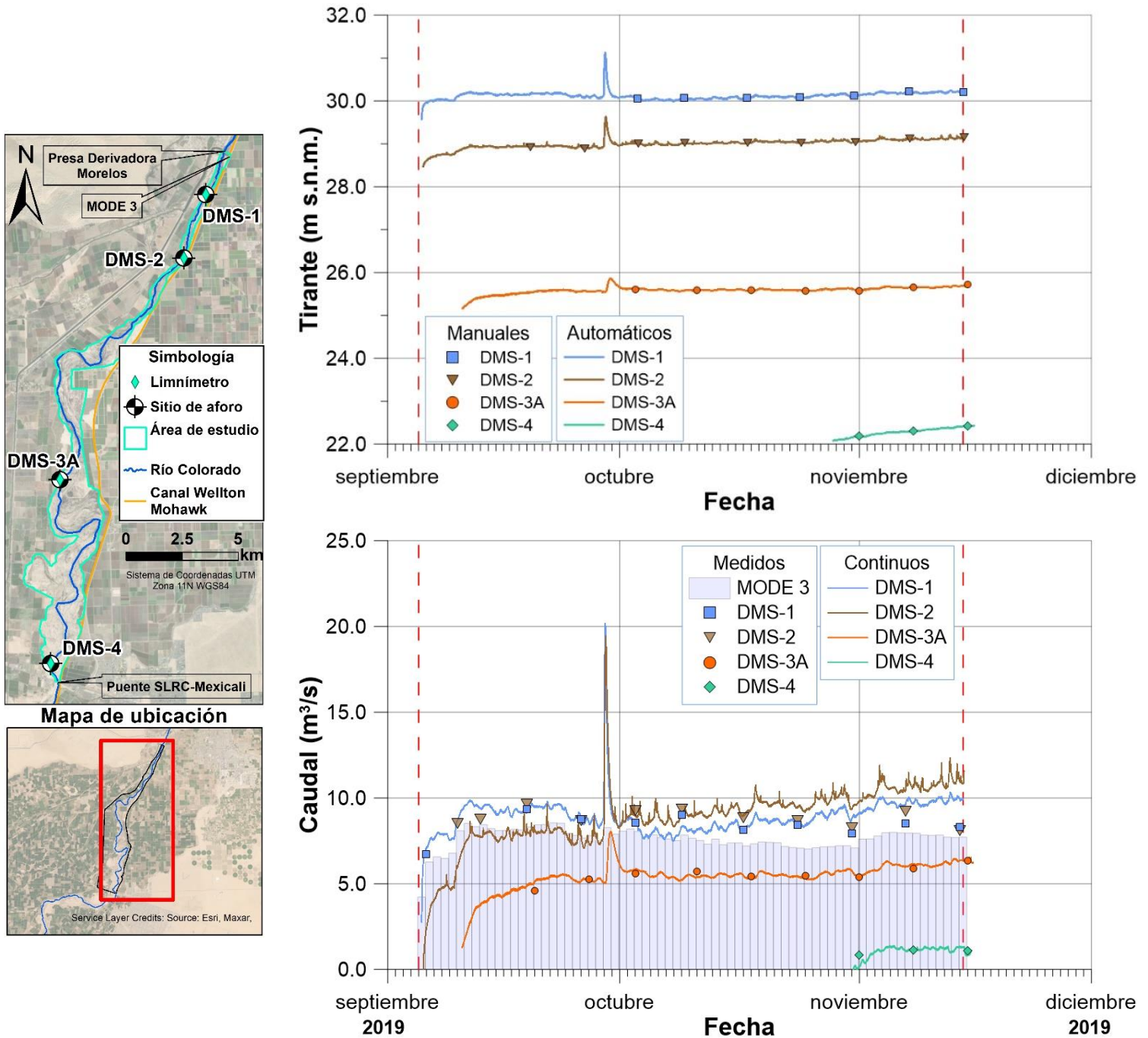


Figura 25. Evolución del tirante e hidrogramas en los sitios de aforo

Se realizó un análisis del volumen medido derivado de las descargas del WM en las diferentes secciones de aforo, así como en la obra de desvío MODE 3 (figura 26). El volumen descargado en la obra de desvío MODE 3 fue de 45.6 hm³, sin embargo, este valor está estimado en intervalos de medición diarios, a diferencia de los DMS que fueron estimados a partir de mediciones de nivel a cada 5 minutos. En la figura 26 se observa un comportamiento similar de las variaciones del volumen en las secciones MODE 3, DMS-1 y DMS-2, debido posiblemente a su cercanía y a que esta zona se encontraba inundada previamente al evento. Sin embargo, posterior al día 26 de septiembre de 2019, se presentó un aumento en el volumen descargado en la sección DMS-1 y DMS-2, esto debido a un evento meteorológico ocurrido en dicha fecha, lo que adicionalmente provocó descargas extraordinarias al cauce del Río Colorado en la PDM por temas asociados a la seguridad de la infraestructura, lo que incrementó el volumen descargado.

El volumen que se registró en el sitio de aforo DMS-1 hasta el día 15 de noviembre de 2019 fue de 53.24 hm³, mientras que para el DMS-2 fue de 53.45 hm³ para el mismo periodo, sin embargo, el volumen acumulado en este sitio de aforo fue estimado con el hidrograma obtenido de una ecuación que mostró un coeficiente de correlación menor a 0.7, por lo que el volumen estimado para el sitio de aforo DMS-2 debe considerarse como un valor aproximado. Para el sitio aforo DMS-3A se calculó un volumen de 29.69 hm³ para el día 14 de noviembre del 2019, siendo este el 56.23 % del volumen total en relación con el sitio de aforo DMS-2. Probablemente el 43.76% restante se perdió por infiltración, evapotranspiración, evaporación y/o por retención de agua por inundación de terrazas bajas debido a que a partir del kilómetro 16.8 el cauce se encuentra completamente seco. Para el sitio de aforo DMS-4 se calculó un volumen de 1.4 hm³ para el día 15 de noviembre de 2019, que equivale al 2.62% del volumen descargado en el sitio de aforo DMS-2. El DMS-4 fue el sitio en el que se midieron mayores pérdidas debido a su lejanía y tener el cauce totalmente seco.

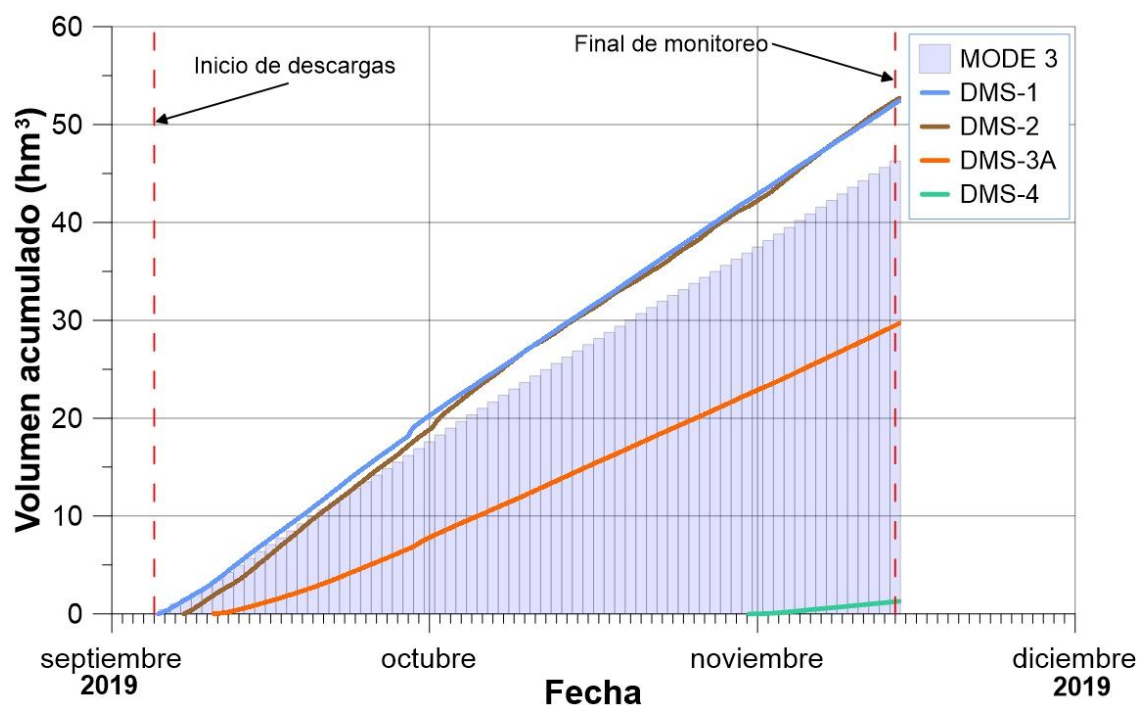


Figura 26. Volumen acumulado descargado en los sitios de aforo

7. 2. AGUA SUBTERRÁNEA

Al inicio del evento los piezómetros N5, N7, MA3, MA4 y MA12 se encontraban secos, sin embargo, con el incremento del nivel del agua subterránea se pudieron obtener mediciones. Los piezómetros próximos a la PDM (N1, N2, N3 y N4) mostraron un incremento menor que los subsecuentes, esto debido al estado antecedente de humedad y saturación del suelo.

El piezómetro N1, ubicado en la porción inicial de la zona de estudio a 168 m del cauce ([figura 27](#)), al inicio del monitoreo el nivel del agua subterránea se encontraba a una profundidad de 6.59 m. este piezómetro mostró una disminución en la profundidad del nivel freático de 0.365 m desde el inicio del monitoreo hasta el 4 de octubre de 2019, mostrando una tasa de incremento de 0.014 m/día. Posteriormente inició un aumento de profundidad mostrando una tasa de aumentos en la profundidad menores a un centímetro por día hasta el 18 de octubre. Para posterior iniciar un decremento en la profundidad, teniendo una profundidad del nivel freático al finalizar el evento de 6.1 m.

En el piezómetro N2, que se encuentra a 52 m del cauce del río, mostró una profundidad del agua subterránea al inicio de las descargas de 5.59 m. Posteriormente, inicio una disminución en la profundidad a una tasa de 0.02 m/día, registrando del inicio de las descargas hasta el 27 de septiembre de 2019, donde se midió una profundidad de 5.04 m. La tasa de decremento de la profundidad después del punto anteriormente mencionado fue menor a un centímetro por día hasta finalizar el monitoreo (14 de noviembre de 2019) donde se midió una profundidad de 4.96 m.

El piezómetro N3 ubicado a 600 m del cauce del río, mostró una profundidad del nivel freático al inicio de las descargas de 7.81 m, una vez iniciadas las descargas, mostró una disminución gradual de la profundidad del nivel freático, teniendo una tasa de decremento en su profundidad de 0.008 m/día, al finalizar el monitoreo, en este piezómetro se registró una profundidad del nivel freático de 7.125m.

Al inicio del monitoreo, el piezómetro N4, ubicado a 90 m del cauce del río, se midió una profundidad del nivel freático de 3.93 m. una vez iniciadas las descargas del canal WM, este piezómetro mostro una tasa de decremento en la profundidad del nivel freático de 0.02 m/día, calculada desde el inicio de las descargas, hasta el 29 de septiembre de 2019. Posteriormente la tasa de decremento en la profundidad del nivel freático fue menores a un centímetro diario, hasta finalizar el monitoreo, donde se midió una profundidad de 3.14 m.

Como se mencionó en capítulos anteriores, una de las razones por la que el cauce del río Colorado aguas abajo de la PDM presenta agua, es debido a la recarga proveniente del Canal Reforma que se encuentra al Oeste del Río Colorado, el cual no cuenta con revestimiento en su parte inicial, por lo que está sujeto a pérdidas que recargan el acuífero y perdidas de la propia PDM, esta dinámica se observa en la [figura 27](#), donde, en el piezómetro N1, se midió una profundidad mayor que la que se observó en el piezómetro N2, el cual se encuentra cercano al cauce del río. A diferencia de la primera sección de piezómetros, en el N3 y N4 se observó una disminución en la profundidad del nivel freático producido por la recarga derivada de las pérdidas por infiltración en el cauce, además el comportamiento del piezómetro N3 difiere del piezómetro N4, donde no se observó una reducción de

la profundidad del nivel freático acelerado, este comportamiento se puede observar en la figura 22 observando la evolución de la profundidad del nivel freático. Lo anterior, podría deberse a la presencia de diferentes tipos de sedimentos que componen las capas de suelo de esa sección piezométrica, sin embargo, no se cuenta con la información suficiente para realizar una afirmación. La evolución del nivel de agua subterránea de los piezómetros descritos se muestra en la figura 27, donde, debido a la respuesta del acuífero, se considera con un comportamiento perdedor.

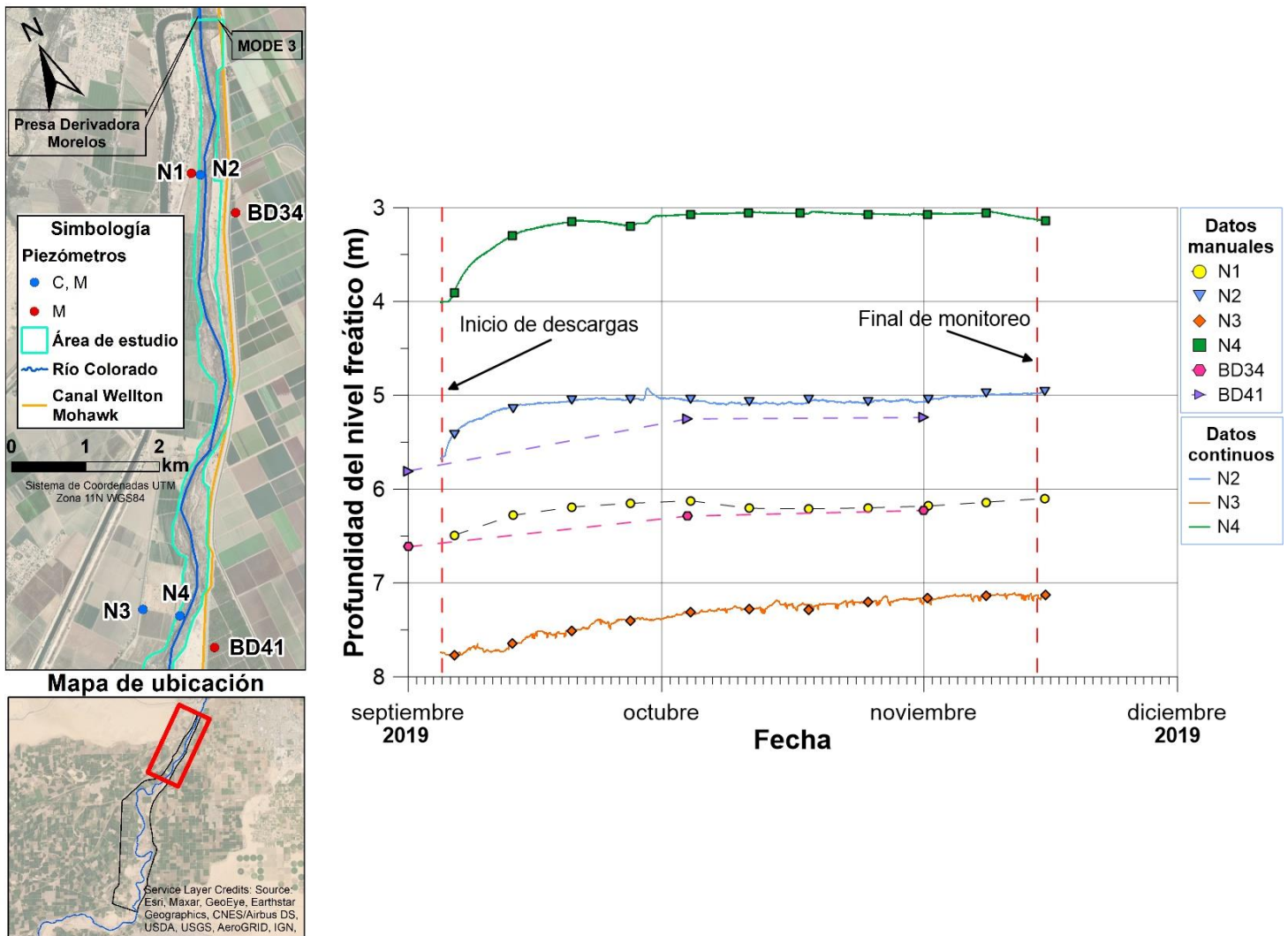


Figura 27. Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros N1, N2, N3, N4, BD34 y BD41

Durante las tres semanas posteriores al inicio de descargas en el cauce del Río Colorado, el piezómetro N5, ubicado a 330 m del cauce del río, se mantuvo seco, el 27 de septiembre se registró la primera lectura de la profundidad del nivel freático (5.775 m), teniendo una tasa de decremento

gradual en la profundidad del nivel freático de 0.03 m/día, calculada desde la primera medición realizada en el piezómetro, hasta el 15 de noviembre de 2019, donde la profundidad medida fue de 4.227 m.

El piezómetro N6, ubicado a 75 m del cauce del río, se mantuvo seco durante todo el periodo de monitoreo, esto debido a la profundidad del piezómetro, la cual no es la suficiente para registrar variaciones de nivel freático, aunque es uno de los piezómetros que se encuentra ubicados cerca del cauce del Río Colorado.

En el piezómetro N10, ubicado a 220 m, se midió una profundidad del agua subterránea al inicio del monitoreo de 9.3 m, esta profundidad mostró un comportamiento constante hasta el día 7 de septiembre de 2019. Posteriormente, el 4 de octubre se midió una profundidad de 6.02 m, con lo cual se calculó una tasa de decremento en la profundidad del nivel freático de 0.12 m/día. Posteriormente, la tasa de decremento cambió a 0.018 m/día, la cual fue calculada del 4 de octubre al 14 de noviembre de 2019, donde se midió una profundidad de 5.245 m.

El piezómetro N7, que se encuentra a 280 m del cauce del río, estaba seco durante siete semanas posteriores al inicio de la descarga, en la octava semana se obtuvo el primer registro de nivel freático en la cual se midió una profundidad de 7.46 m. En este piezómetro se calculó una tasa de disminución de profundidad del nivel freático de 0.01 m/día, calculada desde la primera medición realizada, hasta el 14 de noviembre de 2019, donde se midió una profundidad del nivel freático de 7.2 m.

El piezómetro N8 ubicado a 70 m del cauce del río, mostro una profundidad del nivel freático al inicio del monitoreo de 10.995 m, esta profundidad mostró un comportamiento constante hasta el 10 de septiembre de 2019. Posteriormente, se calculó una tasa de decremento en la profundidad de 0.23 m/día, calculada con los valores observados del 10 de septiembre al 3 de octubre de 2019, donde se midió una profundidad del agua subterránea en el piezómetro de 5.775 m. Posteriormente, se calculó una tasa de decremento en la profundidad del nivel freático de 0.02 m/día, desde el 3 de octubre al 14 de noviembre de 2019, donde se midió una profundidad de 4.845 m.

En el piezómetro N9, que se encuentra a 50 m del cauce del río, se midió una profundidad del agua subterránea de 9.85 m al inicio de las descargas, esta profundidad se mantuvo constante hasta el 12 de septiembre de 2019. Posteriormente el 3 de octubre de 2019 se midió una profundidad de 5.87 m, con lo cual se calculó una tasa de decremento en la profundidad del nivel freático de 0.14 m/día, desde el 12 de septiembre al 3 de octubre de 2019. Después, la tasa de decremento fue de 0.02 m/día hasta finalizar el monitoreo, el cual finalizó el 14 de noviembre de 2019, donde se midió una profundidad de 4.9 m.

Previo a las descargas, los piezómetros N8, N9 y N10 mostraban un comportamiento constante (oscilaciones menores a 0.05 m), esto debido a la influencia del flujo regional que tiene el acuífero, el cual tiene una dirección de Noreste a Suroeste, el cual está influenciado fuertemente por la actividad agrícola de los Valles de Mexicali y Yuma. Resultado de las descargas del WM, la zona seca del cauce del RC se inundó, por lo cual el acuífero se recargó, por la infiltración vertical, horizontal y lateral que estos flujos aportaron a las zonas cercanas al río resultando en un incremento del nivel freático. En esta zona el suelo no se encuentra saturado, la composición de su textura en su mayoría

es de arenas y la profundidad al nivel freático antecedente es de 16 m en promedio, por lo que se presentó una mayor infiltración que en las zonas con suelo saturado próximas a la PDM. En la [figura 28](#) se muestran las variaciones del nivel freático en los piezómetros N5, N6, N7, N8, N9 y N10 durante el período de estudio.

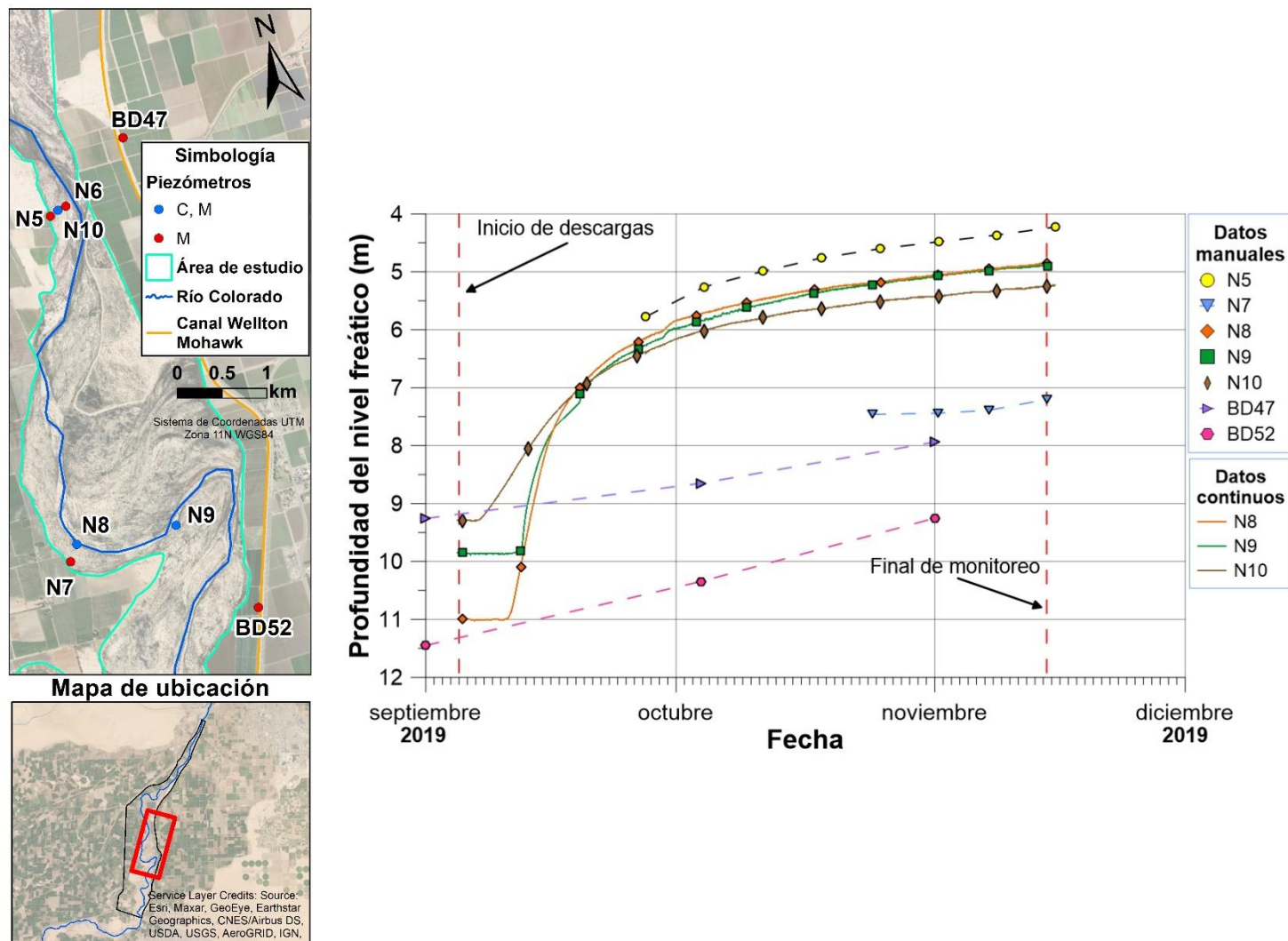


Figura 28. Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros N5, N7, N8, N9, N10, BD47 y BD52

En el piezómetro MA3 ([figura 29](#)) no se registraron mediciones de agua subterránea, es decir, se mantuvo seco hasta el final del monitoreo, en contraste con el piezómetro MA4 que debido a su cercanía al cauce del río quedó completamente inundado. Las primeras mediciones que se obtuvieron en el piezómetro MA12, el cual se encuentra ubicado a 60 m del cauce del río, fueron el 9 de octubre del 2019, donde se midió una profundidad del nivel freático de 10.09 m. la tasa de decremento de la profundidad del nivel freático que se calculó en este piezómetro fue de 0.06 m/día, la cual se calculó del 9 de octubre al 14 de noviembre de 2019. La evolución del nivel del agua subterránea en el piezómetro MA12 se muestra en la [figura 29](#).

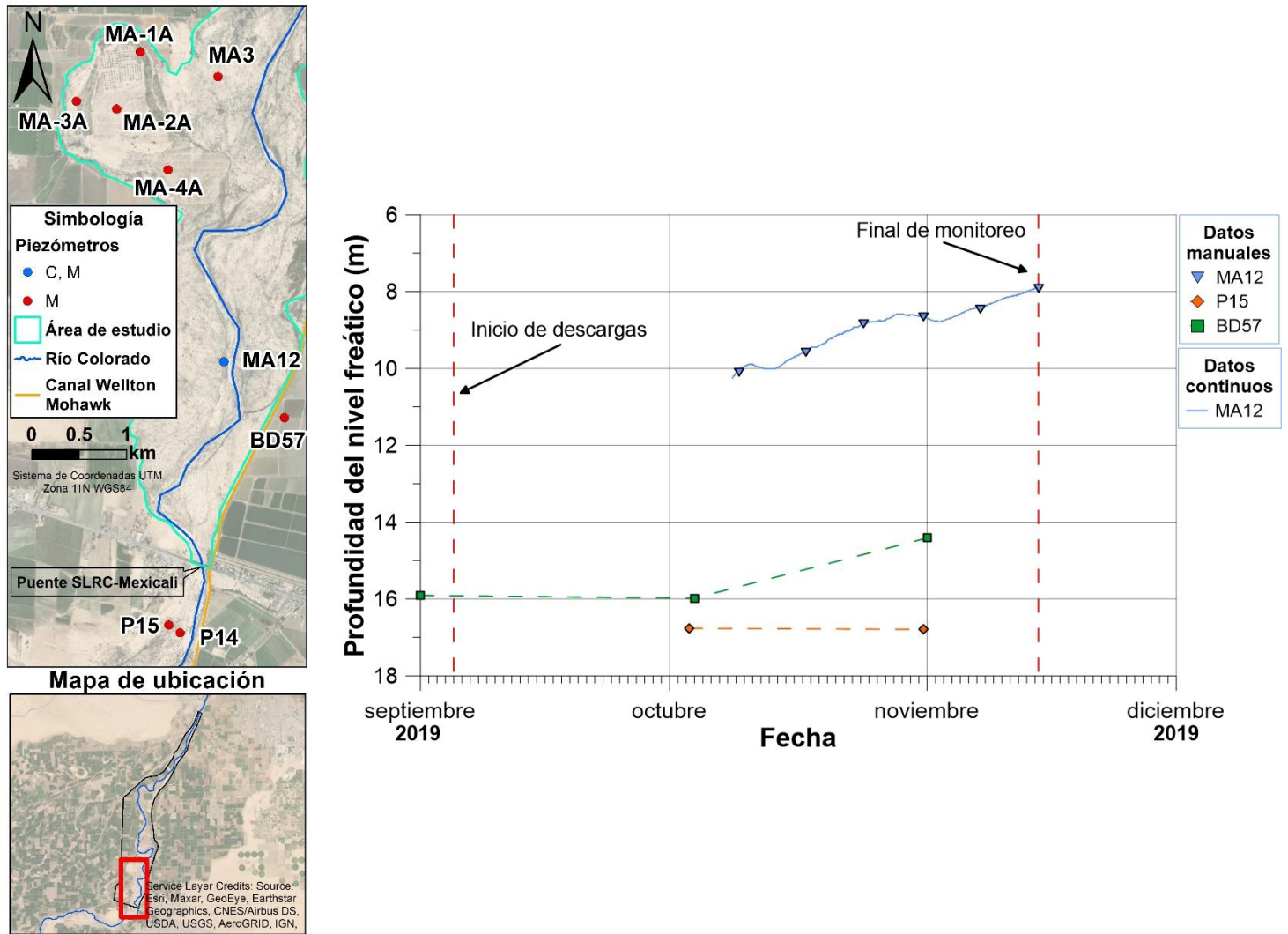


Figura 29. Evolución de la profundidad del nivel freático durante las descargas provenientes del canal WM en los piezómetros MA12, P15 y BD57

En la figura 30 se muestran los contornos de las elevaciones del agua subterránea registradas en los piezómetros del 26 de agosto de 2019 (piezómetros mexicanos) y primero de octubre de 2019 (piezómetros estadounidenses), así como las direcciones de flujo del acuífero previo a la descarga iniciada el 5 de septiembre. En los primeros 16 km se observó una conexión entre el río y el acuífero, teniendo en la parte inicial del área de estudio, una descarga del acuífero hacia el cauce del río, sin embargo, esta situación se invierte aguas abajo, donde el río recarga el acuífero. En la zona seca se observa el comportamiento regional que tiene el acuífero, teniendo un movimiento de agua de Noreste a Suroeste.

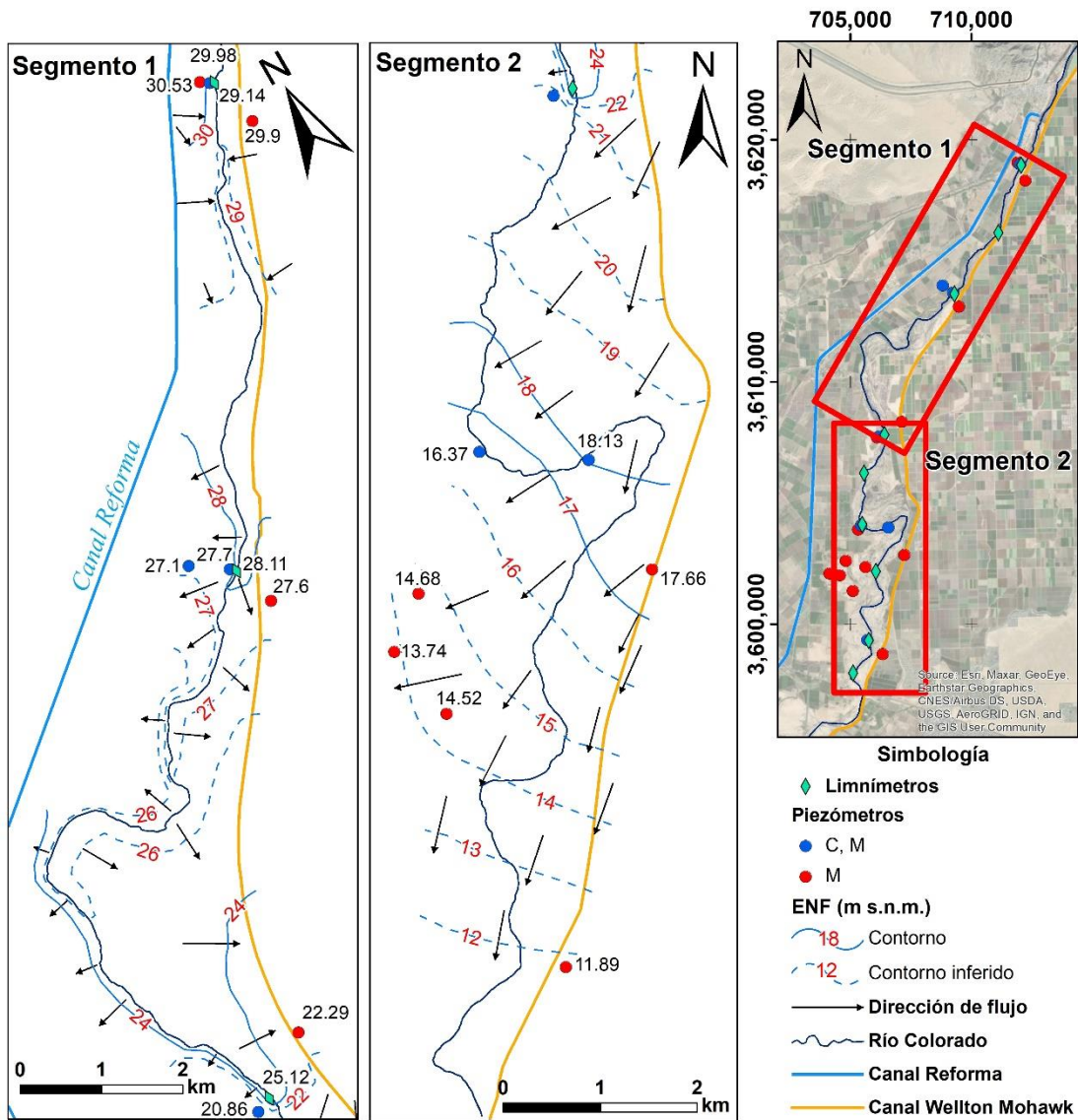


Figura 30. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) antes del 5 de septiembre de 2019.

Treinta días después de iniciada la descarga, el frente del agua en el cauce se encontraba aproximadamente a 29 km aguas debajo de la sección DMS-1. En la figura 31 se muestra un mapa con la configuración de la elevación del nivel freático 30 días después de iniciada la descarga, así como las direcciones de flujo en el acuífero. Se observa un comportamiento similar al que se tuvo previo a las descargas, sin embargo, la recarga del río al acuífero es mayor a la anterior al evento, como es de esperarse.

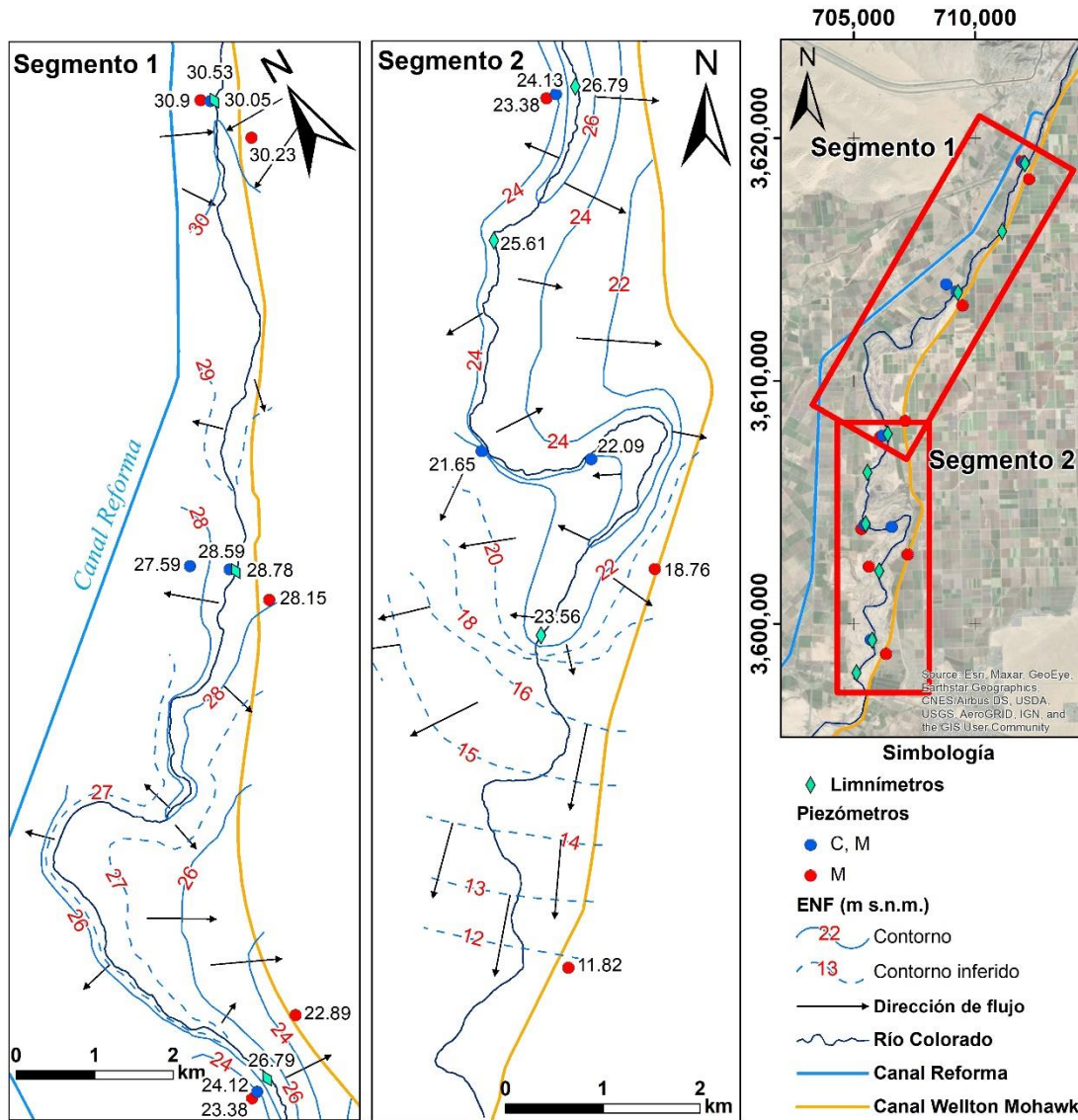


Figura 31. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) 30 días posteriores al inicio de las descargas de canal WM

Dos meses posteriores al inicio de la descarga, el frente del agua se encontraba inundando casi por completo el cauce de la zona limítrofe. En la figura 32 se muestran los contornos de la elevación del nivel freático creadas a partir de los piezómetros dos meses después de iniciadas las descargas provenientes del canal WM, así como las direcciones de flujo del acuífero, mostrando al inicio el segmento 1 (figura 32) una recarga proveniente del acuífero, posteriormente, esta situación se invierte, donde el río es el que recarga al acuífero.

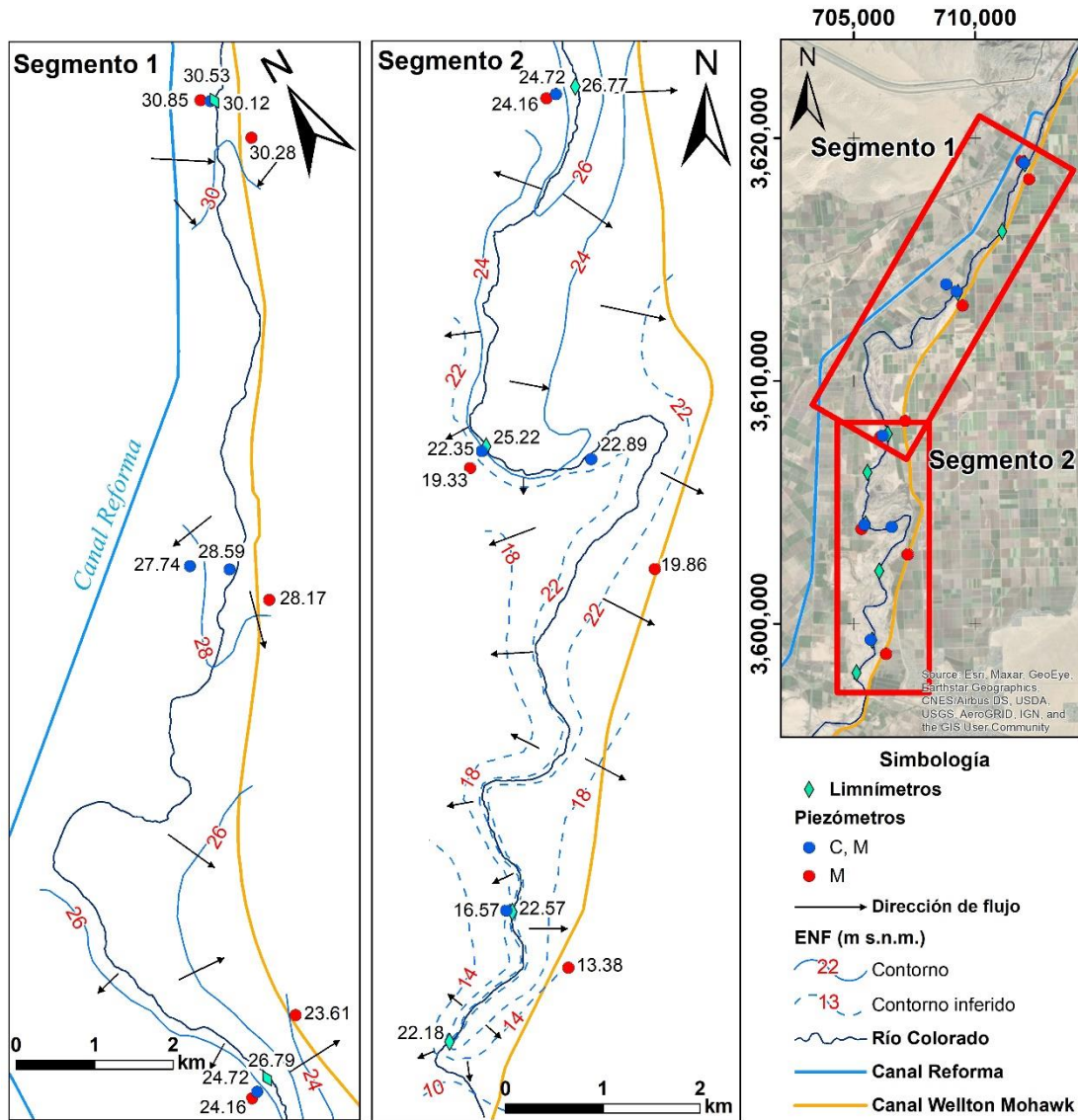


Figura 32. Contornos de elevación del nivel freático (ENF) 60 días posteriores al inicio de las descargas de canal WM

A partir de las superficies piezométricas generadas utilizando la red de pozos de observación en la zona limítrofe y de los limnímetros instalados dentro del cauce del río, se realizó una comparación de la elevación del espejo del agua en el cauce del río. En la figura 33 se puede observar la evolución del espejo del agua dentro del cauce en intervalos de 30 días.

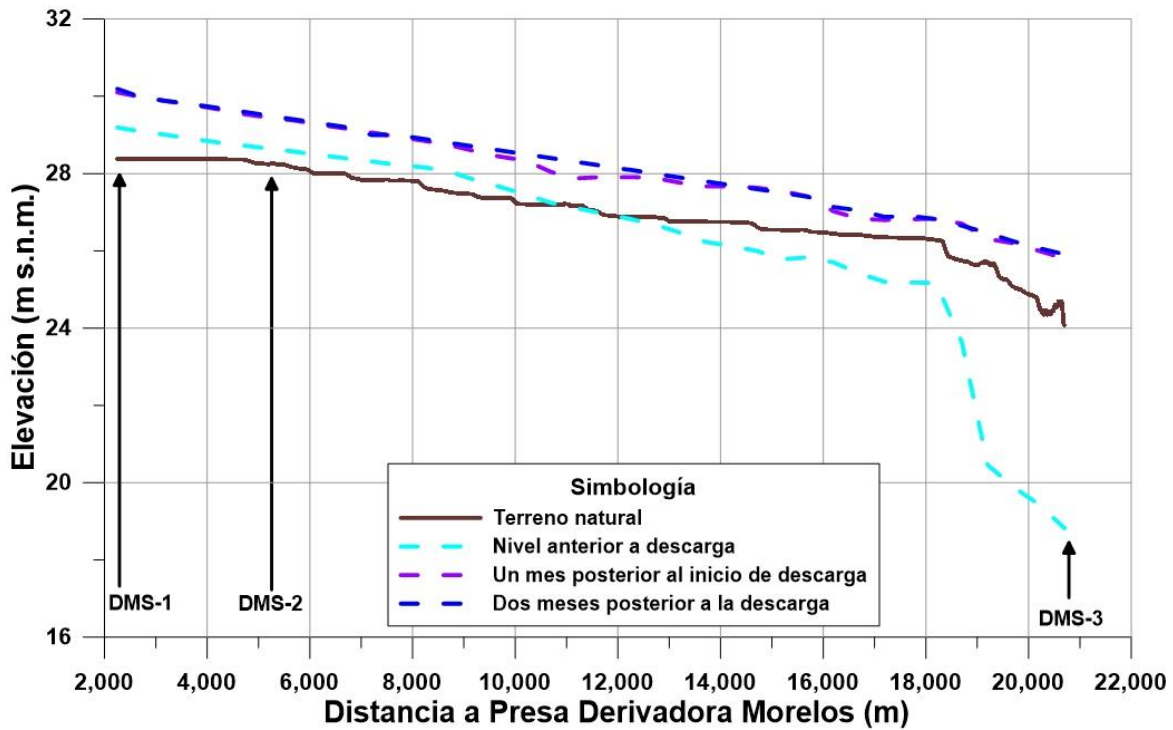


Figura 33. Eje del cauce del RC y la evolución del agua subterránea en intervalos de 30 días

7. 3. MODELIZACIÓN HIDRÁULICA

7. 3. 1. MODELO GEOMÉTRICO

Las elevaciones del fondo del cauce en las secciones de aforo DMS-1 y DMS-2 son de 28.4 m y 28.2 m respectivamente, estas elevaciones corresponden al modelo digital de elevaciones obtenido de la imagen Lidar posterior al evento del Flujo Pulso en 2014, que considera el espejo de agua como parte del terreno natural. En las figuras 34 y 35 se muestra la sección original y la sección modificada del terreno natural en el cauce del RC realizada al modelo digital de elevaciones.

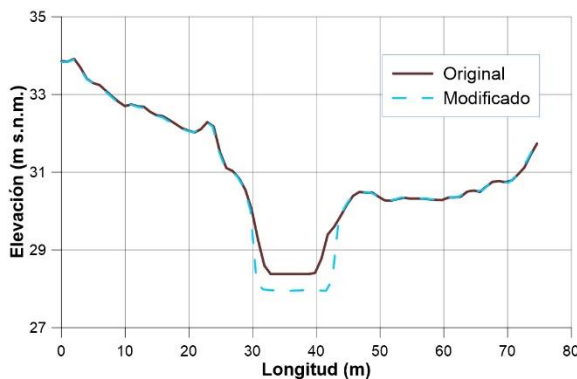


Figura 34. Sección transversal DMS-1

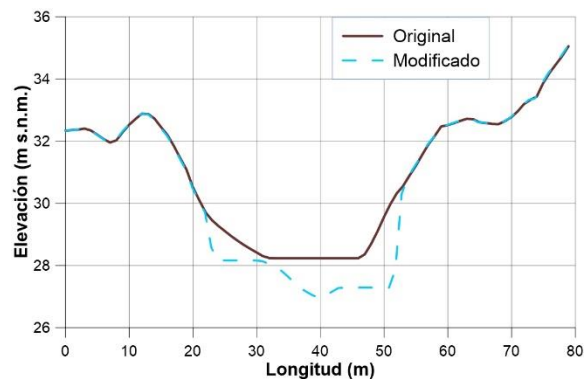


Figura 35. Sección transversal DMS-2

Para obtener la nueva geometría se eliminó la zona del modelo digital de elevaciones que era afectado por el espejo de agua en la zona inundada. En las [figuras 36](#) se muestra el polígono que delimita la inundación que se tenía presente al momento de obtener la información para la elaboración de la imagen LiDar.

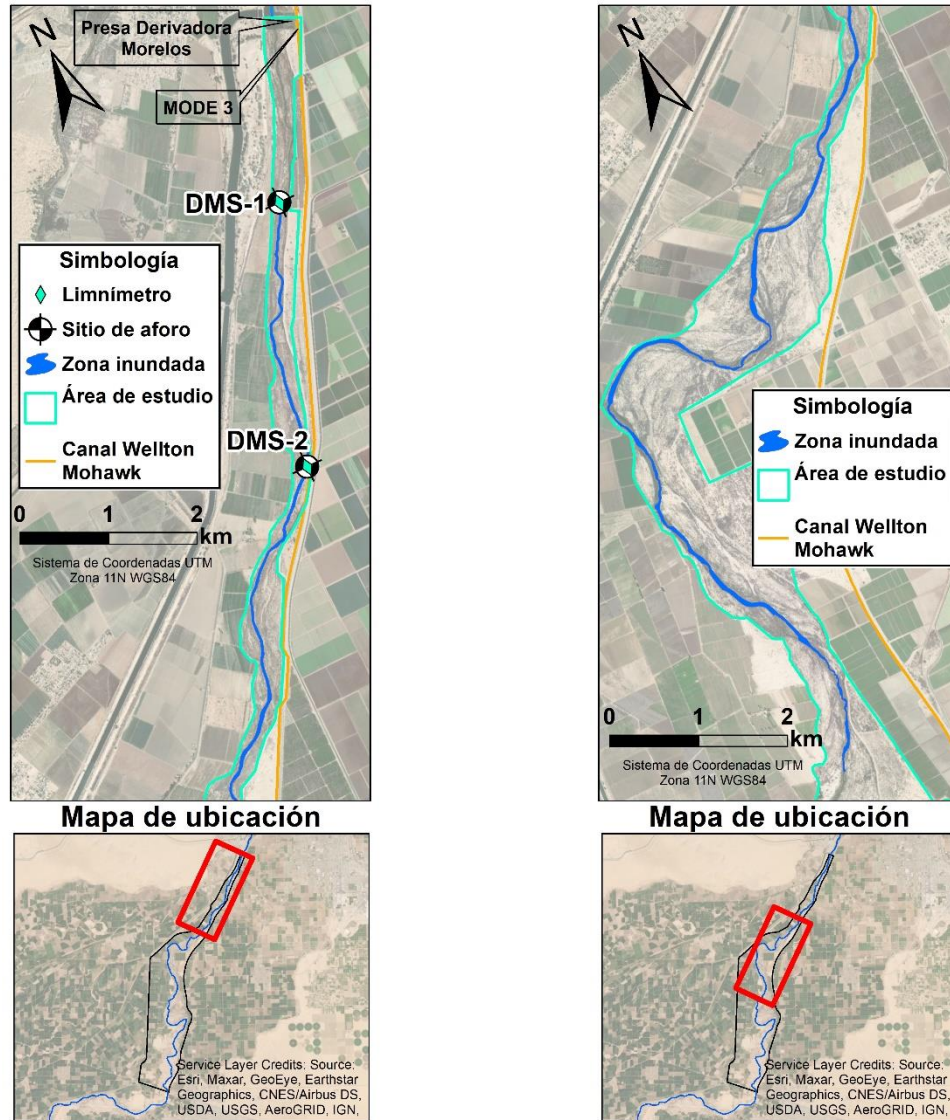


Figura 36. Zona inundada durante recolección de datos para construcción de MDE posterior al evento Flujo Pulso 2014

Con el mismo polígono se creó el modelo de elevaciones de la zona inundada, posteriormente se unieron los dos modelos de elevación. En la [figura 37](#) se muestra los resultados del nuevo relieve topográfico de la zona limítrofe, donde la elevación en la sección de aforo DMS-1 es de 27.95 m y en la sección DMS-2 es de 27 m.

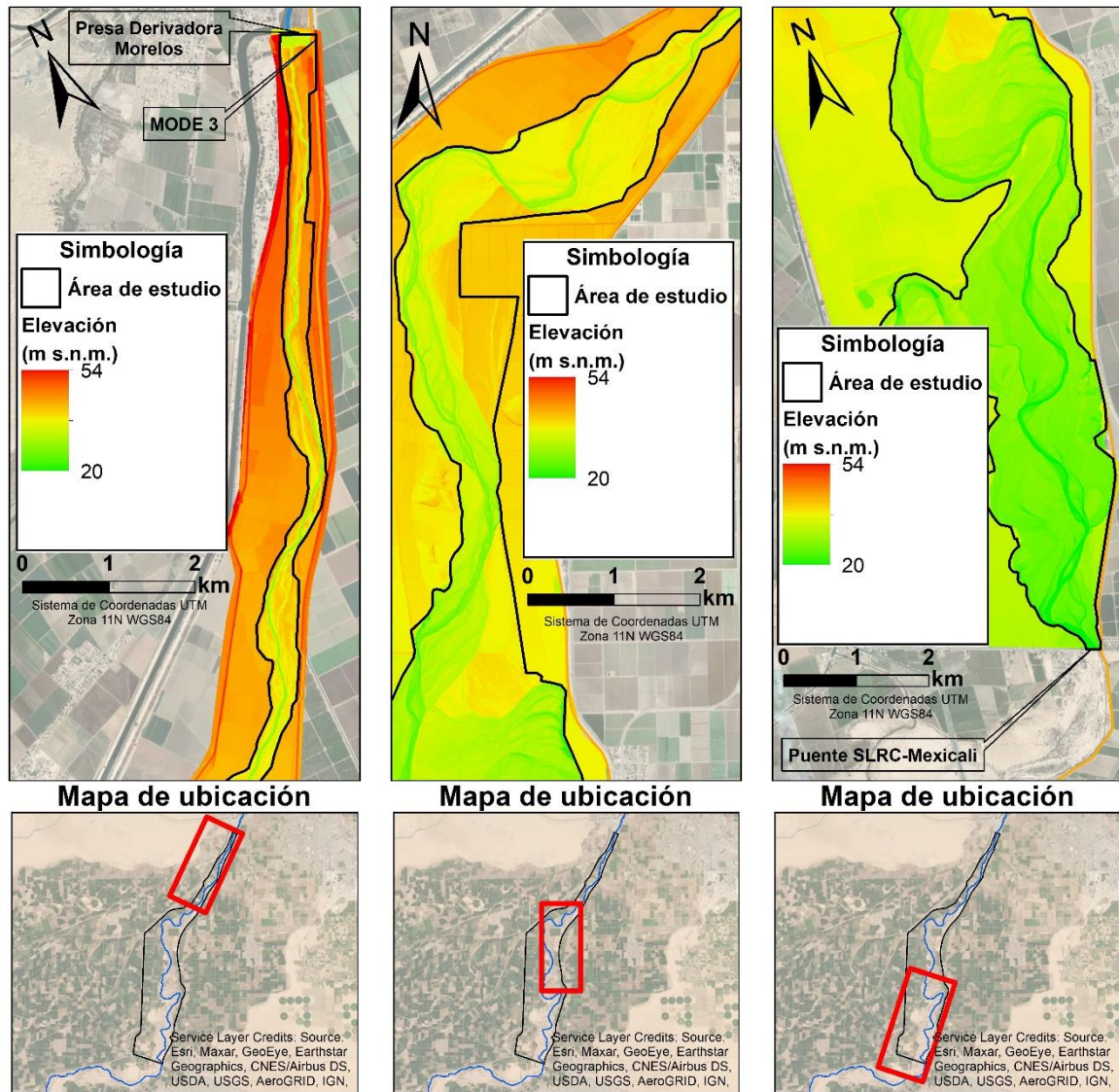


Figura 37. Modelo digital de elevaciones del área de estudio

7. 3. 2. PROYECTO

En la [figura 38](#) se muestran los polígonos de tipo de coberturas utilizados en el modelo hidráulico del río Colorado, la configuración de éstos se realizó con ayuda de imágenes satelitales, realizando una clasificación que depende del tipo de cobertura que tiene la zona, a estos polígonos se les asignó un valor inicial de rugosidad, estos valores iniciales se basaron en los utilizados por [Salcedo Peredia \(2014\)](#) y los recomendados por el propio manual de HEC-RAS.

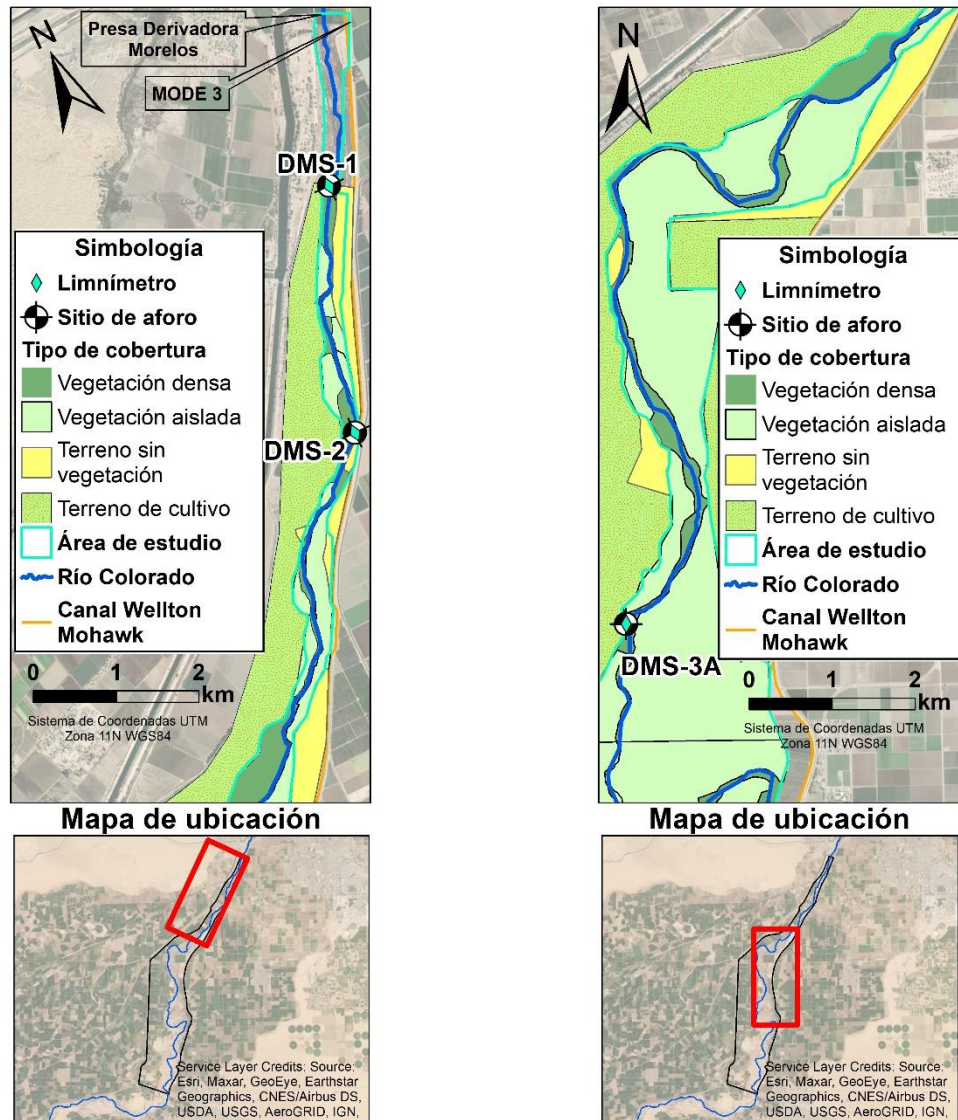


Figura 38. Distribución del tipo de cobertura en la zona limítrofe

Para la construcción del modelo, se creó un polígono para delimitar el mallado del área de estudio, cubriendo toda la zona que se esperaba fuera inundada. El tamaño de la malla se eligió de 50 por 50 metros, en las zonas inundables y de un tamaño menor en la zona del cauce principal. Además, se consideró una línea de quiebre, haciendo que las fronteras de las celdas coincidieran con cambios en la topografía del cauce natural, lo que permite un aumento en la precisión del modelo. Se formaron en total 8,790 celdas, el tamaño de celda se seleccionó con base en dos criterios: el primero fue la precisión alcanzada por el modelo, observándose durante la calibración que a mayor tamaño de celta disminuía la precisión del nivel de agua; el segundo, se refiere al rendimiento en el tiempo de cómputo del modelo, con celdas de menor tamaño, el tiempo de cómputo se incrementaba, por el contrario, con celdas de mayor tamaño, el tiempo de proceso del HEC-RAS para generar el modelo hidrodinámico osciló entre los 6 y 10 minutos. En la figura 39 se observa la configuración del mallado utilizado en la elaboración del modelo en estado transitorio de 2 dimensiones.

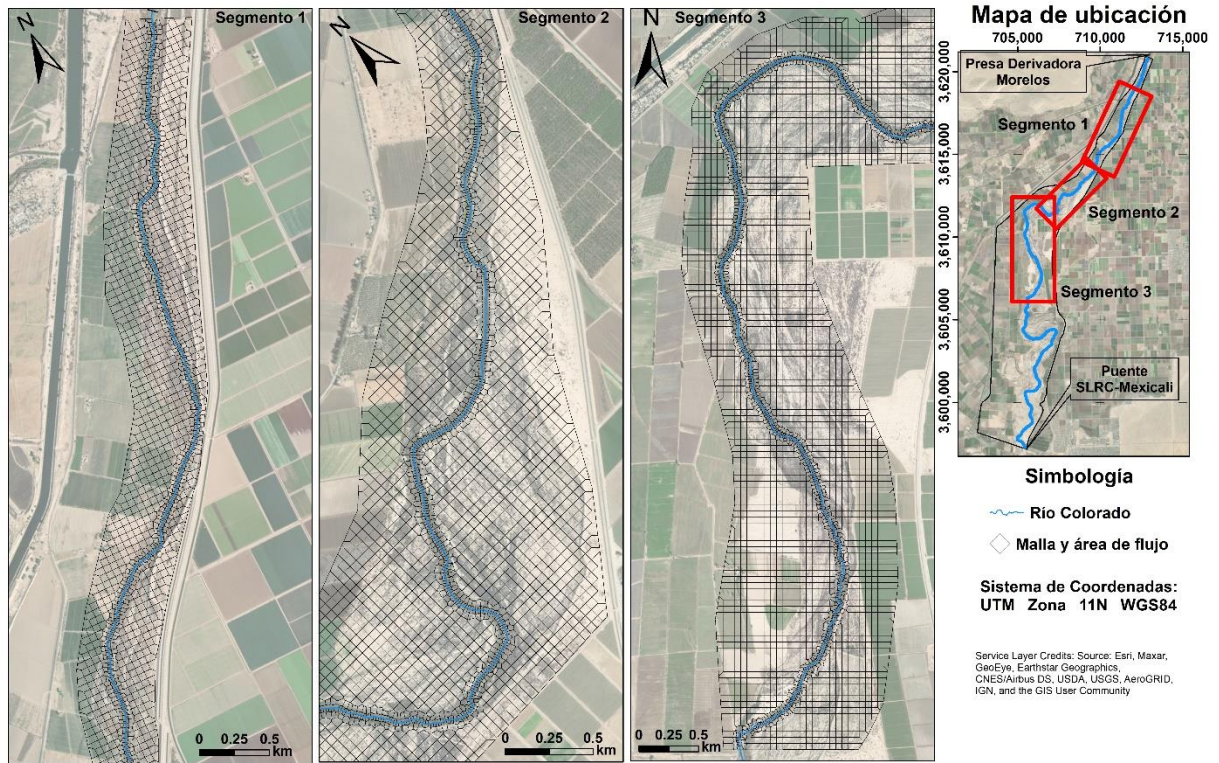


Figura 39. Configuración de la malla utilizada en el modelo hidráulico

Las condiciones de frontera que gobiernan el modelo en este trabajo de investigación son dos; la primera, en la zona norte, es el hidrograma continuo de la sección de aforo DMS-1 obtenido en campo (figura 40), el cual cuenta con registros a cada 5 minutos, y; en la zona sur, la condición de frontera de salida utilizada fue la profundidad normal, utilizando el valor de la pendiente media ponderada, que es 0.00035, la cual se encuentra en la sección de aforo DMS-3 (figura 40)

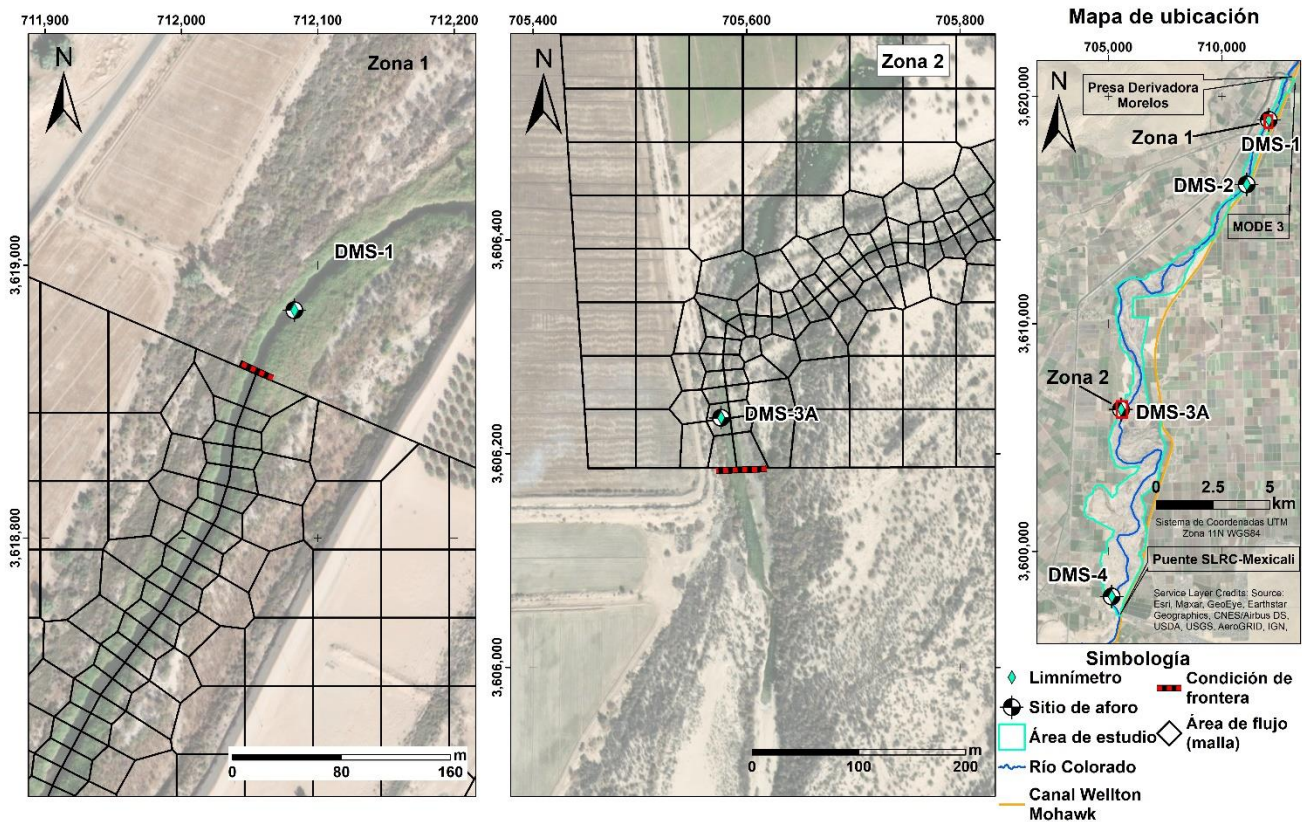


Figura 40. Ubicación de condiciones de frontera de entrada (zona 1) y salida (zona 2)

7. 3. 3. CALIBRACIÓN

Uno de los principales modificadores del comportamiento hidrodinámico del río son las pérdidas de energía debidas a la rugosidad. Al modificar los valores de rugosidad durante cada simulación, los hidrogramas resultantes presentaban diferente comportamiento. Las pérdidas de energía no dependen exclusivamente del tipo de cobertura vegetal, sino también del material en el cauce, la inclinación y forma de los taludes, así como las pendientes propias del cauce. Todos estos factores pueden ocasionar una disminución en la pendiente de energía de un río. Los valores que se encuentran en la Tabla 1, son los valores finales utilizados en los polígonos de tipo de cobertura con los cuales, los hidrogramas resultantes mostraban un comportamiento similar a los hidrogramas reales.

Tabla 2. Valores de rugosidad utilizados en el modelo hidráulico

Tipo de cobertura	Rugosidad
Vegetación densa	0.1
Vegetación aislada	0.08
Terreno sin vegetación	0.01
Terreno de cultivo	0.05

Los valores de rugosidad y profundidad normal se ajustaron de tal manera, que la elevación y el comportamiento de la evolución del espejo de agua entre el modelo creado en HEC-RAS y los hidrogramas de los sitios de aforo mostraran valores similares en tiempo y elevación. En las [figuras 41, 42 y 43](#) se muestra el comportamiento entre los valores resultantes del modelo e hidrogramas de cada sitio de aforo. En la [figura 41](#) se observa el comportamiento real y simulado del sitio de aforo DMS-1, el comportamiento entre ambas es similar en magnitud y temporalidad, además, las diferencias entre ambos hidrogramas fueron menores a 0.01 m en promedio.

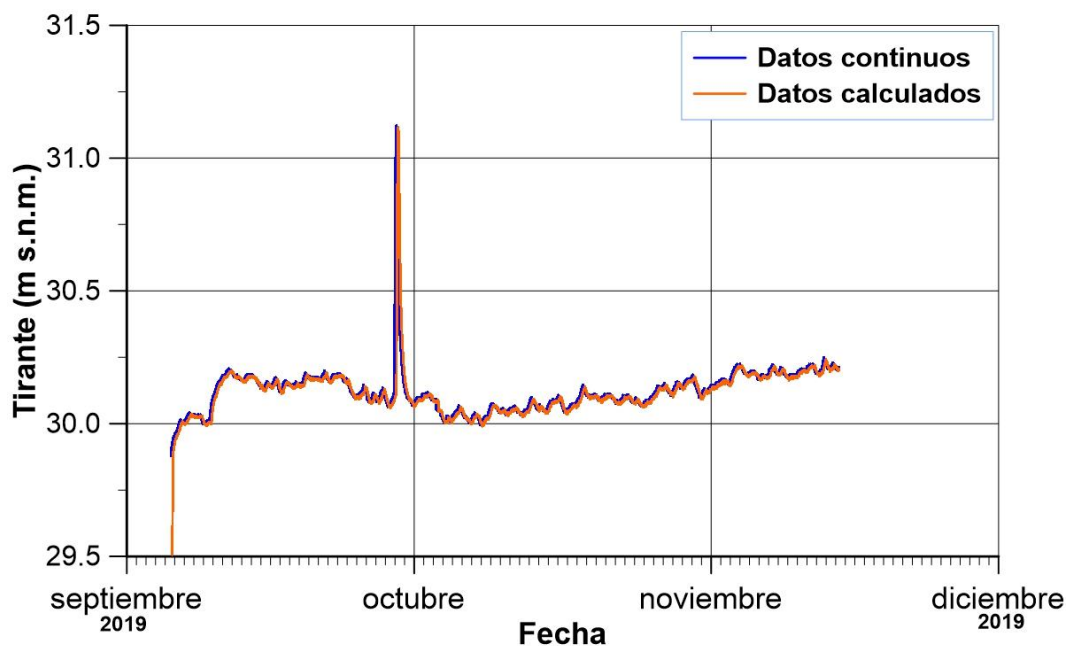


Figura 41. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-1

En la sección de aforo DMS-2 los valores de los datos continuos y los datos calculados del modelo hidráulico mostraron un comportamiento similar en el cambio de magnitudes con respecto al tiempo. Sin embargo, las elevaciones difirieron en magnitud, en la [figura 42](#) se observa la diferencia de magnitudes entre ambas elevaciones, teniendo diferencias en promedio de 0.65 m.

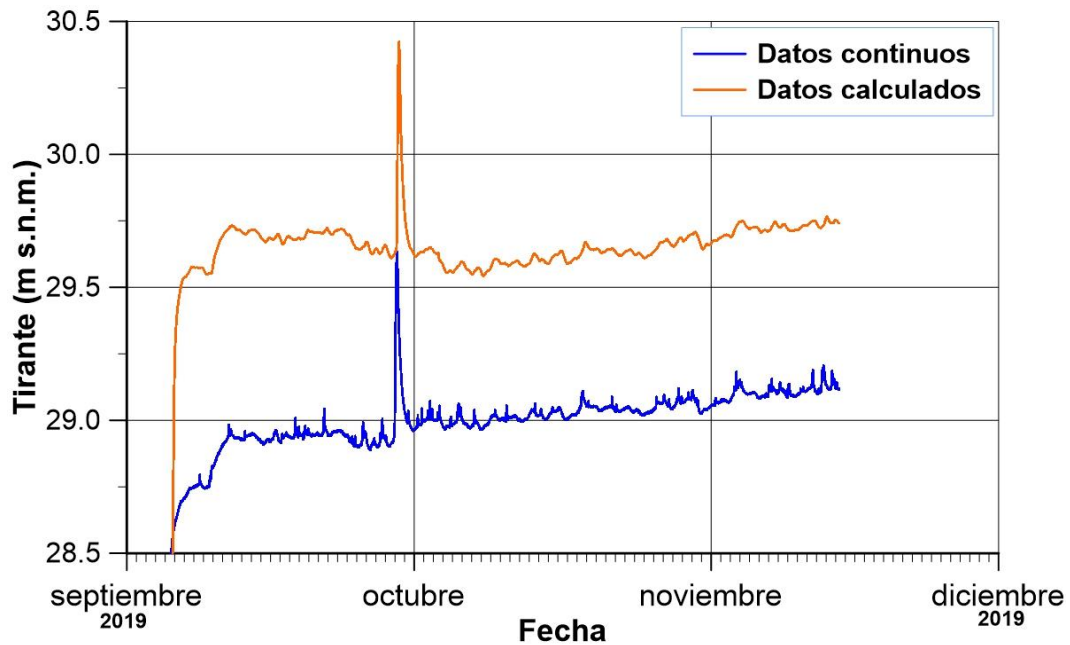


Figura 42. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-2

Comparación con los datos obtenidos en las campañas de monitoreo. La llegada del frente del agua en los resultados del modelo ocurre antes que los datos medidos, esto es debido al valor de la rugosidad que se utilizó. Al realizar pruebas con diferentes rugosidades se observaba que, al aumentar el valor, el tiempo de llegada del frente del agua del modelo se aproximaba a la observada, lo que sugería aumentar el valor de la rugosidad. Sin embargo, el comportamiento del hidrograma del modelo a lo largo del tiempo se modificaba drásticamente difiriendo de los valores reales. Se optó por dar prioridad a la forma del hidrograma durante todo el tiempo simulado sacrificando el ajuste en elevación de ambos hidrogramas. La rugosidad previamente mencionada en la tabla 1 fue utilizada para obtener la evolución del espejo del agua simulado que se presentan en la [figura 43](#). Si bien, al inicio del evento difiere en magnitud y en el cambio de esta a través del tiempo, posterior al flujo pico que inició el 29 de septiembre de 2019, toman una magnitud y cambio de esta similar, mostrando una diferencia promedio entre ambos eventos de 5 centímetros.

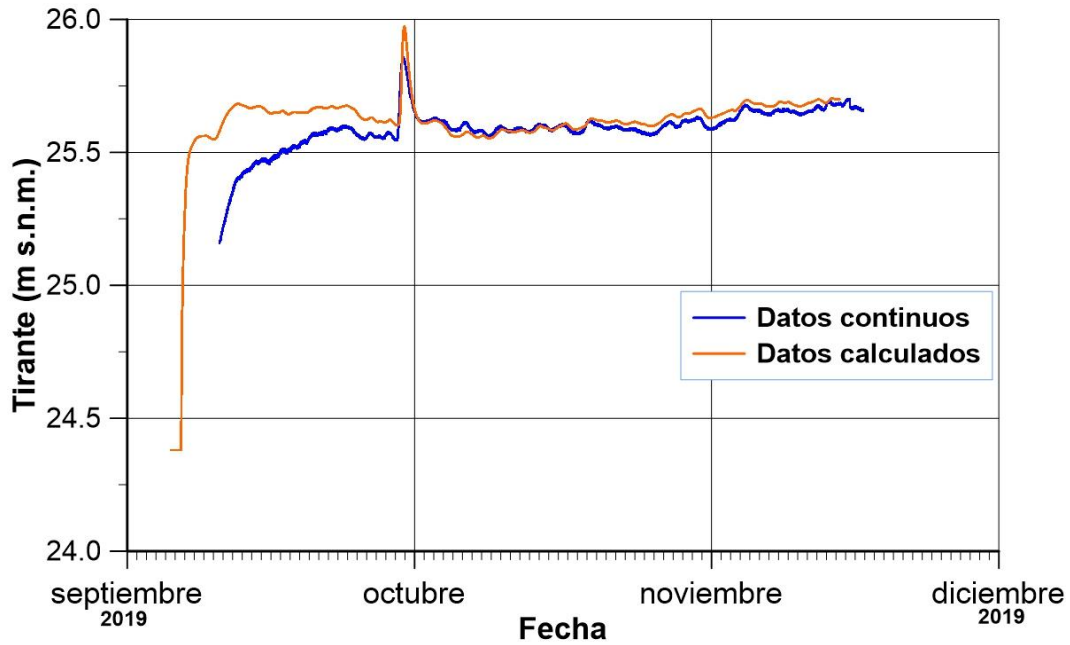


Figura 43. Evolución del tirante real y simulado en el sitio de aforo DMS-3A

7. 3. 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se realizó para los sitios de aforo DMS-1, DMS-2 y DMS-3A modificando los valores de rugosidad sumando o restando 20 y 30% del valor calibrado en el modelo hidráulico.

La modificación en un $\pm 20\%$ en los valores de la rugosidad del sitio de aforo DMS-1 mostró variaciones de entre -0.47 y 0.23 m. La modificación de los valores de rugosidad en un $\pm 30\%$ en el sitio de aforo representó variaciones con respecto al valor calculado por el modelo hidráulico de entre -0.59 y 0.34 m.

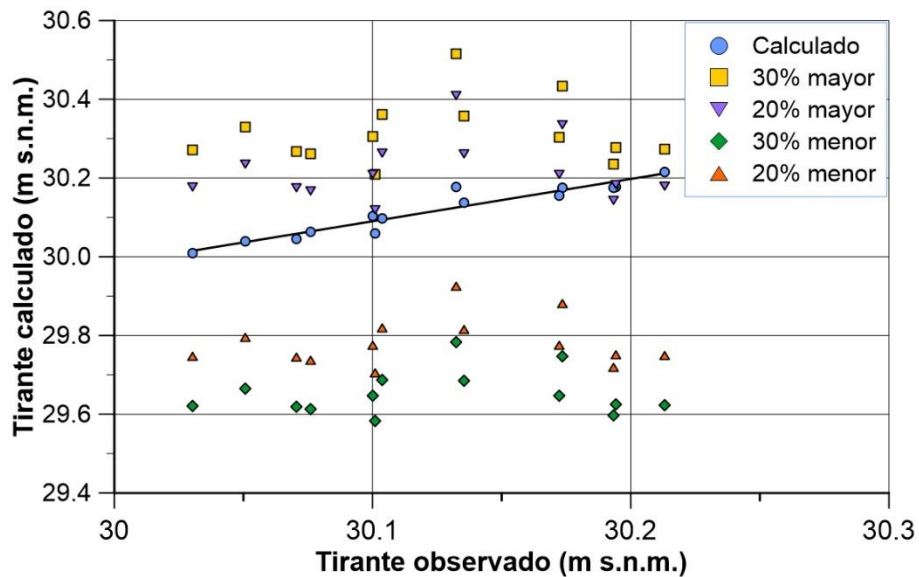


Figura 44. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-1

La modificación en un $\pm 20\%$ en los valores de la rugosidad del sitio de aforo DMS-2 mostró variaciones desde -0.445 a 0.199 m. La modificación de los valores de rugosidad en un $\pm 30\%$ en el sitio de aforo representó variaciones con respecto al valor calculado por el modelo hidráulico de entre -0.62 y 0.34 m.

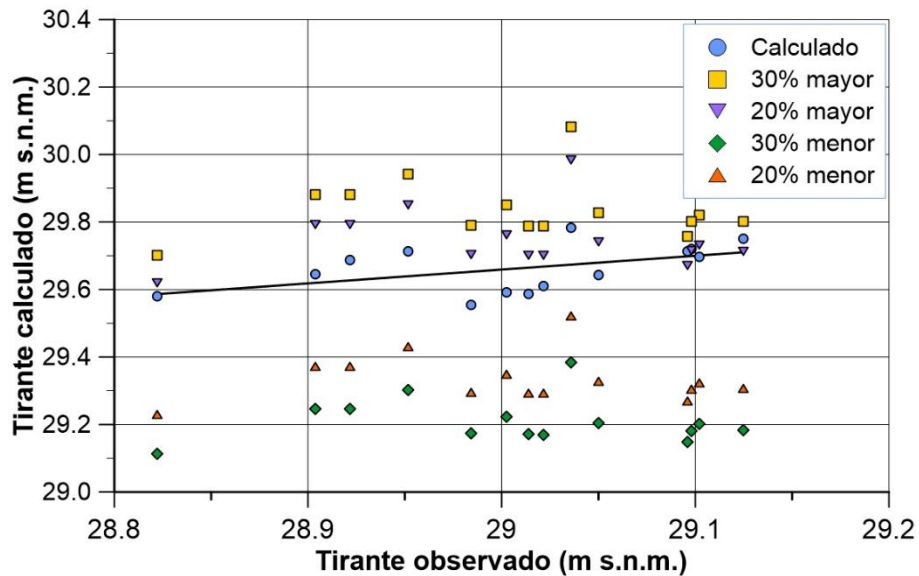


Figura 45. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-2

La modificación en un $\pm 20\%$ en los valores de la rugosidad del sitio de aforo DMS-3A mostró variaciones desde -0.339 a 0.163 m. La modificación de los valores de rugosidad en un $\pm 30\%$ en el sitio de aforo representó variaciones con respecto al valor calculado por el modelo hidráulico de entre -0.432 y 0.239 m.

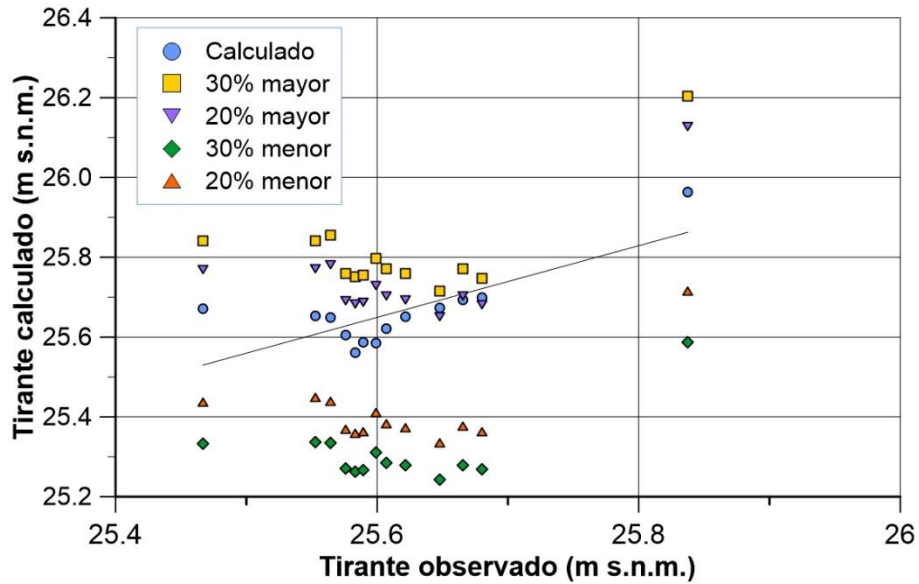


Figura 46. Relación del tirante observado y calculado con las variaciones de la rugosidad, modificando los valores en ± 20 y $\pm 30\%$ en el sitio de aforo DMS-3A

La variabilidad observada con los incrementos y decrementos en los valores de rugosidad en los diferentes sitios de aforo, muestra los posibles cambios que pudieran ocurrir al modificarse las condiciones del cauce del RC, como lo es un trabajo de limpieza de vegetación en los márgenes o modificaciones en su geometría.

7. 3. 5. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como parte de los tratados binacionales posteriores a las descargas ambientales realizadas en 2014, siendo estas el Flujo Pulso y el Flujo Base, se estableció que las futuras descargas ambientales estuvieran por debajo los $10 \text{ m}^3/\text{s}$, para mantener el flujo en el cauce principal y evitar pérdidas por infiltración debidas a las inundaciones en terrazas altas y meandros antiguos. Con los antecedentes anteriores y una vez calibrado el modelo hidrodinámico, se contempló generar tres escenarios del posible comportamiento hidrodinámico del río ante las descargas de 5, 7 y $10 \text{ m}^3/\text{s}$, manteniendo este flujo durante setenta días continuos, iniciando el hidrograma de entrada en cero e incrementando el caudal hasta alcanzar los calores deseados.

En la figura 47 se observan los tres escenarios simulados. Las superficies de inundación muestran la altura que tiene el tirante con respecto al terreno natural, estas inician en la sección de aforo DMS-1. En la tabla 3 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y el tirante máximo por kilómetro para cada escenario.

Tabla 3. Ancho de la extensión de inundación y tirante 2.2, 3 y 4 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
2.2 (DMS-1)	16	18	36	1.54	1.85	2.24
3	22	22	22	1.64	1.95	2.33
4	24.5	24.5	24.5	1.85	2.16	2.53

Previo al cambio de dirección del cauce que se encuentra a los 3 km aguas abajo de la PDM el escenario de 5 m³/s muestra zonas de inundación someras, con tirantes máximos de hasta medio metro, mientras los escenarios de 7 y 10 m³/s incrementan tanto el área de inundación como el tirante, alcanzando valores de 0.8 y 1 m respectivamente. Posteriormente, 50 m antes del kilómetro 4 aguas abajo de la PDM, se encuentra una zona inundada que presentó tirantes de 0.5, 0.7 y 1 m respectivamente.

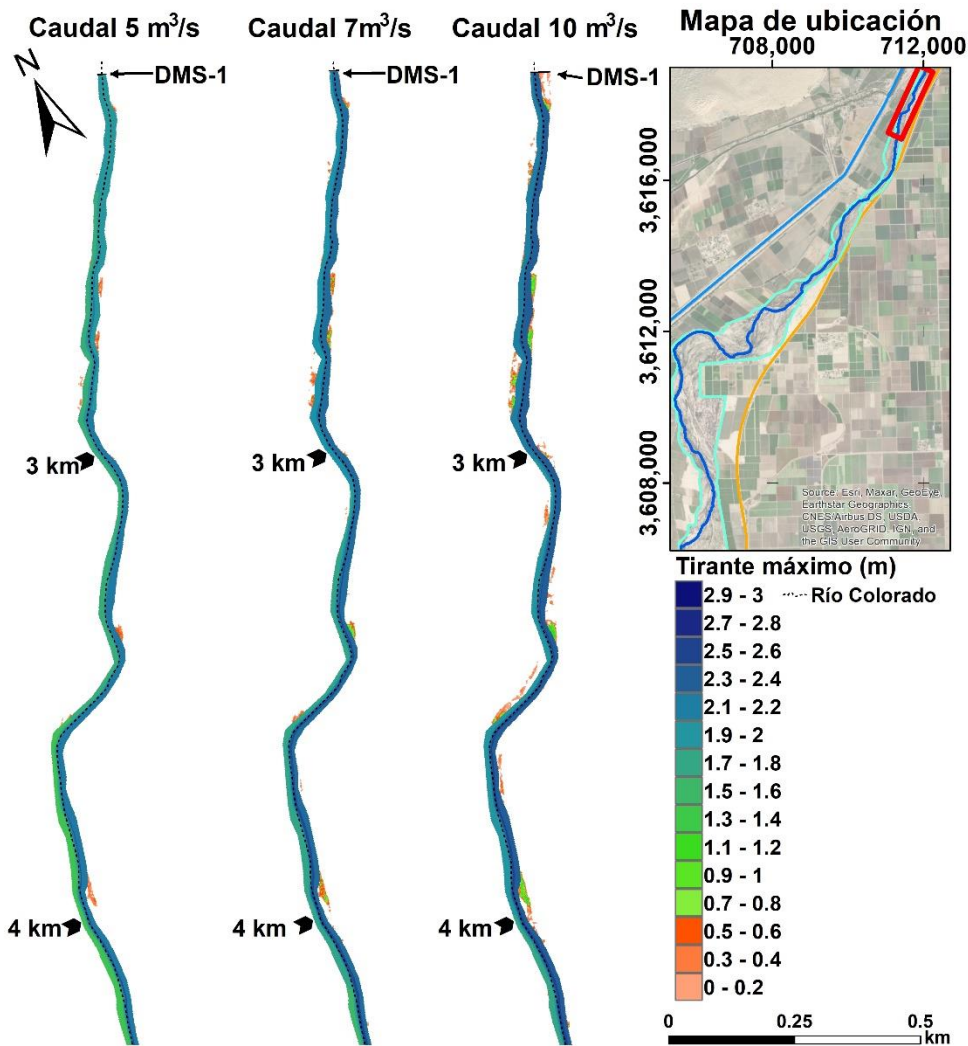


Figura 47. Distribución de la zonas inundadas y de los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 2 y 4 km aguas abajo de la PDM

En la figura 48, se observa la continuación de la distribución de los tirantes con los diferentes escenarios simulados. En la tabla 4 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 4. Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 5, 5.2 y 6 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
5	30	36	43	2	2.5	2.9
5.2 (DMS-2)	34.5	34.5	34.5	2.1	2.4	2.7
6	26.7	27.5	27.5	2.1	2.4	2.75

Del kilómetro 5 hasta 100 m aguas abajo de éste, se presenta una serie de zonas inundadas, incrementando la extensión inundada con el aumento de las magnitudes de los escenarios simulados. En los 5 m³/s estas zonas alcanzan hasta 1 m de tirante, y para los escenarios de 7 y 10 m³/s, estos tirantes incrementaron hasta 1.2 y 1.4 m respectivamente. En la zona comprendida entre los kilómetros 5.84 y 6.13, en el margen izquierdo, existe un meandro abandonado, el cual se inundó, con los escenarios de 7 y 10 m³/s, alcanzando tirantes máximos de hasta 0.8 y 1.1 m respectivamente.

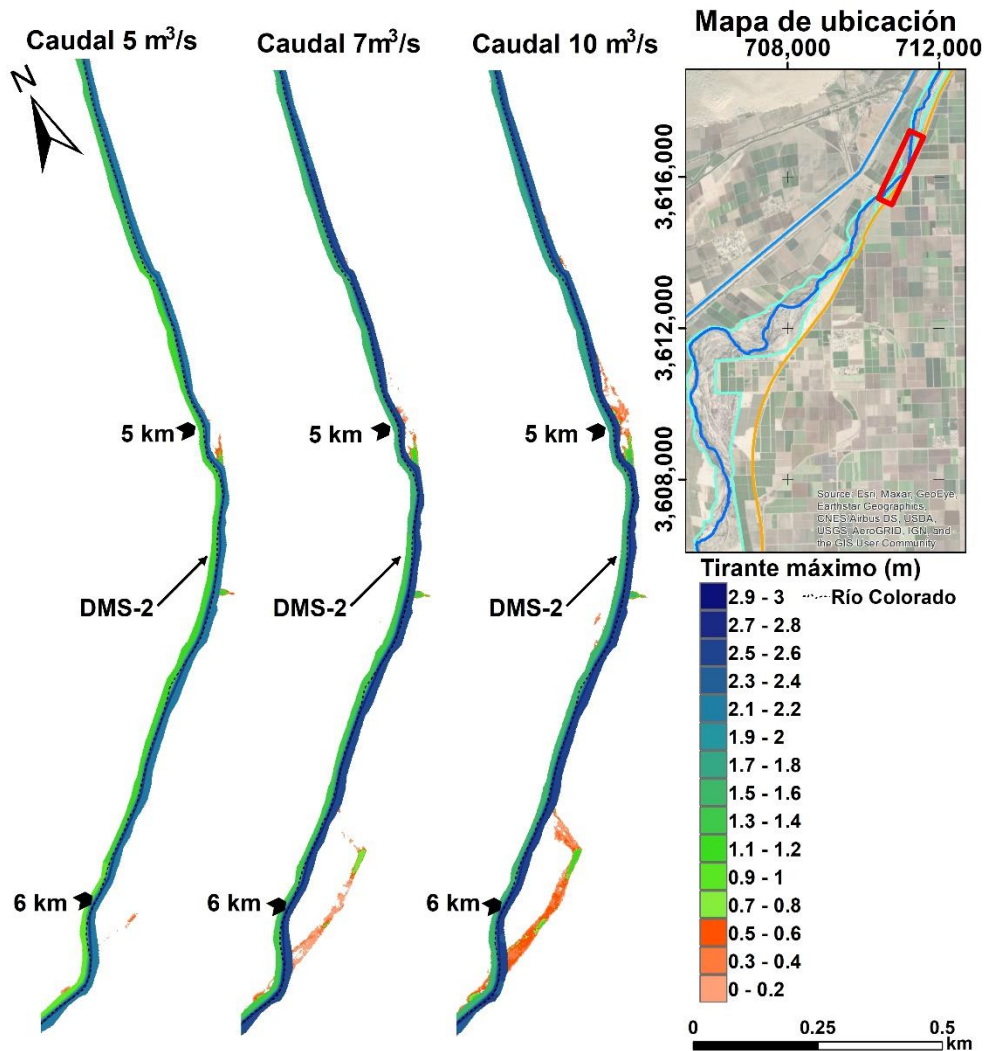


Figura 48. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 5 y 6 km aguas debajo de la PDM

La figura 51 muestra la distribución de los tirantes máximos durante los tres escenarios simulados. En la tabla 4 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 5. Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 7 y 8 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
7	21.2	23	24.2	2	2.3	2.7
8	27.5	28	29	2	2.3	2.6

El kilómetro 7 aguas abajo de la PDM, presenta una zona de interés ya que, en los tres escenarios simulados, la inundación se extiende más allá del cauce principal, inundando el margen izquierdo. Estas zonas inundadas presentaron tirantes máximos de 0.4, 0.7 y 1.1 m.

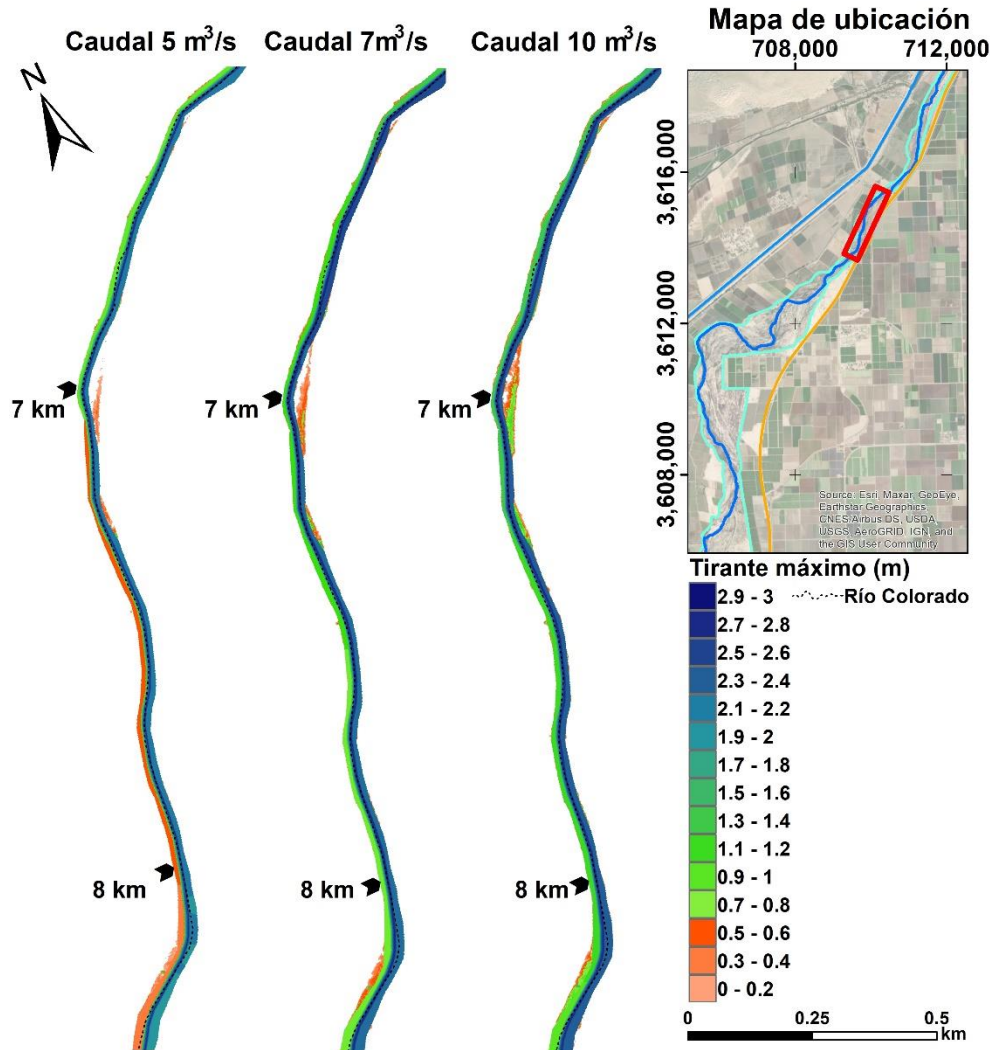


Figura 49. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 7 y 8 km aguas debajo de la PDM

La [figura 52](#) muestra la distribución de los tirantes máximos alcanzados para los diferentes escenarios simulados. En la [tabla 5](#) se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 6. Ancho de la extensión de inundación y altura máxima del espejo de agua para 9 y 10 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
9	38	41	41.5	2.1	2.4	2.7
10	33	33	33	2	2.3	2.6

En el kilómetro 9.3, donde la dirección del cauce cambia, se encuentra un meandro abandonado que presentó inundaciones con los caudales de 7 y 10 m³/s. El escenario de 7 m³/s alcanzó tirantes máximos de hasta 0.6 m, mientras que el escenario de 10 m³/s alcanzó un tirante máximo de 1 m. Posterior al kilómetro 10, se presentaron importantes áreas de inundación en el margen derecho del río, donde se presentaron zonas de inundación con anchos de 52, 66 y 79 m respectivamente, además presentó tirantes máximos de 0.35, 0.65 y 0.9 m, en el escenario de 10 m³/s se presentó la inundación de un pequeño meandro ubicando 200 m aguas abajo del kilómetro 10.

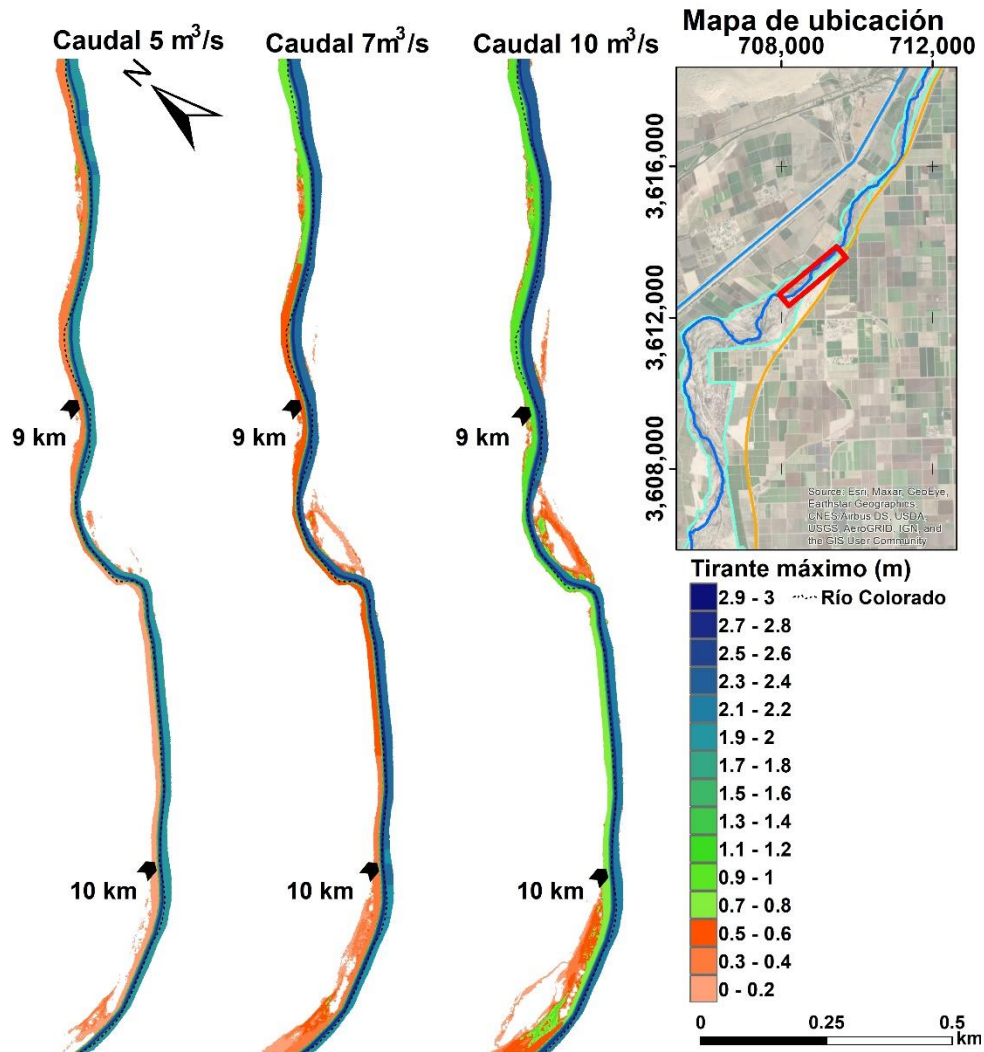


Figura 50. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 9 y 10 km aguas debajo de la PDM

La distribución de los tirantes máximos para los diferentes escenarios simulados de los kilómetros 11 y 12, se muestran en la [figura 53](#). En la [tabla 6](#) se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 7. Ancho de la extensión de inundación y el tirante máximo en los 11 y 12 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
11	34	47	50	2	2.3	2.6
12	74	80	85	2	2.3	2.6

El cauce del río cambia de dirección hacia el suroeste a los 350 m aguas arriba del kilómetro 11, en esta zona se presentaron inundaciones en ambos márgenes del cauce del río. Con el caudal de 5 m³/s, se inundó el margen izquierdo, para los caudales de 7 y 10 m³/s ambos márgenes se encontraron inundados, esto se puede apreciar gráficamente en la [figura 57](#), donde la extensión de inundación del margen derecho, continua hasta el kilómetro 12. En el meandro ubicado en el kilómetro 12 se presentaron áreas de inundación, ubicadas en el margen derecho del cauce del RC, con hasta 38, 78 y 82 m de ancho, con tirantes máximos de hasta 1, 1.2 y 1.4 m, la inundación en estas zonas son extensas, esto podría indicar que el cauce del río no se encuentra definido como en los primeros kilómetros. Posteriormente, 200 aguas abajo del kilómetro 12 se presenta un área inundada en el margen izquierdo, esta zona queda inundada con los tres escenarios simulados, presentando tirantes máximos de hasta 1.14, 1.44 y 1.84 m.

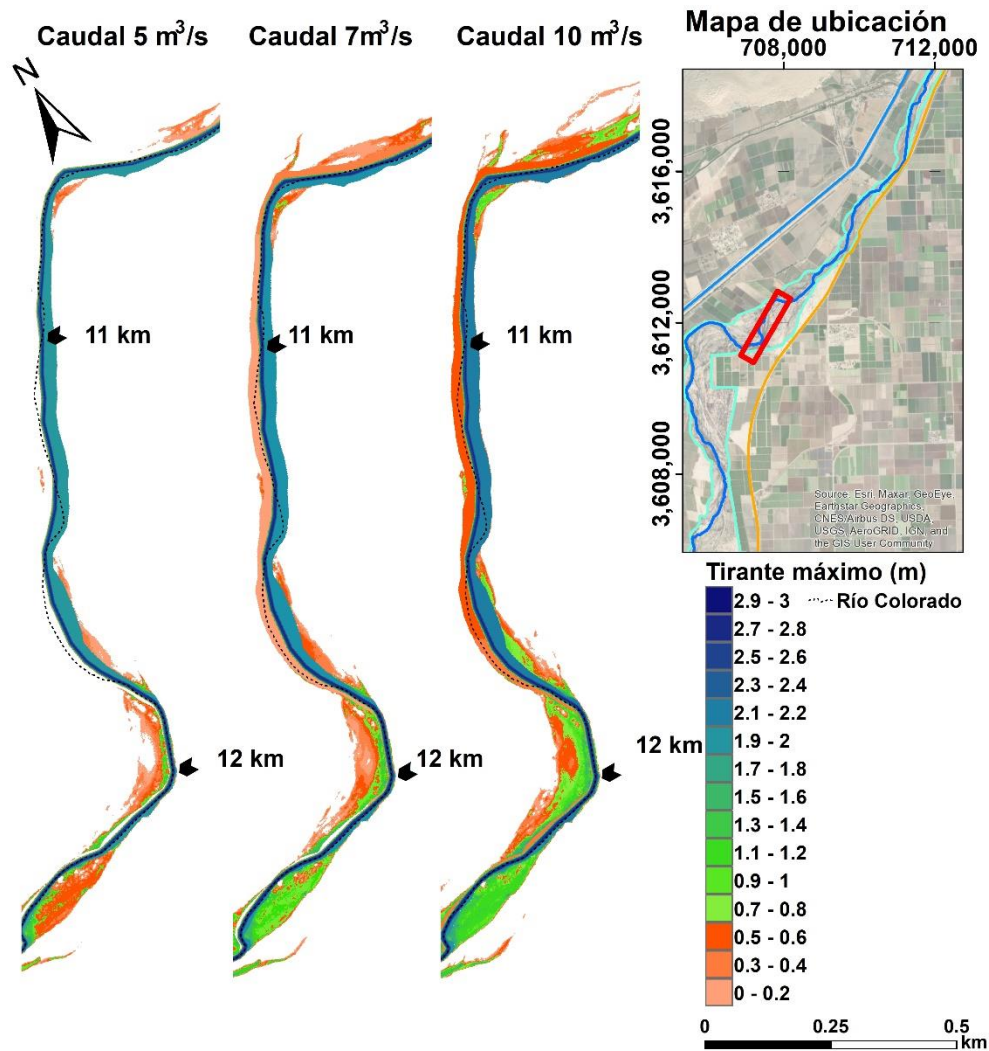


Figura 51. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 11 y 12 km aguas debajo de la PDM

La figura 54 representa los tirantes máximos alcanzados con los tres caudales simulados para los kilómetros 13 y 14 aguas abajo de la PDM. En la tabla 7 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 8. Ancho de la extensión de inundación y tirante máximo en los 13 y 14 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
13	23	27	36	2	2.3	2.6
14	24.5	25	27	2	2.3	2.6

Aguas arriba del kilómetro 13 (650 m) hasta 620 m aguas abajo del mismo, se presentaron zonas de inundación en ambos márgenes, donde el incremento se observa gráficamente en la figura 54,

denotando el incremento en el caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ donde se observa en el margen derecho con un tirante máximo de hasta 0.2 m , extendiéndose aproximadamente 1 km paralelo al cauce del río. Aguas abajo del kilómetro 13 existe un meandro abandonado, el cual solo presentó inundación con el caudal de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

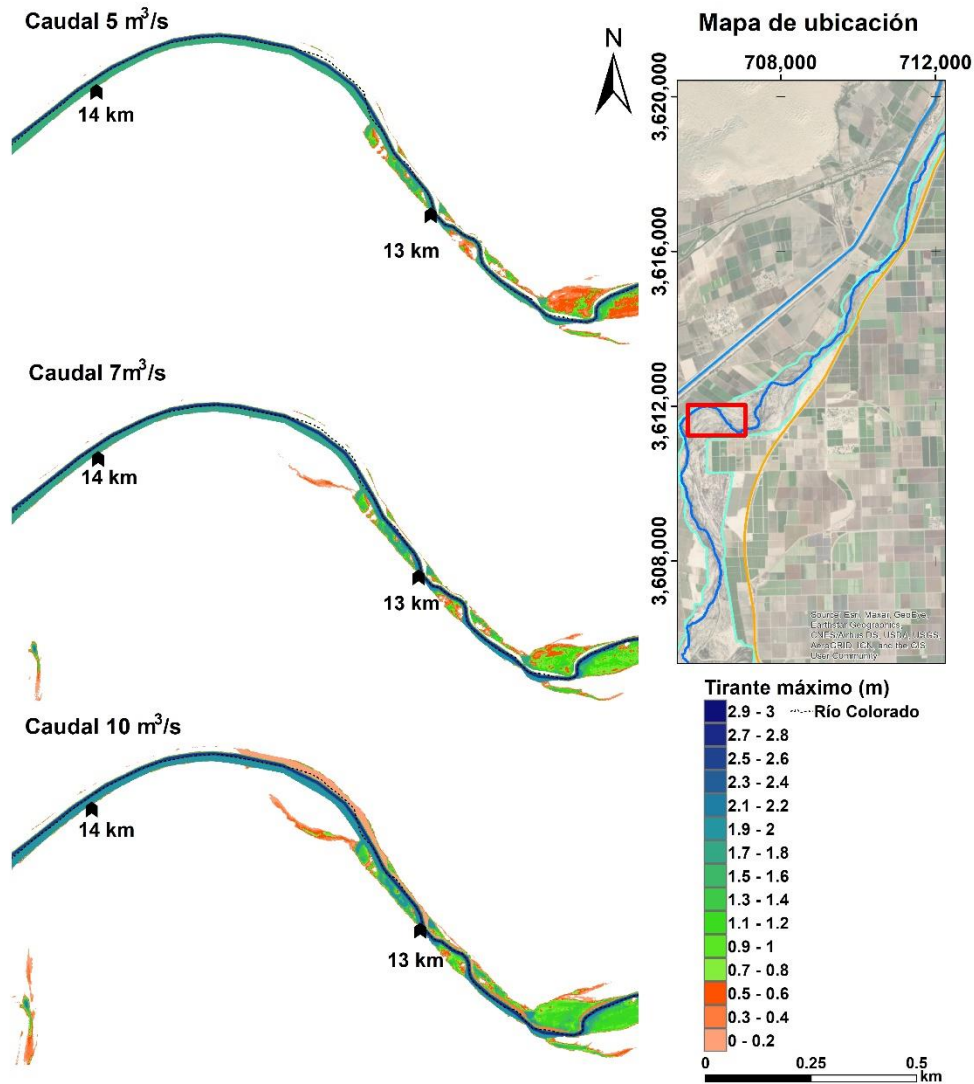


Figura 52. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 13 y 14 km aguas debajo de la PDM

En la figura 55 se observa la distribución de los tirantes máximos alcanzados durante los caudales de 5 , 7 y $10 \text{ m}^3/\text{s}$ para los kilómetros 15 y 16 aguas abajo de la PDM. En la tabla 8 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 9. Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para los 15 y 16 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
15	25.4	27	28	2.1	2.3	2.6
16	36	43	45	2	2.3	2.6

Con los caudales simulados, un meandro abandonado quedó inundado. Éste meandro inicia 500 m aguas arriba del kilómetro 15, reconectándose con el cauce principal 450 m. El meandro mostró un tirante máximo constante de 1 m para el escenario de 5 m³/s, el escenario de 7 m³/s, mantuvo un tirante constante de 1.3 m en el meandro, durante el escenario de 10 m³/s este meandro mantuvo un tirante máximo constante de 1.6 m. Aproximadamente 300 m aguas abajo del kilómetro 15 se observan áreas inundadas en el margen derecho, con una extensión de 500 m paralelos al cauce del RC, con un ancho de inundación máximo promedio de 46, 49 y 53 m y los tirantes máximos de 1.1, 1.3 y 1.6 m, respectivamente. Aproximadamente 400 m aguas arriba del kilómetro 16 se encuentra un meandro abandonado, el cual solo se inundó con el caudal de 10 m³/s, este meandro se reconecta 2 km aguas abajo del inicio de este, mostrando tirantes máximos de hasta 0.7 m. Aguas abajo del kilómetro 16, se encuentra una zona inundada con los tres escenarios simulados, sin embargo, esta presenta diferentes tirantes máximos para cada escenario, los cuales fueron de 1, 1.25 y 1.6 m.

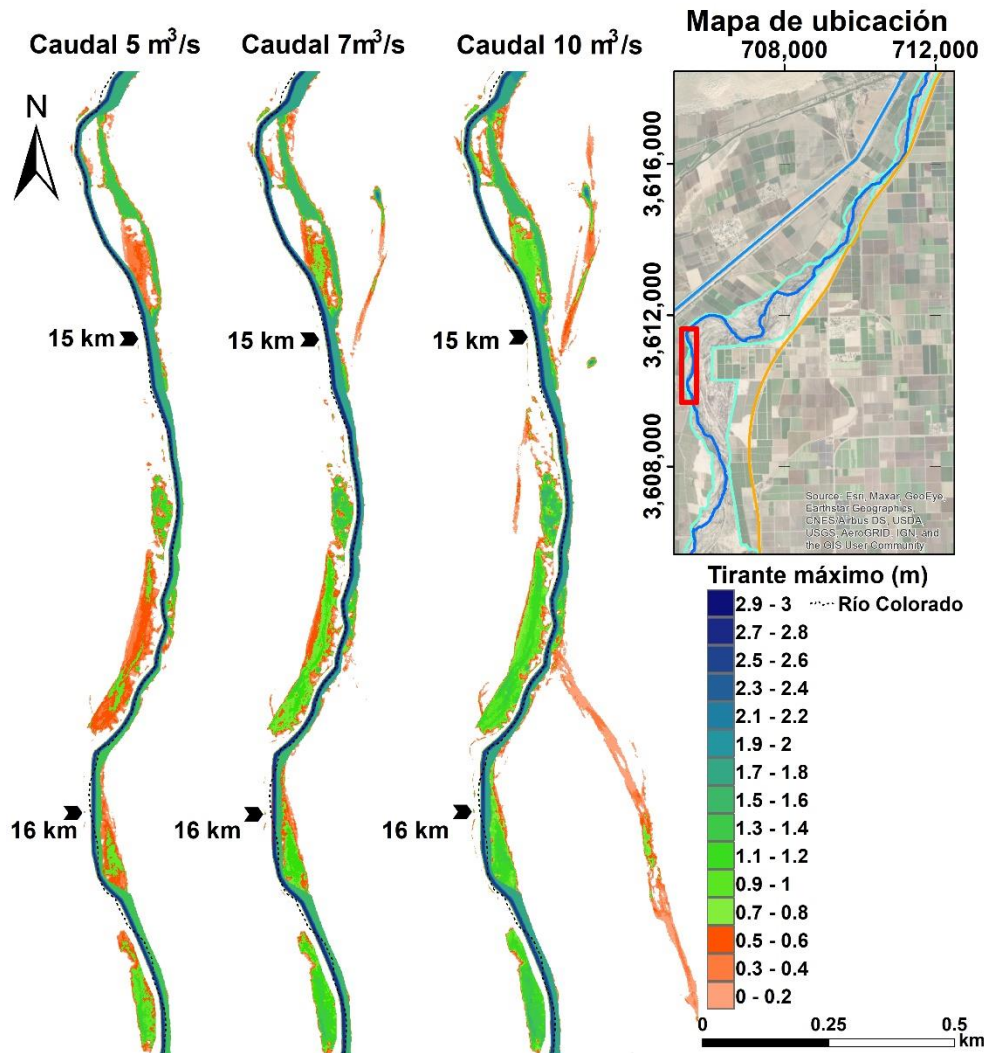


Figura 53. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 15 y 16 km aguas debajo de la PDM

La figura 56 muestra la distribución de los tirantes máximos en los kilómetros 17 y 18 del cauce del Río Colorado debidas a los escenarios simulados de 5, 7 y 10 m³/s. En la tabla 9 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 10. Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para los 17 y 18 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
17	29.6	29.6	29.6	2	2.3	2.5
18	16.7	16.7	16.7	1.98	2.16	2.4

Aproximadamente 550 m aguas abajo del kilómetro 17 se encuentra el final del meandro que se mencionó en la descripción de la figura 55, el final de meandro se encuentra inundado con los tres caudales de los escenarios simulados, teniendo tirantes máximos de hasta 1, 1.2 y 1.45 m. En el margen derecho, 600 m aguas abajo del kilómetro 17, se muestran un conjunto de zonas inundadas y

un meandro abandonado inundado, sin embargo, este no tiene conexión con el cauce principal del RC, esto podría deberse al modelo digital de elevaciones que se construyó para esta investigación, los tirantes máximos alcanzados en éste fueron de 0.8, 0.95 y 1.15 m.

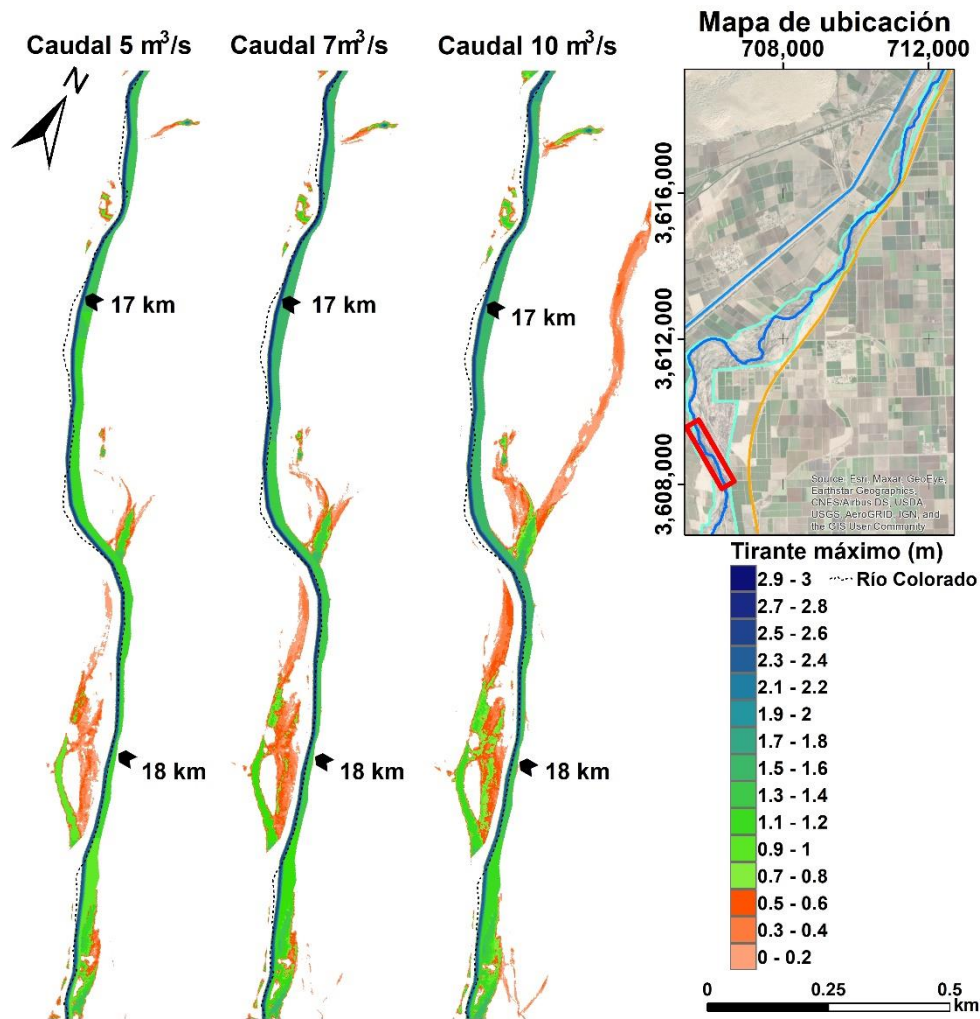


Figura 54. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 17 y 18 km aguas debajo de la PDM

La figura 57 muestra la distribución de los tirantes máximos debidos a los escenarios simulados con caudales de 5, 7 y 10 m³/s. En la tabla 10 se muestra un resumen del ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos por kilómetro para cada escenario.

Tabla 11. Ancho de la extensión de inundación y los tirantes máximos para el 19 y 20 km aguas debajo de la PDM

Kilómetro aguas abajo de la PDM	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Ancho de la extensión de inundación (m)			Tirante máximo (m)		
19	29	30	32	1.85	2	2.2
20	29	33	60	1.5	1.7	1.9

Esta zona se caracteriza por tener un cauce que no tiene la suficiente capacidad para conducir los caudales de los escenarios simulados, esto puede observarse gráficamente en la figura 57, con zonas

inundadas en ambos márgenes, caso contrario a los primeros kilómetros del cauce del RC. Aproximadamente 500 m aguas arriba del kilómetro 19, se encuentra el inicio de un meandro abandonado, el cual, con los caudales simulados se inundó. Este meandro se reconecta con el cauce principal en el kilómetro 19, alcanzando tirantes máximos de hasta 1.5, 1.7 y 1.9 m. En el margen derecho del kilómetro 19, se mostró una importante zona de inundación, la cual se extendió paralelamente al cauce del RC por 750 m, además, su ancho 64 m para los tres escenarios simulados, teniendo tirantes máximos de hasta 1.4, 1.5 y 1.75 m. Aproximadamente, 300 m aguas arriba del kilómetro 20, se encuentra un meandro abandonado, el cual, con los tres caudales simulados se inundó. Éste se reconectó con el cauce principal del RC en el kilómetro 20, este meandro presentó tirantes máximos de 0.5, 0.7 y 0.75 m. A 150 m aguas arriba de la sección de aforo DMS-3, se encuentra una zona que mostró una inundación en dirección norte del cauce del RC, de hasta 500 m para todos los escenarios simulados, mostrando tirantes máximos de hasta 1.95, 2.17 y 2.41 m.

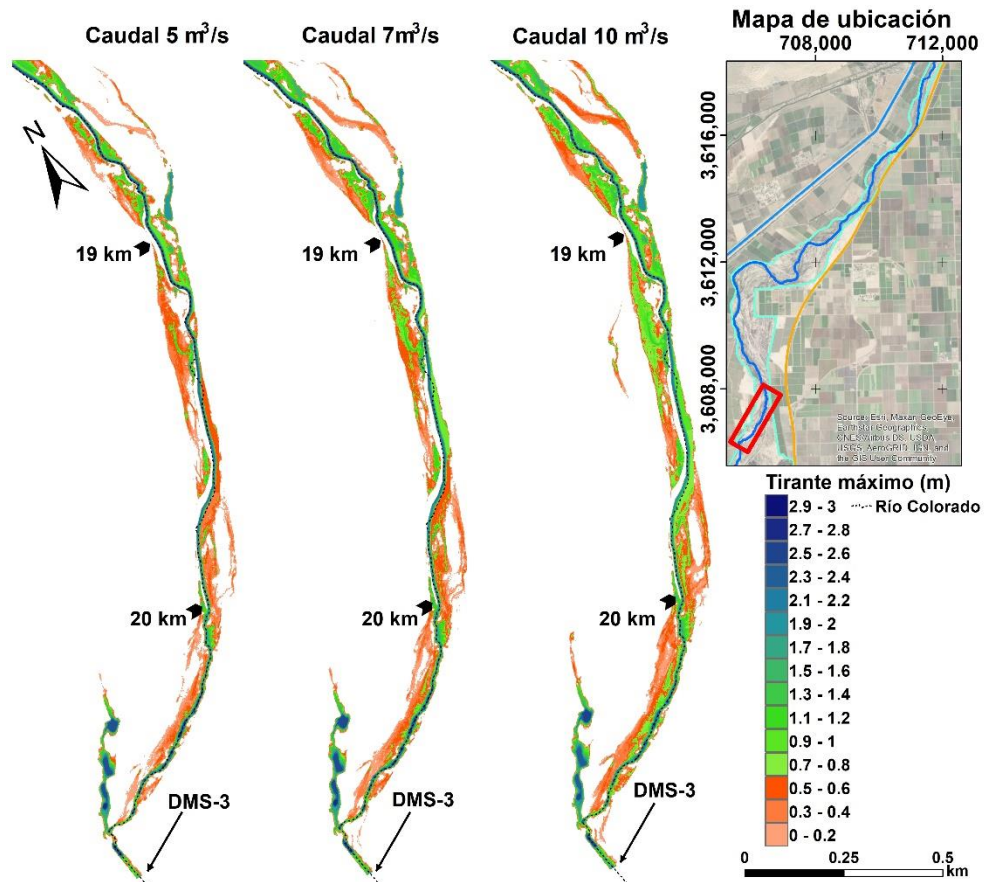


Figura 55. Distribución de las zonas inundadas y los tirantes máximos para los tres caudales simulados en el tramo ubicado entre 19 y 20 km aguas debajo de la PDM

7. 4. ZONAS SUSCEPTIBLES A RESTAURACIÓN

El grupo de trabajo medio ambiental binacional del Acta 323 ha establecido criterios para definir los tipos de restauración que deben ser considerados dentro del corredor ribereño del RC. En la [tabla 2](#) se muestra la clasificación del tipo de hábitat de acuerdo con las profundidades del nivel freático.

Tabla 12. Profundidades del nivel freático para cada tipo de hábitat de acuerdo con los lineamientos del Acta 323

Tipo de hábitat	Profundidad al agua subterránea (m)
Cuerpo de agua	menores a 0
Marisma	0 - 0.5
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5
Ribereño mixto denso	1.5 - 2
Ribereño de baja densidad	2 - 2.5
Mezquite	2.5 - 3.5
Terrazas altas	mayores a 3.5

Con el objetivo de mostrar en qué zonas y con qué tipo de hábitat es susceptible a restaurar el corredor ribereño estudiado, se clasificó la superficie del nivel freático en tres momentos; el primero, previo a las descargas de agua en el canal principal del Río Colorado debidas al mantenimiento del canal WM; el segundo, un mes después; y el tercero, dos meses posteriores al inicio de las descargas. En el Anexo 1 se muestran la profundidad al nivel freático clasificado de acuerdo con los tipos de hábitat propuestos por el grupo binacional del Acta 323

Utilizando la información de los niveles del agua superficial y subterránea, el análisis de las zonas inundadas y las alturas del espejo de agua obtenidas del modelo con las diferentes magnitudes de caudal y el comportamiento de la evolución del nivel freático registrado en la red piezométrica se trazó un conjunto de áreas de las zonas susceptibles a restauración. La selección de estas áreas está basada en los criterios propuestos por el grupo binacional de ciencia del Acta 323. Las [figuras 58](#) y [59](#) presentan el corredor ribereño de la zona limítrofe dividido en dos segmentos, uno correspondiente a la porción norte de la zona de estudio y el otro de la porción sur.

En la [figura 58](#) se muestran los polígonos correspondientes a las áreas susceptibles a restauración que fueron identificadas como 1, 2, 3 y 4, éstas se describen con referencia a su kilometraje en el cauce del Río Colorado desde la PDM.

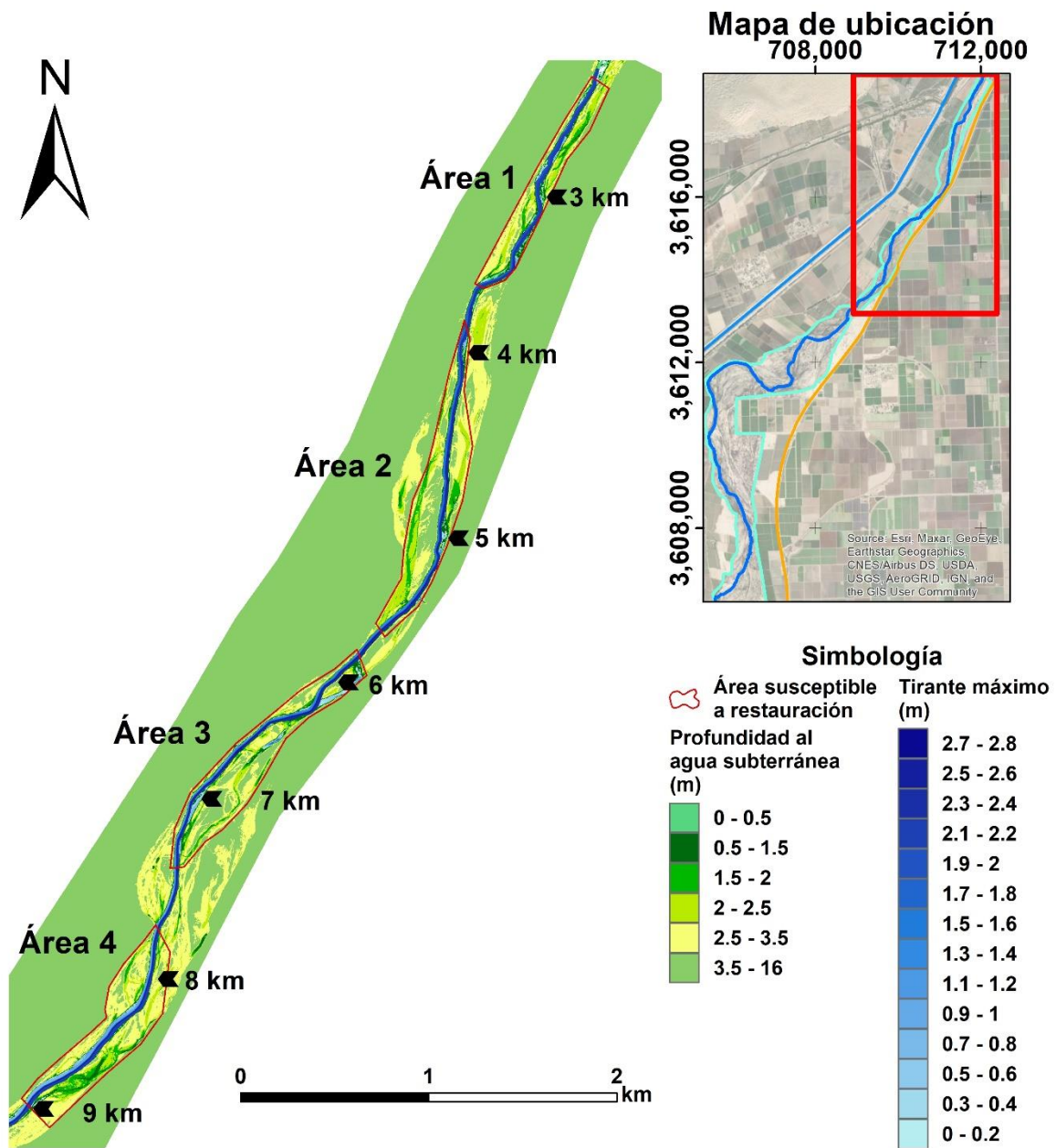


Figura 56. Áreas susceptibles a restauración dentro del segmento norte

En el segmento sur del área de estudio (figura 59) se observan las áreas susceptibles a restauración 5, 6, 7, 8 y 9, las cuales están distribuidas dentro del corredor ribereño incluyendo ambos márgenes y su cauce. El cauce en ese segmento se encuentra inundado debido a las filtraciones de la PDM hasta aproximadamente el kilómetro 16 aguas debajo de ésta, posterior a esto, el cauce del RC se encuentra seco de forma casi permanente.

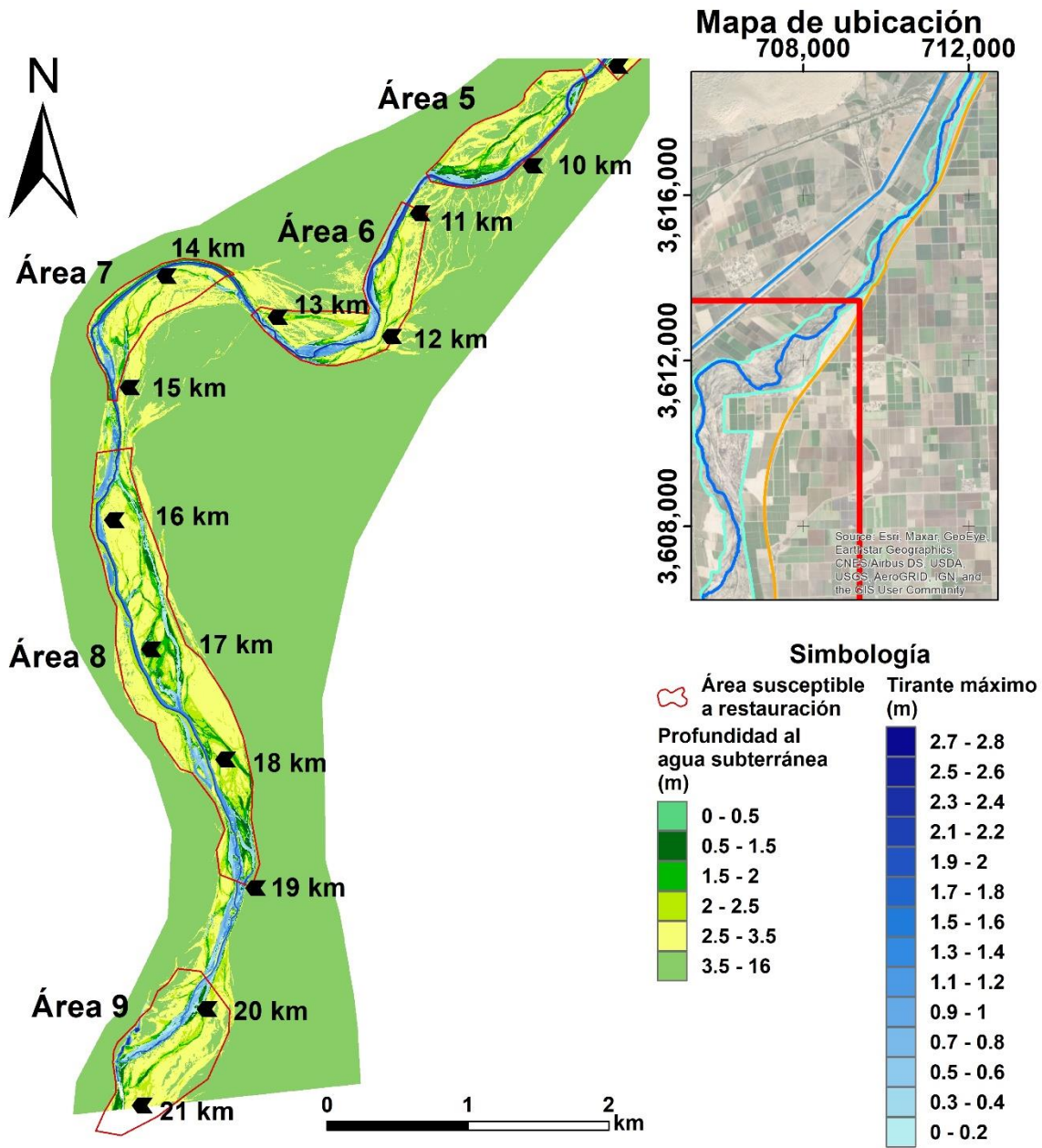


Figura 57. Áreas susceptibles a restauración dentro del segmento sur

ÁREA 1. El área 1 se encuentra ubicada en el corredor ribereño de la zona limítrofe, entre los kilómetros 2.3 y 3.6, tiene una extensión de 16.5 ha, con un largo de 1.250 km y un ancho de 130 m en promedio: Esta área, previa a las descargas, contaba con una superficie inundada de 34, 500 m² con tirantes máximos de hasta 1.3 m. El origen de esta agua sobre el cauce del Río Colorado son las pérdidas del canal Reforma que recarga el acuífero y descarga en el cauce del río y las pérdidas de agua a través de las compuertas de la PDM, las cuales mantienen un espejo de agua superficial perenne en esta área. En la [tabla 9](#) se presenta la superficie que tiene cada tipo de hábitat dentro del área 1 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. La superficie de las zonas de marismas, ribereño mixto denso y ribereño de baja intensidad aumentaron su extensión más

del 100% en el primer mes posterior al inicio de las descargas del WM, lo que se explica por una clara recarga del acuífero proveniente del río. Las zonas que presentaban profundidades al nivel freático mayores a 3.5 m se redujeron en más de un 50%, sin embargo, después de dos meses de iniciadas las descargas las profundidades se mantuvieron similares. Lo anterior puede explicarse porque se alcanzó un equilibrio hidrodinámico que logró mantener los niveles del espejo del agua constante.

Tabla 13. Tipo de hábitat y evolución de su área durante los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 1

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	0.134	0.597	0.573
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	0.961	1.255	1.225
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	0.583	1.485	1.415
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	0.82	2.364	2.477
Mezquite	2.5 - 3.5	4.552	4.645	4.784
Terrazas altas	mayores a 3.5	6.034	2.135	2.22

Un mes posterior a las descargas, el área 1 contaba con una superficie inundada de 3.69 ha, teniendo tirantes máximos de hasta 2.1 m en promedio. Esta superficie inundada incrementó a 3.809 ha después de dos meses iniciadas las descargas teniendo tirantes máximos de hasta 2.3 m en promedio. Por otra parte, a partir de los resultados de la modelización hidráulica, la superficie máxima inundada con el caudal de 5 m³/s fue de 3.437 ha, mostrando tirantes máximos de hasta 1.75 m. El escenario simulado para 7 m³/s presentó una superficie de inundación máxima de 3.533 ha, mostrando tirantes máximos de inundación dentro del cauce de hasta 2 m. La extensión del área inundada debida al escenario que simulaba un hidrograma constante de 10 m³/s, fue de 3.819 ha, teniendo tirantes máximos de inundación de hasta 2.5 m.

ÁREA 2. El área 2, susceptible a restauración, cuenta con 27.63 ha de extensión, teniendo 1.7 km lineales de cauce dentro de los límites de su polígono. Esta zona inicia 140 m aguas arriba del kilómetro 4 y finaliza 600 m aguas abajo del kilómetro 5 y cuenta con un cauce inundado perenne debido a la misma situación que se presenta el Área 1. En la [tabla 10](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 2 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Las zonas que cumplen con los criterios para hábitat como marismas y ribereño mixto denso incrementaron su superficie en más de un 100% durante el primer mes posterior al inicio de las descargas, las zonas ribereño húmedo, ribereño de baja intensidad y mezquite también aumentaron su extensión, pero en menor magnitud, mientras que la zona de terrazas altas redujo su superficie en casi un 50%. Para el segundo mes posterior al inicio de las descargas provenientes del canal WM, las zonas como marismas, ribereño húmedo, ribereño mixto denso y mezquite incrementaron su extensión, mientras que la superficie del tipo de hábitat de terrazas altas, mostró un decremento en comparación del mes anterior. Con los resultados obtenidos de este análisis se puede concluir que existe una recarga del río hacia el acuífero por parte de las descargas del canal WM.

Tabla 14. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 2

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	0.09	0.271	0.357
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	0.685	1.108	2.133
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	0.775	2.645	4.298
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	3.083	4.476	2.843
Mezquite	2.5 - 3.5	6.619	7.432	8.833
Terrazas altas	mayores a 3.5	11.198	6.27	3.64

Esta área contaba con una superficie inundada de 5.363 ha como consecuencia de un mes de descargas proveniente del canal WM, teniendo tirantes máximos de hasta 2.4 m en promedio. Sin embargo, dos meses después de iniciadas las descargas, la extensión de inundación se incrementó a 5.449 ha, con tirantes máximos de hasta 2.6 m. La superficie máxima inundada para el escenario simulado de 5 m³/s dentro del área 2 fue de 5.11 ha, mostrando tirantes máximos de hasta 2 m. Para el escenario de descarga de 7 m³/s, la superficie máxima inundada fue de 5.195 ha, mostrando tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2.4 m. En el escenario modelado para 10 m³/s, la extensión de la inundación máxima fue de 5.435 ha, mostrando tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2.8 m.

ÁREA 3. El área 3 cuenta con 26.9 ha de extensión, iniciando 200 m aguas arriba del kilómetro 6 y finalizando 380 m aguas abajo del kilómetro 7, dentro de su superficie el RC tiene una longitud de 1.6 km. El cauce del río se encontraba inundado previo a las descargas provenientes del canal WM. En la [tabla 11](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 3 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. En esta área susceptible a restauración, los cinco tipos de hábitat incrementaron sus superficies cuando las descargas del canal WM tenían un mes de iniciadas. Sin embargo, el hábitat de terrazas altas se redujo debido a que la elevación del nivel freático incrementó, y las áreas que ocupaban las terrazas altas, se convirtieron en zonas de mezquite, esta tendencia de crecimiento de superficie para cada tipo de hábitat continuó a los dos meses iniciadas las descargas, mostrando una recarga del acuífero.

Tabla 15. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 3

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	0.331	0.886	0.876
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	1.821	1.9	2.6
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	1.18	1.916	2.555
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	2.232	2.558	2.308
Mezquite	2.5 - 3.5	5.253	6.996	9.367
Terrazas altas	mayores a 3.5	11.654	7.908	3.826

Esta área contó una superficie inundada de 5.649 ha posterior a un mes de las descargas provenientes del canal WM, con tirantes máximos de hasta 2.6 m en promedio, inundando un meandro abandonado que se encuentra en el kilómetro 6 aguas abajo de la PDM. La zona inundación incrementó su extensión a 5.807 ha en los dos meses posteriores iniciado las descargas, teniendo tirantes máximos en el cauce de hasta 2.7 m. El escenario de 5 m³/s, mostró un área de inundación máxima de 4.436 ha, con tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2 m. Para el escenario de 7 m³/s, la superficie inundada incrementó a 4.99 ha, teniendo tirantes máximos de hasta 2.4 m. Por su parte, el escenario que simuló 10 m³/s, presentó una superficie de inundación máxima de 5.574 ha, teniendo tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2.7 m.

ÁREA 4. El área 4 tiene una extensión superficial de 27.4 ha, iniciando 270 m aguas arriba del kilómetro 8 y finalizando en el kilómetro 9, dentro de su polígono se encuentra un segmento del RC de 1.23 km. Al igual que las áreas susceptibles a restauración anteriores, esta también contaba con el cauce inundado. En la [tabla 12](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 4 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. En esta área, se observó una reducción en la profundidad del nivel freático en el margen izquierdo del cauce principal, lo cual incrementó la superficie para las zonas con tipo de hábitat ribereño húmedo, ribereño mixto denso y mezquite, por el contrario, el hábitat de marismas se redujo debido a que más del 50% de estas superficies queda inundadas debido al incremento del tirante en el río. Esta reducción progresiva de superficie en el hábitat de marismas continuó en los dos meses posteriores a la descarga, debido al incremento de superficies inundadas. Particularmente, las zonas con tipo de hábitat ribereño húmedo incrementaron en más del 100%. Por su parte, en el margen derecho también se incrementaron las superficies de los diferentes tipos de hábitat, aunque en menor intensidad, debido a que el área del lugar tiene una mayor elevación del terreno natural que el margen izquierdo.

Tabla 16. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 4

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	1.607	0.596	0.344
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	0.889	1.365	3.189
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	1.572	2.723	3.635
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	3.461	3.705	3.964
Mezquite	2.5 - 3.5	8.521	11.08	10.145
Terrazas altas	mayores a 3.5	8.244	3.563	1.224

El área 4 mostró una superficie de inundación de 4.812 ha debido a las descargas un mes de iniciadas éstas, teniendo tirantes máximos de hasta 2.5 m en promedio. La extensión de inundación incrementó a 4.881 ha en los dos meses posteriores iniciadas las descargas. Los tirantes máximos dentro del cauce fueron de 2.65 m. Para los escenarios simulados con caudales de 5, 7 y 10 m³/s, la extensión de inundación fue 4.52, 4.679 y 4.907 ha respectivamente, mientras que los tirantes máximos dentro del cauce mostraron valores de 2, 2.35 y 2.7 m.

ÁREA 5. El Área 5 cuenta con una extensión de 42.6 ha de extensión dentro del corredor ribereño, teniendo la zona inundada en la zona Este, donde se encuentra un segmento del RC de 1.5 km, esta área inicia 130 m aguas abajo del kilómetro 9 y finaliza 660 m aguas abajo del kilómetro 10. En la [tabla 13](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 5 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Esta zona se caracterizó por mostrar un incremento en las superficies de los tipos de hábitat en la margen derecha del RC. Los tipos de hábitat de marismas, ribereño mixto denso y mezquite incrementaron su superficie en más de un 100% un mes iniciadas las descargas. La zona de terrazas altas mostró un declive en su superficie, esto es debido al incremento del nivel del agua subterránea. Durante el segundo mes iniciadas las descargas, se mostró una reducción en la superficie de marismas, esto debido al aumento de la superficie inundada, mientras que el aumento en los otros tipos de hábitat continuó, sin embargo, el hábitat de terrazas altas se redujo. Dentro de esta área susceptible a restauración, se encuentra un meandro abandonado que responde rápidamente a los incrementos del nivel de agua subterránea, haciendo que la profundidad del acuífero en esa zona sea somera.

Tabla 17. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 5

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	0.213	2.192	1.758
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	3.766	3.883	4.859
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	1.16	3.008	3.506
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	1.947	3.418	3.761
Mezquite	2.5 - 3.5	5.815	12.262	16.404
Terrazas altas	mayores a 3.5	26.496	13.002	8.669

Por otro lado, el comportamiento de la superficie de inundación del RC en esta área, durante el mes posterior al inicio de las descargas mostró una superficie inundada de 6.92 ha, además de tirantes máximos de hasta 2.5 m. Dos meses posteriores del inicio de las descargas, la extensión de inundación incrementó a 7.23 ha, y mostró tirantes máximos en el cauce de hasta 2.65 m. Para el caudal de 5 m³/s, la extensión de inundación máxima fue de 4.87 ha con tirantes máximos dentro del cauce de 2 m. La superficie máxima de inundación para el caudal de 7 m³/s fue de 6.36 ha, mientras que los tirantes máximos dentro del cauce fueron de 2.35 m. El escenario simulado de 10 m³/s mostró una extensión de inundación máxima de 7.36 ha, con tirantes máximos dentro del cauce de 2.7 m.

ÁREA 6. El área 6 propuesta cuenta con una extensión de 53.4 ha, iniciando 70 m aguas arriba del kilómetro 11, finalizando 50 m aguas abajo del kilómetro 13. Esta área cuenta con un segmento de cauce del RC de 2 km, que ya se encontraba inundado antes de las descargas del canal WM. En la [tabla 14](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 6 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Durante el primer mes posterior de iniciadas las descargas, las superficies de los tipos de hábitat de marismas, ribereño de baja intensidad y mezquites incrementaron en más de un 100%, el tipo de hábitat de terrazas altas se redujo en más del 50%, esto debido al incremento del nivel del agua subterránea. Durante los dos meses posteriores a las descargas del WM, se mostró una reducción en la superficie del hábitat ribereño húmedo, esto debido a que muchas de estas zonas se convirtieron en zonas de marismas. El hábitat ribereño de baja intensidad fue el de mayor crecimiento durante el segundo mes posterior de las descargas provenientes del canal WM.

Tabla 18. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 6

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	0.765	2.779	3.513
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	5.712	5.446	4.196
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	2.085	3.527	4.932
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	2.055	6.623	8.412
Mezquite	2.5 - 3.5	11.317	23.488	21.005
Terrazas altas	mayores a 3.5	27.305	5.705	3.215

La superficie de inundación del RC un mes después de iniciadas las descargas del WM, contó con 12.02 ha inundadas, teniendo tirantes máximos promedio de hasta 2.5 m. Como consecuencia de las descargas continuas en el cauce del RC dos meses después de iniciadas éstas, la extensión de inundación incrementó a 12.27 ha, con tirantes máximos en el cauce de 2.6 m. El caudal de 5 m³/s mostró una superficie inundada máxima de 8.479 ha, teniendo tirantes máximos dentro del cauce de 2 m. El caudal simulado de 7 m³/s, generó una superficie máxima de inundación de 11.02 ha, con tirantes máximos dentro del cauce de 2.3 m. El escenario que simuló un caudal de 10 m³/s, generó una superficie de inundación máxima de 12.386 ha, teniendo tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2.65 m.

ÁREA 7. El área 7 cuenta una extensión de 36.51 ha, esta área inicia 600 m aguas arriba del kilómetro 14, finalizando 90 m aguas abajo del kilómetro 15, además, cuenta con un segmento del cauce del RC de 1.7 km, contando con un meandro abandonado de 450 m, con los caudales de 5, 7 y 10 m³/s resultó inundado, este meandro inicia 500 m aguas arriba del kilómetro 15, reconectándose con el cauce del RC en el kilómetro 15. En la [tabla 15](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 7 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Durante el primer mes posterior de iniciadas las descargas, las superficies del tipo de hábitat de marismas disminuyó en aproximadamente un 50%, esto debido al incremento de la superficie inundada, mientras que el hábitat ribereño mixto denso y mezquite aumentaron en más del 100%. Debido al incremento de superficie de todos los tipos de hábitat, la zona de terrazas altas se redujo considerablemente. Durante el segundo mes iniciadas las descargas, se observó un incremento en la zona de marismas. El tipo de hábitat ribereño mixto denso sufrió una reducción en la extensión de su superficie, esto debido al incremento del nivel del agua subterránea que trae como consecuencia, que las zonas ocupadas por este tipo de hábitat se conviertan en tipo de hábitat ribereño húmedo, el cual mostró un crecimiento del más del 100%.

Tabla 19. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 7

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	1.392	0.629	0.892
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	2.109	2.719	6.176
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	1.07	4.352	3.773
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	2.24	3.824	7.861
Mezquite	2.5 - 3.5	7.627	18.543	11.993
Terrazas altas	mayores a 3.5	20.714	2.244	0.274

Esta área presentó una superficie de inundación como consecuencia de las descargas un mes después de iniciadas, de 6.521 ha, teniendo tirantes máximos promedio de hasta 2.5 m. Dos meses posteriores al inicio de descargas, la extensión de la inundación incrementó a 6.861 ha, presentando tirantes máximos dentro del cauce principal de hasta 2.65 m. El escenario que simuló un caudal de 5 m³/s, presentó una superficie de inundación máxima de 5.419 ha, además, mostró tirantes máximos en el cauce de 2.1 m. El caudal de 7 m³/s generó una superficie máxima de inundación de 5.95 ha, con tirantes máximos dentro del cauce de 2.35 m. El escenario de 10 m³/s generó una superficie máxima de 7.134 ha, el cual, presentó un tirante máximo de 2.6 m.

ÁREA 8. El área 8 es la de mayor extensión de las 9 propuestas, siendo esta de 128.8 ha, iniciando 500 m aguas arriba del kilómetro 16, terminando en el kilómetro 19. Dentro de esta área se encuentra un segmento del RC de 3.4 km, el cual se encontraba inundado solamente los primeros 3 km. En la [tabla 16](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 8 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Durante el primer mes posterior a las descargas, todas las superficies de los diferentes tipos de hábitats se incrementaron en más del 100 %, indicando una recarga importante proveniente del cauce hacia el acuífero, además de una reducción de más del 50% de las terrazas altas. En esta área se encuentra un importante meandro abandonado, el cual, con las descargas provenientes del canal WM reaccionó con mayor intensidad que el resto de la superficie del Área 8, ya que debido a la elevación del terreno natural que tiene, el acuífero se encuentra a una menor profundidad que el resto de la superficie del área. Durante el segundo mes de iniciadas las descargas, las superficies de los diferentes tipos de hábitats continuaron incrementado, sin embargo, la zona de mezquites se redujo, esto debido al incremento del nivel del acuífero.

Tabla 20. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 8

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	1.411	4.185	4.644
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	6.669	16.857	19.284
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	3.303	11.959	17.654
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	7.749	23.255	23.691
Mezquite	2.5 - 3.5	26.739	56.985	36.351
Terrazas altas	mayores a 3.5	81.209	6.102	13.542

Esta área mostró una superficie inundada posterior a un mes iniciadas las descargas de 20.99 ha, con tirantes máximos promedio en el cauce de hasta 2.3 m. Esta zona se caracterizó por tener un meandro abandonado que fue inundado por las descargas, el cual tiene una longitud de 1.75 km iniciando 350 m aguas arriba del kilómetro 16, y reconectándose con el cauce principal en kilómetro 17.6. Un segundo meandro ubicado 500 m aguas abajo del kilómetro 18 también se reconectó con el cauce principal debido a las descargas del canal WM, éste se reconecta con el cauce en el kilómetro 19. La superficie inundada incrementó a 21.896 ha dos meses posteriores al inicio de las descargas del canal WM, teniendo tirantes máximos de hasta 2.5 m en la parte norte del área y 2.2 m al final de ésta. El caudal de 7 m³/s, incrementó la superficie de inundación máxima a 17.08 ha, mostrando tirantes máximos dentro del cauce de 2.3 m. La descarga de 10 m³/s presentó una inundación máxima de 22.209 ha, y tirantes máximos de 2.6. El caudal de 10 m³/s inundó el primer meandro abandonado que se encuentra a 350 m aguas arriba del kilómetro 16, teniendo una longitud de 1.7 km, reconectándose con el cauce principal 570 m aguas abajo del kilómetro 17. Durante el escenario de 5 m³/s, se registró una superficie máxima de inundación de 15.1 ha, este escenario inundó el segundo meandro abandonado que se encuentra 450 m aguas arriba del kilómetro 19, el cual, tiene una longitud de 500 m, este meandro se reconectó con el cauce principal en el kilómetro 19. Los tirantes máximos presentados debido al caudal descargado de 5 m³/s fue 2.1 m en el cauce del RC.

ÁREA 9. El área 9 cuenta con una extensión de 62.1 ha, tendiendo parte del kilómetro 19 y 20 dentro de su superficie. Esta área inicia 250 m aguas arriba del kilómetro 21, finalizando 200 m aguas abajo del kilómetro 21. Dentro de esta área se encuentra un segmento del cauce del RC de 1.4 km, el cual previo a las descargas del canal WM se encontraba seco. Esta es la única área propuesta en la que el cauce estaba completamente seco antes del evento de descarga. En la [tabla 17](#) se presenta la superficie asociada a cada tipo de hábitat para el área 9 y su evolución durante las descargas provenientes del canal WM en el RC. Esta área fue la que mostró un mayor cambio en la distribución del tipo de hábitat, ya que previo a las descargas, toda la superficie era considerada como terrazas altas debido a la profundidad del nivel freático. Un mes iniciadas las descargas, el hábitat de terrazas altas se redujo a más del 50% como consecuencia del incremento del nivel del agua subterránea. Dos meses posteriores iniciadas las descargas, la superficie del tipo de hábitat de marisma se redujo, esto debido al incremento de la altura del espejo de agua, mientras que los demás tipos de hábitat mostraron un incremento en su extensión.

Tabla 21. Tipo de hábitat y evolución de su área de los tres momentos de las descargas provenientes del canal WM en el área 9

Tipo de hábitat	Profundidad al nivel freático (m)	Área (ha)		
		Pre - descarga	1 mes posterior al inicio de descarga	2 meses posteriores al inicio de descarga
Marismas	0 - 0.5	-	3.355	1.792
Ribereño húmedo	0.5 - 1.5	-	4.115	5.381
Ribereño mixto denso	1.5 - 2	-	2.154	2.68
Ribereño de baja intensidad	2 - 2.5	-	4.193	6.139
Mezquite	2.5 - 3.5	-	17.851	25.89
Terrazas altas	mayores a 3.5	55.052	20.227	11.667

En esta área la extensión de inundación provocada un mes después de iniciadas la descarga fue de 6.285 ha, presentado tirantes máximos promedio en el cauce de 1.8 m. La extensión de inundación se incrementó a 6.424 ha, esto debido a las descargas continuas dos meses posteriores de iniciadas, con tirantes máximos dentro del cauce de hasta 2.4 m. El caudal simulado de 5 m³/s, causó una superficie máxima de inundación de 4.724 ha, con un tirante máximo en el cauce principal de 2.2 m. La superficie máxima de inundación incrementó a 5.650 ha durante el caudal de 7 m³/s y mostró un tirante máximo en el cauce de 2.3 m. Por su parte, el escenario de 10 m³/s presentó una superficie de inundación de 6.529 ha, con tirantes máximos de hasta 2.6 m.

Las superficies inundadas modelizadas para los tres escenarios (5, 7 y 10 m³/s) para todas las zonas seleccionadas se muestran en la [tabla 18](#). El comportamiento de las áreas susceptibles a restauración con los diferentes escenarios modelados para el segmento norte ([figura 62](#)) muestran superficies máximas de inundación similares, esto es debido a la configuración del terreno natural, en el que, de manera general, no se encuentran meandros abandonados y el cauce principal del RC tiene la capacidad para conducir los diferentes caudales modelados sin inundar las terrazas bajas. Las áreas susceptibles a restauración del segmento sur tienen un corredor ribereño con zonas de cultivo alejadas del cauce en comparación del segmento norte, haciendo un corredor ribereño de mayor ancho. La configuración del terreno natural permite un incremento gradual de la superficie máxima inundada al incrementar el caudal descargado, aunado a que, en esta zona, se encuentran meandros abandonados, los cuales pueden ser inundados con caudales de 5, 7 y/o 10 m³/s. Sin embargo, la extensión de inundación y los tirantes máximos dependen de la magnitud del caudal descargado. El segmento sur cuenta con terrazas inundables que tienen una extensión mayor que en el segmento norte, donde las terrazas altas, utilizadas como áreas agrícolas, se encuentran próximas al cauce del RC.

Tabla 22. Áreas inundadas y elevaciones del espejo de agua máximas para los diferentes escenarios modelizados

Área susceptible a restauración	Escenario			Escenario		
	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s	5 m ³ /s	7 m ³ /s	10 m ³ /s
	Área máxima inundada (ha)			Tirante máximo (m)		
1	3.437	3.533	3.819	1.75	2	2.5
2	5.111	5.195	5.435	2	2.4	2.8
3	4.437	4.991	5.574	2	2.4	2.7
4	4.52	4.68	4.907	2	2.35	2.7
5	4.871	6.358	7.363	2	2.35	2.7
6	8.479	11.02	12.387	2	2.3	2.65
7	5.419	5.956	7.135	2.1	2.35	2.6
8	15.1	17.08	22.209	2.1	2.3	2.6
9	4.725	5.651	6.53	2.2	2.3	2.6

El caudal promedio descargado proveniente del canal WM fue de 7.6 m³/s, estimando un volumen descargado total de 46.3 hm³. La sección de aforo DMS-1 mostró un caudal promedio de 8.37 m³/s teniendo un volumen descargado de 52.41 hm³, este volumen es debido a las descargas provenientes del canal WM y la descarga del acuífero hacia el cauce del río. La sección DMS-2 la descarga promedio fue de 8.84 m³/s. La sección de aforo DMS-3 promedió un caudal 5.52 m³/s, en este sitio de aforo se estimó una pérdida de volumen del 43.4 %. El sitio DMS-4 mostró un caudal promedio de 1.03 m³/s, estimándose las pérdidas de agua por infiltración al DMS-4 del 97.5 % del total del volumen descargado.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

El análisis de los datos medidos en campo y la modelización del flujo superficial de los caudales descargados en el corredor ribereño del RC, considerados como caudales ambientales, permitió evaluar el efecto de las descargas tanto en la profundidad del nivel freático como del espejo de agua en el Río Colorado, así como en el hábitat ribereño a lo largo de la zona limítrofe del RC.

El análisis de las mediciones de caudal en cuatro sitios de aforo ubicados en el cauce del corredor ribereño durante las descargas del canal WM, la medición de los tiempos de recorrido y las áreas de inundación permiten concluir que:

1. El volumen total medido en el sitio de aforo DMS-1 fue de 52.412 hm³ (más aguas arriba de la zona de estudio) fue mayor que el medido en el DMS-3 (29.673 hm³) ubicado a 20.5 km aguas debajo de la PDM, por lo que el volumen total de pérdida entre el DMS-1 y DMS-3 representó el 56.6% de la descarga total (29.665 hm³), lo que se considera como pérdidas es: infiltración, retención, evaporación, y recarga al acuífero.
2. Las pérdidas de agua estimadas entre los sitios DMS-2 y DMS-3, separadas 15.1 km entre sí, fueron del 43.7 % del total descargado. El frente del agua llegó al DMS-3 catorce días después de iniciadas las descargas.
3. Entre los sitios de aforo DMS-2 y DMS-4 se registró una pérdida de agua del 97.5 % del volumen total que se descargó, registrándose un tiempo de recorrido del agua de 56 días hasta el DMS-14.
4. Dado que el área inundada ocupó en casi todo el recorrido el canal principal del RC del DMS-1 al DMS-4, inundando parcialmente algunos meandros, es posible estimar los volúmenes de agua y tiempos de descarga para diseñar hidrogramas con diversos objetivos ambientales; por ejemplo, para proveer de agua superficial a algunos sitios de restauración establecidos en la margen derecha en la zona limítrofe, o bien para usos recreativos en las zonas concurridas socialmente en el puente de la carretera Federal No. 2 en su cruce con el Río Colorado, así como para los objetivos enmarcados en el Acta 323.

Las mediciones sistemáticas de los niveles de agua subterránea durante las descargas del canal WM, mostraron que la profundidad del acuífero en la zona ribereña del tramo limítrofe aumentan, por la recarga propiciada por estos flujos, lo que permitió establecer 9 zonas susceptibles a restauración dentro del corredor ribereño de la zona limítrofe de acuerdo con los esquemas establecidos por el Grupo Binacional de Trabajo Ambiental del Acta 323, lo que permitiría una superficie de 421.84 ha de diversos hábitats. Además, con el objetivo de aportar elementos hidrológicos para la definición de zonas propicias para la restauración y el diseño de estos posibles sitios, se clasificaron por tipos de hábitats, encontrando que 5.943 ha corresponderían a hábitat de marismas, 22.612 ha de ribereño húmedo, 11.728 ha de ribereño mixto denso, 23.587 ha de ribereño de baja intensidad, 76.443 ha de hábitat de mezquite y 247.906 ha de hábitat de terrazas altas. Las variaciones de estas superficies para diferentes hábitats en función de su disponibilidad de agua subterránea y superficial fueron analizadas para la duración total del evento de descarga encontrando incrementos en la superficie de hábitat de marismas y ribereño húmedo contra la disminución de ribereño de baja densidad.

La simulación hidráulica realizada en 2D en flujo en estado transitorio utilizando el programa HEC-RAS ofreció resultados favorables de calibración (diferencias entre tirantes de 0.05 a 0.6 m), desde la sección DMS-1 hasta la sección DMS-3A lo que fue explicado porque este tramo se encontraba inundado antes del evento de descarga y el porcentaje de infiltración resultó menor y manejable para la aproximación utilizada por el programa. Los parámetros del modelo fueron calibrados contrastando la velocidad de avance de la onda y los tirantes del agua, utilizando los datos recopilados en las campañas de monitoreo con el objeto de generar y analizar 3 escenarios de descarga, de 5, 7 y 10 m³/s que permitieran enriquecer los criterios de selección de áreas con fines de restauración. Se encontró que las superficies inundadas en los primeros 9 km aguas debajo de la PM se mantuvieron dentro del cauce principal para todos los escenarios modelizados, y que la inundación máxima sería de 65.82, 75.59 y 88.33 ha para cada escenario, respectivamente. Además, que con una descarga de 7 m³/s por 30 días inundaría meandros abandonados susceptibles de ser restaurados, por lo que se concluye que éste caudal es el más recomendable para usos ambientales.

Durante el 5 de septiembre al 15 de noviembre de 2019 se monitorearon la descarga de flujos al cauce del Río Colorado provenientes del canal Wellton Mohawk. En el sitio de aforo DMS-1 se registraron un total de 53.24 hm³, de los cuales 1.4 hm³ se registraron en el sitio de aforo DMS-4, lo que representa pérdidas del 97.2% del volumen total medido en el sitio de aforo DMS-1. Estos resultados contrastan con los anteriores descritos, inclusive el volumen de pérdidas fue mayor al reportado durante el Flujo Pulso 2014 de 44.6 hm³ lo que representó el 56.1% del total descargado en el Presa Morelos durante el flujo pulso 2014 ([Ramírez-Hernández et al., 2017](#)). Sin embargo, la diferencia en duración fue de 71 días para este evento con respecto a 27 del Flujo Pulso 2014 ([Rodríguez-Burgueño et al., 2017](#))

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R. W. (2007). RESTORING THE ENVIRONMENT AND RESTORING DEMOCRACY: LESSONS FROM THE COLORADO RIVER. *Virginia Environmental Law Journal*, 25(1), 55–104. <http://www.jstor.org/stable/24791035>
- Alen, S., Linkon, B., Sudip, B., Balbhadra, T., Neekita, J., Ajay, K., & Ritu, G. (2021). Understanding Suitability of MIKE 21 and HEC-RAS for 2D Floodplain Modeling. In *World Environmental and Water Resources Congress 2020* (pp. 237–253). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784482971.024>
- Banco Mundial. (2019). *Agua: Panorama general*. https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview?fbclid=IwAR3lBmDxTzS2_Pi1OWZuc9Zzd1608q5WC11gB8VbeXbjZ5voIKx9jLi5VWI#1
- Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2016). *Forest management and planning*. Academic press.
- Brunner, G. (2020). *HEC-RAS River Analysis System 2D Modeling User's Manual*.
- Bureau of Reclamation. (2019). *Reclamation to begin maintenance activities on the Bypass Canal*. <https://www.usbr.gov/newsroom/newsroomold/newsrelease/detail.cfm?RecordID=67683>
- Carriquiry, J. D., & Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158(1–4), 125–145. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00189-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00189-3)
- Chow, Ven Te. (1964). *Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resources technology*.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.
- Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P., & Palmer, R. N. (2004). The Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change*, 62(1), 337–363. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013684.13621.1f>
- Cital, F., Ramírez-Hernández, J., García-Hernández, J., García-Leyva, G., Rodríguez-Burgueño, J. E., & Ramírez-Barreto, M. E. (2022). Ecosystem services (ES) provided by ditches in a desert agricultural valley. *Ecological Engineering*, 174, 106462. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106462>
- Cohen, M. (2006). The Delta's Perennial Drought: Instream Flows for an Over-Allocated River. *Pac. McGeorge Global Bus. & Dev. LJ*, 19, 115.
- Comision Internacional de Límites y Aguas. (1944). *Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos de America de la distribución de las*

aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravo, desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México.

- Comision Internacional de Límites y Aguas. (2017). *Acta 323. Ampliación de las medidas de cooperación y adopción ante la escasez de agua en la Cuenca del Río Colorado.*
- Comision Internacional de Límites y Aguas. (2018). *Informe Final del Acta 319 sobre el monitoreo de Flujos Ambientales en el Tramo Limítrofe y Delta del Río Colorado.*
- Comision Internacional de Límites y Aguas. (2020). *Acta 323. Grupo de Trabajo Ambiental. Reporte de implementación 2018.*
- Comisión Internacional de Límites y Aguas. (2012). *Acta 319. Medidas interinas de cooperación internacional en la cuenca del Río Colorado hasta 2017 y ampliación de las medidas de cooperación del Acta 318, para atender los prolongados efectos de los sismos de abril de 2010 en el Valle de Mexicali, Baja C.*
- Comision Nacional del Agua. (2018). *Atlas del agua en México* (2018th ed.).
- Comision Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Valle de Mexicali (0210), Estado Baja California.*
- Comission International Boundary and Water. (2018). *Minute 323 Environmental Work Group Restoration Programmatic Framework Draft.*
- CONABIO. (2020). *Delta del Río Colorado.*
http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_011.html
- Custodio, E., & LLamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Barcelona. Vol. *Omega*. *Barcelona.*
- Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13(6), 913–921. <https://doi.org/10.5194/hess-13-913-2009>
- Farooq, M., Shafique, M., & Khattak, M. S. (2019). Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM). *Natural Hazards*, 97(2), 477–492. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>
- French, R. H. (1988). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.
<https://books.google.com.mx/books?id=6QO4swEACAAJ>
- Furnish, D. B., & Ladman, J. R. (1975). The Colorado River Salinity Agreement of 1973 and the Mexicali Valley. *Nat. Resources J.*, 15, 83.
- Garambois, P.-A., Larnier, K., Monnier, J., Finaud-Guyot, P., Verley, J., Montazem, A.-S., & Calmant, S. (2020). Variational estimation of effective channel and ungauged anabranching river discharge from multi-satellite water heights of different spatial sparsity. *Journal of Hydrology*, 581, 124409. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124409>

- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Giles, R. V. (1991). *Mecánica de fluidos e hidráulica*. McGraw-Hill.
<https://books.google.com.mx/books?id=MlhLPQAACAAJ>
- Glenn, E. P., Hucklebridge, K., Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P. L., & Pitt, J. (2008). Reconciling environmental and flood control goals on an arid-zone river: Case study of the Limitrophe region of the Lower Colorado River in the United States and Mexico. *Environmental Management*, 41(3), 322–335. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9056-4>
- Glenn, E. P., Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Shaw, W., & Flessa, K. (2001). Ecology and conservation biology of the Colorado River delta, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 49(1), 5–15. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0832>
- Gómez-Sapiens, M. M., Jarchow, C. J., Flessa, K. W., Shafroth, P. B., Glenn, E. P., & Nagler, P. L. (2020). Effect of an environmental flow on vegetation growth and health using ground and remote sensing metrics. *Hydrological Processes*, 34(8), 1682–1696.
<https://doi.org/10.1002/hyp.13689>
- Gordillo, G., Morales-Hernández, M., & García-Navarro, P. (2019). Finite volume model for the simulation of 1D unsteady river flow and water quality based on the WASP. *Journal of Hydroinformatics*, 22(2), 327–345. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.080>
- Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P. L., Carrillo-Guererro, Y. K., & Glenn, E. P. (2013). Effects of drought on birds and riparian vegetation in the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering*, 51, 275–281. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.082>
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1–4), 87–99.
- Hultine, K. R., Froend, R., Blasini, D., Bush, S. E., Karlinski, M., & Koepke, D. F. (2020). Hydraulic traits that buffer deep-rooted plants from changes in hydrology and climate. *Hydrological Processes*, 34(2), 209–222. <https://doi.org/10.1002/hyp.13587>
- Jarchow, C. J., Nagler, P. L., Glenn, E. P., Ramírez-Hernández, J., & Rodríguez-Burgueño, J. E. (2017). Evapotranspiration by remote sensing: An analysis of the Colorado River Delta before and after the Minute 319 pulse flow to Mexico. *Ecological Engineering*, 106, 725–732.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.056>
- Kennedy, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., & Ramírez-Hernández, J. (2017). Groundwater response to the 2014 pulse flow in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 715–724.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.072>
- Kumar, N., Kumar, M., Sherring, A., Suryavanshi, S., Ahmad, A., & Lal, D. (2020). Applicability of HEC-RAS 2D and GFMS for flood extent mapping: a case study of Sangam area, Prayagraj, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 397–405.
<https://doi.org/10.1007/s40808-019-00687-8>

- Luecke, D., Pitt, J., Congdon, C., Glenn, E., Valdés-Casillas, C., & Briggs, M. (1999). *A Delta onces more: restoring riparian and wetland habitat in the Colorado River Delta*.
- Lytle, D. A., & Poff, N. L. R. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution*, 19(2), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.002>
- Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología Editorial MIR*. Moscú.
- Morrison, J. I., Postel, S., & Gleick, P. H. (1996). *Sustainable use of water in the lower colorado river basin*.
- Mueller, D., & Wagner, C. (2009). Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. In *Techniques and Methods*.
- Mueller, E. R., Schmidt, J. C., Topping, D. J., Shafroth, P. B., Rodríguez-Burgueño, J. E., Ramírez-Hernández, J., & Grams, P. E. (2017). Geomorphic change and sediment transport during a small artificial flood in a transformed post-dam delta: The Colorado River delta, United States and Mexico. *Ecological Engineering*, 106, 757–775. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.08.009>
- Nagler, P. L., Glenn, E. P., Hinojosa-Huerta, O., Zamora, F., & Howard, K. (2008). Riparian vegetation dynamics and evapotranspiration in the riparian corridor in the delta of the Colorado River, Mexico. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 864–874. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.04.010>
- NAGLER, P. L., HINOJOSA-HUERTA, O., GLENN, E. P., GARCIA-HERNANDEZ, J., ROMO, R., CURTIS, C., HUETE, A. R., & NELSON, S. G. (2005). Regeneration of Native Trees in the Presence of Invasive Saltcedar in the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology*, 19(6), 1842–1852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00234.x>
- Nelson, S. M., Ramírez-hernández, J., Rodríguez-burgue, J. E., Milliken, J., Kennedy, J. R., Zamora-arroyo, F., Schlatter, K., Santiago-serrano, E., & Carrera-villa, E. (2017). A history of the 2014 Minute 319 environmental pulse flow as documented by field measurements and satellite imagery. *106(319)*, 733–748. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.040>
- O'Brien, A. L. (1980). The Role of Ground Water in Stream Discharges from Two Small Wetland Controlled Basins in Eastern Massachusetts. *Groundwater*, 18(4), 359–365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1980.tb03410.x>
- Ochoa, E. P. (2003). *Ficha Informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)*. 1–17.
- Olmsted, F. H., Loeltz, O. J., & Irelan, B. (1973). *Geohydrology of the Yuma area, Arizona and California* (Vol. 486). US Government Printing Office.
- ONU. (2014). *Aguas transfronterizas*. https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/transboundary_waters.shtml?fbclid=IwAR3TVujDefehzsFhHXzRUVxkHPhd5Pa178Xy6YGcfDm5tcmBADB6BgKA12I

- Pacheco, M., Martín-Barajas, A., Elders, W., Espinosa-Cardena, J. M., Helenes, J., & Segura, A. (2006). Stratigraphy and structure of the Altar basin of NW Sonora: Implications for the history of the Colorado River delta and the Salton trough. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 1–22.
- Palmer, M., & Ruhi, A. (2019). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(6459).
<https://doi.org/10.1126/science.aaw2087>
- Pitt, J. (2001). Can we restore the Colorado River delta? *Journal of Arid Environments*, 49(1), 211–220. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0843>
- Pitt, J., Hinojosa-Huerta, O., & Carrillo-Guerrero, Y. (2015). *Colaboración Binacional en la Cuenca del Río Colorado : Recomendaciones para Prevenir una Crisis de Agua*. February, 8. <http://www.atl.org.mx/coloquio/images/stories/curricula/Osvel Hinojosa-Jennifer Pitt ponencia español.pdf>
- Pitt, J., & Kendy, E. (2017). Shaping the 2014 Colorado River Delta pulse flow: Rapid environmental flow design for ecological outcomes and scientific learning. *Ecological Engineering*, 106, 704–714. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.12.002>
- Poff, N. L. R., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Quezada, N. (2007). *Simulación hidráulica unidimensional del Río Colorado en el tramo Puente Ferroviario-Vado Carranza, Mexicali, B. C.* Universidad Autónoma de Baja California.
- Quiroga, V. M., Kurea, S., Udoa, K., & Manoa, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. *Ribagua*, 3(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Ramírez-Hernández, J., Hinojosa-Huerta, O., Peregrina-Llanes, M., Calvo-Fonseca, A., & Carrera-Villa, E. (2013). Groundwater responses to controlled water releases in the limitrophe region of the Colorado River: Implications for management and restoration. *Ecological Engineering*, 59, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.016>
- Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Kendy, E., Salcedo-Peredia, A., & Lomeli, M. A. (2017). Hydrological response to an environmental flood: Pulse flow 2014 on the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 633–644.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.03.003>
- Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., Zamora-Arroyo, F., Carreón-Diazconti, C., & Pérez-González, D. (2015). Mimic pulse-base flows and groundwater in a regulated river in semiarid land: Riparian restoration issues. *Ecological Engineering*, 83, 239–248.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.06.006>
- Ramsar. (2008). *Ficha informativa de los Humedales Ramsar. Sistema de Humedales Remanentes*

del Delta del Río Colorado.

- Rangari, V. A., Umamahesh, N. V., & Bhatt, C. M. (2019). Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(4), 1839–1851. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00641-8>
- Rantz, S. E. (1982). *Measurement and computation of streamflow: volume 1. Measurement of stage and discharge.*
- Rodríguez-Burgueño, J. Eliana, Shanafield, M., & Ramírez-Hernández, J. (2017). Comparison of infiltration rates in the dry riverbed of the Colorado River Delta during environmental flows. *Ecological Engineering*, 106, 675–682. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.014>
- Rodríguez-Burgueño, Jesús Eliana. (2017). *Efectos hidrológicos de los flujos pulso y base en la zona riparia del Delta del Río Colorado.* Universidad Autónoma de Baja California.
- Ruíz, P. R. (2008). *Hidráulica de canales.* México.
- Salcedo-Peredia, A. T. (2014). *Simulación hidráulica del Flujo Pulso (2014) en el corredor del delta del río Colorado.* Universidad Autónoma de Baja California.
- Shafroth, P. B., Schlatter, K. J., Gomez-Sapiens, M., Lundgren, E., Grabau, M. R., Ramírez-Hernández, J., Rodríguez-Burgueño, J. E., & Flessa, K. W. (2017). A large-scale environmental flow experiment for riparian restoration in the Colorado River Delta. *Ecological Engineering*, 106, 645–660. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.016>
- Solís Bolaños, H., Murillo Montero, W., & Oreamuno Vega, R. (1991). *Estudio hidrológico e hidráulico para el control de inundaciones en la cuenca del río Purires, valle del Guarco. Informe técnico.* Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento, San José
- SonTek. (2016). *RiverSurveyor S5 and M9 System Manual, Firmware Version 4.02.* 858, 244. <http://www.sontek.com/productsdetail.php?RiverSurveyor-S5-M9-14>
- Sophocleous, M. (2002a). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
- Sophocleous, M. (2002b). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 52–67.
- Sumner, J. R. (1972). Tectonic significance of gravity and aeromagnetic investigations at the head of the Gulf of California. *Geological Society of America Bulletin*, 83(10), 3103–3120.
- Sykes, G. (1926). The delta and estuary of the Colorado River. *Geographical Review*, 16(2), 232–255.
- Sykes, G. G. (1937). *Colorado delta.*

- Te Chow, V., & Saldarriaga, J. G. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
<https://books.google.com.mx/books?id=XnvUAAAACAAJ>
- TetraTech. (2004). *Lower Colorado River. Proposed pilot channel analysis*.
- Tiegs, Scott D, O’leary, J. F., Pohl, M. M., & Munill, C. L. (2005). Flood disturbance and riparian species diversity on the Colorado River Delta. *Biodiversity & Conservation*, 14(5), 1175–1194.
- Tiegs, Scott Darel, & Pohl, M. (2005). Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976-2000. *Geomorphology*, 69(1–4), 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.12.002>
- UN-Water. (2008). Transboundary Waters: Sharing Benefits, Sharing Responsibilities. *Task Force on Transboundary Waters*, 16.
https://doi.org/http://www.unwater.org/downloads/UNW_TRANSBOUNDARY.pdf
- UNESCO. (2015). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (United Nations World Water Assessment Programme). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*.
- Valdés-Casillas, C., Hinojosa-Huerta, O., Munoz-Viveros, M., Zamora-Arroyo, F., Carrillo-Guerrero, Y., Delgado-Garcia, S., Lopez-Camacho, M., Glenn, E. P., Garcia, J., & Riley, J. (1998). Information database and local outreach program for the restoration of the Hardy River wetlands, lower Colorado River delta, Baja California and Sonora, Mexico. *Campus Guaymas*, 102.
- Van de Kamp, P. C. (1973). Holocene continental sedimentation in the Salton Basin, California: a reconnaissance. *Geological Society of America Bulletin*, 84(3), 827–848.
- Vandersande, M. W., Glenn, E. P., & Walworth, J. L. (2001). Tolerance of five riparian plants from the lower Colorado River to salinity drought and inundation. *Journal of Arid Environments*, 49(1), 147–159. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0839>
- Vesipa, R., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2017). Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: Processes and models. *Advances in Water Resources*, 110(July), 29–50. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.028>
- Ye, F., Chen, Q., Blanckaert, K., & Ma, J. (2013). Riparian vegetation dynamics: Insight provided by a process-based model, a statistical model and field data. *Ecohydrology*, 6(4), 567–585. <https://doi.org/10.1002/eco.1348>
- You, X., & Liu, J. (2018). Describing the spatial–temporal dynamics of groundwater-dependent vegetation (GDV): A theoretical methodology. *Ecological Modelling*, 383(September 2017), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.010>
- Zainalfikry, M. K., Ab Ghani, A., Zakaria, N. A., & Chan, N. W. (2019). HEC-RAS One-dimensional hydrodynamic modelling for recent major flood events in Pahang river. *AWAM International Conference on Civil Engineering*, 1099–1115.

- Zamora-Arroyo, F., Nagler, P. L., Briggs, M., Radtke, D., Rodriguez, H., Garcia, J., Valdes, C., Huete, A., & Glenn, E. P. (2001). Regeneration of native trees in response to flood releases from the United States into the delta of the Colorado River, Mexico. *Journal of Arid Environments*, 49(1), 49–64. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0835>
- Zamora-Arroyo, F., Pitt, J., Cornelius, S., Glenn, E., Hinojosa-Huerta, O., Moreno, M., García, J., Nagler, P., de la Garza, M., & Parra, I. (2005). Conservation priorities in the Colorado river delta, Mexico and the United States. *Prepared by the Sonoran Institute, Environmental Defense, University of Arizona, Pronatura Noroeste Dirección de Conservación Sonora, Centro de Investigación En Alimentación y Desarrollo, and World Wildlife Fund—Gulf of California Program.*
- Zamora, F., Pitt, J., Glenn, E. P., Nagler, P. L., Moreno, M., Garcia, J., Hinojosa-Huerta, O., de la Garza, M., & Parra, I. (2005). *Conservation Priorities in the Colorado River Delta: Mexico and the United States.* 103.
- Zeiger, S. J., & Hubbart, J. A. (2021). Measuring and modeling event-based environmental flows: An assessment of HEC-RAS 2D rain-on-grid simulations. *Journal of Environmental Management*, 285, 112125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112125>
- Zellou, B., & Rahali, H. (2017). Assessment of reduced-complexity landscape evolution model suitability to adequately simulate flood events in complex flow conditions. *Natural Hazards*, 86(1), 1–29.
- Zengel, S. A., Meretsky, V. J., Glenn, E. P., Felger, R. S., & Ortiz, D. (1995). Cienega de Santa Clara, a remnant wetland in the Rio Colorado delta (Mexico): vegetation distribution and the effects of water flow reduction. *Ecological Engineering*, 4(1), 19–36. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574\(94\)00050-F](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0925-8574(94)00050-F)

ANEXO I

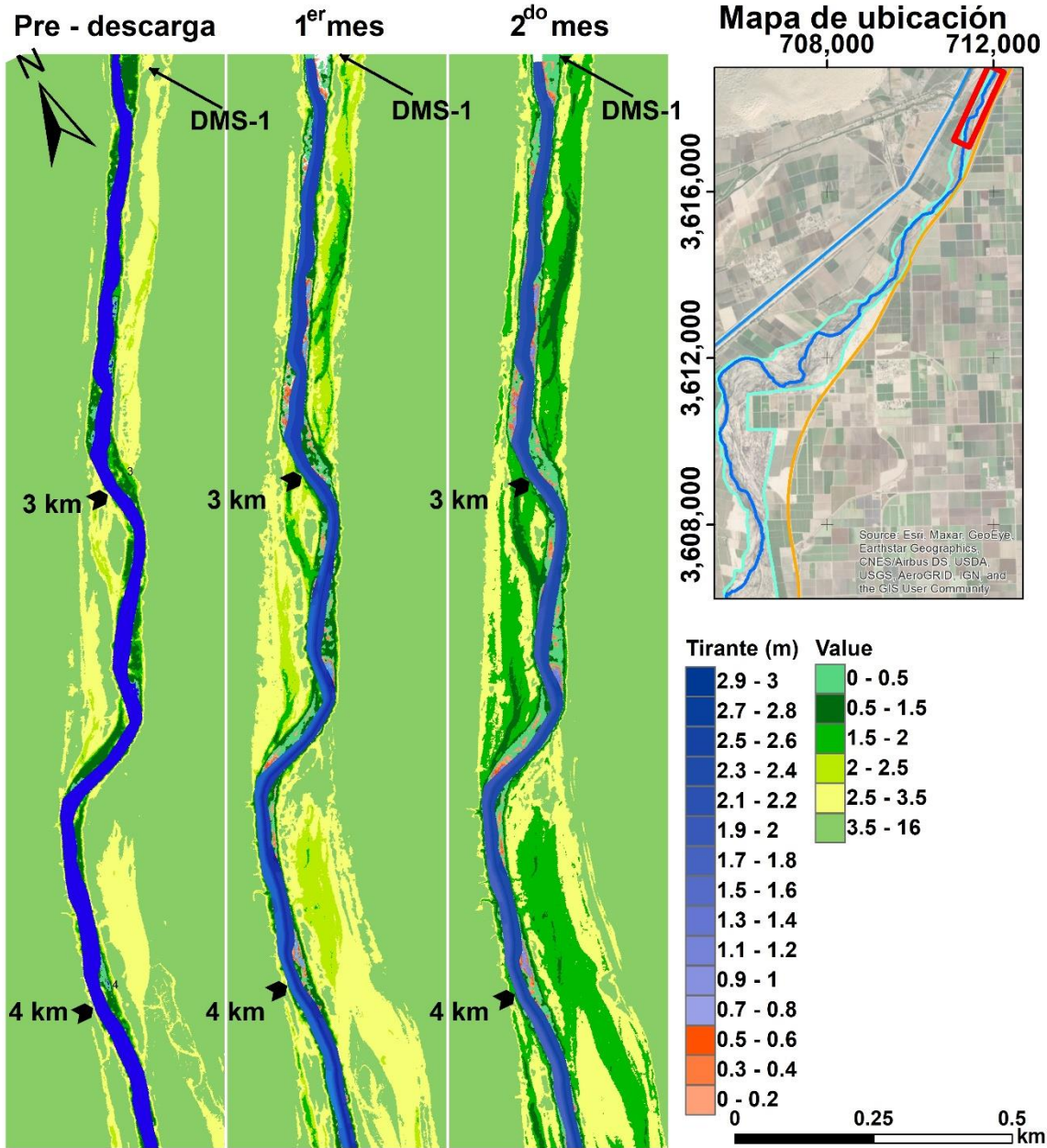


Figura 58. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 3 y 4 aguas debajo de la PDM

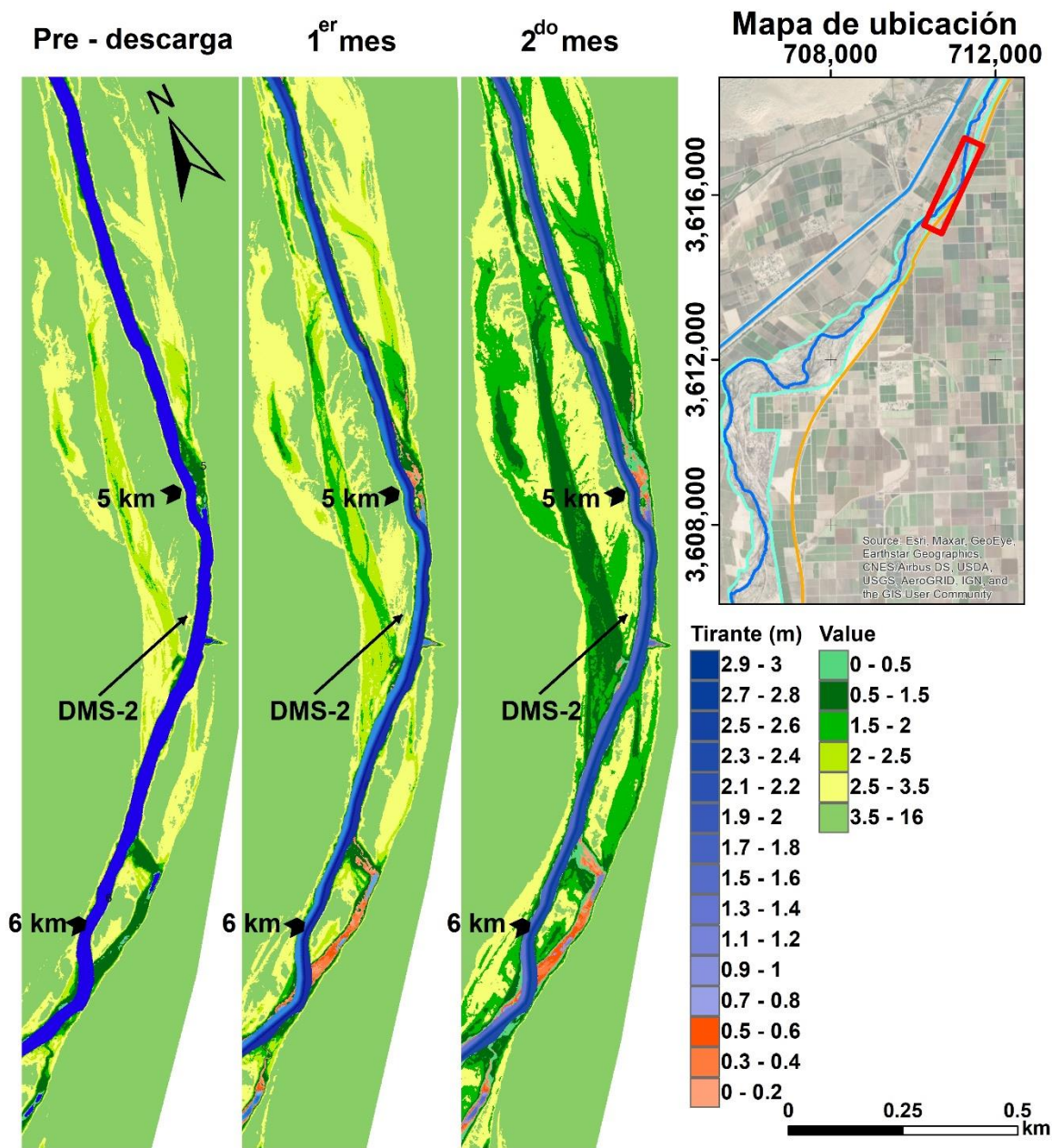


Figura 59. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 5 y 6 aguas debajo de la PDM

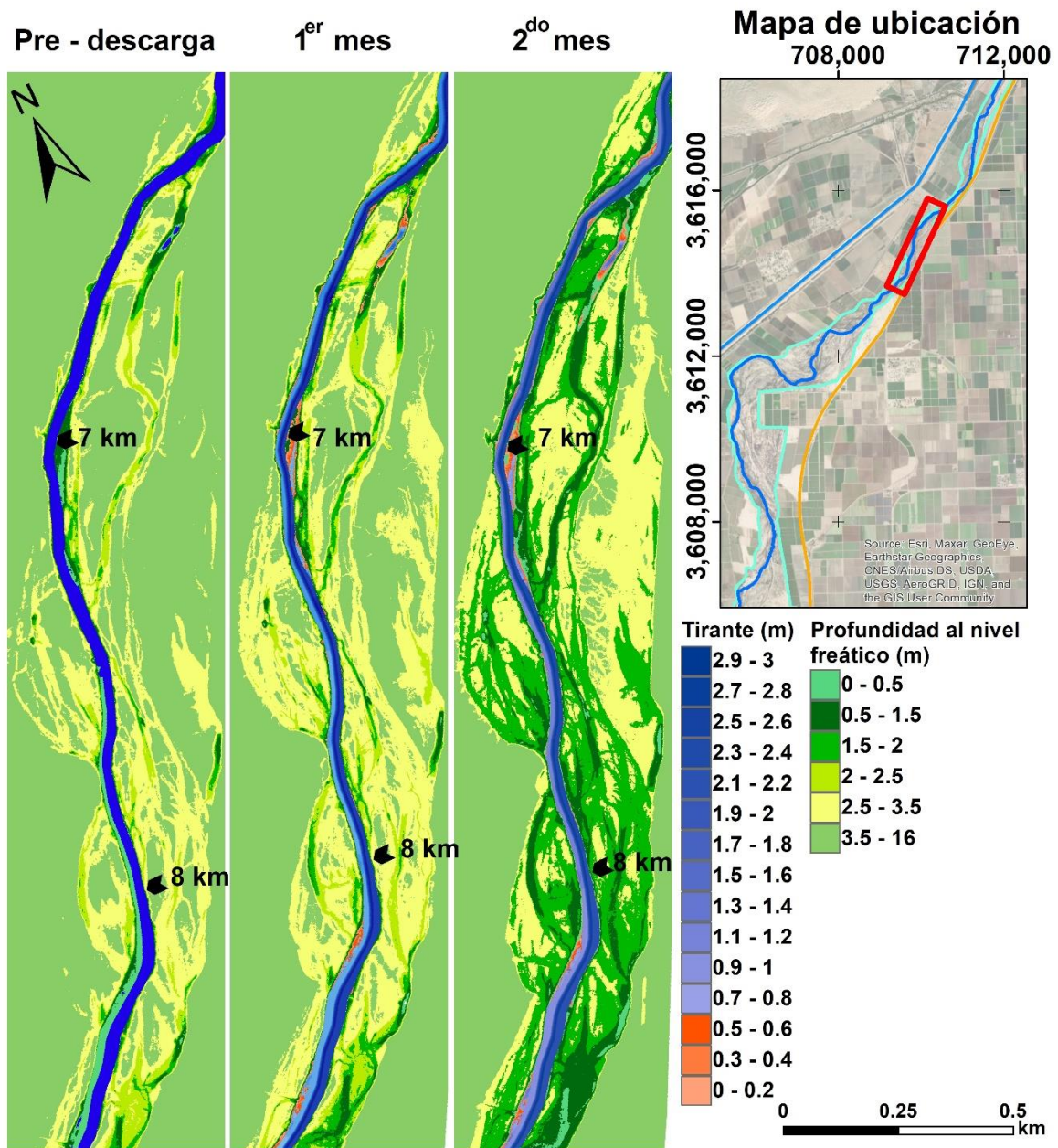


Figura 60. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 7 y 8 aguas debajo de la PDM

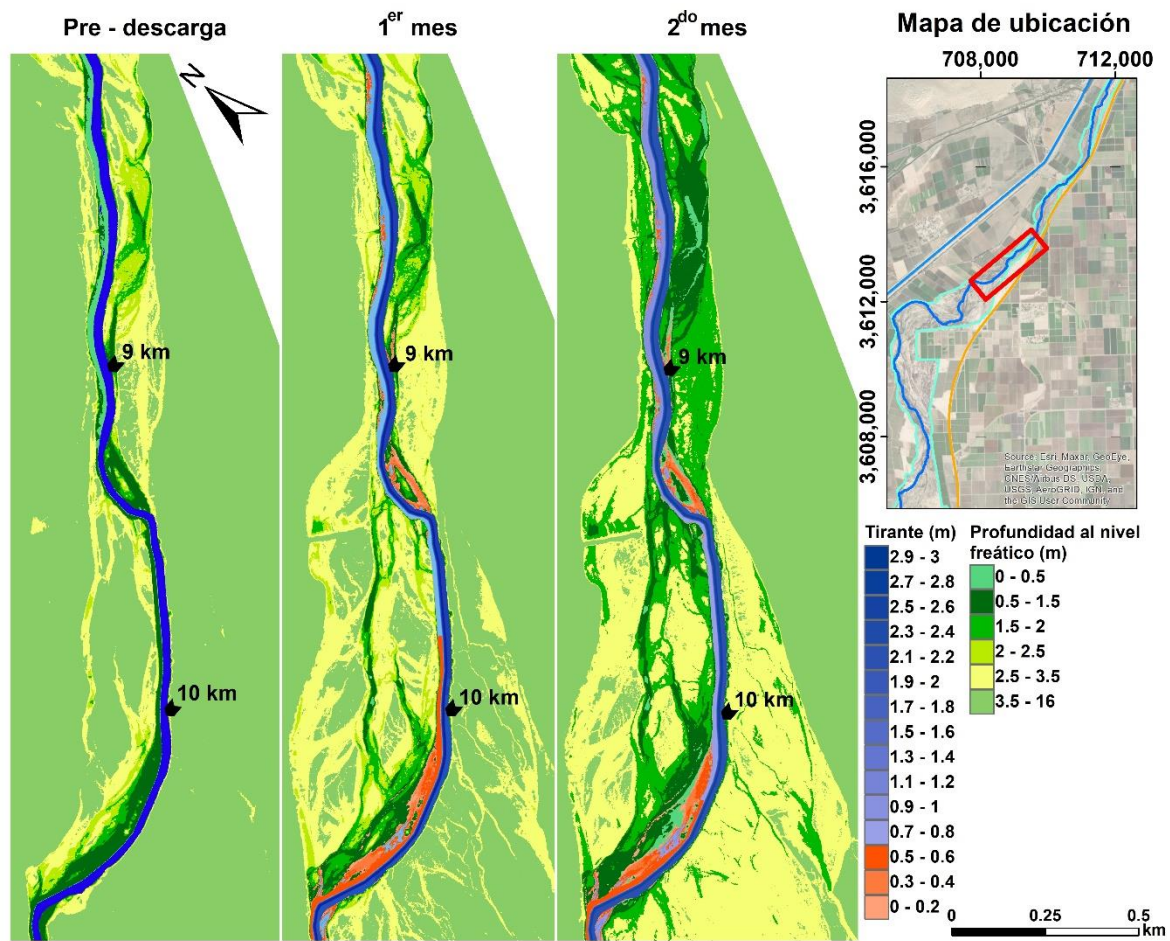


Figura 61. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 9 y 10 aguas debajo de la PDM

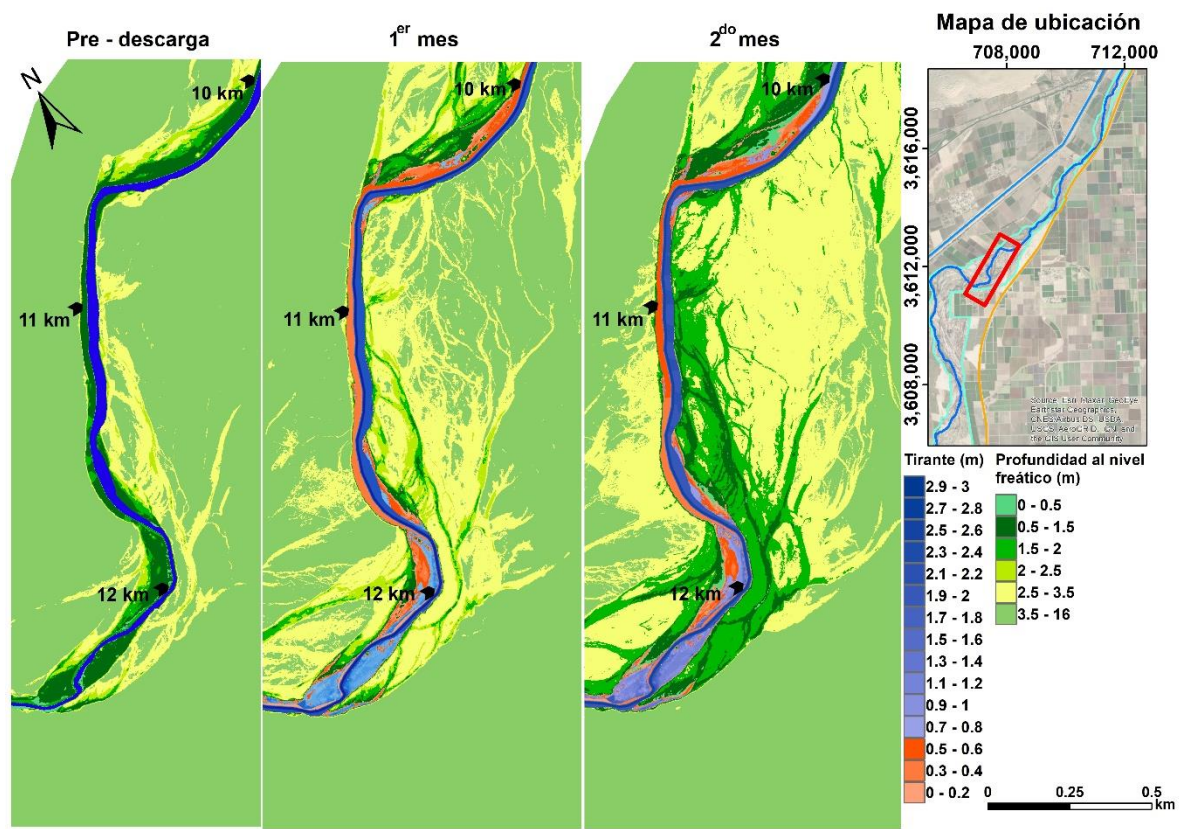


Figura 62. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 11 y 12 aguas debajo de la PDM

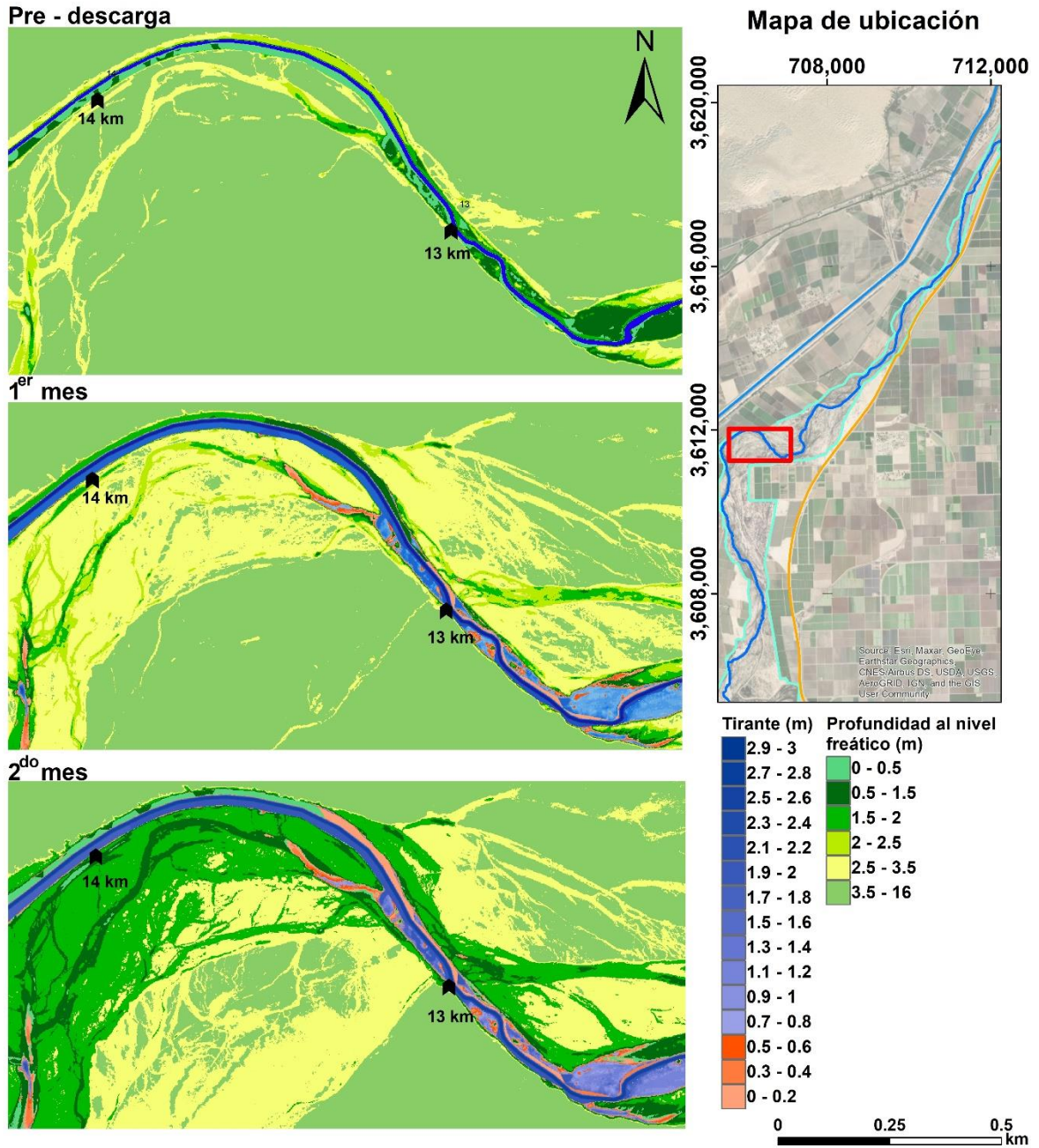


Figura 63. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 13 y 14 aguas debajo de la PDM

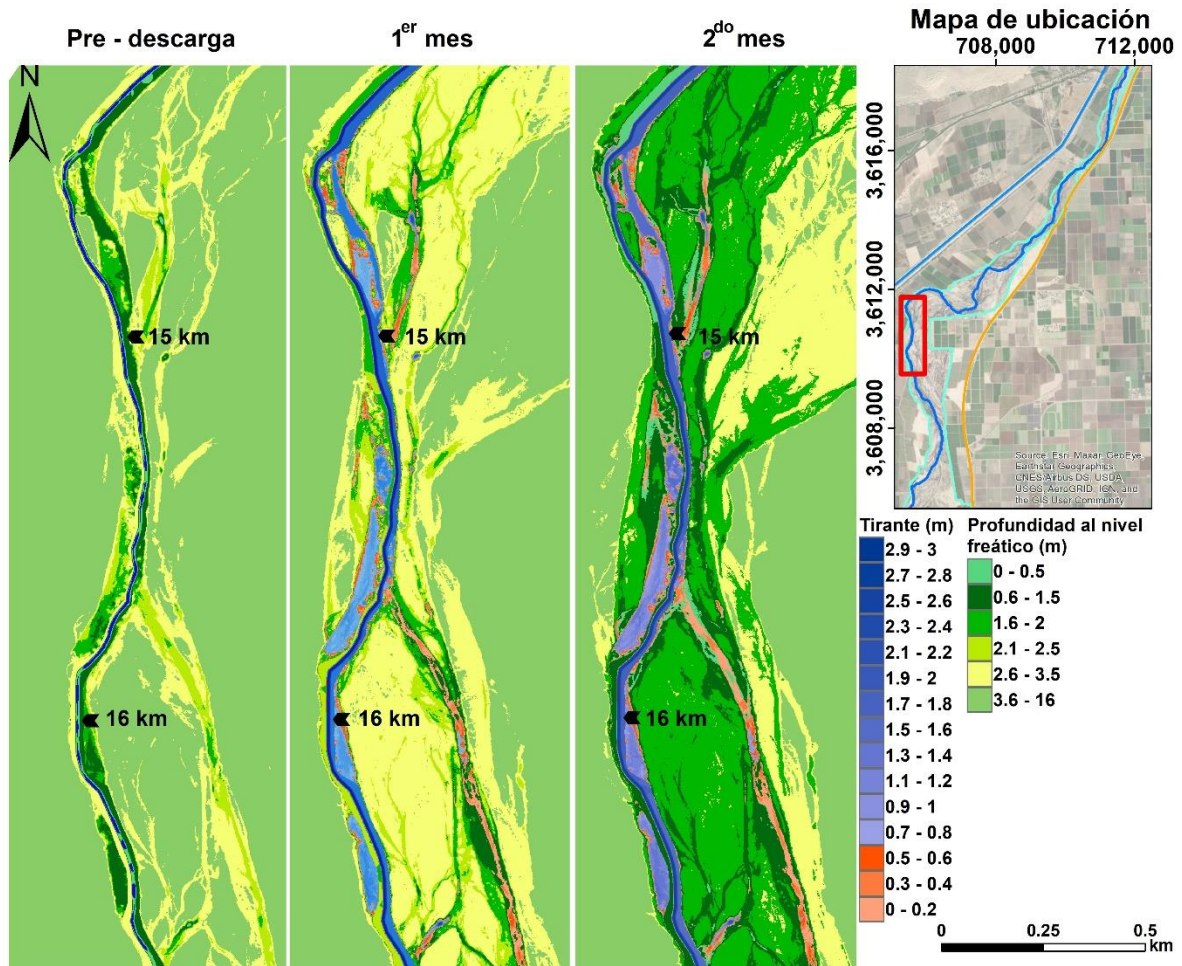


Figura 64. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 15 y 16 aguas debajo de la PDM

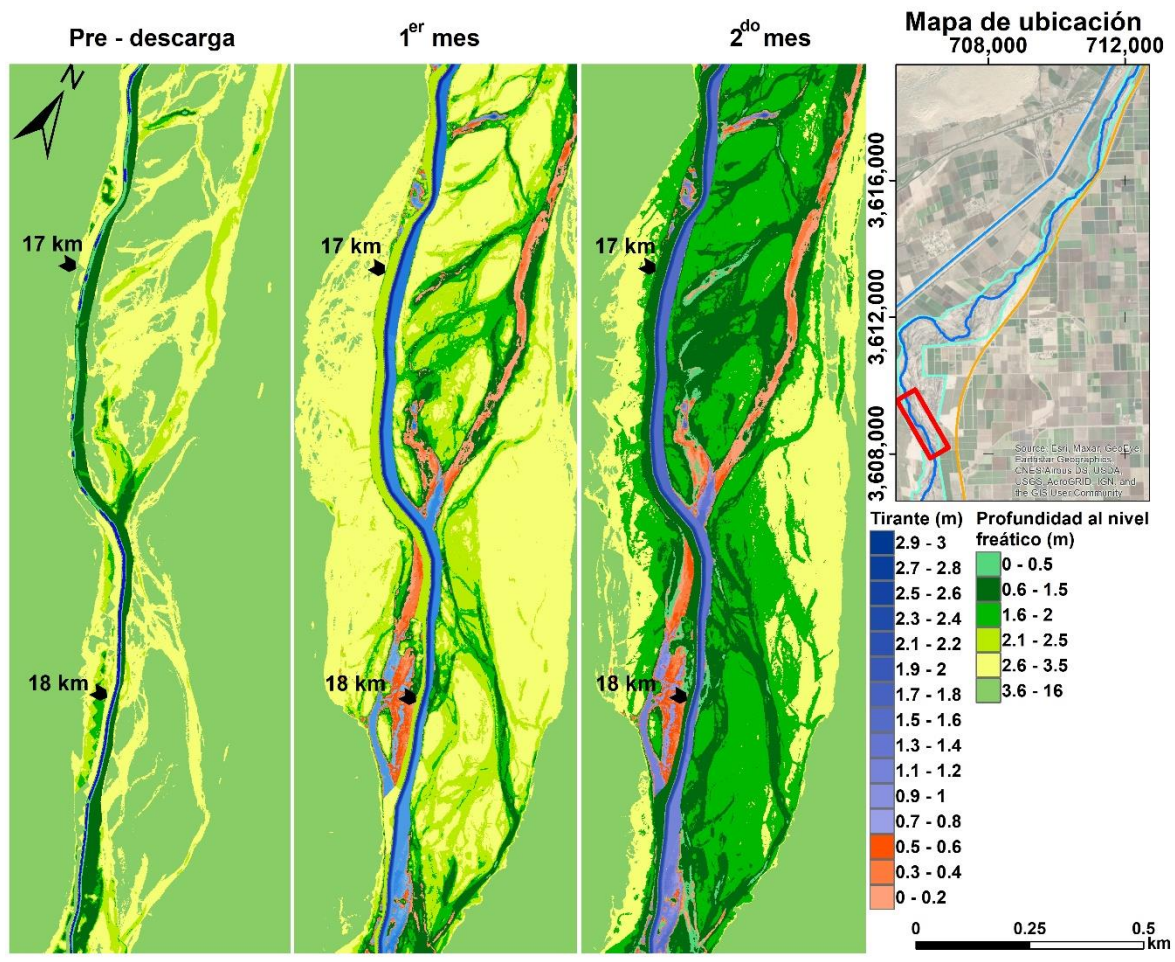


Figura 65. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 17 y 18 aguas debajo de la PDM

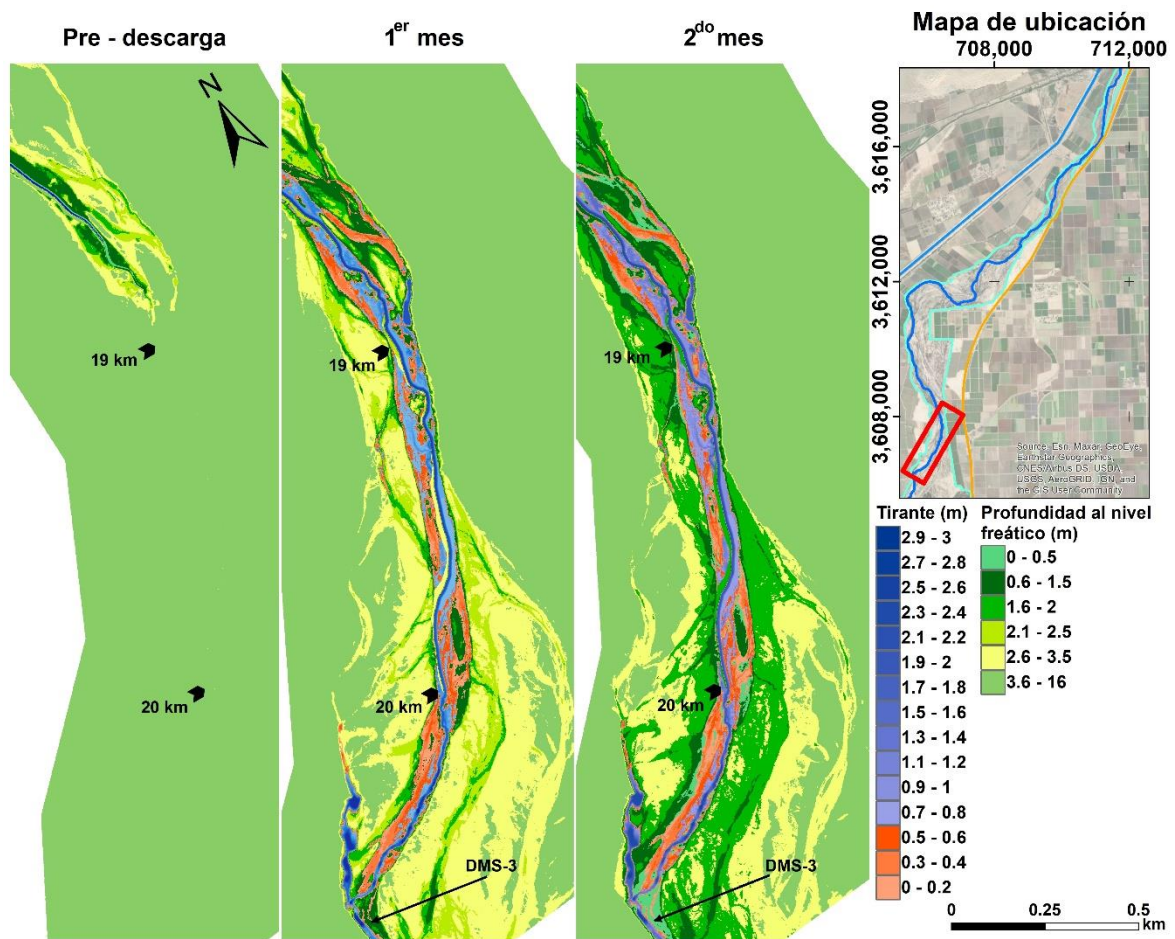


Figura 66. Distribución de profundidades del agua subterránea de acuerdo con la clasificación creada por el grupo binacional de ciencia del Acta 323, kilómetros 19 y 20 aguas debajo de la PDM