



Acta 319
Tramo Limítrofe y Delta
del Río Colorado
Monitoreo de Flujos
Ambientales
Informe Interino
19 de mayo del 2016

Autoridad

Este informe y estudio fue llevado a cabo por México y Estados Unidos en acuerdo con la Sección III.6-Agua para el Ambiente y el Programa Piloto de Intercambio ICMA/ICS en el marco del Acta 319 de la Comisión Internacional de Límites y Aguas, México y Estados Unidos titulado “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 California.”, de fecha 20 de noviembre del 2012. Este informe interino se preparó como un paso hacia el cumplimiento del Acta 319 Art. III.6.f, e incluye información sobre los resultados ambientales obtenidos por la entrega de agua en apego al programa piloto.

Agencias Participantes

Comisión Internacional de Límites y Aguas
Entre México y Estados Unidos

Por México:

El Colegio de la Frontera Norte
Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
Comisión Nacional del Agua
Pronatura Noroeste
Universidad Autónoma de Baja California

Por Estados Unidos:

Environmental Defense Fund
National Audubon Society
Sonoran Institute
The Colorado River Basin States
The Nature Conservancy
University of Arizona
U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation
U.S. Geological Survey

Agradecimientos

Este informe fue compilado y editado para la Comisión Internacional de Límites y Aguas por el Dr. Karl Flessa (Universidad de Arizona), la Dra. Eloise Kendy (The Nature Conservancy) y Karen Schlatter (Sonoran Institute) de parte de todas las personas y organizaciones involucradas en el monitoreo de la Delta del Río Colorado en apego al Acta 319.

Estos esfuerzos representan un esfuerzo colaborativo de muchas entidades que directa e indirectamente en todas las fases del estudio promoviendo la colaboración binacional entre agencias federales, universidades y organizaciones no gubernamentales.

*Crédito de fotografías de portada, fotografía de repetición, restauración de la Laguna Grande antes, durante y seis meses después del flujo de pulso del Acta 319. Dale Turner, The Nature Conservancy.

El Financiamiento Para El Monitoreo Del Flujo Base y Flujo De Pulso Fue Proporcionado Por:

Alianza WWF – Fundación Carlos Slim
Anne Ray Charitable Trust
Donantes Anónimos
Colegio de la Frontera Norte
Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas
Comisión Nacional del Agua
The David and Lucile Packard Foundation
Environmental Defense Fund
International Boundary and Water Commission, United States and Mexico
LightHawk
National Audubon Society
Pronatura Noroeste
Raise the River
Sonoran Institute
Sonoran Joint Venture
The Nature Conservancy
Universidad de Arizona
U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation
U.S. Geological Survey
Universidad Autónoma de Baja California
Walton Family Foundation

Contenido

Sección 1: Introducción y Resumen Ejecutivo	05
Sección 2: Hidrología: Respuesta del agua superficial	18
Sección 3: Hidrología: Respuesta del agua del subsuelo	26
Sección 4: Respuesta geomórfica	35
Sección 5: Respuesta de la vegetación al usar técnicas de campo	41
Sección 6: Respuesta de la vegetación al usar técnicas de sensores remotos	57
Sección 7: Respuesta de la vida silvestre (aves)	64
Sección 8: Canal bajo y el estuario	72

Apéndices

- A. Métodos usados para calcular el volumen infiltrado
- B. Mapas mostrando las ubicaciones de los piezómetros
- C. Tamaños y características de los piezómetros
- D. Datos del nivel y salinidad del agua de subsuelo
- E. Análisis de vegetación: métodos y resultados
- F. Fotografía de repetición
- G. Aves y gremios de aves en el área de inundación del delta del Colorado

Sección 1: Introducción y Resumen Ejecutivo

Introducción

El Acta No. 319 (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 California, se firmó por ambas secciones de la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) el 20 de noviembre del 2012. Un componente del Acta 319 es la Sección III.6, Programa Piloto de Agua para el Ambiente y de Intercambio de ICMA a ICS, que detalla que el “programa piloto establece los medios para crear un volumen de 195 Mm³ (158,088 acre-pies) de agua para flujo base y flujo pulso para el tramo límite del Río Colorado y su Delta, a través de la participación de México, los Estados Unidos y Organizaciones no Gubernamentales.” “La implementación de esta Acta proporcionará un mecanismo para aportar tanto flujo base como flujo pulso”...“tentativamente durante 2014, pero no después de 2016.” “[L]a información que se genere a través de la puesta en práctica de esta Acta, será utilizada para la toma de futuras decisiones con relación a los esfuerzos de cooperación binacional para emprender acciones de carácter proactivo en el Delta del Río Colorado.” “Para la entrega del flujo pulso y flujo base con fines ambientales en México conforme a esta Acta, los Comisionados darán indicaciones al Consejo Consultivo y al Grupo de Trabajo Ambiental, para que preparen un Plan de Entregas que incluirá un programa calendarizado con los flujos mensuales, puntos de entrega, y volúmenes en una cantidad de aproximadamente 130 Mm³ (105,392 acre-pies) de flujo pulso y 65 Mm³ (52,696 acre-pies) de flujo base.” Una porción de los fondos proporcionados en la Sección III.6.d por los Estados Unidos proporcionará fondos para proyectos en México que generarán el 50% del flujo pulso. Las fuentes de agua para implementar este flujo serán del ICMA creado o agua deferida por México en apego a la Sección III.1. El Consejo Consultivo y Grupo de Trabajo Ambiental formó y encargó a un Equipo de Flujos Ambientales (Cuadro 1-1) para desarrollar el Plan de Entrega (entre los miembros se encontraban representantes de agencias tanto federales como estatales de México y los Estados Unidos así como organizaciones no gubernamentales).

Como parte del programa piloto, el Acta 319 estableció que “se deberán obtener recursos para la investigación conjunta de los diferentes aspectos de este programa. Los recursos para esta investigación deberán de ser aportados por México y los Estados Unidos.” Los flujos ambientales fueron uno de los artículos a ser investigados a través de una evaluación de “la respuesta del ecosistema, primordialmente la hidrológica y en segundo término la biológica.” Para lograr este objetivo, el Equipo de Flujos Ambientales binacional trabajó con científicos y expertos para desarrollar planes para el monitoreo de la respuesta del ecosistema. El monitoreo del ecosistema se efectuó anteriormente, durante y después del flujo pulso del 23 de marzo al 18 de mayo del 2014. Las actividades de monitoreo se llevaron a cabo en el corredor ripario del Delta del Río Colorado (Ilustración 1-1) por los equipos binacionales (Cuadro 1-2) y estas actividades continuarán hasta el 2017. Este Informe Interino resume actividades y resultados preliminares hasta el 1 de diciembre del 2015. Los colaboradores de este informe están en una lista en el Cuadro 1-3. Se continuará con la preparación de informes adicionales para la elaboración del Informe Final en junio del 2018.

Cuadro 1.1.- Representantes del Equipo de Ambiental Binacional del Acta 319

Co-Presidentes

Osvel Hinojosa, Pronatura Noroeste
Jennifer Pitt, National Audubon Society

Miembros del Equipo

Gilbert Anaya, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección de Estados Unidos
Francisco Bernal, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana
Tom Buschatzke, Arizona Department of Water Resources
Yamilett Carillo, Fideicomiso de Agua del Delta del Río Colorado
Adrian Cortez, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección de Estados Unidos
Peter Culp, Squire Patton Boggs
Carlos de la Parra, Colegio de la Frontera Norte
Albert Flores, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección de Estados Unidos
José Gutiérrez, CONAGUA
Ted Kowalski, Colorado Water Conservation Board
Jennifer McCloskey, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation
Don Ostler, Upper Colorado River Commission
Carlos Pena, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección de Estados Unidos
Antonio Rascón, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana
Adriana Reséndez, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana
Daniel Galindo, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana
Adriana Rodriguez, CONAGUA
Seth Shanahan, Southern Nevada Water Authority
Eduardo Soto, CONANP
Tanya Trujillo, Colorado River Board of California
Laura Vecerina, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation
Terri Wilson, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation
Amy Witherall, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation
Francisco Zamora, Sonoran Institute

Cuadro 1-1. Representantes del equipo binacional de Flujos Ambientales del Acta 319.

Cuadro 1-2. Representantes de los equipos binacionales responsables del monitoreo de la respuesta del ecosistema al flujo pulso y flujo base.

Equipo de Coordinación del Proyecto

Karl W. Flessa, Co-Jefe Científico, University of Arizona
Carlos de la Parra-Rentería, Co-Jefe Científico, Colegio de la Frontera Norte
Eloise Kendy, The Nature Conservancy
Karen Schlatter, Sonoran Institute

Equipo de Hidrología

Jeffrey Kennedy, U.S. Geological Survey
James Leenhouts, U.S. Geological Survey
Erich Mueller, U.S. Geological Survey
Jorge Ramírez-Hernández, Universidad Autónoma de Baja California
J. Eliana Rodríguez-Burgueño, Universidad Autónoma de Baja California
Margaret Shanafield, Flinders University
Anna Morales, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección de Estados Unidos
Francisco Bernal, Comisión Internacional de Límites y Aguas, Sección Mexicana

Equipo de Flora y Fauna

Ed Glenn, Universidad de Arizona
Martha Gomez-Sapiens, Universidad de Arizona
Osvel Hinojosa-Huerta, Pronatura Noroeste
Karen Schlatter, Sonoran Institute
Pat Shafroth, U. S. Geological Survey
Eduardo Soto, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Equipo del Canal Inferior del Río

Karen Schlatter, Sonoran Institute
Francisco Zamora-Arroyo, Sonoran Institute

Equipo de Sensores Remotos

Ed Glenn, Universidad de Arizona
Pamela Nagler, U.S. Geological Survey
Steve Nelson, Científico Independiente
Jeff Milliken, Bureau of Reclamation
Francisco Zamora-Arroyo, Sonoran Institute

Cuadro 1-3. Miembros del equipo de ciencia y monitoreo que contribuyeron a este informe.

Genesis Alarcón Gómez, Universidad Autónoma de Baja California
Joaquín Barreras, Sonoran Institute
Juan Butrón Méndez, Pronatura Noroeste
José Juan Butrón Rodríguez, Pronatura Noroeste
James Callegary, United States Geological Survey
Alejandra Calvo Fonseca, Pronatura Noroeste
Edgar Carrera, Sonoran Institute
Karl Flessa, Universidad de Arizona
Edward Glenn, Universidad de Arizona
Martha M. Gómez Sapiens, Universidad de Arizona
Matthew Grabau, Sonoran Institute
Itzel Hernández, Pronatura Noroeste
Osvel Hinojosa Huerta, Pronatura Noroeste
Christopher Jarchow, Universidad de Arizona/United States Geological Survey
Eloise Kendy, The Nature Conservancy
Jeffrey Kennedy, United States Geological Survey
Carlos Medina, Pronatura Noroeste
Jeffrey Milliken, United States Bureau of Reclamation
Erich Mueller, United States Geological Survey
Pamela Nagler, United States Geological Survey
Steven Nelson, independiente
Jorge Ramírez Hernández, Universidad Autónoma de Baja California
Tomás Rivas, Sonoran Institute
Benito Rocha, Pronatura Noroeste
Jesús Eliana Rodríguez Burgueño, Universidad Autónoma de Baja California
Adrián Salcedo Pereida, Universidad Autónoma de Baja California
Edith Santiago, Sonoran Institute
Karen Schlatter, Sonoran Institute
Patrick Shafroth, United States Geological Survey
Dale Turner, The Nature Conservancy
Francisco Zamora, Sonoran Institute



Ilustración 1-1. Zonas de estudio del delta del Río Colorado para las actividades de monitoreo del Acta 319.

Resumen Ejecutivo

Tal como se prevé en el Acta 319 del Tratado de Aguas de 1944 entre México y Estados Unidos, un flujo pulso de aproximadamente 130 millones de metros cúbicos (105,392 acre-pies) fue liberado en el corredor ripario del Delta del Río Colorado desde la Presa Morelos en la frontera entre México y Estados Unidos, el Vertedor del km 27 y el Vertedor del km 18. El agua fue entregada en el transcurso del periodo de ocho semanas que empezó el 23 de marzo del 2014 y terminó el 18 de mayo del 2014. Los flujos máximos fueron liberados al principio del periodo para simular un flujo de primavera. Algunas aguas del flujo pulso fueron liberadas al corredor ripario a través de los canales de irrigación del Valle de Mexicali.

Los volúmenes del flujo base de un total de 65 Mm³ (52,696 acre-pies) están siendo derivados a las áreas de restauración de Miguel Alemán y Laguna Grande y al cauce aguas abajo de la Presa Morelos durante el periodo del Acta 319 hasta el 31 de diciembre del 2017. Se presentarán mayores detalles sobre las entregas de flujo base en 2014 y 2015 posteriormente cuando la información se encuentre disponible.

Métodos

La siguiente lista describe las actividades generales de monitoreo que se han estado llevando a cabo antes, durante y después del flujo pulso.

- Las condiciones base (antes del flujo pulso) de informes publicados y observaciones de campo fueron resumidas.
- El flujo de agua superficial, el comportamiento del agua de subsuelo, y la salinidad del agua fueron medidos durante el flujo pulso. Fueron utilizadas técnicas geofísicas en la sección limítrofe del área de estudio (i.e., zona 1 y 2) para entender mejor la respuesta inmediata del agua del subsuelo al flujo pulso.
- El monitoreo del agua de subsuelo después del flujo pulso sigue vigente.
- Los tiempos de llegada del flujo pulso fueron rastreados en el suelo utilizando observación directa y sensores de temperatura.
- Cadenas de socavación, levantamientos topográficos, modelos digitales de elevación, análisis de tamaño de grano y muestras de sedimentos suspendidos se utilizaron para calcular la erosión y deposición.
- La extensión del área de inundación fue documentada mientras progresaba el flujo, usando observación directa y aérea, así como imágenes satélite (Landsat, Worldview) y las escalas del Río junto con los modelos hidrológicos (HEC-RAS).
- Los datos de Detección de Luz y Distancia (LiDAR por sus siglas en inglés) fueron recopilados antes y después del flujo pulso para documentar los cambios topográficos que resultaron del flujo pulso y para ayudar a mapear la distribución, composición y estructura de la vegetación.
- La topografía fue evaluada a lo largo de 21 transectos perpendiculares al cauce para poder relacionar la germinación, crecimiento y supervivencia de nueva vegetación a los cambios en el cauce y la topografía del área de inundación.
- Se evaluó el reclutamiento de la vegetación nativa y no nativa a lo largo de los 21 transectos co-localizados con transectos de revisiones topográficas y sitios de monitoreo de agua del subsuelo. El influjo de semillas, cambios en salinidad y textura en la tierra y cubierta de

vegetación a lo largo de los 21 transectos fueron monitoreados antes y después del flujo pulso y al final de la primera y segunda temporadas de crecimiento.

- En el área de Laguna Grande, 130 hectáreas (320 acres) de vegetación no nativa del área fueron limpiadas y conformadas para promover la regeneración de vegetación nativa. Algunas porciones del sitio fueron hidro-sembradas con vegetación nativa y 55 hectáreas (136 acres) del sitio fueron utilizadas para plantar árboles nativos. Actualmente se están llevando a cabo evaluaciones detalladas de la nueva vegetación, condiciones del agua de subsuelo, condiciones de la tierra y poblaciones de aves.
- En el área de restauración Miguel Alemán, se limpiaron y conformaron 63 hectáreas (156 acres) y de éstas, 38 hectáreas (93 acres) se plantaron con árboles nativos.
- Las evaluaciones de salud de la vegetación (“verdosidad”) que empezaron en el 2000 utilizando datos basados en sensores remotos siguen en curso.
- Se recopilieron imágenes fotográficas de lugares fijos dentro del corredor ripario justo antes, durante y seis meses después del flujo pulso.
- Las evaluaciones base de vegetación y aves riparias (iniciadas en el 2002) y las evaluaciones sobre las aves de marisma (iniciadas en el 2004) se expandieron para incluir áreas adicionales en la zona limítrofe, sitios de restauración y demás lugares.
- Se continúa el monitoreo del zooplancton, peces y calidad del agua en los tramo más bajos del Río y del estuario para poder documentar los cambios en conectividad entre el Río y el Golfo de California.

Geografía del área de estudio

Se muestran mapas detallados del corredor ripario del Delta del Río Colorado en la Ilustración 1-2. Estos mapas muestran la ubicación de transectos, estaciones de aforo, áreas de restauración y lugares a los que se refiere este informe.

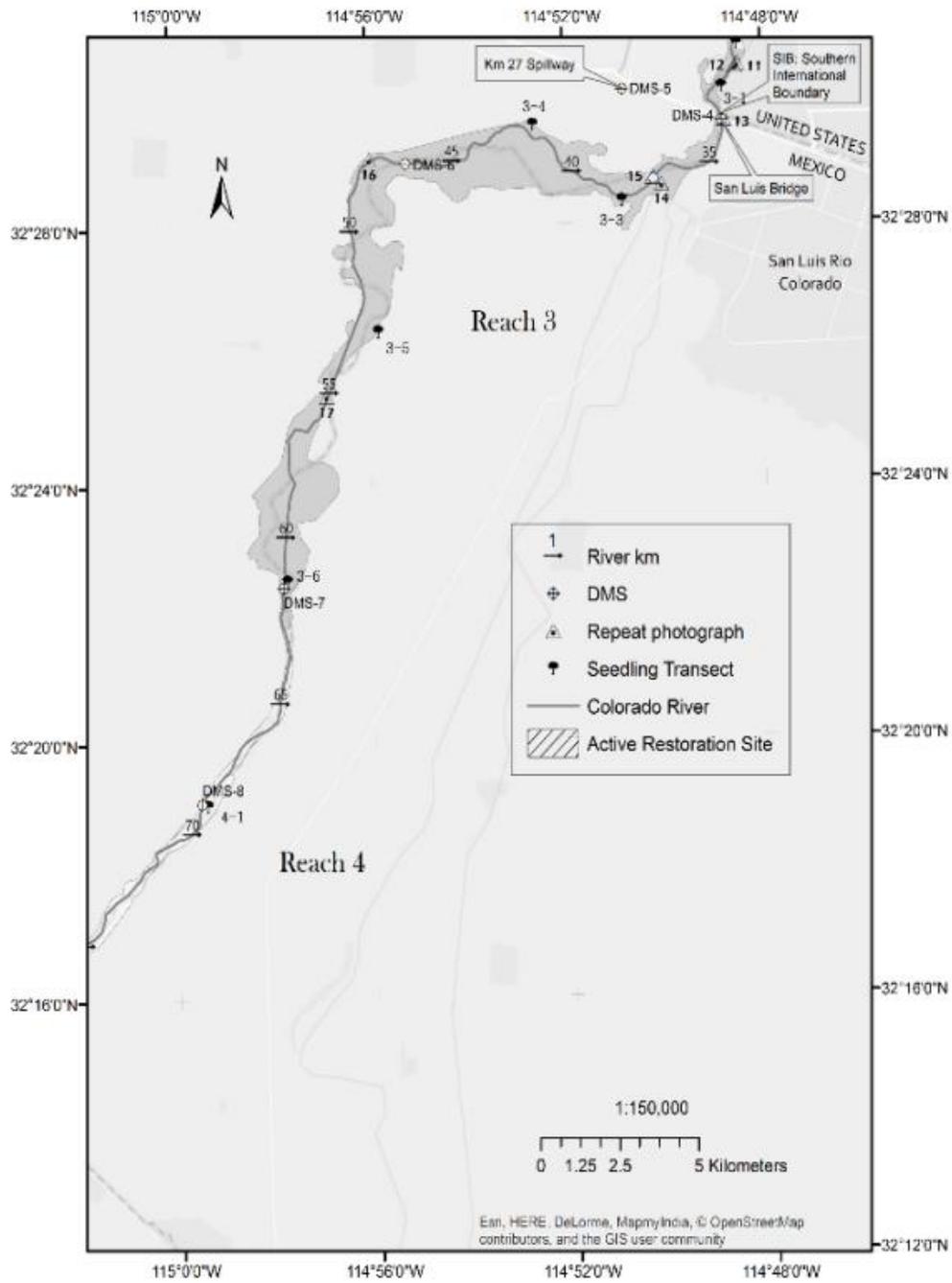


Ilustración 1-2B. Área de estudio. Zona (Reach) 3 y la parte norte de la Zona 4. Kilómetros de Río (en incrementos de 5 km) es la distancia de río desde la Presa Morelos.

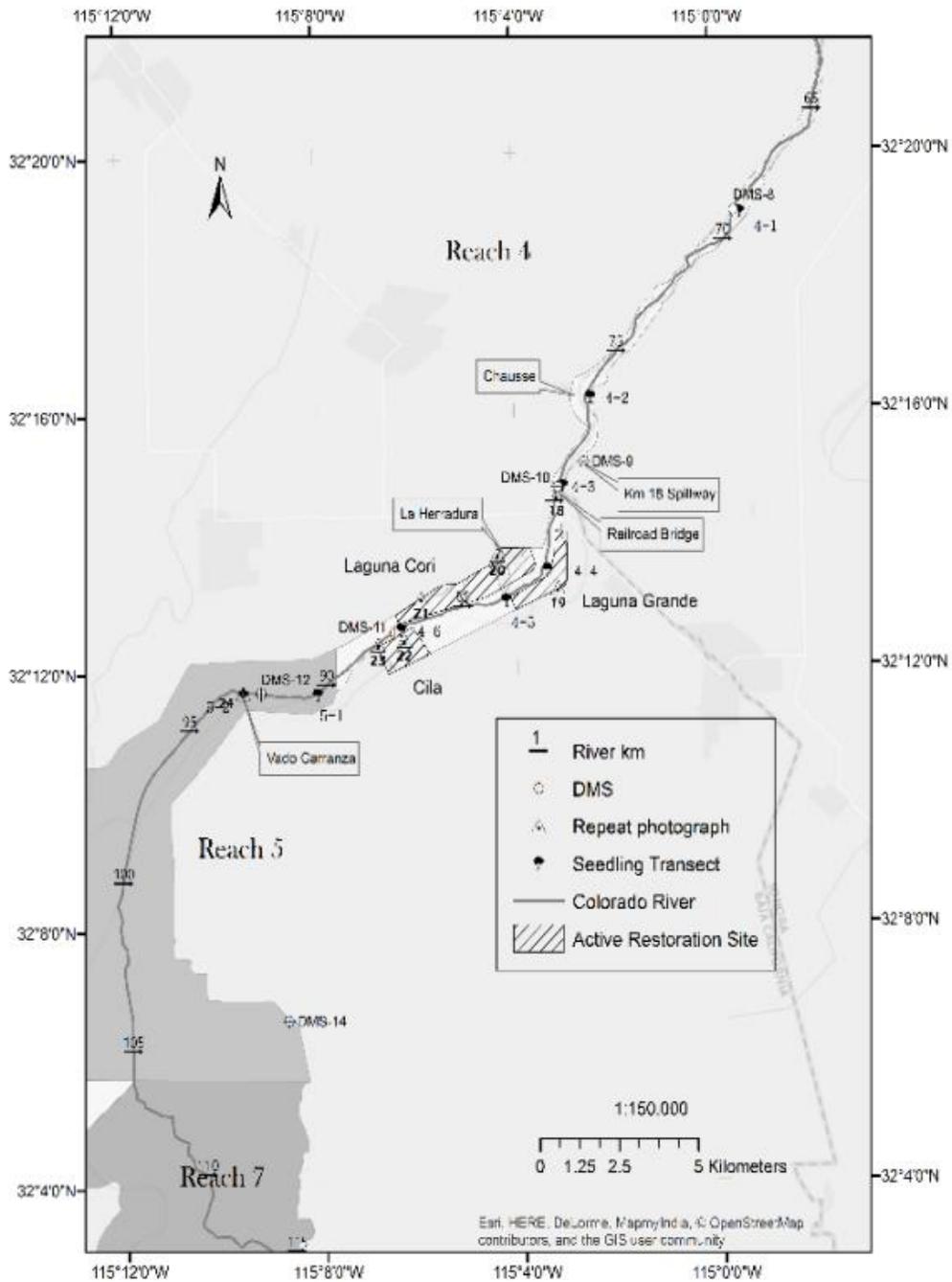


Ilustración 1-2C. Área de estudio. Zona 4 y parte norte de la Zona 5. Kilómetros de Río (en incrementos de 5 km) es la distancia de río desde la Presa Morelos.

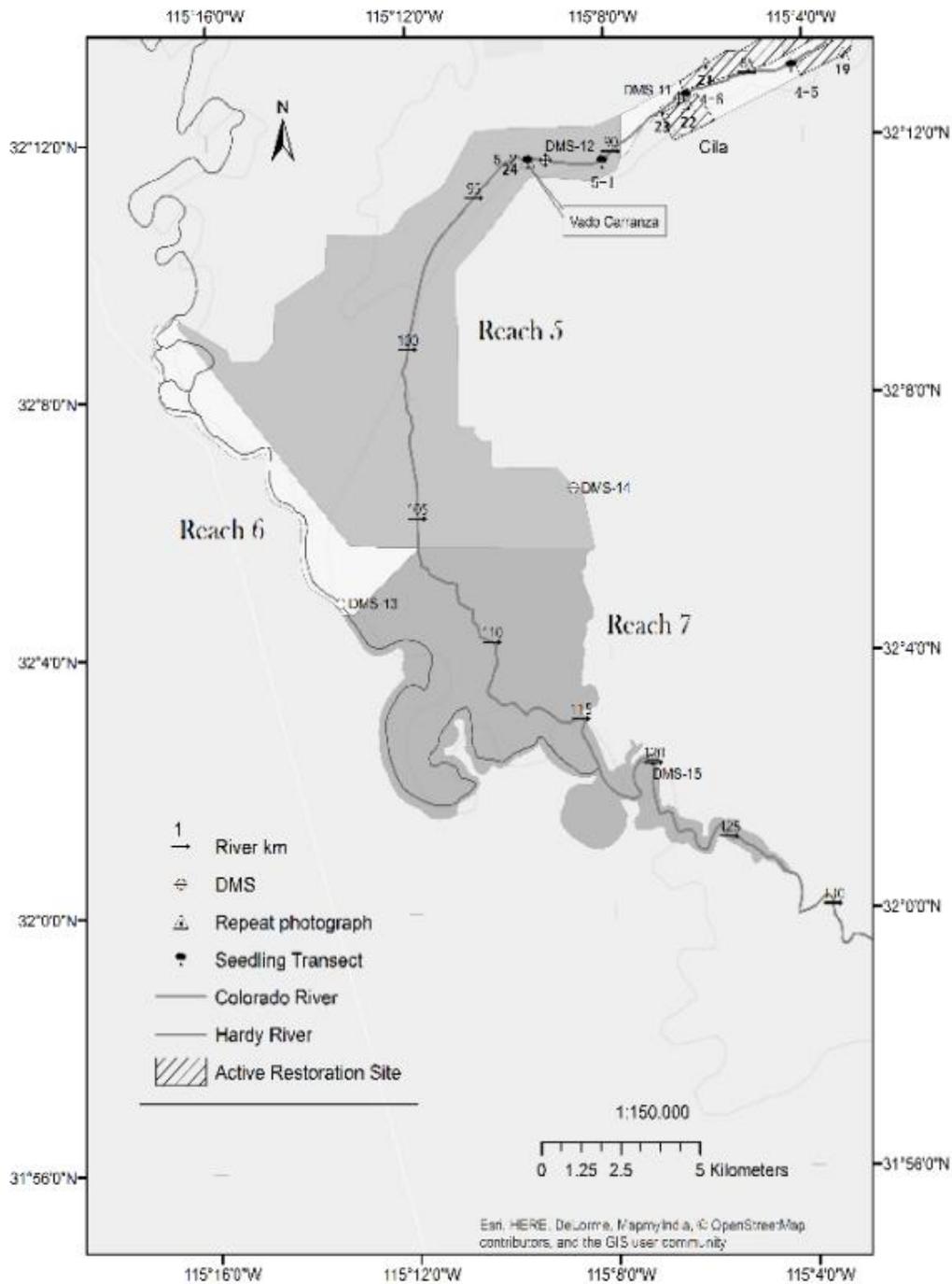


Ilustración 1-2D. Área de estudio. Zonas 5, 6 y 7. Kilómetros de Río (en incrementos de 5 km) es la distancia de río desde la Presa Morelos.

Resumen de observaciones y análisis realizados hasta el 4 de diciembre del 2015

La presentación detallada y discusión de estos resultados – y datos de soporte, están en las secciones subsecuentes y apéndices de este informe y en ScienceBase.

1. El flujo pulso del 2014 inundó aproximadamente 1,600 ha (4,000 acres) del canal principal y terrazas adedañas, logrando conectividad lateral y longitudinal a lo largo del río entero desde la Presa Morelos hasta el estuario por primera vez desde 1997.
2. Los porcentajes y volúmenes de flujo de agua superficial disminuyeron aguas abajo, principalmente como resultado de la infiltración. Los volúmenes de infiltración fueron más altos en los Sectores 4 y 5 (Zona 3), donde el agua superficial llenó depresiones aisladas en las cuales el agua no podía regresar al cauce principal después de que el flujo máximo había pasado.
3. Si un canal piloto a lo largo de la zona seca (Zona 3) hubiera podido conducir el flujo pulso completamente, unos 60 Mm³ (50,000 acre-pies) hubieran podido fluir aguas abajo en vez de recargar el acuífero local en las depresiones adedañas al cauce principal.
4. El monitoreo del flujo pulso del 2014 mejoró considerablemente el entendimiento de la hidráulica del río en el tramo Limítrofe y en el delta bajo las condiciones actuales.
5. Aproximadamente 122 Mm³ (99,000 acre-pies) del agua del flujo pulso recargaron los acuíferos subyacentes en la región. Este influjo adicional de agua subterránea fue superpuesto a los patrones de flujo complejos definidos por la recarga y extracción en la región.
6. La conectividad vertical entre el río y el agua de subsuelo se logró en todas las zonas. Durante el flujo pulso, la capa freática se elevó un máximo de 9 m (30 pies) localmente, con impactos disminuyéndolo a lo lejos del canal del Río. Las elevaciones de la capa freática regresaron en gran parte a los niveles previos al pulso en un período de 6 meses, mientras el montículo formado por el flujo pulso se disipaba en el acuífero regional.
7. Aunque el flujo elevó el nivel del agua subterránea en menos de 2 m en la Zona 4, donde la capa freática ya estaba alta, este incremento es importante para el establecimiento de la vegetación.
8. Los porcentajes más altos medidos de transporte de sedimento suspendido fueron en la parte alta del tramo limítrofe y a una distancia aproximada de 10 km (6.2 mi) aguas abajo del Lindero Internacional Sur (LIS).
9. Aunque $156,000 \pm 81,000 \text{ m}^3$ (5.5 millones de pies³ \pm 2.8 millones de pies³) de sedimento se movilaron, los cambios dentro de las zonas 1-3 durante el flujo pulso se limitaron a una redefinición localizada del lecho del cauce, socavación y sedimentación del orden de 2 m (7 pies) o menos dentro del cauce activo, y erosión menor en las márgenes.
10. La descarga del flujo pulso no fue suficiente para ensanchar el canal, o para derrumbar o enterrar cantidades significativas de vegetación existente.
11. La mayoría de los requerimientos para el reclutamiento de especies riparias boscosas nativas se lograron en áreas no preparadas de las zonas 1 y 4 debido a una alta disponibilidad de semillas, humedad continua del terreno y niveles tolerables de salinidad en el suelo. Sin embargo, la densa vegetación existente en estas áreas sin preparar redujeron la disponibilidad de espacios necesarios para la germinación en los sitios más hidrológicamente favorables.
12. Todos los requerimientos de establecimiento de semillas se lograron en su mayoría en las áreas preparadas para la restauración en la Zona 4 debido a acciones de manejo, incluyendo la remoción de Pino Salado y Cachanilla, la excavación y conformación de meandros; y la aplicación de flujos base durante la primer y segunda temporada de crecimiento.

13. Las especies riparias boscosas nativas se establecieron con las frecuencias y densidades más altas en las áreas preparadas de la Zona 4 (excepto LG1) y en las no preparadas de la Zona 1.
14. El reclutamiento más extenso de especies boscosas nativas en sitios no preparados con condiciones hidrológicas favorables (zonas 1 y 4) requerirá de un manejo activa tal como la eliminación de vegetación existente, la entrega de flujos base y el control de especies no nativas.
15. La Zona 4 tiene una elevada salinidad del suelo superficial en comparación con otras zonas del río, debido a la presencia de aguas subterráneas poco profundas y la falta de caudales superficiales regulares. Los caudales ambientales son críticos para el control de la salinidad del suelo en áreas como la Zona 4 que soporta hábitat ripario nativo existente y restaurado.
16. Las especies de plantas riparias se establecieron exitosamente en los sitios manejados activamente de Miguel Alemán y Laguna Grande a través de la eliminación del Pino Salado y Cachanilla, plantando/sembrando y regando especies nativas.
17. El flujo pulso del Acta 319 produjo un incremento del 16% en el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI o “verdosidad”) a lo largo de las zonas riparias en el 2014.
18. Los incrementos del NDVI en el 2014 ocurrieron tanto en la zona inundada por los flujos superficiales como en las partes no inundadas de la zona riparia, donde la vegetación existente se sustenta del agua subterránea. En el 2015, el NDVI se redujo a niveles del 2013.
19. La abundancia y diversidad de aves se incrementó en el área de inundación del Río Colorado en México después del flujo pulso del 2014. La respuesta se mantuvo en el 2015. Las aves acuáticas migratorias, las aves acuáticas anidantes y las aves riparias anidantes incrementaron en abundancia.
20. La abundancia combinada de 19 especies de interés para la conservación incrementó en un 49% del 2013 al 2015, incluyendo al Carpintero de Gila, Vaquero Cabecicafé, Copetón Gorjiceno, Gritón Pechiamarillo y Gorrión Cantor.
21. Los sitios de restauración tuvieron una mayor abundancia, un mayor número de especies y un mayor índice de diversidad por punto de aves que en el resto de la planicie de inundación.
22. La abundancia combinada de 19 especies de interés para la conservación fue 43% más alta en los sitios de restauración que en el resto de la planicie de inundación. El Bolsero Encapuchado, Gritón Pechiamarillo, Mosquero Cardenalito, Carpintero de Gila y la Matraca del Desierto incrementaron en abundancia.
23. Aproximadamente el 10% del flujo pulso alcanzó la parte alta de la Zona 5; el agua inundó e infiltró porciones de las zonas 5 y 7 sustentando la vegetación en esos sitios.
24. Una pequeña cantidad de agua del río Colorado se mezcló con agua del Golfo de California.
25. El agua del Golfo de California se mezcla con agua del río Hardy durante las mareas altas primaverales, pero una barra arenosa previene que esta mezcla regrese al Golfo. La conectividad aquí es mayormente de una sola vía.
26. El flujo pulso tuvo un impacto que se podría considerar de mínimo a nulo en el zooplancton y la fauna de peces en el alto estuario.
27. Con el fin de mejorar el hábitat y beneficiar a las especies marinas en el alto estuario, se requeriría una mayor cantidad de agua dulce, además de mejorar la conectividad de las mareas por encima de la barra de arena. Se requiere investigación adicional, incluyendo modelado y flujo experimental de entregas, para estimar la cantidad y calendarización de los flujos requeridos para el mejoramiento del estuario.

Sección 2: Hidrología: Respuesta del agua superficial

Observaciones clave:

- 1. El flujo pulso del 2014 inundó 1,600 hectáreas (4,000 acres) del canal principal y las terrazas aledañas, logrando conectividad lateral y longitudinal a lo largo del río entero desde la Presa Morelos hasta el estuario por primera vez desde 1997.**
- 2. Los porcentajes y volúmenes de agua superficial disminuyeron aguas abajo, principalmente como resultado de la infiltración. Los volúmenes de infiltración fueron más altos en los Sectores 4 y 5 (Zona 3; km 34-61), donde el agua superficial llenó depresiones aisladas de donde el agua no podía regresar al canal principal después de que el flujo máximo había pasado.**
- 3. Si un canal piloto a lo largo de la zona seca hubiera podido conducir el flujo pulso entero, unos 60 Mm³ (50,000 acre-pies) hubieran podido fluir aguas abajo en vez de recargar el acuífero local en las depresiones aledañas al cauce.**
- 4. El monitoreo del flujo pulso del 2014 mejoró considerablemente el entendimiento de la hidráulica del río en el Delta bajo condiciones predominantes.**

Introducción

Aguas abajo de la Presa Morelos, la sección límite de 33 km (21 millas) del Río Colorado empieza como un arroyo lento que se alimenta de agua subterránea de poca profundidad y de las filtraciones de la presa, haciendo transición a un canal seco alrededor del km 19 (milla 12). De ahí, el cauce seco se dirige hacia el sur pasando el Lindero Internacional Sur (LIS) como un canal arenoso flanqueado por planicies de inundación saturadas de Pino Salado, confinadas entre bordos. Alimentándose de agua subterránea de poca profundidad y drenes agrícolas, el río re-emerge alrededor del km 61 (milla 38) como una serie de estanques de poca profundidad, creciendo a un cauce ancho de lento movimiento donde el Río Hardy (km 114, milla 71) contribuye con drenaje agrícola y efluente municipal tratado. En los siguientes 20 km, el río está repleto de Pino Salado, que se mantiene por un acuífero somero y salado. Aguas abajo, la vegetación da camino a grandes expansiones de planicies lodosas y salitrales, que se encuentran con los canales de marea del Golfo de California.

Esta condición ha existido esencialmente desde que el Lago Powell se empezó a llenar en 1963, con excepciones notorias durante algunos años húmedos en los que aguas de avenidas liberadas de la Presa Morelos fluyeron al Golfo (Glenn et al., 1996). Por ejemplo, en enero de 1993, enero de 1997 y en enero del 2001, un volumen estimado de 92, 88 y 147 millones de metros cúbicos (Mm³) (75,000, 7,100 y 119,000 acre-pies), respectivamente, fluyeron pasando el LIS, el sitio de medición más confiable históricamente.¹ Para comparar, 59 Mm³ (48,000 acre-pies) fluyeron pasando el LIS durante el flujo pulso del 2014. La ilustración 2-1 compara el flujo pulso del 2014 a la media hidrográfica antes de la finalización de la Presa Hoover.

¹ Los volúmenes de flujo histórico son estimados con base en escurrimientos medios diarios medidos en el Lindero Internacional Sur. Fuente: Datos hidrométricos de la CILA.

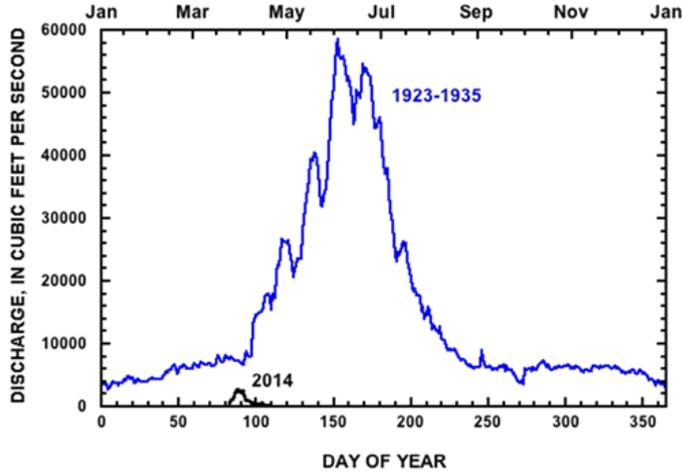


Ilustración 2-1. Comparación del hidrograma del flujo pulso del 2014 (línea negra) y el hidrograma promedio de la descarga del Río Colorado en el delta antes de construirse la Presa Hoover (línea azul, 1923-1935) (Schmidt 2014).

El Flujo Pulso

Para asegurar la certeza de los análisis en esta sección, consideraremos “Sectores”, tal como se define en el cuadro 2-1 y delineado en la Ilustración 2-2. A diferencia de las zonas, las fronteras superior e inferior del Sector corresponden precisamente con las estaciones de aforo.

A su máxima extensión, el flujo pulso inundó alrededor de 1,600 hectáreas (4,000 acres) (Cuadro 1-2) con profundidades máximas de agua superficial de 6.5 m (21 pies). Por primera vez desde 1997, el flujo pulso logró la conectividad lateral y longitudinal a lo largo del cauce principal, meandros aislados y conectados, y planicies de inundación desde la Presa Morelos hasta al estuario.

Cuadro 2-1. Inundación Máxima por Sector (ver Ilustración 2-2 para ubicaciones de los Sectores). *La inundación de los Sectores 1-9 se calculó de los datos continuos de niveles del río y de topografía basadas en LiDAR, utilizando software de SIG. La inundación del Sector 10 (zonas 5 y 7) se obtuvo de las imágenes Landsat tomadas el 11 de mayo, a 4 o 5 días de la inundación máxima. (seco) indica condiciones normalmente secas.*

Sector	1	2 (seco)	3 (seco)	4 (seco)	5 (seco)	6	7	8	9	10
DMS	Dam-2	2-3a	3a-4	4-6	6-7	7-8	8-10	10-11	11-12	12-15
Zona	1	1-2	2-3	3	3	3-4	4	4	4-5	5-7
Hectáreas	64	641	164	184	242	66	70	91	37	42
Acres	160	1,580	405	455	598	163	173	225	91	104

Se emplearon varios métodos para obtener datos de aspectos relacionados al agua superficial. La Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA) reportó entregas de agua de la Presa Morelos, km 27 (DMS 5) y el km 18 (DMS 9), al igual que los vertedores de las millas 11 y 20, que contribuyeron con agua adicional al canal durante el flujo pulso. El equipo de monitoreo midió los gastos del agua superficial en 18 estaciones de medición (DMS) desde la Presa Morelos hasta el canal bajo en la Zona 7 (Ilustración 1-2). Los volúmenes de flujo en la DMS2, 3a, 4, 6, 8, 10 y 12 se determinaron con información de niveles continuos y de gastos diarios. Los volúmenes de flujo en la DMS7, DMS11 y DMS15, donde no se registró tirante, se estimaron de los datos de gastos diarios. Donde se utilizaron tanto el gasto como el tirante, los volúmenes de flujo concordaron entre 0.02 y 6 por ciento. Las mediciones de flujo en la DMS11 se vieron afectadas por agua retenida. Las mediciones de flujo en la DMS15 se vieron afectadas por el agua que fue levantada por el viento a través del ancho, poco profundo y trenzado cauce. La evaporación del agua al aire libre se determinó al aplicar la ecuación de referencia estandarizada (ASCE-EWRI 2005) a áreas inundadas diariamente, utilizando datos de la estación AZMET Yuma Sur y un Índice Reflejante de 0.06. Se utilizó software de SIG para determinar las áreas inundadas a diario con los datos LiDAR y los datos del nivel de río continuo registrado en los transductores.

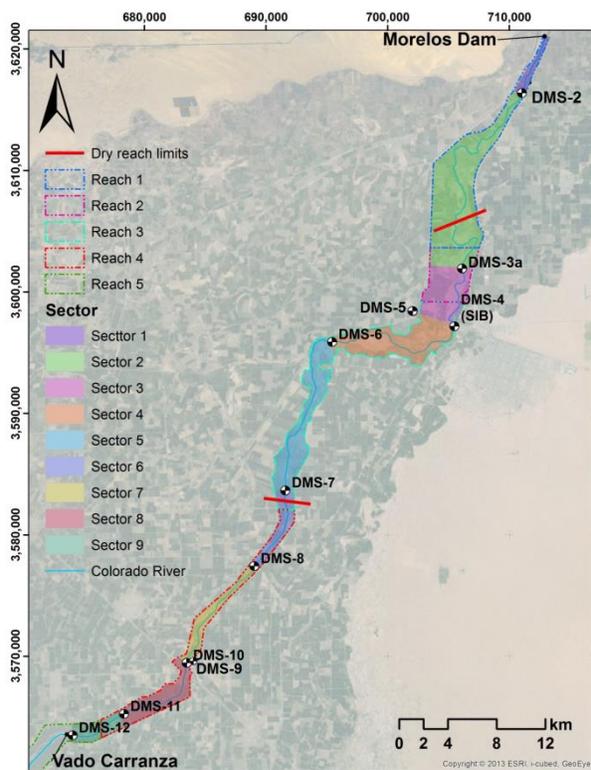


Ilustración 2-2. Las Estaciones de Medición de Gastos (DMS), Zonas y Sectores desde la Presa Morelos hasta el Vado Carranza (en la parte superior de la Zona 5). Los Sectores se refieren a porciones del corredor ripario entre las estaciones de medición de descarga. No se muestran las DMS 0, 1, 3, 13, 14 y 15.

Desde el 23 de marzo hasta el 18 de mayo del 2014, el flujo pulso entregó un total de 132 Mm³ (107,000 acre-pies) al corredor ripario del Delta del Río Colorado, incluyendo 102 Mm³ (77%) de la Presa Morelos, 21 Mm³ (16%) del vertedor del km 27 del Canal Reforma (km de río 37; milla de río 23) y 9 Mm³ (7%) del vertedor del km 18 del Canal Barrote (km de río 79; milla de río 49). Unos 0.8 Mm³ (650 acre-pies) adicionales entraron al río desde los vertedores de las millas 11 y 20 como excedente operacional.

La ilustración 2-3 muestra los porcentajes de gastos aforados durante el flujo pulso tal y como fue progresando aguas abajo mientras transcurría el tiempo. La ilustración 2-4 muestra el total de volumen de flujo que pasó por cada sitio de medición. Tanto el porcentaje de flujo y los volúmenes disminuyeron aguas abajo.

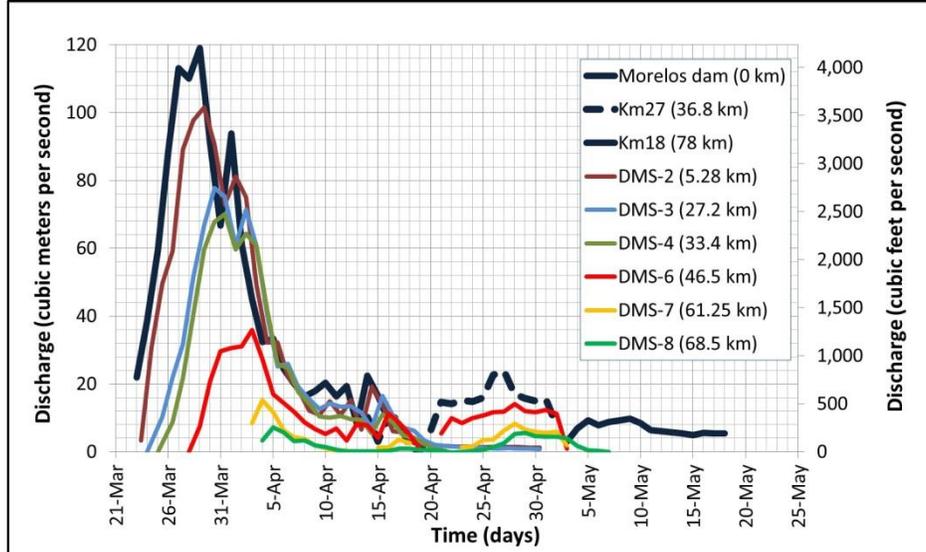


Ilustración 2-3. Los porcentajes de gastos del flujo pulso medidos en nueve estaciones de medición a lo largo del río Colorado, mostrando retrasos y atenuación mientras el flujo pulso fluía aguas abajo. El agua se derivó en la Presa Morelos, km 27 y km 18. (DMS4 es el LIS).

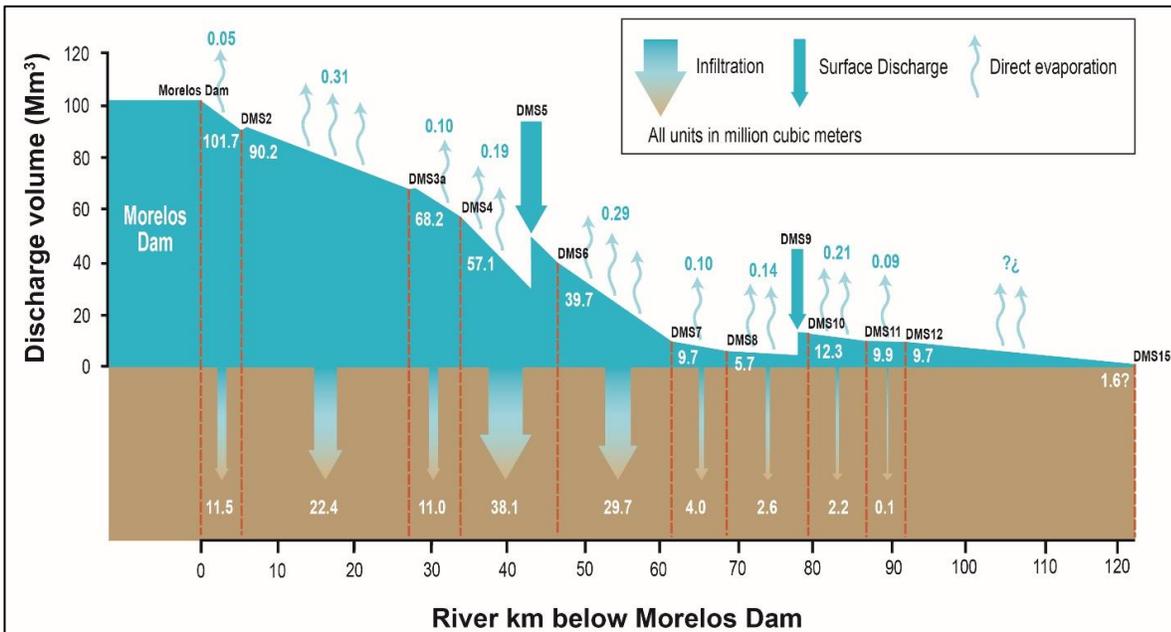


Ilustración 2-4. Balance de agua mientras el flujo pulso progresaba aguas abajo, mostrando volúmenes de agua entregada, agua en el canal, evaporación de agua superficial e infiltraciones, del 12 de marzo al 22 de mayo del 2014. La anchura de las flechas es proporcional a los volúmenes de agua. DMS5 y DMS9 son los vertedores del km 27 y km 18, respectivamente.

La mayoría del agua del flujo pulso se infiltró al canal del cauce y al área de inundación (ilustración 2-4). La evaporación del agua al aire libre consumió un 1 por ciento del flujo pulso. Alrededor del 92 por ciento (122 Mm³, o 99,000 acre-pies) del flujo pulso se infiltró al suelo. Una parte del agua infiltrada se capturó posteriormente con el bombeo de agua subterránea y la evapotranspiración (ET), de la cual se hablará en la sección de agua subterránea de este informe. El 7 por ciento restante (10 Mm³, u 8,000 acre-pies) fluyeron aguas abajo de la DMS12. Hasta donde sabemos, no se sustrajo más agua superficial del río durante el flujo pulso.

Cuadro 2-2. Volúmenes de infiltración por Sector. Los métodos usados para distinguir la infiltración del canal principal al canal externo (Apéndice A; Alarcón Gómez 2015) requirió el obtener y analizar sedimento del cauce, al que sólo se pudo acceder en la zona seco (Sectores 2-5).

Sector	Infiltración (Mm ³)	Infiltración (m ³ /m ²)	Infiltración (porcentaje de afluencia al sector)	Infiltración al canal principal (Mm ³)	Infiltración al canal externo (Mm ³)
1 (Dam-DMS 2)	11.5	3.5	11		
2 (DMS 2-3a)	22.4	0.5	25	9.5	12.9
3 (DMS 3a-4)	11.0	0.7	16	4.8	6.2
4 (DMS 4+5-6)	38.1	1.7	49	16.5	21.6
5 (DMS 6-7)	29.7	1.4	75	8.8	20.8
6 (DMS 7-8)	4.0	0.5	41		
7 (DMS 8+9-10)	2.6	0.2	17		
8 (DMS 10-11)	2.2	0.3	18		
9 (DMS 11-12)	0.1	0.0	1		
TOTAL	121.5			39.7	61.5

Se usaron tres métodos diferentes para calcular los porcentajes y volúmenes de infiltración por cada sector de la zona de río seco; los resultados fueron mutuamente consistentes (Apéndice A; Alarcón Gómez 2015). El ochenta y tres por ciento de la infiltración ocurrió en la zona seca (Sectores 2-5). La infiltración que se fue hacia los meandros del canal externo y otras depresiones excedieron la infiltración hacia el canal principal del río en todos los Sectores de la zona seca (Cuadro 2-2).

La intención de entregar agua a través de los vertedores del km 27 y km 18 fue minimizar la infiltración en áreas sin restauración al desviar el flujo pulso para rodear las zonas secas. El incremento volumétrico que fue evidente en la DMS10 (ilustración 2-4) y persistió a través del complejo de restauración Laguna Grande (Sector 9) sugiere que esta estrategia fue exitosa en el km 18. La cantidad relativamente pequeña de agua que se infiltró debajo del DMS10 estuvo disponible para promover la restauración. Por lo contrario, una cantidad pequeña del agua superficial que fue entregada a través del km 27 permaneció en los Sectores 7 y 8 (Zona 4) (ilustraciones 2-3 y 2-4).

Los volúmenes y porcentajes de la infiltración en canales externos fueron particularmente altos en los Sectores 4 y 5 (Cuadro 2-2). Una vista aérea del Sector 4 durante el flujo pulso (Ilustración 2-5) nos muestra la extensión de la inundación en las depresiones de los canales externos. Mientras el flujo

máximo iba retrocediendo, las depresiones aislaron del canal principal, permitiendo al agua restante infiltrarse y evaporarse (Ilustración 2-6, parte inferior). En contraste, las áreas inundadas en otros Sectores se mantuvieron conectadas generalmente al cauce principal, permitiendo que el agua continuara su flujo aguas abajo (ilustración 2-6, parte superior).

Por supuesto, la inundación de canales externos es una respuesta hidrológica natural a los flujos pulso. Sin embargo, si un canal “piloto” hubiera sido capaz de contener el flujo pulso entero a través de la zona seca (Sectores 2-5) sin pérdidas, entonces, de acuerdo al Cuadro 2-2, la infiltración total durante el flujo pulso del 2014 hubiera podido ser reducida en un porcentaje que pudo haber sido de hasta 61.5 Mm³ (50,000 acre-pies). Actualmente, la capacidad de carga del canal piloto es de alrededor de 10-20 m³/s (350-700 cfs), comparado con los flujos pulso de alrededor de 70 and 36 m³/s (2,500 and 1,300 cfs) en la DMS4 (LIS) y la DMS5, respectivamente. Por lo tanto, el prevenir toda esta infiltración en canales externos pudiera haber requerido el construir y delimitar un canal piloto mucho más grande, y extenderlo hasta el área limítrofe.

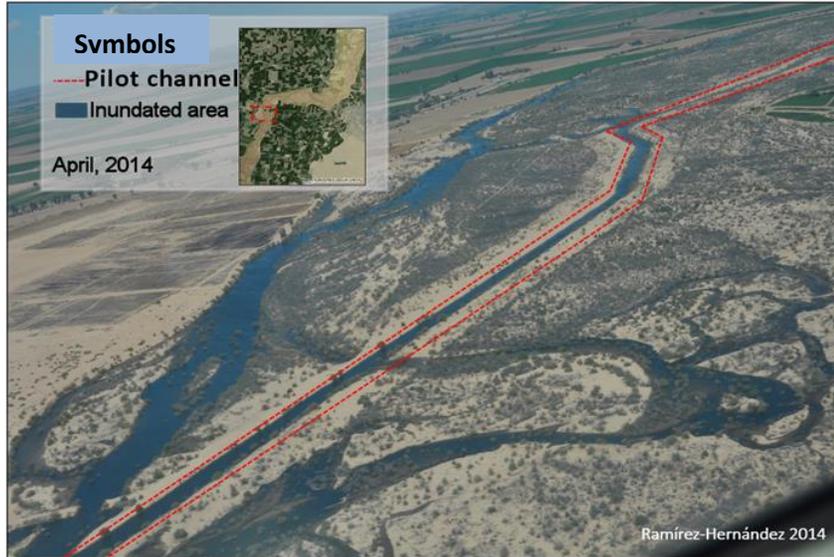


Ilustración 2-5. Vista aérea oblicua de una porción típica del Sector 4 durante el flujo pulso, mostrando la extensión de la inundación del canal piloto y las depresiones externas.

Mientras el flujo pulso de 2014 mejoró considerablemente el entendimiento de la hidráulica del río en el Delta, es una herramienta incompleta de predicción de los resultados de los flujos pulso, donde las condiciones prevalentes pudieran diferir. Las áreas de inundación y los balances de volúmenes de agua reportados aquí resultaron de muchos factores, incluyendo, pero no limitados a el diseño del flujo pulso.

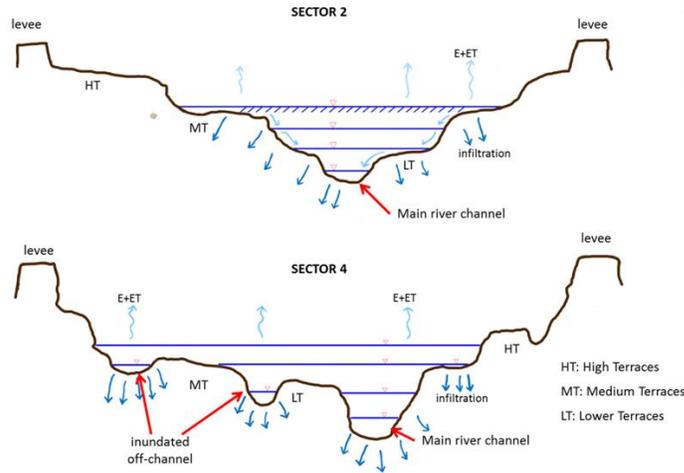


Ilustración 2-6. Sección transversal conceptual comparando el Sector 2 (arriba), donde las áreas del canal externo que se inundaron se drenaron de vuelta al canal principal mientras pasaba el flujo pulso, al Sector 4 (abajo), donde las áreas del canal externo que se inundaron se aislaron y continuaron infiltrándose aún después de que el flujo máximo del flujo pulso había pasado. E+ET = evaporación más evapotranspiración. HT, MT y LT = terraza alta, mediana y baja, respectivamente.

La infiltración es controlada por la magnitud y duración del flujo, profundidad y extensión de la inundación, características hidráulicas del sustrato, profundidad del agua subterránea, contenido de humedad previa y si el sustrato se estaba mojando o secando antes del flujo. La profundidad del flujo, extensión y duración fueron afectados por la rugosidad del canal, que a su vez fueron afectados por la vegetación y otras obstrucciones. Claramente, el Pino Salado que estaba en el camino del flujo pulso obstruyó el flujo aguas abajo, incrementando así tanto el área inundada como el volumen de infiltración.

El monitoreo del flujo pulso proporcionó una gran cantidad de datos para construir y calibrar en HEC-RAS un modelo hidráulico unidimensional de estado estacionario, que simule la respuesta hidráulica del río a diferentes niveles de descarga bajo las condiciones prevalecientes (Salcedo-Peredia 2016). Esta simulación de niveles de agua y extensiones de inundación en secciones transversales específicas genera informes de los análisis tanto de las respuestas hidrológicas y ecológicas al flujo pulso.

Flujos Adicionales: mayo, 2015

Debido a que los flujos adicionales a los que se liberaron durante el flujo pulso pudieron haber afectado la hidrología y ecología del tramo Limítrofe y el delta, reportamos aquí, con fines informativos, que aproximadamente 28.2 Mm³ (22,900 acre-pies) fueron liberados en la Presa Morelos entre el 16 y 19 de mayo del 2015. Estos flujos llegaron al LIS.

Flujos Base

Adicionalmente a los 132 Mm³ (107,000 acre-pies) de flujo pulso, 12.3 Mm³ (9,970 acre-pies) de flujo base también se entregaron en el año hidrológico 2014 (octubre 2013 a septiembre 2014). De este volumen, se entregaron 5.1 Mm³ (4,100 acre-pies o 41%) al canal principal a través de la Presa Morelos del 5 al 9 de septiembre del 2014; 0.5 Mm³ (400 acre-pies o 4%) se entregaron al área de restauración Miguel Alemán; y 6.7 Mm³ (5,400 acre-pies o 55%) se entregaron por medio del vertedor del km 18 al cauce principal y al área de restauración Laguna Grande. Mayores detalles sobre las entregas de flujo base durante el año hidrológico 2015 (octubre 2014-septiembre 2015), se presentarán cuando la información se encuentre disponible.

Referencias citadas

- Alarcón Gómez GE. 2015. Caracterización de la infiltración en el lecho seco del Delta Río Colorado bajo escenarios del flujo pulso 2014. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Mexicali, B.C.
- ASCE-EWRI. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. In R. G. Allen, I. A. Walter, R. Elliot, T. Howell, D. Itenfisu & M. Jensen (Eds.), (pp. 1-59): American Society of Civil Engineers.
- Glenn EP, Lee C, Felger R, Zengel S. 1996. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology* 10: 1175-1186.
- Salcedo-Peredia, A.T., 2016. Simulación Hidráulica del Flujo Pulso (2014) en el Corredor Ripario del Delta del Río Colorado, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ingeniería, Mexicali, B.C.
- Schmidt, J. C. 2014. Incorporating sediment supply, sediment transport, and geomorphology into environmental flows. Utah State University Spring Runoff Conference, April 2014, unpubl. slides and presentation.

Sección 3: Hidrología: Respuesta del agua subterránea.

Observaciones clave:

- 1. Aproximadamente 122 Mm³ (98,500 acre-pies) de agua del flujo pulso reabastecieron los acuíferos regionales. Este influjo adicional de agua subterránea fue superpuesta en los patrones complejos de flujo definidos por la extracción y recarga regional.**
- 2. La conectividad vertical entre el río y el agua subterránea se logró en todas las zonas. Durante el flujo pulso, el manto freático subió un máximo de 9 metros (30 pies) localmente, y el impacto fue menor a mayor distancia del canal del río. Las elevaciones del manto freático regresaron a los niveles existentes 6 meses antes del pulso, conforme el montículo de agua subterránea creada por el flujo pulso se disipó en el acuífero regional.**
- 3. Aunque el flujo pulso aumentó el nivel del agua subterránea menos de 2 metros en la Zona 4, donde el manto freático ya era alto, este incremento es importante para el establecimiento de la vegetación.**

Introducción

El área del proyecto yace sobre los acuíferos aluviales regionales del Valle de Mexicali, Valle de San Luis y Yuma. El flujo del agua subterránea en estos acuíferos se controla por el abastecimiento y la descarga regional. De acuerdo a fuentes gubernamentales, aproximadamente 760 Mm³ (620,000 acre-pies) de agua abastecen anualmente los acuíferos de Mexicali y San Luis (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2015) como una corriente subterránea de Arizona, California y Sonora; la filtración de los canales de riego, las tierras de cultivo y el drenaje urbano; y el abastecimiento episódico del río (Ariel, 1968). Alrededor de 900 Mm³ (730,000 acre-pies) de agua se extraen de los acuíferos por medio de pozos de bombeo (Distrito de Riego Río Colorado 2014), y un volumen de agua adicional pasa como corriente subterránea al Golfo de California (DOF 2015). El volumen de agua almacenada en los acuíferos está disminuyendo en una cantidad estimada de 463 Mm³ (375,000 acre-pies) anuales (DOF 2015). Distinguir la distribución espacial y temporal de la extracción y recarga regional y sus efectos en los flujos del río va más allá del alcance de este informe.

El agua subterránea normalmente fluye del noreste al suroeste, al menos en la década de los 1980s (Ilustración 3-1, izquierda). Para el 2006, el manejo del agua subterránea alteró el patrón de este flujo. La recarga en el área de Yuma dirigió el agua subterránea hacia el oeste cruzando la zona límite, mientras que el bombeo atrajo el agua subterránea hacia la Mesa Arenosa, y la zona de pozos del Acta 242 al este del Lindero Internacional Sur (LIS) y hacia el campo de pozos de Viejo Mexicali hacia el oeste, como se evidencia por el abatimiento de los niveles de agua (Ilustración 3-1, derecha). Tanto en 1984 como en 2006, el manto freático estaba casi completamente plano a lo largo de la Zona 4 y la parte baja de la Zona 3, indicando un flujo relativamente de baja velocidad del agua subterránea. Las proyecciones indican que el revestimiento del Canal Todo Americano reducirá el flujo subterráneo de California hacia Baja California, alterando aún más el flujo en el acuífero (USBR 2006; Coes *et. al.* 2015). Se requieren datos del nivel de agua regional en México con el fin de delinear los patrones del flujo regional. Además, como se puede ver en la ilustración 3-1 (véase también el Apéndice B), se requiere un mayor número de

piezómetros al Sur del puente del ferrocarril para deducir las direcciones de flujo aguas abajo en las zonas 4, 5, 6 y 7.

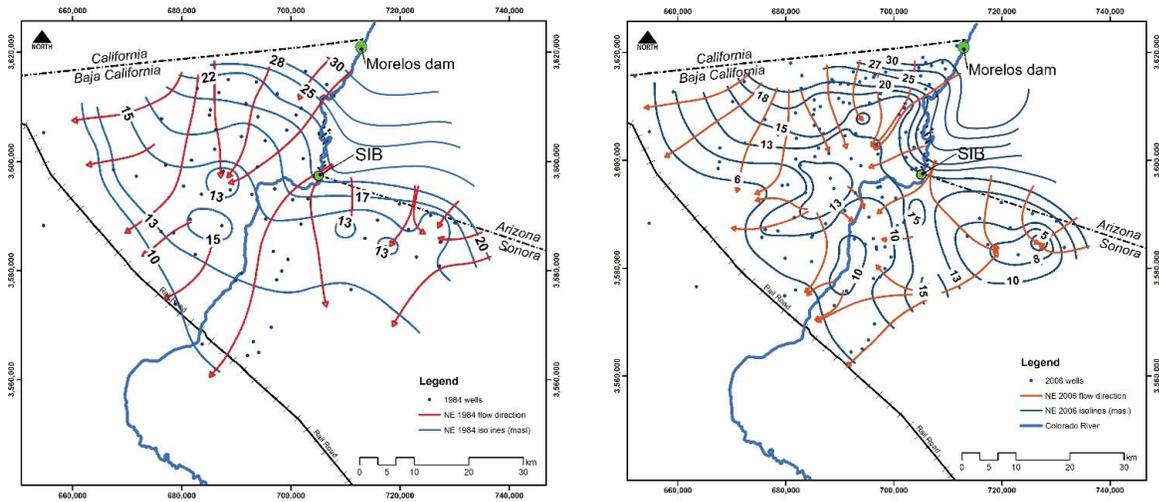


Ilustración 3-1. Elevaciones del manto freático y direcciones de flujo del agua del subsuelo en el acuífero del Valle de Mexicali/Valle de San Luis/Yuma en 1984 (izquierda) y 2006 (derecha). El agua del subsuelo fluye desde los niveles altos a los bajos. Fuentes de los contornos de niveles de agua: Lesser 2006; Overby 1992; U.S. Bureau of Reclamation 2015.

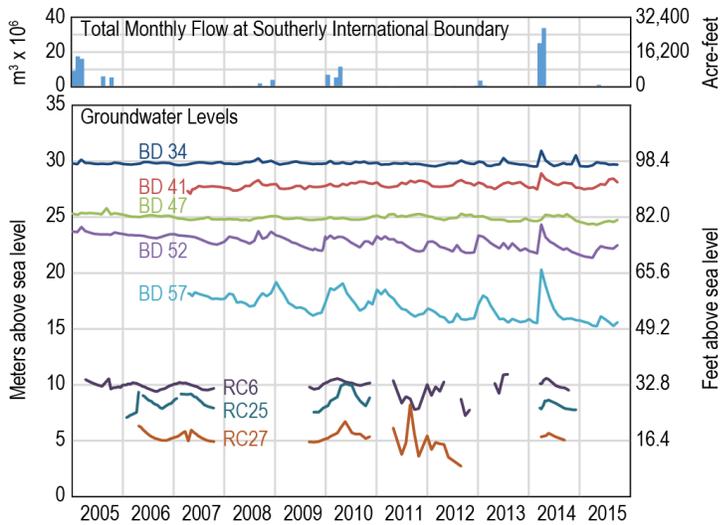


Ilustración 3-2. Elevaciones de agua del subsuelo a lo largo del corredor del río yuxtapuesto al flujo mensual del LIS, 2005-2015. Para ubicar los piezómetros, favor de ver los Apéndices A y C.

Los limitados datos históricos sobre el agua subterránea nos indican las tendencias del nivel de agua en el corredor ripario (ilustración 3-2). En la parte superior de las zonas 1 y 4, los niveles de agua se han mantenido relativamente estables por una década. A diferencia de los niveles de agua en la zona seca (BD52 y BD57), donde se están viendo reducidos.

La evapotranspiración (ET) de la vegetación riparia se cuantificó con datos del índice de vegetación mejorado y de sensores remotos MODIS (MODIS-EVI) utilizando el método desarrollado por Nagler *et. al.* (2013). Nuestro análisis indica que en el 2000-2013, la vegetación riparia evapotranspiró un promedio anual de 160 Mm³ (130,000 acre-pies), esos números se fueron reduciendo con el tiempo. Como comparación, un promedio de 46 Mm³ (37,000 acre-pies) de agua superficial fluyeron a través del LIS anualmente, de acuerdo a datos de medición de la CILA.

El Flujo Pulso

Los niveles de agua subterránea se midieron antes, durante y después del flujo pulso. Ciento dieciséis piezómetros² fueron utilizados a lo largo de los canales y áreas de inundación y terrazas aledañas para registrar los cambios de elevación del manto freático (Apéndice D). Se utilizaron técnicas geofísicas en la sección límite del área de estudio (zonas 1 y 2) para entender mejor la respuesta inmediata del agua subterránea al flujo pulso.

Localmente alrededor del corredor ripario, los piezómetros registraron niveles de profundidad de agua subterránea previa al flujo pulso en un rango que iba desde cero donde el manto freático cruza con el canal del río, hasta más de 14 m (46 pies) cerca de San Luis Río Colorado (Piezómetro P15). Durante el flujo pulso, el manto freático se elevó a un máximo de 9 m (30 pies) en el área límite baja (piezómetro MA15), con los impactos disminuyendo a mayor distancia del canal principal.

Las ilustraciones 3-3 – 3-5 muestran cómo los niveles de agua cambiaron como resultado del flujo pulso en sitios representativos a lo largo del río. Los cambios más significativos ocurrieron en la zona seca (zonas 2 y 3), donde los niveles previos al flujo pulso fueron más profundos. En las áreas de restauración de la Zona 4, la elevación de agua subterránea cambió poco, porque sólo un reducido abastecimiento de un relativamente pequeño volumen de agua fue entregado a la Zona 4 y porque la capa freática previa al flujo pulso estaba cerca de la superficie.

En todas las zonas, el flujo pulso estableció una conexión vertical entre el río y el agua subterránea (Ilustración 3-5). Sin embargo, los efectos hidráulicos en el sistema de flujo de agua subterránea fueron relativamente de corta duración y en lugares específicos.

En el tramo límite (ilustración 3-5, arriba), el agua subterránea fluyó lateralmente hacia el río del acuífero aledaño previo al flujo pulso; es decir, el agua subterránea descargó hacia el río, tal como fue observado por Ramírez-Hernández *et. al.* (2013). Por un corto periodo durante el flujo pulso, se revirtió la dirección del flujo, y el río reabasteció al acuífero. En un periodo de dos meses, la capa freática había casi regresado a su nivel previo al flujo pulso, y el agua subterránea continuó fluyendo hacia el río. Para octubre, todos los niveles de agua subterránea en el tramo límite habían regresado a apenas unos 2 m (7 pies) de sus niveles previos al flujo pulso.

² Setenta y nueve Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y 37 U.S. Geological Survey (USGS), Buró de Reclamaciones y la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA).

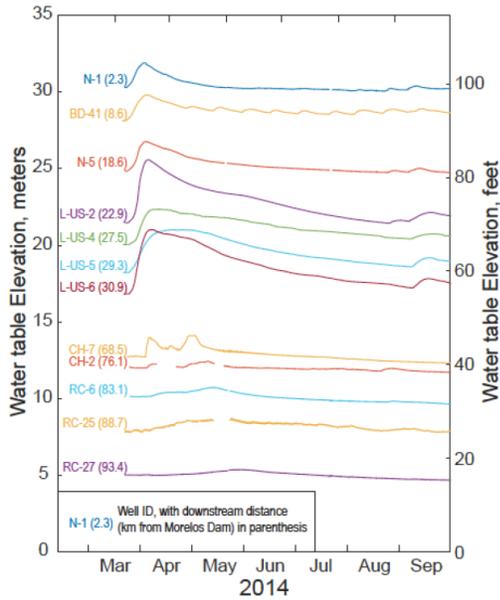


Ilustración 3-3 Hidrogramas registrados en los piezómetros representativos a lo largo del corredor ripario, mostrando como la respuesta al flujo pulso varió aguas abajo y se atenuó con el tiempo. Los kilómetros de río desde la Presa Morelos a cada piezómetro se muestran en paréntesis.

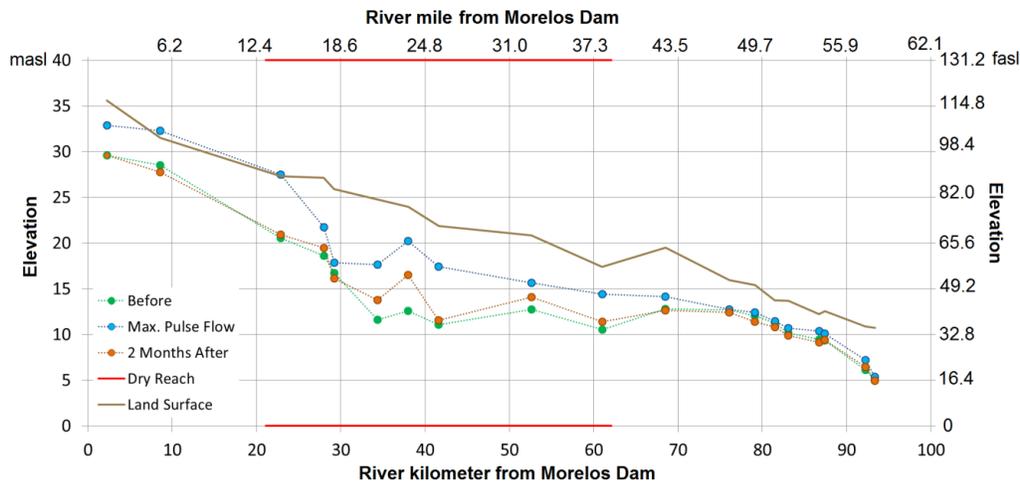


Ilustración 3-4 Cambios de nivel del agua subterránea a lo largo del corredor ripario, mostrando elevaciones del agua subterránea relativas a la superficie del área de inundación (en las ubicaciones de los piezómetros) antes (marzo 2014), durante y dos meses después de que el flujo pulso máximo pasó en cada una de las ubicaciones.

En la zona seca (ilustración 3-5, centro), antes del flujo pulso el agua subterránea fluyó del oeste al este por debajo del río hacia la Mesa Arenosa y la zona de pozos del Acta 242. El abastecimiento del flujo pulso incrementó el manto freático más de 9 m (30 pies) en el área inmediatamente alrededor del río.

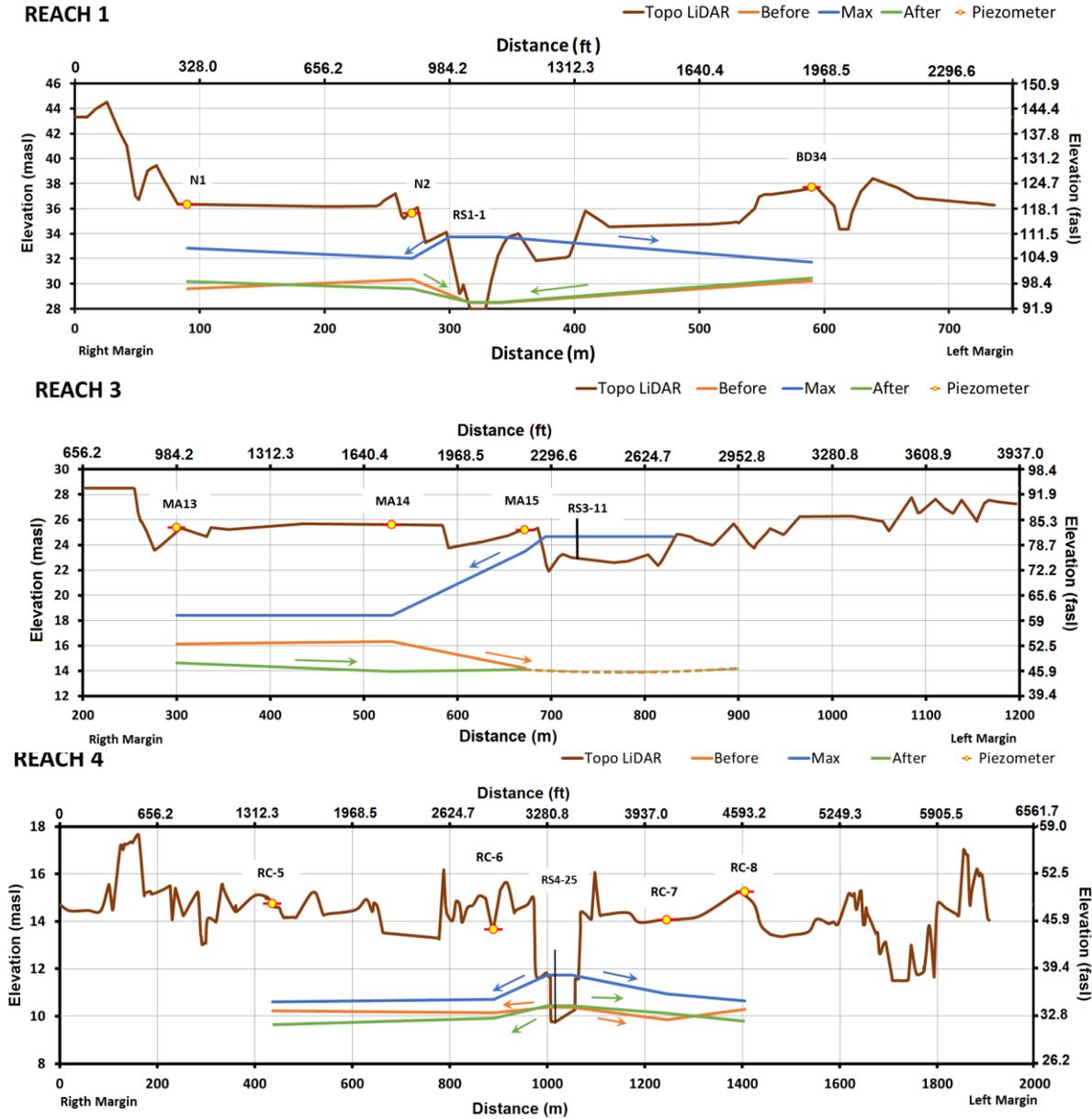


Ilustración 3-5. Secciones transversales que muestran como el flujo de pulso afectó el componente de flujo de agua del subsuelo perpendicular al canal del río antes (naranja), durante (azul), y 2 meses después (verde) de que la cúspide del flujo de pulso pasó cada ubicación. La línea punteada indica el nivel de agua inferido debajo del piezómetro RS3-11, que estaba seco. Hay que notar que la escala vertical varía entre ilustraciones. RS indica los puntos de medición del nivel del río.

Como fue mencionado previamente, el ET anual del agua subterránea ha ido disminuyendo por lo general desde el 2000. En el 2014, esta tendencia se revirtió temporalmente, quizá como respuesta al flujo pulso (Ilustración 3-6, izquierda). El flujo pulso del 2014 no incrementó la ET a la magnitud que precedía la ecuación de regresión en la Ilustración 3-6 (derecha), quizá debido a la condición deteriorada

de la vegetación. La respuesta del 2015 probablemente refleja el verdor de la vegetación existente; la vegetación recién germinada pudo haber estado muy pequeña en el 2015 para ser detectada por MODIS. Debido a que la vegetación existente estaba en una condición deteriorada, es posible que su capacidad de recuperación fuera insuficiente al pasar un solo flujo pulso. También es de notarse que la ET captura agua de varias fuentes. El agua superficial medida en el LIS puede ser una fuente debido al agua que se infiltró al suelo y fue utilizada por la vegetación aguas abajo.

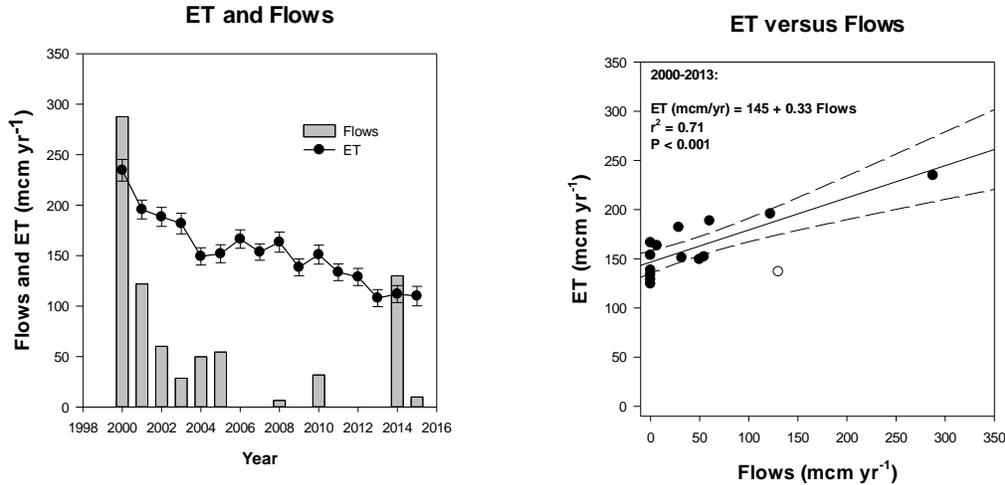


Ilustración 3-6. Izquierda: ET anual del corredor ripario y los flujos superficiales en el LIS, 2000-2015. Derecha: regresión de la ET vs los flujos superficiales, 2000-2013. La ET del 2014 (círculo abierto) cayó fuera del 95% de intervalo de confianza de la regresión (línea punteada) y fue omitida del análisis.

El Cuadro 3-1 compara la infiltración del flujo pulso con la evapotranspiración (ET) desde el acuífero del corredor ripario (entre bordos) por sector durante la temporada de cultivo del 2014 (marzo-octubre). La infiltración es el agua del flujo pulso que abasteció al acuífero, tal como se describe en la sección de Agua Superficial. El método utilizado para cuantificar la ET (Nagler et. al. 2013) no distingue entre la ET derivada del agua que está por encima o por debajo del manto freático. Asumiendo que la vegetación consumió agua principalmente de la zona saturada, incluimos el volumen entero en el cuadro 3-1. En cada sector, la diferencia entre infiltración y ET es el volumen de agua de flujo pulso infiltrada que se extrajo utilizando pozos de bombeo y fluyó lateralmente hacia o fuera del sector como agua subterránea.

Cuadro 3-1. Los componentes del flujo de agua subterránea entre bordos, excluyendo los flujos subterráneos y el bombeo, de marzo a octubre 2014, en millones de metros cúbicos (Mm³), con un margen de error del 5-10%. Es de notar que el flujo pulso generó toda la infiltración, pero no toda la evapotranspiración, la cual, de acuerdo a los datos del MODIS-EVI, no tuvo diferencias visibles entre el 2013, 2014 y 2015. La infiltración de 12.3 Mm³ de las entregas del flujo base en el año hidrológico 2014 no se incluyó. SD = sin determinar.

Sector o Zona	Infiltración	ET
Sector 1 (DMS 1-2)	11.5	1.1
Sector 2 (DMS 2-3)	22.4	7.5
Sector 3 (DMS 3a-4)	11	2.3
Sector 4 (DMS 4-6)	38.1	4.0
Sector 5 (DMS 6-7)	29.7	3.9
Sector 6 (DMS 7-8)	4.0	1.1
Sector 7 (DMS 8-10)	2.6	4.2
Sector 8 (DMS 10-11)	2.2	1.9
Sector 9 (DMS 11-12)	0.1	2.5
Zona 5	SD	26.4
Zona6	SD	5.8
Zona7	SD	25.1
TOTAL	122	85.7

La salinidad del agua subterránea

La salinidad del agua subterránea afecta la distribución y el tipo de vegetación en el tramo Límitrofe y el delta. La conductividad eléctrica específica (un indicador para la salinidad) del agua subterránea fue medida periódicamente en piezómetros selectos en el 2014 (Apéndice D). Las concentraciones de salinidad generalmente aumentaron gradualmente aguas abajo (Ilustración 3-6), tal como se esperaba en un sistema con flujos limitados de agua dulce y altos porcentajes de evapotranspiración. Nuestros datos no indican un patrón temporal de cambios en la salinidad del agua subterránea consistente durante el flujo pulso.

Las concentraciones medidas fueron considerablemente más bajas que los 3-10 g/L típicos de zonas de pino salado que dependen de las infiltraciones del Bajo Río Colorado, como en los Refugios Nacionales de Vida Silvestre en Cíbola (Glenn et. al. 2013) y Havasu (Guay, 2001). La zona riparia del Delta, por lo tanto, es inusual en la planicie de inundación de la Cuenca Baja del Río Colorado, porque tiene un acuífero de relativamente baja salinidad que puede sustentar árboles nativos (Nagler et. al., 2005).

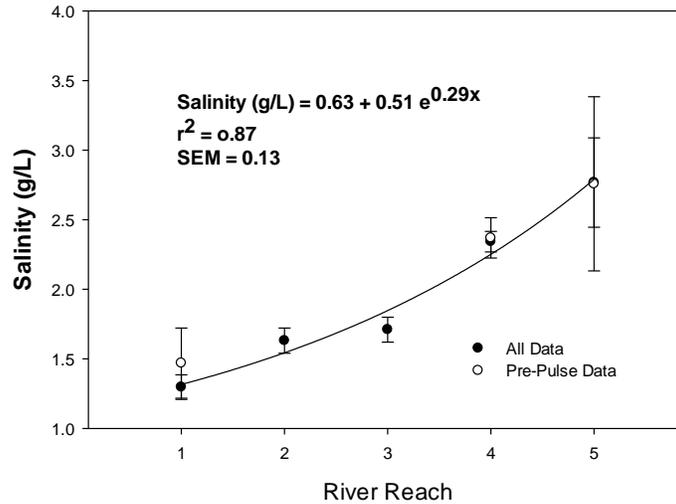


Ilustración 3.7. La salinidad del agua subterránea medida en 69 piezómetros a lo largo del corredor ripario de marzo a mayo del 2014, se midieron como conductividad específica (dS/m) y se convirtieron a salinidad (g/L) utilizando un factor de 0.62 (basado en los análisis de agua subterránea reportados en Dickenson et. al. 2006). El crecimiento vigoroso de los árboles de Álamo y Sauce requirió una concentración de salinidad menor a 2.5 g/L (4 dS/m), aunque los árboles pueden tolerar hasta 5 g/L (8 dS/m) (Shafroth et al., 2008; Glenn et al., 1998).

Flujos Base

Adicionalmente a los 132 Mm³ (107,000 acre-pies) de flujo pulso, 12.3 Mm³ (9,970 acre-pies) de flujo base también se entregaron en el año hidrológico 2014 (octubre 2013 a septiembre 2014). De este volumen, se entregaron 5.1 Mm³ (4,100 acre-pies o 41%) al canal principal a través de la Presa Morelos del 5 al 9 de septiembre del 2014; 0.5 Mm³ (400 acre-pies o 4%) se entregaron al área de restauración Miguel Alemán; y 6.7 Mm³ (5,400 acre-pies o 55%) se entregaron por medio del vertedor del km 18 al cauce principal y al área de restauración Laguna Grande. Mayores detalles sobre las entregas de flujo base durante el año hidrológico 2015 (octubre 2014-septiembre 2015), se presentaran conforme la información se encuentre disponible

Referencias citadas

- Ariel Construcciones, S. A. 1968. Estudio Hidrogeológico preliminar de los Acuíferos del Valle de Mexicali, BC. y Mesa Arenosa de San Luis Sonora. Mexico: CONAGUA.
- Coes, A.L., Land, Michael, Densmore, J.N., Landrum, M.T., Beisner, K.R., Kennedy, J.R., Macy, J.P., and Tillman, F.D., 2015, Initial characterization of the groundwater system near the Lower Colorado Water Supply Project, Imperial Valley, California: U.S. Geological Survey, Scientific Investigations Report Series 2015–5102, 59 p. <http://dx.doi.org/10.3133/sir20155102>
- Dickenson, J.E., Land, Michael, Faunt, C.C., Leake, S.A., Reichard, E.G., Fleming, J.B., and Pool, D.R., 2006, Hydrogeologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry

- analyses, and water-budget components of the Yuma area, southwestern Arizona and southeastern California: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2006-5135
- Distrito de Riego Río Colorado, 2014. Número de usuarios, superficie con derechos de riego y volumen asignado por fuente de abastecimiento ciclo agrícola (2014-2015). Órgano informativo del Distrito de Riego Río Colorado S. de R.L. de I.P. de C.V. Aquí en el Valle, No. 174. Diciembre 2014.
- DOF, 2015. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Artículo 1. Diario Oficial de la Federación. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos. México, D.F. 20 de Abril del 2015. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015. Accessed Jan. 22, 2016.
- Glenn E, Tanner R, Mendez S, Kehreta T, Moore D, Garcia J, Valdes C. 1998. Growth rates, salt tolerance and water use characteristics of native and invasive riparian plants from the delta of the Colorado River, Mexico. *Journal of Arid Environments* 40: 281-294.
- Lesser, J. 2006. "Estudio de actualización geohidrológica integral del acuífero Valle de Mexicali del Estado de Baja California, análisis e incorporación de la actualización geohidrológica de la zona de la Mesa Arenosa de San Luis, Sonora". SGT-PBC-BC-06-GAS-004-RF-LP, Comisión Nacional del Agua.
- Nagler PL, Hinojosa-Huerta O, Glenn EP, Garcia-Hernandez J, Romo R, Curtis C, Huete AR, Nelson SG. 2005. Regeneration of native trees in the presence of invasive saltcedar in the Colorado River delta, Mexico. *Conservation Biology* 19: 1842-1852.
- Nagler PL, Glenn EP, Nguyen U, Scott RL, Doody T. 2013. Estimating riparian and agricultural actual evapotranspiration by reference evapotranspiration and MODIS enhanced vegetation index. *Remote Sensing* 5(8): 3849-3871. <http://www.mdpi.com/2072-4292/5/8/3849>
- Overby, A. 1992. Maps showing groundwater conditions in the Yuma Basin, Yuma County, Arizona: Arizona Department of Water Resources Hydrologic Map Series No. 30.
- Ramírez-Hernández, J., Hinojosa-Huerta, O., Peregrina-Llanesb, 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.
- 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. *Ecol. Eng.* 83, 239-248.
- Schmidt, J. C. 2014. Incorporating sediment supply, sediment transport, and geomorphology into environmental flows. Utah State University Spring Runoff Conference, April 2014, unpubl. slides.
- U.S. Bureau of Reclamation 2006. Supplemental Information Report: All-American Canal Lining Project, p. 3–8, http://www.usbr.gov/lc/region/programs/AAC/SIR_1-12-06.pdf, accessed October 1, 2015.
- U.S. Bureau of Reclamation, 2015, Yuma Area Water Management System Groundwater Maps webpage, accessed Oct. 1, 2015, at <http://www.usbr.gov/lc/yuma/programs/YAWMS/Groundwater/YV122007-72dpi.pdf>.

Sección 4: Respuesta geomórfica

Observaciones clave:

- 1. Los porcentajes más altos de sedimento suspendido se midieron en el área límite superior y en un zona de aproximadamente 10 km (6.2 millas) aguas abajo del LIS.**
- 2. Aunque $156,000 \pm 81,000 \text{ m}^3$ (5.5 millones de $\text{pies}^3 \pm 2.8$ millones de pies^3) de sedimento se movilaron, los cambios dentro de las zonas 1-3 durante el flujo pulso se limitaron a una redefinición localizada del lecho del cauce, socavación y sedimentación del orden de 1 m (3 pies) o menos dentro del canal activo, y erosión menor en las márgenes.**
- 3. La descarga del flujo pulso no fue suficiente para ensanchar el canal, o para remover o enterrar una cantidad significativa de vegetación existente.**

Introducción

Las condiciones históricas de inundaciones dan forma a la geomorfología riparia. Después de la construcción de la Presa Hoover en 1935, el flujo anual y los suministros de sedimentos al Río Colorado se vieron reducidos drásticamente, pero aun así ocurrían flujos máximos casi todos los años. Las inundaciones hacia el Delta cesaron en gran parte después de la construcción de la Presa Glen Canyon en 1963, y no ocurrió ningún flujo en casi el 20% del tiempo en el Lindero Internacional Sur (LIS). Después de que se llenó el Lago Powell, se presentaron grandes inundaciones en la década de los ochenta siguieron por varios años sucesivos debido a un gran flujo de los deshielos en la parte superior de la Cuenca del Río Colorado y un flujo máximo de $934 \text{ m}^3/\text{s}$ (33,000 cfs) se registró en el LIS en 1983. Estas inundaciones fueron de larga duración y causaron un ajuste considerable en el canal (McCleary, 1986; Tiegs y Pohl, 2005). De 1989 a 1992, no hubo flujo registrado en el LIS un 92% de las veces. Este periodo seco finalizó con unos flujos de inundación en 1993 del Río Gila, que tuvieron un flujo máximo de $646 \text{ m}^3/\text{s}$ (22,800 cfs) en el LIS. Después de periodos extendidos de cero descarga a mediados de los noventa, una serie de flujos moderadamente altos ocurrieron a finales de los noventa. Se ha registrado que los flujos han disminuido progresivamente en el LIS desde el año 2000.

El canal del río en el tramo límite es relativamente natural, lo que significa que no ha sido modificado significativamente por actividad humana a excepción de los bordos. El segmento aguas arriba (Zona 1) está más confinado dentro de los bordos, y la filtración de la Presa Morelos y el flujo de retorno del riego dan como resultado un canal húmedo con un cauce con vegetación densa. En el segmento aguas abajo (Zona 2), el canal del río es seco, la vegetación del cauce es menos densa, y el canal está menos confinado por los bordos. El ancho del corredor aluvial entre los bordos está en un rango de aproximadamente 0.5 km (0.3 millas) inmediatamente aguas abajo de la Presa Morelos, a más de 4 km (2.5 millas) en partes de la Zona 2. Aguas abajo del LIS, el canal permanece seco por aproximadamente 35 km (22 millas) (Zona 3). Aquí, gran parte del corredor del río mantiene una forma parcialmente natural, pero se parte en dos por el canal piloto que tiene la intención de llevar el flujo aguas abajo. Aproximadamente a 30 km (20 millas) aguas abajo del tramo límite, el corredor del río está completamente canalizado, y eventualmente se humedece con la afluencia del agua subterránea (zonas 4 y 5). El canal del río en gran parte de las zonas 3 o 4 siguen el camino del canal Vacanora construido en

1929 (Sykes, 1939), y aguas abajo del puente del ferrocarril en la Zona 4, el río sigue un curso establecido en 1942 después de desfuegos de prueba en la Presa Hoover.

El Flujo Pulso

Los levantamientos pre-existentes, mapas y fotografías documentan los cambios históricos en los canales desde 1939 al 2014 en el tramo límite, lo que estableció las condiciones para el flujo de agua superficial y el transporte de sedimento durante el flujo pulso. Las imágenes satelitales, la fotografía aérea y los modelos de elevación digital de LiDAR (adquirido a principios de marzo 2014 y agosto 2014) documentaron los cambios geomórficos y el transporte de sedimentos en todo el corredor del río durante el flujo pulso. Adicionalmente, en repetidas secciones transversales, cadenas de socavación y las mediciones del transporte suspendido de sedimento en diversas ubicaciones proveen observaciones de campo más detalladas de la respuesta geomórfica al flujo pulso. Veintitrés secciones transversales dentro del área límite, espaciadas de 1 a 4 km (0.6 a 2.5 millas) de distancia, se enfocaron en áreas que era probable que se inundarían. Unas 13 secciones transversales adicionales se evaluaron aguas abajo del tramo límite. Se tomaron muestras del incremento de ancho equitativo (IAE) en seis ocasiones en tres sitios en el tramo límite durante el flujo pulso, y se tomaron muestras del sedimento único vertical durante el flujo máximo en seis sitios adicionales, incluyendo dos sitios aguas abajo del LIS, para cuantificar las magnitudes de sedimento transportado durante el flujo pulso.

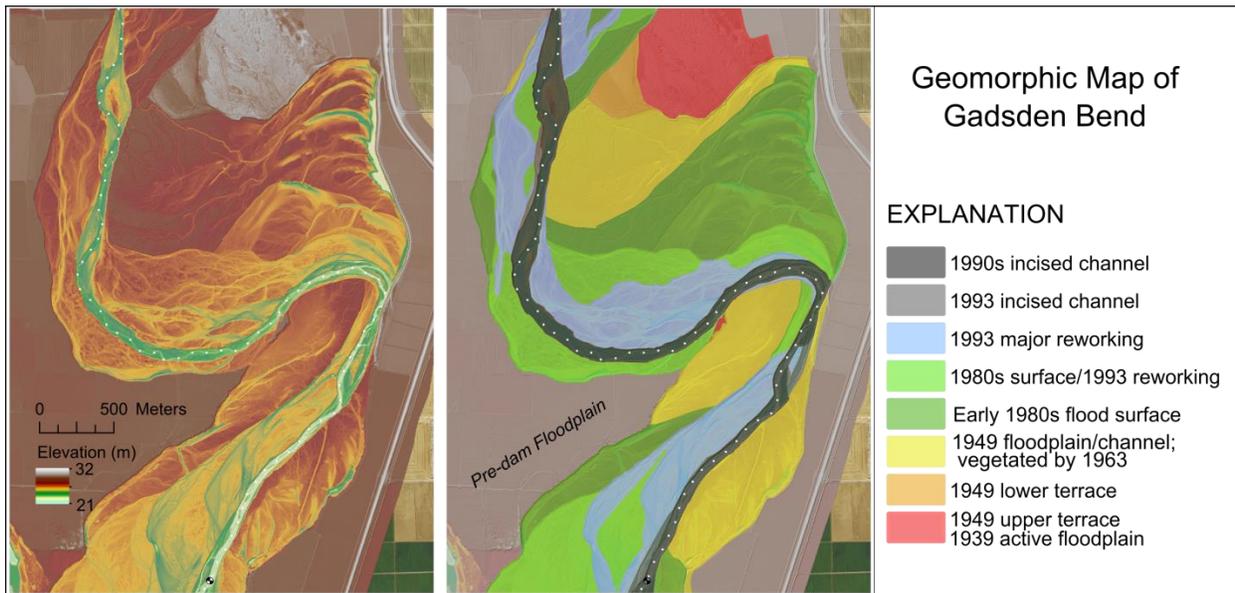


Ilustración 4-1. Ejemplo del canal del río y superficies geomórficas en Gadsden Bend dentro de la zona límite. El LiDAR de antes del flujo pulso (izquierda) y las superficies geomórficas muestran el tiempo de la más reciente ocupación y ajuste (centro); el canal moderno (puntos) sigue un canal “activo” recientemente erosionado en los años noventa.

La fotografía aérea y las secciones transversales e informes históricos de la CILA nos sugieren que la mayoría de los cambios significativos posteriores a la construcción de las presas ocurrieron a principios de los años cuarenta cuando había apenas 2 m (7 pies) de degradación de cauce, y durante las inundaciones de larga duración a mediados de los ochenta (Ilustración 4-1). Las inundaciones de los

años ochenta causaron una migración lateral significativa y un cambio en el canal entre 1982 y 1989, pero la erosión profunda del cauce en 1983 se recuperó mayormente para finales de los años ochenta (Ilustración 4-1) (Datos no publicados de la CILA; Tetra Tech, 2004; NCD/FPC 2006). Las inundaciones de los ochenta también resultaron en una migración considerable del canal, inundando y ajustando el cauce a lo largo del corredor del río aguas abajo del LIS en México. Las inundaciones del Río Gila de 1993 resultaron en aún más migración del canal y reajustes en el cauce, pero el mayor cambio geomórfico se confinó a la parte del canal afectada por las inundaciones de los ochenta, en vez de erosionar las terrazas más antiguas y altas. Las inundaciones de finales de los noventa modificaron mayormente este canal, que se erosionó aún más, y ahora forma el canal moderno “activo” (Ilustración 4-1). Para 1999, la parte más profunda del canal se había erosionado aún más abajo que el nivel de 1989, y el LiDAR del 2014 indica que la configuración del canal es muy similar a la observada en 1999. El grado de erosión en el canal debajo de la superficie del área de inundación disminuye aguas abajo en México.

La máxima descarga de flujo pulso de $120 \text{ m}^3/\text{s}$ (4,200 cfs) en la Presa Morelos y $71 \text{ m}^3/\text{s}$ (2,500 cfs) en el LIS (Ilustración 2-3) fue mucho menor que las inundaciones aguas abajo de la presa descritas arriba. El hidrograma de flujo diario de la Presa Morelos muestra un periodo de 3 días de descargas máximas, un segundo surgimiento de descarga tres días después del umbral, y algunas otras fluctuaciones durante la curva de descenso del hidrograma. (Ilustración 4-2).

Las concentraciones de sedimento suspendido disminuyeron con el tiempo (Ilustración 4-2, derecha). Concentraciones relativamente altas de arena suspendida solo se encontraron en el punto de medición de la estación de la milla 11 (DMS-2) aproximadamente 5 km (3.1 millas) aguas abajo de la Presa Morelos, y la mayor parte de las 4,000 toneladas (4,410 toneladas americanas) de arena suspendida que pasaron por este medidor se depositaron dentro del zona límite (Ilustración 4.2, derecha). Aguas abajo, conforme se ensanchaba el corredor del río, el transporte de sedimento suspendido disminuía rápidamente, y la mayor parte del cambio geomórfico se limitó a la erosión de sedimento local y la deposición en el canal recientemente activo (Ilustración 4-3). En el tramo de 10 km (6 millas) aguas abajo del LIS, las concentraciones de sedimento eran algo más altas que en la parte baja del tramo límite (Ilustración 4-3). Esta área de mayor cambio geomórfico fue algo inesperado debido al reducido flujo de agua en esta zona, pero los cambios estuvieron confinados al canal activo y al canal piloto con erosión limitada en los bancos. Excepto por los segmentos aislados, el transporte de sedimento probablemente disminuyó rápidamente mientras el gasto disminuía a menos de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ (530 cfs) aguas abajo en las zonas 4 y 5.

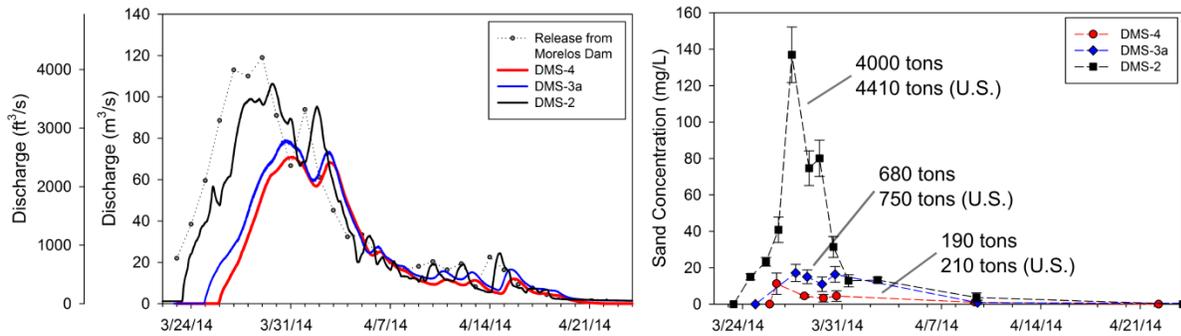


Ilustración 4-2 Hidrogramas de gasto continuo para los sitios de muestreo de sedimento suspendido en el tramo límite (izquierda), e indicación de las concentraciones de arena asociadas con el total de arenas suspendidas (derecha).

Los cambios geomórficos en la topografía del cauce a lo largo del Río Colorado durante el flujo pulso se concentraron en el canal activo reciente donde las profundidades de los flujos fueron mayores; aguas abajo, también hubo un transporte de sedimento considerable en lugares donde el canal piloto se cruza con el curso del río natural formado durante las inundaciones de los ochenta y donde las represas de tierra fueron rebasadas por el agua (Ilustración 4-4, meandros canalizados y represas rebasadas). La erosión y deposición máxima a lo largo del cauce del canal estuvo generalmente en el rango de ± 1 m (3 pies) sin una tendencia longitudinal neta (Ilustración 4-4). Las repeticiones del LiDAR indican que aproximadamente $156,000 \pm 81,000$ m³ ($5,509,000 \pm 2,860,000$ pies³) de sedimento fueron parte del ajuste del cauce (procesos de erosión y deposición) en el canal seco (zonas 2 y 3), pero no hubo un cambio neto significativo estadísticamente en el almacenamiento de sedimentos para esta zona.

El flujo de baja velocidad inundó algunas de las superficies más altas en el segmento de 50 km (30 millas) aguas abajo de la Presa Morelos, pero no hubo algún cambio geomórfico que se notara en esas superficies. La erosión significativa del margen del río no ocurrió a lo largo de la mayor parte del canal, pero la arena enterró algo de la vegetación en algunos sitios y el margen del canal principal se reajustó a lo largo del corredor del río en el tramo límite. Sólo dos cadenas de socavación mostraron evidencia de socavación significativa (>0.1 m, o 0.3 pies) antes de la deposición, mientras que la mayoría mostró un transporte de sedimento bastante corto y localizado. Además, el flujo pulso resultó en cambios topográficos enfocados en el margen del canal del río recientemente activo y el canal piloto, pero no causó más incisión en el canal o alguna erosión significativa al margen debido a la magnitud relativamente pequeña y corta duración.

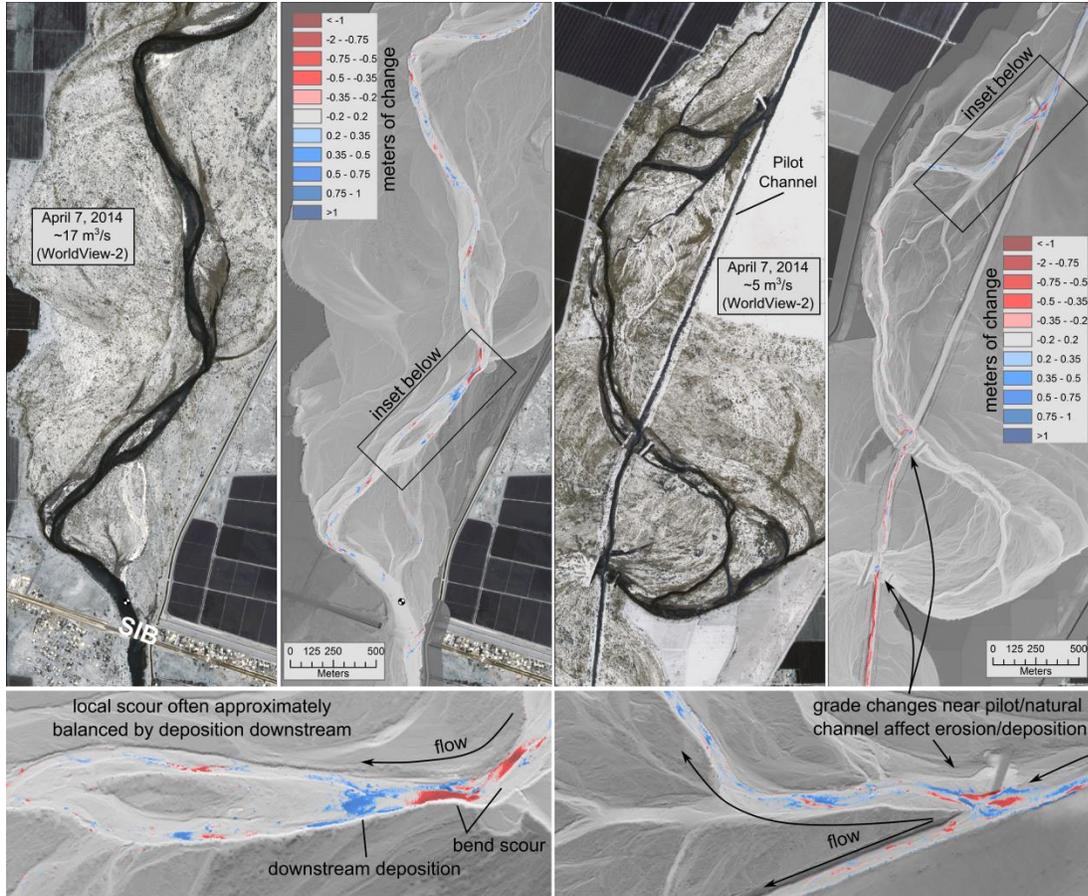


Ilustración 4-3. Imágenes de Worldview del 7 de abril del 2014 que muestran el canal activo inundado varios días después de la descarga máxima y el DEM (Modelo de Elevación Digital) de LiDAR mostrando ejemplos de cambios en el canal. Los sitios se ubican justo aguas arriba del LIS (izquierda) y en la parte aguas abajo de la Zona 3 (derecha).

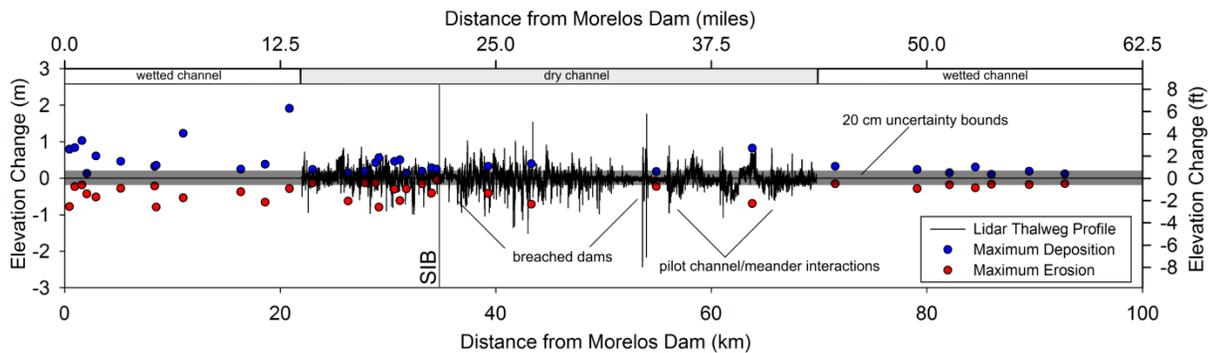


Ilustración 4-4. La tendencia aguas abajo en la sedimentación y erosión máximas de las secciones transversales analizadas (puntos), y el DEM de LiDAR DEM para el perfil más bajo (líneas) a lo largo del corredor del río.

Referencias citadas

- McCleary, D.P., 1986. Channel adjustments of the lower Colorado River. Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference (FISC), Las Vegas, NV, pp. 5-103-5-112.
- NCD/FPC, Natural Channel Design/Fred Phillips Consulting, 2006. Restoration strategy: a preliminary design for enhancement of native riparian habitats, lower Colorado River, limitrophe reach, U.S.-Mexico. Final report to Environmental Defense, 122 pp.
- Sykes, G. (1937). The Colorado Delta. American Geographical Society Special Publication No. 19, 193 pp.
- Tetra Tech, 2004. Lower Colorado River, proposed pilot channel analysis. Final report to U.S. Army Corps of Engineers, Memorandum of Understanding IBM 92-21, 98 pp.
- Tiegs, S.D. and Pohl, M., 2005. Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976-2000. *Geomorphology*, 69, pp. 14-27.

Sección 5; Respuesta de la vegetación al usar técnicas terrestres de sondeo.

Observaciones Clave

- 1. La mayoría de los requerimientos para el reclutamiento de árboles nativos riparios (Álamo, Sauce y Batamote) se cumplieron en las áreas sin preparar de las zonas 1 y 4 debido a una alta disponibilidad de semillas, humedad continua de la tierra y niveles tolerables de salinidad en la tierra. Sin embargo, la densa vegetación existente en estas áreas sin preparación redujeron la disponibilidad de espacio necesario para la germinación en la mayoría de los sitios favorables hidrológicamente.**
- 2. Todos los requerimientos para el establecimiento de plántulas se cumplieron en la mayoría de las áreas de restauración preparadas en la Zona 4 debido a las acciones de manejo. Previo al flujo pulso, los encargados del sitio removieron el pino Salado y la cachanilla, y excavaron y conformaron los meandros; además se entregaron flujos base durante la primera y segunda temporadas de crecimiento.**
- 3. Los árboles nativos riparios se establecieron con las frecuencias y densidades más altas en las áreas preparadas de la Zona 4 (excepto LG1) y las áreas no preparadas de la Zona 1.**
- 4. El reclutamiento de árboles nativos riparios en los sitios sin preparación con condiciones hidrológicas favorables (zonas 1 y 4) requerirá de manejo activo, como la remoción de la vegetación existente, entrega de flujos base y el control de especies no nativas.**
- 5. La Zona 4 tiene un nivel de salinidad elevada en el suelo en comparación con otras zonas del río debido a la presencia de agua subterránea de baja profundidad y la falta de flujos superficiales regulares. Los flujos ambientales son críticos para el manejo de la salinidad en el suelo en áreas como la Zona 4, que apoyan el hábitat ripario existente y restaurado.**
- 6. Los árboles riparios se establecieron exitosamente en los sitios manejados activamente en Miguel Alemán y Laguna Grande, por medio de la remoción del pino salado y cachanilla, la plantación de especies nativas y el riego.**

Introducción

El entendimiento de los requerimientos para el establecimiento de plántulas de especies riparias es crítico para interpretar las respuestas de la vegetación a la liberación de flujos ambientales del Acta 319. Varios factores afectan el éxito del reclutamiento de árboles pioneros riparios y arbustos a lo largo de los ríos del oeste de Norteamérica, incluyendo el Río Colorado y su delta (ilustración 5-1; Harper et. al. 2011; Mahoney and Rood 1998; Shafroth et. al. 1998). Estos incluyen: 1) disponibilidad de semillas; 2) disponibilidad de sustrato limpio; 3) exposición a inundaciones secundarias; 4) niveles y tasa de disminución del agua superficial y subterránea; 5) textura y salinidad del suelo; y 6) competencia y herbivorismo. Si las condiciones no se cumplen en varios niveles en el ciclo de vida de las plántulas, entonces es probable que no sobrevivan. Las acciones de manejo pueden mejorar la probabilidad de reclutamiento al sobrellevar los factores limitantes (Ilustración 5-1). Para este informe, se evaluó qué tan bien cada requerimiento de reclutamiento se alcanzó en las zonas 1-4 en el contexto de las descargas de flujos ambientales del Acta 319, incluyendo ambos sitios preparados (i.e., áreas de restauración) y sitios sin preparación (i.e., transectos de plántulas).

Las siguientes especies clave de plantas son referidas en el texto e ilustraciones:

- Álamo (*Populus fremontii*; código de especie: POFR; de aquí en adelante mencionado como Álamo);
- Sauce (*Salix gooddingii*; SAGO; de aquí en adelante mencionado como Sauce);
- Batamote y Jarilla (especies de *Baccharis*; BASP; de aquí en adelante mencionados como Batamote);
- Cachanilla (*Pluchea sericea*; PLSE; de aquí en adelante mencionado como Cachanilla);
- Pino Salado (especies de *Tamarix*; TASP; de aquí en adelante mencionado como Pino Salado).

El Alamo, Sauce, Batamote y Cachanilla son especies nativas riparias. El Pino Salado es la especie no nativa dominante a lo largo del corredor del río y se considera como de menor calidad para el hábitat que los árboles nativos (Hinojosa-Huerta et al. 2008).

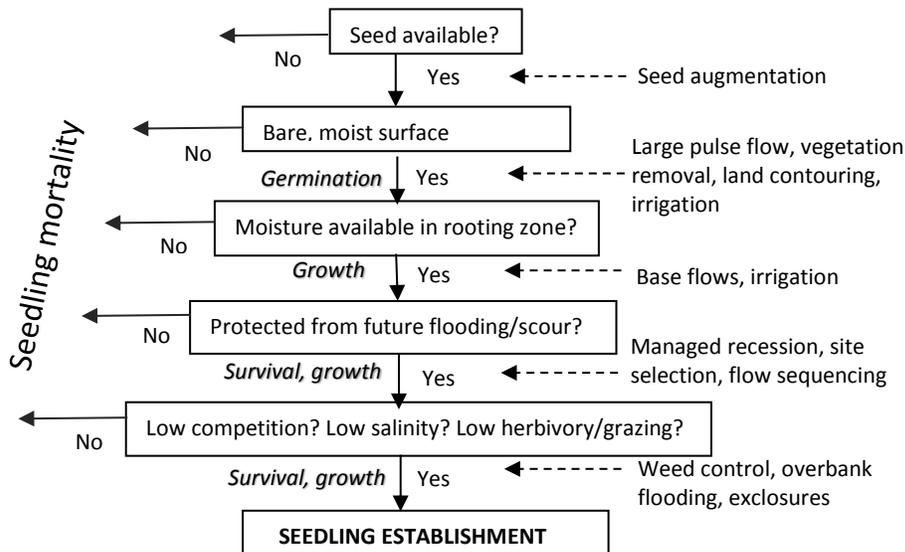


Ilustración 5-1. Requerimientos clave para la germinación y establecimiento de árboles pioneros y arbustos riparios. Los requerimientos se describen dentro de las cajas en forma de preguntas y se presentan en secuencia. Si un requerimiento se cumple (“sí”), entonces la germinación, sobrevivencia o crecimiento ocurrirán y el próximo requerimiento se examinará (las flechas que señalan hacia abajo). Si un requerimiento no se cumple (“no”), entonces la muerte de la plántula es probable (flechas sólidas hacia la izquierda). Las acciones de manejo están indicadas al lado derecho de la ilustración con flechas punteadas señalando la condición o requerimiento abordado por la acción de manejo.

Métodos

El equipo de monitoreo de vegetación del Acta 319 utilizó métodos de campo para evaluar los efectos del flujo pulso en la vegetación riparia a lo largo del corredor del Río Colorado en áreas con diferentes niveles de manejo activo. Se utilizaron cuatro sub-apartados para organizar nuestra presentación del material relacionado con la respuesta de la vegetación: 1) *transectos de plántulas* (áreas no preparadas),

2) *transectos de Laguna Grande* (áreas preparadas), 3) *comparación entre áreas no preparadas y áreas preparadas*, y 4) *áreas de restauración programadas y plantadas* en Laguna Grande y Miguel Alemán. Se puede encontrar en el Apéndice E, una discusión detallada sobre los métodos y ubicaciones de muestreo.

Además, se utilizó la fotografía de repetición para documentar varios sitios poco antes, durante y seis meses después del flujo pulso. Ver Apéndice F para los métodos utilizados de fotografía de repetición.

Transectos de plántulas (áreas no preparadas)

No se realizaron acciones de manejo antes de las descargas de flujos ambientales en sitios no preparados en el área de inundación del Río Colorado donde se establecieron los transectos de plántulas. El establecimiento de plántulas de árboles y los factores ambientales se monitorearon en las zonas 1-5 a lo largo de 21 transectos orientados perpendicularmente al canal principal (en lo sucesivo “transectos de plántulas”). Los transectos fueron monitoreados antes (marzo) y después (mayo) del flujo pulso del 2014 y otra vez en junio y octubre del 2015. Además, se establecieron 34 parcelas de “largo plazo” en octubre del 2014 a lo largo de los transectos en los que había plántulas y se estudiaron de nuevo en mayo y octubre del 2015.

Transectos de Laguna Grande (áreas preparadas)

Para ayudar a cumplir los requerimientos para las plántulas, tales como superficies húmedas y limpias con pequeña competencia de la vegetación existente, el Sonoran Institute preparó sitios en el Área de Restauración Laguna Grande (Laguna Grande) previo a la liberación del flujo pulso. La preparación del sitio ocurrió en áreas donde se proyectaba habría inundaciones por el flujo pulso con base en un modelo hidráulico unidimensional de estado estacionario (HEC-RAS; Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, USA). Las acciones de manejo incluyeron: 1) la remoción de pino salado y cachanilla en 129 hectáreas (ha) (320 acres); 2) la excavación para reconectar tres antiguos meandros (en lo sucesivo, “meandros”) con el canal principal del Río Colorado; 3) la excavación para interconectar partes de los seis meandros remanentes; y 4) la nivelación y conformación del terreno.

En los sitios preparados de Laguna Grande, 32 transectos perpendiculares a los meandros fueron establecidos a lo largo de cinco meandros desmontados para evaluar el reclutamiento de especies de plantas y su sobrevivencia después del flujo pulso. Los transectos se monitorearon en agosto y octubre del 2014 y en mayo y octubre del 2015. Los resultados se agruparon en varias áreas de restauración dentro de la Laguna Grande: Herradura (LG1), Cori (LG2), y CILA (LG3) (Ilustración 5-2).



Ilustración 5-2. Ubicación de transectos en las áreas de restauración preparadas en el Área de Restauración de Laguna Grande: Herradura (LG1), Cori (LG2) y CILA (LG3).

Áreas de restauración manejadas y plantadas (Laguna Grande y Miguel Alemán)

Se plantaron especies nativas en áreas de restauración que se riegan y limpian con regularidad. La preparación en el sitio de restauración Laguna Grande incluyó la remoción de Pino Salado y Cachanilla, la nivelación del sitio y la creación de surcos (o la instalación de sistemas de riego por goteo) previo a la plantación/siembra. La preparación en el sitio de restauración Miguel Alemán incluyó la limpieza de 80 hectáreas (198 acres) de Pino Salado, la instalación de un tubo de 4.8 km (3 millas) para poder traer agua para riego del Canal Reforma, y la nivelación y conformación de 63 ha (156 acres) previos a la plantación. El monitoreo de vegetación en áreas de restauración incluyó los promedios estimados de densidad de árboles, sobrevivencia y crecimiento de árboles plantados.

Resultados

Muestreos terrestres

Este informe provee una actualización de los monitoreos de campo llevados a cabo en 2014-2015 y los resultados preliminares de dichos esfuerzos. Hacemos énfasis en que estos resultados son borradores preliminares y provisionales. Ver Apéndice E para revisar los resultados detallados.

1. Condiciones antes y después del flujo pulso:

a. Creación de sustratos limpios

Transectos de plántulas (áreas no preparadas):

Las zonas 2 y 3, donde predomina un canal ancho y arenoso, tuvieron el porcentaje más alto de sustrato limpio a lo largo de transectos antes y después del flujo pulso (Ilustración 5-3^a). El porcentaje promedio de transectos donde se presentó un sustrato limpio cambió muy poco como resultado del flujo pulso, y disminuyó ligeramente en cuatro o cinco zonas (Ilustración 5-3a), aunque las diferencias del antes contra el después no fueron significativas estadísticamente. Podría haber pequeñas diferencias como resultado de una combinación de cambios debido a la erosión y deposición asociados con el flujo pulso,

el crecimiento de la vegetación existente y la nueva vegetación recientemente establecida entre marzo y mayo, la presencia de áreas inundadas después del flujo pulso y el error de muestreo (ver Apéndice E para métodos de estimación de suelo limpio).

Transectos Laguna Grande (áreas preparadas):

El porcentaje promedio de sustrato limpio a lo largo de los transectos excedió el 90% en todos los sitios de Laguna Grande: Herradura (LG1), Cori (LG2) y CILA (LG3) (Ilustración 5-3b). A estos sitios se les removió parte o toda la vegetación preexistente (la vegetación nativa deseada no se retiró).

Comparación de superficies limpias:

Los sitios de restauración preparados tuvieron un porcentaje mucho más alto de cobertura de sustrato limpio que los sitios sin preparar tanto antes como después del flujo pulso. Esto se debe a la limpieza del Pino Salado y la Cachanilla a lo largo de los meandros previo a la descarga del flujo pulso.

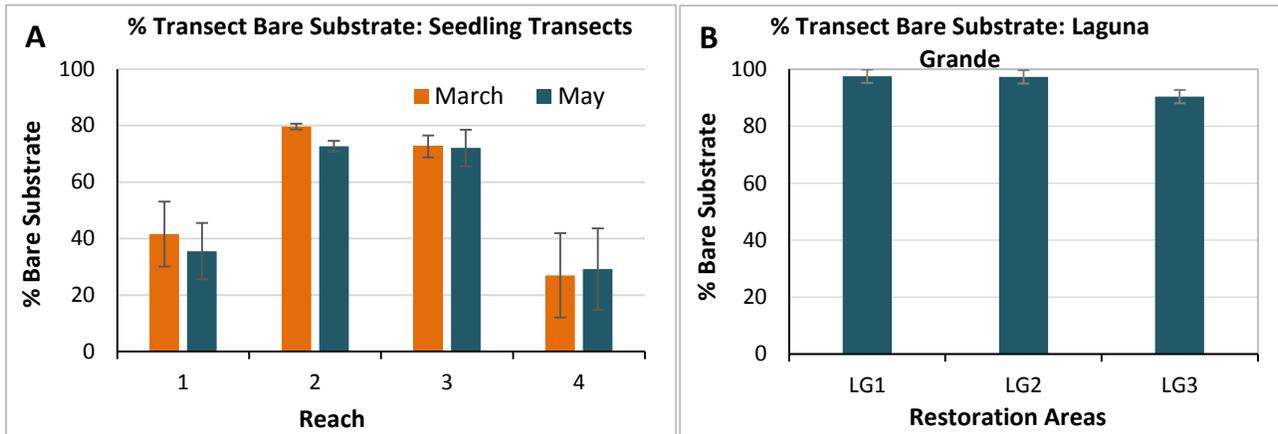


Ilustración 5-3 A. El porcentaje promedio de transectos con sustrato limpio antes (marzo) y después (mayo) del flujo pulso del 2014 a lo largo de los transectos de plántulas sin preparar. **B.** El porcentaje promedio de cobertura de transectos con sustrato limpio en áreas preparadas (extracto de los datos de mayo del 2015, y asumiendo que son representativos de la cobertura de sustrato limpio después de la limpieza de marzo del 2014).

b. Salinidad en el Suelo

Transectos de plántulas (áreas no preparadas):

La salinidad en el suelo puede limitar la germinación y crecimiento de las especies nativas, riparias; se utilizan 8 dS/m como un nivel de tolerancia máxima para especies riparias méxicas basados en estudios previos (Shafroth et al., 2008; Glenn and Nagler, 2005). En las cuatro zonas, el 75-100% de las muestras de suelo de marzo (antes del flujo pulso) tenían valores de salinidad dentro del rango apropiado para las especies riparias (Ilustración 5-4a). Sin embargo, la salinidad de la superficie del suelo variaba mucho en las zonas 1 y 4 donde pudo haber sido un factor limitante en algunas áreas dentro de estas zonas. Todas las muestras de suelo de mayo (después del flujo pulso) tuvieron un nivel de salinidad menor al nivel de 8 dS/m, y casi todos estaban por debajo de 4 dS/m. para las zonas 1 y 4, la disminución de salinidad en el suelo después del flujo pulso no fue significativa debido a la alta variabilidad de los niveles de salinidad. El incremento de la salinidad en las zonas 2 y 3 fue significativo, pero es probable que no a un nivel que limite el crecimiento de Álamos y Sauces.

Desafortunadamente no se tomaron muestras de suelo de las parcelas de plántulas de Álamos o Sauces (sólo hubo una parcela y no se tomaron muestras). La salinidad de los suelos en las parcelas de plántulas de Pino Salado y Batamote fue más alta en la Zona 4 (Ilustración 5-4b). En general, la salinidad de los suelos en las parcelas de las plántulas puede ser más alta que las muestras tomadas previamente a lo largo de los transectos debido al hecho de que las muestras de las parcelas de plántulas fueron obtenidas en octubre cuando se establecieron las parcelas; la evaporación durante la temporada de crecimiento pudo haber llevado a un nivel de salinidad elevado. La textura del suelo en áreas donde se establecieron las plántulas puede que causen también un alto nivel de salinidad en estas las parcelas.

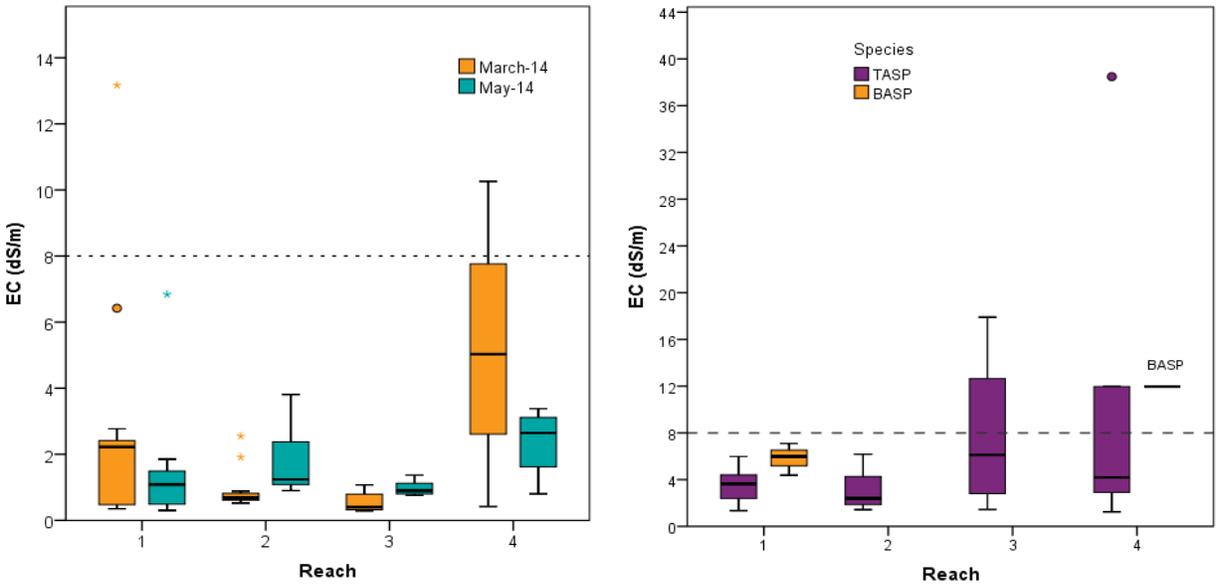


Ilustración 5-4a (izquierda). El diagrama de caja de la salinidad en los suelos en las zonas 1-4 antes y después del flujo pulso (marzo y mayo del 2014). La barra representa el 25-75% de valores de salinidad en los suelos para cada zona, la línea negra es la media, los puntos representan lo atípico y los asteriscos los atípicos extremos (valores 3 veces más altos que la altura de la barra). Las pestañas muestran el nivel más bajo y alto de los valores muestreados y la línea punteada indica el límite de tolerancia de salinidad para árboles y arbustos riparios.

Ilustración 5-4b (derecha). Salinidad en los suelos superficiales en octubre de 2014 en las parcelas de plántulas a largo plazo (n=31) en las zonas 1-4. Nota: la ilustración solo contiene muestras de parcelas de plántulas con Pino Salado y Bataonte (no hay Álamos o Sauces).

Transectos de Laguna Grande (áreas preparadas):

Los resultados de salinidad en los suelos en Laguna Grande están limitados por el número pequeño de muestras de suelo superficial tomadas antes (marzo 2014) y después (octubre 2014) del flujo pulso. Adicionalmente, las muestras no se tomaron a lo largo de los transectos de plántulas, lo que hace difícil determinar si se afectó el reclutamiento de las plántulas por la salinidad de los suelos. En general, los suelos superficiales a lo largo de los sitios de restauración fueron altamente variables (Ilustración 5-5), lo que significa que las áreas propicias para el reclutamiento de las plántulas variaron enormemente de lugar a lugar. El sitio de la Herradura (LG1) parece haber tenido el nivel de salinidad en suelos superficiales más alto de todas las áreas de restauración, y pudo haber inhibido la germinación de semillas ahí. Las muestras sugieren que en gran parte de las áreas, la salinidad en el suelo disminuyó de marzo a octubre del 2014, consistente con el lavado de sales que pudo resultar de las entregas de los

flujos base y pulso en las áreas de restauración. Es de notarse también que se observó el establecimiento de plántulas nativas y no nativas en áreas que eran conocidas por sus niveles altos de salinidad previos a las entregas de los flujos pulso y base (sal visible en superficie); esto sugiere que 1) los flujos redujeron la salinidad y 2) puede que las plántulas se hayan establecido en lugares con un nivel de salinidad más alto que el tolerable de acuerdo a la literatura (8 dS/m). Muchos árboles existentes (remanentes) de Álamo y Sauce en los sitios de restauración actualmente sobreviven en áreas con suelos superficiales de salinidad alta.

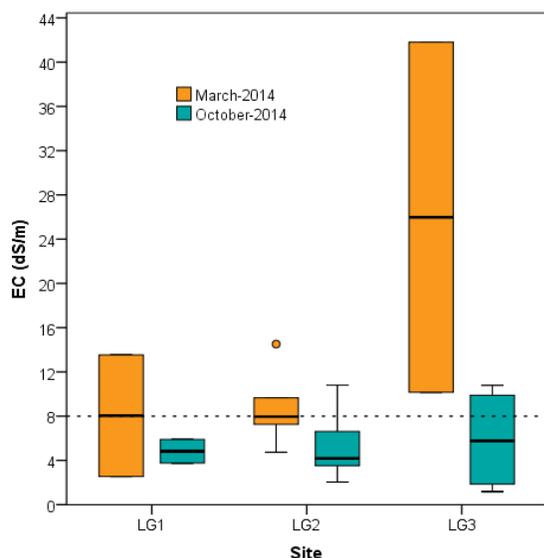


Ilustración 5-5. Salinidad de suelo superficial en las áreas de restauración preparadas: LG1 (Herradura), LG2 (Cori) y LG3 (CILA).

Comparación de salinidad en suelo:

La salinidad del suelo en las áreas preparadas de la Zona 4 fue similar a la de las áreas sin preparar, que en general fue más alta que la salinidad en las zonas 1-3. La salinidad alta en los suelos superficiales de las áreas preparadas y sin preparar de la Zona 4 probablemente se deba a la presencia perene de agua salada estancada (de la infiltración de agua subterránea) en algunos meandros y gran parte del canal principal del río. A diferencia del canal de la Zona 1, el canal y los meandros de la Zona 4 casi nunca se desaguaron con agua de baja salinidad antes de las entregas de los flujos ambientales del 2014, mientras que la Zona 1 recibe flujos incidentales de la Presa Morelos más regularmente. Además, debido a la baja profundidad de la capa de agua subterránea en la Zona 4, las sales se mueven hacia los suelos superficiales a través del ascenso capilar, evaporación en la superficie y la persistente ausencia de flujos de agua dulce. Estos factores probablemente causaron la salinidad elevada a lo largo de gran parte del área de inundación de la Zona 4; los flujos ambientales son críticos para el manejo de la salinidad del suelo para sustentar el hábitat nativo ripario existente y restaurado en esta área.

Tanto en los sitios preparados como en los no preparados, la salinidad del suelo en algunos casos se incrementó después de los flujos ambientales, que pudo ser debido al incremento del nivel del agua subterránea y al movimiento de las sales al suelo superficial a través del ascenso capilar y la evaporación. En otros casos, la salinidad del suelo superficial disminuyó (aunque no significativamente), tal como en las zonas 1 y 4 y en las muestras de tierra superficial en sitios de restauración. Las diferencias en la salinidad de l suelo superficial de marzo a mayo pudiera ser función de 1) el nivel de

salinidad previo al flujo pulso (si los niveles de salinidad eran extremadamente altos, es más probable que disminuyan), y 2) la proximidad de la muestra a la zona de inundación. Si el sitio de muestreo se inundó, entonces la salinidad del suelo superficial pudo haber disminuido; si no fue inundado pero se humedeció con el incremento del agua subterránea a la superficie, entonces la salinidad del suelo superficial pudo haberse incrementado. La resolución de la delimitación de la zona de inundación es en muchos casos insuficiente para valorar si las muestras estuvieron en la zona de inundación de agua superficial o en zonas humedecidas por las aguas subterráneas.

c. Disponibilidad de semillas

Transectos de plántulas (áreas sin preparar):

El Álamo tuvo una ventana de dispersión de semilla más corto que lo observado para el Sauce; la dispersión de semillas de Álamo terminó a principios de junio del 2014, mientras que se observó que la dispersión de semillas de Sauce continuó hasta agosto del 2014 (aunque nuestro periodo de monitoreo oficial terminó el 18 de junio) (Ilustración 5-6). Debido a la ausencia de árboles maduros de Álamos y Sauces en gran parte de las zonas 2 y 3, la dispersión de semillas se ausentó o se observó por un periodo de tiempo más corto de lo normal para estas especies y áreas. Similar al sauce, las especies de *Baccharis* dispersaron semillas a lo largo del periodo de monitoreo. El Pino Salado dispersó activamente semillas durante nuestro periodo de monitoreo en todas las zonas, una característica que contribuyó a un alto porcentaje de establecimiento a lo largo del área de estudio.

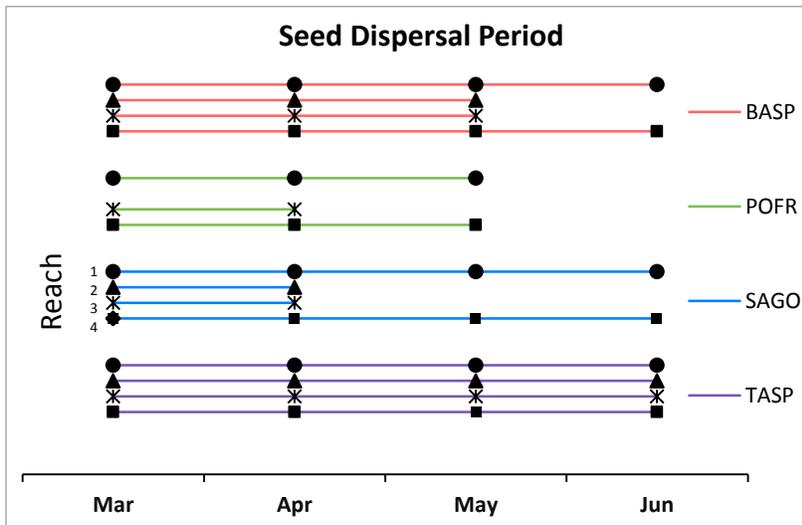


Ilustración 5-6. El periodo de dispersión de semillas por especie y zona (durante el periodo de monitoreo). La Zona 1 es representada por círculos; la Zona 2 por triángulos; la Zona 3 por asteriscos; la Zona 4 por cuadros. POFR = Álamo (*Populus fremontii*); SAGO = Sauce (*Salix gooddingii*); TASP = Pino Salado (especies de *Tamarix*); BASP = Batamote (especies de *Baccharis*). R1-5 = zonas 1-5. Sitios de restauración: LG1 = Herradura; LG2 = Cori; LG3 = Sitio CILA. Nótese la diferencia de escalas en el eje de las y entre el 2014 y 2015.

Transectos de Laguna Grande (áreas preparadas):

En general, las semillas de Álamo, Sauce y Batamote fueron muy abundantes en las áreas preparadas de Laguna Grande debido a la presencia de árboles maduros/arbustos existentes (remanentes) al igual que árboles/arbustos maduros que fueron plantados. El Sitio CILA tuvo la disponibilidad más alta de semillas

para árboles nativos (es el área de restauración más desarrollada), seguida de Cori, seguida de Herradura (LG1). El sitio de la Herradura tiene una cantidad pequeña de Sauces existentes en las áreas de los meandros, y un puñado de Álamos, Sauces y Batamote a lo largo del canal del río; la fuente limitada de semillas pudo haber limitado el establecimiento de especies nativas en esta área. La semilla del Pino Salado estuvo altamente disponible en todos los sitios durante la temporada de crecimiento.

d. Niveles de agua subterránea

Áreas sin preparar

La profundidad máxima del agua subterránea de marzo a octubre del 2014 nos provee un estimado de las condiciones más limitantes del agua subterránea durante la temporada de crecimiento para la vegetación existente y recién establecida. Para esta evaluación, se utilizaron mediciones de agua subterránea de los piezómetros que estaban a no más de 200 metros del transecto de plántulas. Estamos trabajando en calcular los niveles de agua subterránea en las ubicaciones exactas de las plántulas, pero estos cálculos no estuvieron disponibles al momento de redacción de este informe. Por lo tanto, los niveles de agua subterránea que se resumen aquí abajo (Ilustración 5-7) no proveen una evaluación acertada de los niveles de agua subterránea en el área de establecimiento de plántulas debido a la distancia del transecto al piezómetro. Los niveles de agua subterránea en los transectos de plántulas son probablemente menos profundos que los niveles presentados debido a la cercanía al cauce del río y a las ubicaciones de los piezómetros. Sin embargo, la comparación relativa de la profundidad de agua subterránea de zona a zona probablemente tenga más significado. En la primer temporada de crecimiento (mayo-octubre 2014), la Zona 3 tuvo el nivel máximo de profundidad de todas las zonas (con alta variabilidad entre los transectos), seguidas de la Zona 2 (Ilustración 5-7). La Zona 4 tuvo en general el nivel de profundidad de agua subterránea menor (valor medio de 4 m), mientras que en la Zona 1 el valor medio fue de 5 m.

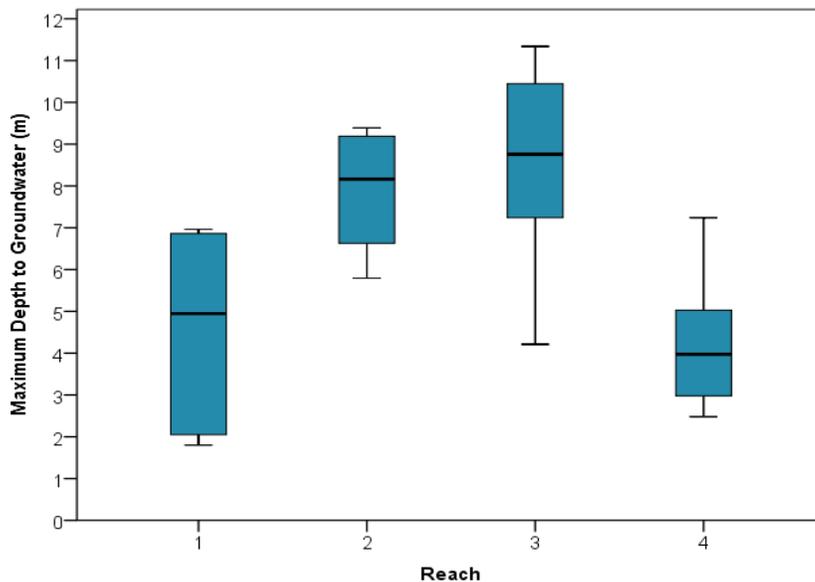


Ilustración 5-7. El diagrama de caja de la profundidad máxima del agua subterránea de marzo a octubre del 2014 en los piezómetros ubicados a 200 m o menos de los transectos de plántulas en las zonas 1-4.

La caja representa el 25-75% de los valores de profundidad de agua subterránea en cada zona, la línea negra es el punto medio, y las pestañas muestran los valores de las muestras más bajos y altos.

Áreas preparadas

En general, los flujos base parecieron ser benéficos en las áreas de restauración (Laguna Grande y Miguel Alemán). Los beneficios de los flujos base en las áreas del Zona 4 fuera del área de Laguna Grande no se pueden evaluar sin tener más detalles sobre el tiempo y los puntos de entrega. Los beneficios de los flujos base en el Zona 1 no se pueden determinar sin información detallada del tiempo, cantidad y puntos de entrega.

4. Comparación general de las condiciones

El área más favorable para el reclutamiento nativo fue en los sitios preparados de la Zona 4, donde los requerimientos para el establecimiento de plántulas se cumplieron en la mayoría de los sitios debido a las acciones de manejo implementadas antes, durante y después del flujo pulso (incluyendo la asignación de flujos base). Las áreas no preparadas más favorables para el reclutamiento nativo ocurrieron en las zonas 1 y 4. La Zona 3 tuvo las condiciones menos favorables, seguido de la Zona 2 (Cuadro 5-1).

Cuadro 5-1. Estimaciones cualitativas de qué tan bien se cumplieron las condiciones para el reclutamiento de vegetación nativa riparia en cada zona y con diferentes acciones de manejo en la Zona 4 después del flujo pulso.

Componente	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4 (sin preparar)	Zona 4 (preparado)
Disponibilidad de semilla	buena	regular	mala	buena	excelente
Sustrato limpio	regular	buena	buena	mala	excelente
Humedad continua	buena	mala	mala	buena	buena
Baja competencia	mala	buena	buena	mala	buena
Baja salinidad en suelo	buena	buena	regular	mala - regular	mala - regular
Libre de Herbivorismo/pastoreo	buena	buena	buena	buena	buena

1. Reclutamiento de plántulas después de la 1era y 2da temporadas de crecimiento

Transectos de Plántulas (áreas no preparadas):

Al final de la temporada de crecimiento del 2014 (octubre), se presentó una baja densidad de Álamo y una alta densidad de plántulas de Sauce en la Zona 1 (Ilustración 5-8a; Cuadro A-1 en el Apéndice E). Las plántulas de *Baccharis* fueron algo densas tanto en la Zona 1 y en la 4, y la densidad del Pino Salado también fue más alta en las zonas 1 y 4. No hubo establecimiento de especies nativas en las zonas 2, 3 o 5. La distribución de plántulas tuvo irregularidades a lo largo de los transectos.

Los cambios de densidad de plántulas entre octubre 2014 y octubre 2015 (Cuadro 5-2) fueron altamente variables por parcela y por especie. Para el final de la segunda temporada de crecimiento en octubre del 2015, la densidad de plántulas de todas las especies muestreadas fue menos de 1 individuo/m² en todas las zonas (Ilustración 5-8b; Cuadro A-2 del Apéndice E). La densidad de plántulas de Álamo permaneció igual desde el 2014 hasta el 2015 en el Zona 1 (Cuadro 5-2). El bajo porcentaje de sobrevivencia del Sauce del 2014 al 2015 (1%) pudo haber sido resultado de que las plántulas de Sauce no pudieron

competir con los carrizos invasivos *Arundo donax*, *Phragmites australis*, y otras especies herbáceas. Las nuevas plántulas de *Baccharis* y Pino Salado germinaron en el 2015, lo que significó que aunque en el transcurso del 2014 probablemente el porcentaje de sobrevivencia de las plántulas era bajo, las nuevas plántulas pudieron haber elevado los números de densidad en el 2015. En la Zona 4, las plántulas de *Baccharis* no sobrevivieron al final de la segunda temporada de crecimiento, probablemente debido a la falta de humedad y/o competencia con otras especies. Las densidades de Pino Salado disminuyeron en todas las zonas, siendo la reducción más grande la observada en las zonas 1 y 4. En la Zona 2, se establecieron nuevas plántulas de Pino Salado en el 2015, que aminoraron la reducción de densidad entre los dos años, ya que no distinguimos entre las plántulas del primer año con las del segundo año durante los muestreos de transectos de plántulas. En la Zona 3, el Pino Salado tuvo un establecimiento bajo en el 2014 pero un porcentaje de sobrevivencia más alto que otras zonas del primer al segundo año.

Cuadro 5-2. Comparación de la densidad de plántulas en las parcelas entre octubre 2014 y octubre 2015 (los plántulas del 2015/plántulas en 2014*100). *Nota, este cuadro muestra información sólo de las parcelas con plántulas (la N es baja) y no contabiliza los transectos sin plántulas. Las densidades proporcionadas en las Ilustraciones 5-6a y b son promedios entre todos los transectos dentro de una zona que incluye transectos con cero plántulas (lo que reduce la densidad general).

Especie	Zona			
	1	2	3	4
<i>Baccharis</i> spp.	100%, N=3			0%, N=2
<i>Populus fremontii</i>	100%, N=1			
<i>Salix gooddingii</i>	1%, N=1			
<i>Tamarix</i> spp.	18%, N=9	37%, N=8	43%, N=10	19%, N=5

Transectos de Laguna Grande (áreas preparadas):

El establecimiento de plántulas varió a lo largo de las áreas de restauración preparadas en la primer temporada de crecimiento (Ilustración 5-8a; Cuadro A-3 en el Apéndice E). En particular, el establecimiento de especies nativas fue muy bajo en el sitio de la Herradura (LG1). Aunque el sitio se limpió de Pino Salado y Cachanilla antes del flujo pulso, no se inundó durante las entregas de flujo pulso. Además, existían muy pocas fuentes de semillas cercanas (i.e., árboles maduros o arbustos), especialmente para el Álamo y el Batamote, y los niveles de salinidad del suelo estuvieron altos en el sitio, lo que pudo haber inhibido aún más el establecimiento de las especies nativas. El establecimiento más alto de especies nativas en las áreas de restauración fue en los meandros del Sitio CILA (LG3), probablemente debido al alto número de árboles riparios nativos maduros que dispersaban semillas de las áreas de restauración adyacentes, al nivel de salinidad del suelo relativamente bajo, y a las entregas continuas de flujos base al área.

Similar a los transectos del corredor del río, la densidad de plántulas se redujo del 2014 al 2015 a lo largo de los transectos de Laguna Grande debido a la mortalidad de las plántulas (Ilustración 5-8b; Cuadro A-4 del Apéndice E). Los porcentajes de sobrevivencia fueron 29%, 30%, 15%, y 31% para las plántulas de Álamo, Sauce, Batamote y Pino Salado respectivamente, desde octubre 2014 a 2015 (se pudieron determinar los porcentajes debido a que distinguimos entre los germinantes del 2014 y 2015 en los muestreos de los transectos de Laguna Grande). La zona total de plántulas se redujo en un 11% del 2014 al 2015 en las áreas preparadas de Laguna Grande.

Comparación de establecimiento de plántulas en sitios preparados y no preparados:

Comparamos la frecuencia de las plántulas en el 2014 y 2015 entre los sitios preparados y no preparados para evaluar la efectividad de la preparación del suelo y las entregas de los flujos base para promover el reclutamiento de plántulas nativas. Las comparaciones directas de densidad entre los transectos de Laguna Grande y los transectos de plántulas en el corredor del río están limitadas debido a las diferencias en los métodos de monitoreo. Específicamente, es probable que se esté subestimando la densidad de plantas en las áreas preparadas de Laguna Grande (ver Apéndice E para la explicación de los métodos de estimación); sin embargo, en la mayoría de los casos la densidad de plántulas en las áreas preparadas de Laguna Grande sigue siendo más alta que en las áreas no preparadas.

La frecuencia en la presencia de plántulas a lo largo de los transectos es una métrica directamente comparable entre los sitios preparados y no preparados. En octubre del 2014, había una frecuencia alta de especies nativas (Álamo, Sauce y Batamote) en las áreas sin preparar de la Zona 1 y las áreas preparadas de Laguna Grande (Ilustración 5-9a). La baja frecuencia de plántulas de Pino Salado, Álamo y Sauce en transectos no preparados de la Zona 4 se debe probablemente a la alta densidad de Carrizo Gigante (*Arundo donax*), Carrizo (*Phragmites australis*), Pino Salado y Cachanilla a lo largo de la mayor parte del cauce. Aunque algunas plantas de *Baccharis* se establecieron en la Zona 4, no sobrevivieron. Hubo nuevo reclutamiento en el 2015, probablemente como resultado de áreas más abiertas causadas por incendios y una variación de humedad en el suelo. Por lo tanto, la frecuencia del Pino Salado y el *Baccharis* se incrementó en los sitios sin preparar de la Zona 4 durante el segundo año (2015) (ilustración 5-9b).

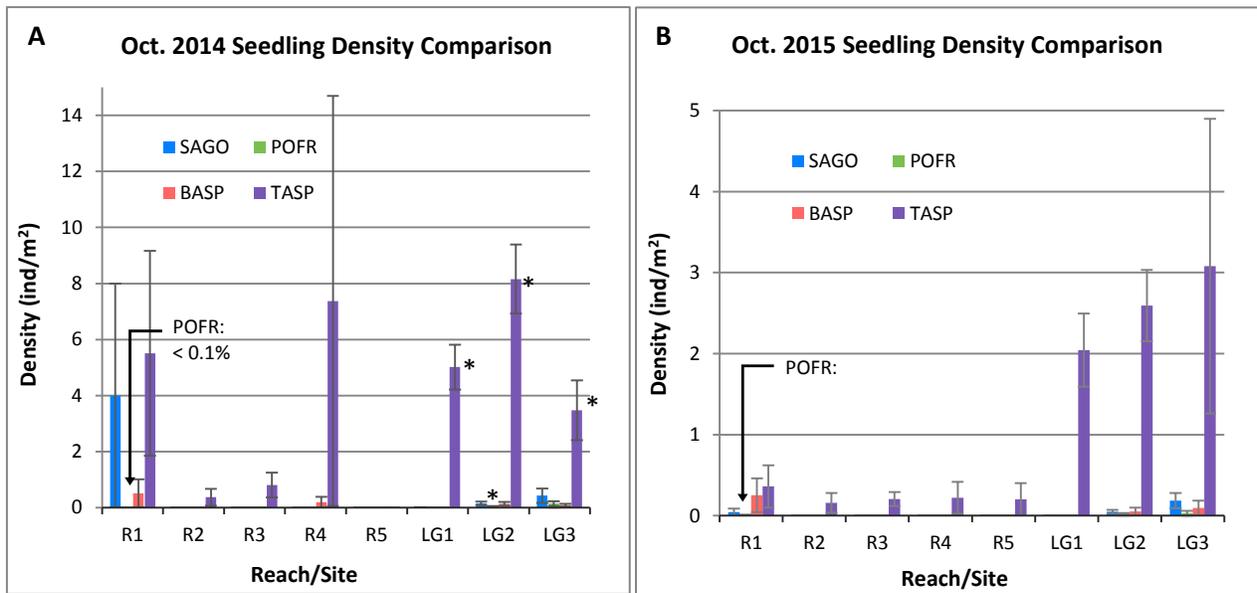
En las áreas preparadas de Laguna Grande, el establecimiento de Sauces fue particularmente prevalente en octubre del 2014 (Ilustración 5-9a). Esto podría ser debido a la tardanza de la recesión del flujo base (junio – agosto 2014), que de hecho causó mayores niveles de inundación que el flujo pulso en Laguna Grande. Los Sauces maduros aún estaban dispersando semillas en agosto del 2014, mientras que los Álamos dejaron de esparcir semilla a finales de mayo, que fue antes de las inundaciones significativas del flujo base. La frecuencia de especies nativas disminuyó del 2014 al 2015 en las áreas preparadas, siendo el rango de la frecuencia en el 2015 de 0-40% (Ilustración 5-9b). El Pino Salado se presentó en la mayoría de los transectos de Laguna Grande, con las altas frecuencias manteniéndose en el 2015.

Discusión

Las densidades combinadas de Álamo y Sauce en el 2014 y 2015 (Ilustraciones 5-8a y 5-8b) sugieren que los flujos ambientales del Acta 319 contribuyeron al establecimiento exitoso de plántulas nativas riparias en áreas sin preparar de la Zona 1 y áreas preparadas en la Zona 4. La densidad de plántulas observadas y los porcentajes de sobrevivencia de Álamo, Sauce y Pino Salado a lo largo de los transectos de plántulas y de los sitios de restauración, son comparables a los que se reportaron en los muestreos de establecimiento de plántulas llevados a cabo a lo largo de los ríos del oeste de Estados Unidos (Cooper et. al., 1999; Cooper y Andersern, 2012); las densidades son típicamente bajas para las especies de Álamo y Sauce en el primer año de crecimiento, y la mortalidad de los plántulas año con año es típicamente mayor al 50%.

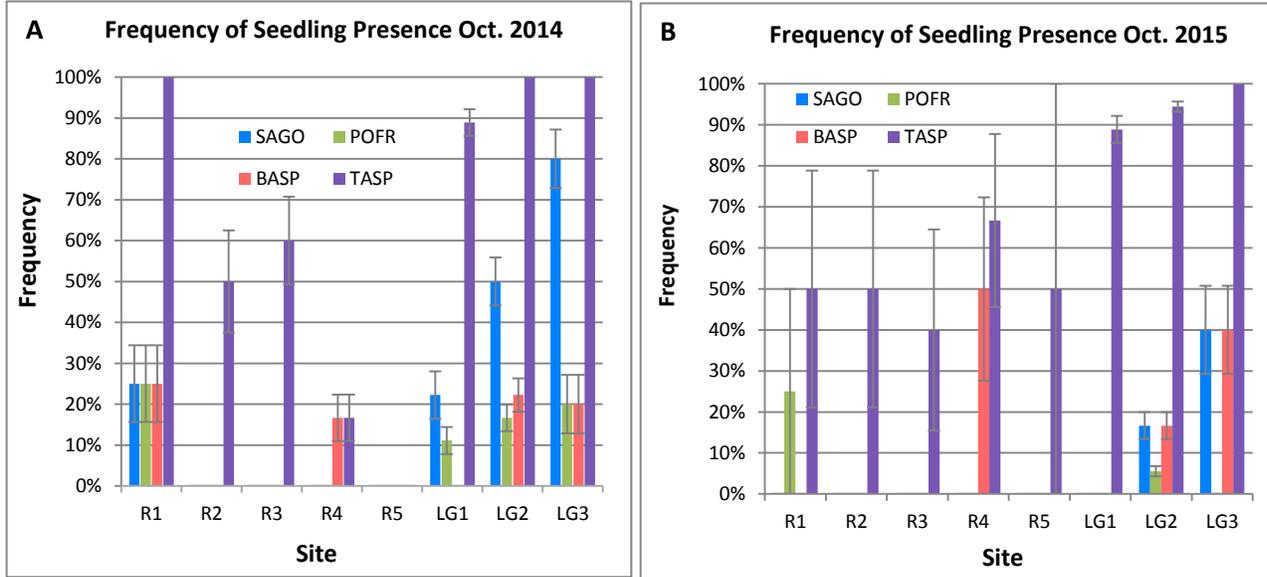
Adicionalmente, es muy importante el proveer contexto en tamaños relativos e interacciones de competencia entre las especies nativas y pioneras no nativas. Aunque el Álamo y el Sauce se establecieron en densidades más bajas que el Pino Salado no nativo a lo largo del corredor del río y en áreas de restauración preparadas, después de 1 a 2 años de crecimiento, las especies nativas de árboles riparios pueden competir y vencer al Pino Salado de alta densidad con un crecimiento rápido en altura y copa (Sher et. al., 2002). Además, la composición del hábitat ripario con una cobertura vegetal nativa relativamente pequeña (20% - 40%) mezclándose con la cobertura de especies no nativas se considera como un hábitat de alta calidad para muchas especies de aves (Van Riper et. al., 2008).

Los resultados de frecuencia y densidad de las plántulas dan sustento a los cálculos derivados del modelo de reclutamiento de plántulas (Ilustración 5-1; Cuadro 5-1): las especies de plantas nativas riparias se establecieron con las frecuencias y densidades más altas de las áreas sin preparar de la Zona 1 y las áreas de restauración preparadas de la Zona 4 (con excepción del LG1, la Herradura). Este resultado no es tan sorprendente dada la falta de disponibilidad de semillas y niveles profundos del agua subterránea en las zonas 2 y 3. Las acciones de manejo, incluyendo la limpieza de alguna de la vegetación existente y la provisión de flujos base a las áreas de restauración de la Zona 4, fueron exitosas en promover el establecimiento de especies nativas, comparadas con áreas no manejadas.



Ilustraciones 5-8a y 5-8b. La densidad de parcelas de plántulas a largo plazo en las zonas 1-5 y parcelas de 4x5 metros en los sitios de restauración LG1-3 en octubre 2014 (izquierda) y 2015 (derecha). POFR = Álamo (*Populus fremontii*); SAGO = Sauce (*Salix gooddingii*); TASP = Pino Salado (especies de *Tamarix*); BASP = Batamote (especies de *Baccharis*). A1-5 = zonas 1-5. Sitios de Restauración: LG1 = Herradura; LG2 = Cori; LG3 = Sitio CILA.

*indica "mayor que" debido a que había una categoría de mayor que 100 en el conteo de parcelas para el monitoreo de transectos en Laguna Grande. Esto ocurrió para TASP en las tres áreas de restauración, y para BASP en LG2 en el 2014.



Ilustraciones 5-9a y 5-9b. La frecuencia de ocurrencia de plántulas en los transectos de 1 metro de diámetro en las zonas de río (A1 y A5) y en las áreas preparadas de Laguna Grande (LG1-LG3) en octubre del 2014 (izquierda) y 2015 (derecha). POFR = Álamo (*Populus fremontii*); SAGO = Sauce (*Salix gooddingii*); TASP = Pino Salado (especies de *Tamarix*); BASP = Batamote (especies de *Baccharis*). A1-5 = zonas 1-5. Sitios de Restauración: LG1 = Herradura; LG2 = Cori; LG3 = Sitio CILA.

Densidad y Supervivencia en las Áreas de Restauración Plantadas en Laguna Grande y Miguel Alemán:
Laguna Grande:

En el 2013, se plantaron 23,157 árboles en 14 ha (35 acres) de terreno preparado en el polígono del Sitio CILA. En el 2014, se plantaron 59,177 árboles en 24.5 ha (60.5 acres) de terreno preparado en el polígono del Sitio CILA. Para noviembre del 2015, se plantaron 24,176 árboles en 15.9 ha (39.3 acres) de terreno preparado en el polígono Cori en el sitio de la Herradura. Las especies plantadas en 2013-2015 incluyen álamo, sauce, sauce coyote y mezquites. Se utilizó la hidrosemilla en zonas adicionales para el álamo, sauce y varias especies de plantas nativas en Laguna Grande del 2013-2015. Los sitios de plantación e hidrosembrado se regaron utilizando la irrigación por inundación en surcos o riego por goteo, y se podaban de 1 a 2 veces por año. Desde el 2013 al 2015, la densidad de árboles promedio fue de 1995/ha (805/acre), y el promedio de sobrevivencia fue del 89% (Cuadro 5-3).

Miguel Alemán

Se empezó a plantar en el sitio de Miguel Alemán en el 2014, con un total de 16,092 árboles en 7.5 ha (18.6 acres). En el 2015, se plantaron 24,591 árboles en 30 ha (74.1 acres). Las especies plantadas incluyen Álamo, Sauce, Mezquites y Palo Verde. Desde el 2014-2015, la densidad promedio de árboles plantados fue de 1083/ha (439/acre) y la sobrevivencia promedio fue del 76% (Cuadro 5-4)

Cuadro 5-3. Resumen del área plantada en el Sitio de Restauración Laguna Grande del 2013-2015. *Después de 1 año de crecimiento. No se contó el hábitat de agua abierta adicional en el total de área plantada.

Año de plantación	Polígono	# de Ha	# de Acres	Densidad Promedio (arb/ha; arb/acre)	% Supervivencia *	Especies Plantadas
2013	CILA	14	35	1798/ha; 719/acre	96%	<i>Álamo, Sauce, Sauce Coyote, Mezquites</i>
2014	CILA	24.5	60.5	2415/ha; 978/acre	85%	
2015	Cori/CILA	15.9	39.3	1520/ha; 615/acre	85-90%	
Total/ Promedio		54.4	134.8	1995/ha; 805/acre	89%	

Cuadro 5-4. Resumen del área plantada en el Sitio de Restauración Miguel Alemán del 2014-2015. *Después de 1 año de crecimiento.

Año de plantación	# de Ha	# de Acres	Densidad Promedio (arb/ha; arb/acre)	% Supervivencia*	Especies Plantadas
2014	7.5	18.6	2146/ha; 865/acre	71	<i>Álamo, Sauce, Mezquites, Palo Verde</i>
2015	30	74.1	820/ha; 332/acre	81	
Total/ Promedio	37.5	92.6	1083/ha; 439/acre	76	

Fotografía en Repetición (ver Apéndice F)

Los efectos visibles del flujo pulso se vieron influenciados fuertemente por las condiciones preexistentes de vegetación y agua. Las áreas con agua superficial antes del pulso, que fueron preparadas mecánicamente (partes de la Zona 4) tenían vegetación dispersa, previo al pulso, como resultado de las actividades de limpieza. Seis meses después del pulso, esas áreas mostraron un reclutamiento significativo de nueva vegetación riparia, principalmente de especies nativas, en una banda de aproximadamente 2 m de ancho a lo largo del agua. Esas áreas también mostraron incrementos en altura y volumen de las plantas preexistentes.

Las áreas que tenían agua estancada o fluyendo antes del pulso y no contaban con una preparación mecánica (Zona 1 y partes de la Zona 4) también tenían vegetación riparia abundante antes del pulso, con especies nativas y no nativas. Después del pulso hubo un cambio mínimo o nulo en la composición o densidad de la vegetación, pero algunas plantas individuales tuvieron más altura y volumen de follaje. Las áreas donde el canal estaba seco antes del pulso (zonas 2 y 3) tenían vegetación riparia dispersa dominada por especies no nativas, y después del pulso hubo pequeños incrementos en altura y volumen de las plantas preexistentes.

No hubo un cambio visible en la morfología del canal a excepción de la fotografía en el punto 12. En ese sitio, aguas arriba del final de la Zona 3, se mostró aproximadamente 1 m de erosión en una curva drástica del cauce. Esa erosión local fue notada en el análisis de respuesta geomórfica (Apéndice F, Ilustración 4-3, imágenes de la izquierda).

Efectos de los flujos base

Mayores detalles sobre las entregas de flujo base durante el año hidrológico 2015 (octubre 2014-septiembre 2015), se presentarán después de que la información se encuentre disponible. Proporcionaremos una evaluación detallada de los efectos del flujo base en la vegetación en el área de estudio, después de que esté disponible la información.

Referencias citadas

- Cooper, D.J., Merritt, D.M., Andersen, D.C., Chimner, R.A. 1999. Factors controlling the establishment of Fremont cottonwood seedlings on the upper Green River, USA. *Regulated Rivers: Research & Management* 15:419-440.
- Cooper, D.J., Andersen, D.C. 2012. Novel plant communities limit the effects of a managed flood to restore riparian forests along a large regulated river. *River Research and Applications* 28:204-215.
- Glenn, E.P., Nagler, P.L. 2005. Comparative ecophysiology of *Tamarix ramosissima* and native trees in western U.S. riparian zones. *Journal of Arid Environments* 61:419-446.
- Harper, E.B., Stella, J.C., Fremier, A.K. 2011. Global sensitivity analysis for complex ecological models: a case study of riparian cottonwood population dynamics. *Ecological Applications* 21:1225-1240.
- Hinojosa-Huerta, O., Iturrubarría-Rojas, H., Zamora-Hernández, E., Calvo-Fonseca, A. 2008. Densities, species richness and habitat relationships of avian species in the Colorado River, Mexico. *Studies in Avian Biology* 37:74-82.
- Mahoney J.M., Rood, S.B. 1998. Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment - An integrative model. *Wetlands* 18: 634-645.
- Shafroth, P.B., Auble, G.T., Stromberg, J.C., Patten, D.T. 1998. Establishment of woody riparian vegetation in relation to annual patterns of streamflow, Bill Williams River, Arizona. *Wetlands* 18: 577-590.
- Shafroth, P.B., V.B. Beauchamp, M.K. Briggs, K. Lair, M.L. Scott, and A.A. Sher. 2008. Planning riparian restoration in the context of *Tamarix* control in western North America. *Restoration Ecology* 16:97-112.
- Sher, A.A., Marshall, D.L., Taylor, J.P. 2002. Establishment patterns of native *Populus* and *Salix* in the presence of invasive nonnative *Tamarix*. *Ecological Applications* 12:760-772.
- Van Riper, C. III, Paxton, K.L., O'Brien, C., Shafroth, P.B., McGrath, L.J. 2008. Rethinking avian responses to *Tamarix* on the Lower Colorado River: A threshold hypothesis. *Restoration Ecology* 16(1): 155-167.

Sección 6: Respuesta de la vegetación a las técnicas de sensores remotos

Observaciones Clave:

- 1. El Flujo Pulso del 319 produjo un incremento de NDVI (“verdosidad”) del 16% a través de las zonas riparias en el 2014.**
- 2. Los incrementos del NDVI en el 2014 ocurrieron en la zona inundada por el flujo pulso al igual que en las zonas de la planicie de inundación riparia, donde el agua subterránea da sustento a la vegetación existente. En el 2015, el NDVI disminuyó a niveles del 2013.**

Introducción

Esta sección documenta los cambios en la densidad de follaje verde (verdosidad) asociado con los flujos base y pulso del Acta 319.

Las imágenes Landsat (resolución de 30 m (98 pies), en tiempo de retorno de 16 días) y las imágenes del Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) (resolución de 250 m (820 pies), tiempo de retorno de un día) se utilizaron para los análisis. Los análisis utilizaron índices de vegetación, donde las relaciones de diferentes bandas ópticas proporcionan una medida de la “verdosidad” del follaje. El Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) fue utilizado para las imágenes Landsat. Estos índices se eligieron basándose en las comparaciones anteriores de desempeño hechas en ecosistemas riparios (Nagler, et al., 2005a).

Respuesta a los Flujos Ambientales del Acta 319

El NDVI de Landsat se comparó para cada zona de río en agosto de 2013, 2014 y 2015 (Ilustración 6-2). Se eligió el mes de agosto para las comparaciones, ya que es una temporada en la que la verdosidad está casi en su máximo nivel. El NDVI estuvo más alto en el 2014 que en el 2013 para todas las zonas excepto en la Zona 4, donde el pino salado y la cachanilla habían sido removidos en los sitios de restauración previo al flujo pulso, y se hizo deshierbe adicional de terrenos en la planicie de inundación para uso en agrícola. El incremento general del NDVI del 2013 al 2014 fue del 16% ($P < 0.001$). La verdosidad más intensa del 2014 tomó lugar en la zona de inundación, pero los incrementos en NDVI también ocurrieron fuera de la zona de inundación, indicando que el flujo pulso probablemente también mejoró las condiciones del agua subterránea en esas áreas. El NDVI regresó a sus niveles más bajos en el 2015, y en la mayoría de las zonas los valores de 2015 fueron menores a los observados en 2013.

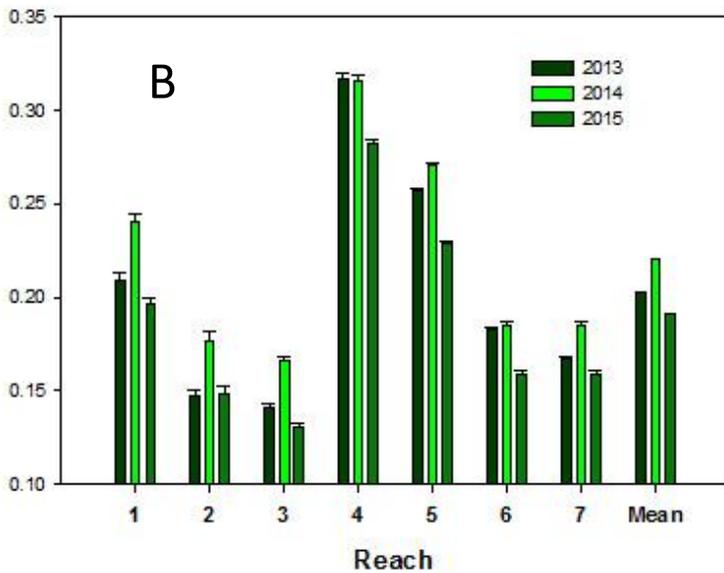
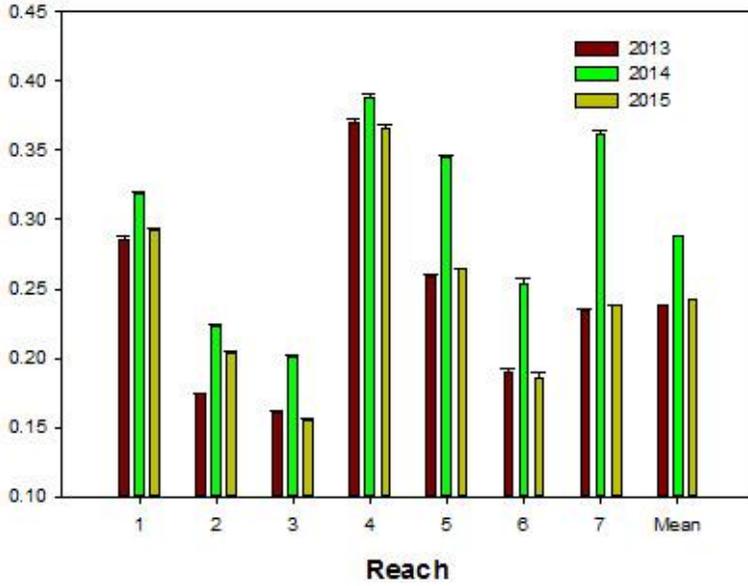


Ilustración 6-2ª (superior). El NDVI en la zona riparia, por zona del río, en agosto de 2013, 2014 y 2015.

Ilustración 6-2b (inferior). El NDVI en el área de inundación, por zona del río, en agosto de 2013, 2014 y 2015.

En la zona de inundación (ilustración 6-2b) el NDVI en el 2015 regresó a niveles aproximados a los del 2013 en todos los zonas excepto en las zonas 2 y 4. En la Zona 2 los valores de 2015 fueron más bajos que en el 2014, pero más altos que en el 2013. En la Zona 4, los valores fueron iguales en 2014 y 2015, los cuales fueron mayores que los valores de 2013.

La ilustración 6-3 muestra las áreas inundadas durante el flujo pulso y las diferencias en NDVI entre agosto del 2013 (previo al flujo pulso) y agosto del 2014 (posterior al flujo pulso), con segmentos ampliados aislados del corredor ripario. El color más verde nos indica que el NDVI fue más alto en agosto del 2014 que en agosto del 2013. Hubo un reverdecimiento extenso en todas las áreas, excepto en la

porción de la parte baja de la Zona 4 (ampliada), donde se llevó a cabo la remoción de vegetación no nativa antes del flujo pulso. Gran parte de dichos terrenos no se inundaron durante el flujo pulso.

La ilustración 6-4 muestra las áreas inundadas durante el flujo pulso y las diferencias en el NDVI entre agosto del 2014 y agosto del 2015. El área más verde indica que el NDVI fue más alto en agosto del 2015 que en agosto del 2014. El color café indica una reducción en “verdosidad” (no necesariamente como resultado de vegetación café) del 2014 al 2015. Es de notar que mientras algunas partes son más verdes después del flujo pulso del verano del 2014 (ver ampliaciones de la Zona 1 y la parte baja del Zona 4), otras partes del corredor ripario no están tan verdes como en el año anterior – ver específicamente la parte ampliada de la Zona 7.

La Ilustración 6-5 muestra las áreas inundadas durante el flujo pulso y las diferencias en el NDVI entre agosto del 2013 (previo al pulso) y agosto del 2015 (dos temporadas de crecimiento después del flujo pulso). Algunas áreas continuaron el incremento en verdosidad desde el 2013 a 2015 (parte baja de la Zona 1 y la Zona 7), mientras que otras áreas muestran pocos cambios, o están menos verdes que en condiciones previas al flujo pulso.

Conclusiones

El flujo pulso del Acta 319 produjo un incremento en NDVI (“verdosidad”) del 16% a lo largo de las zonas riparias en el 2014 en comparación con el 2013. En el 2015, el NDVI regresó a niveles del 2013. Los incrementos del NDVI en el 2014 ocurrieron en la zona inundada por el flujo pulso al igual que las partes no inundadas de la planicie de inundación riparia, donde el agua subterránea da sustento a la vegetación.

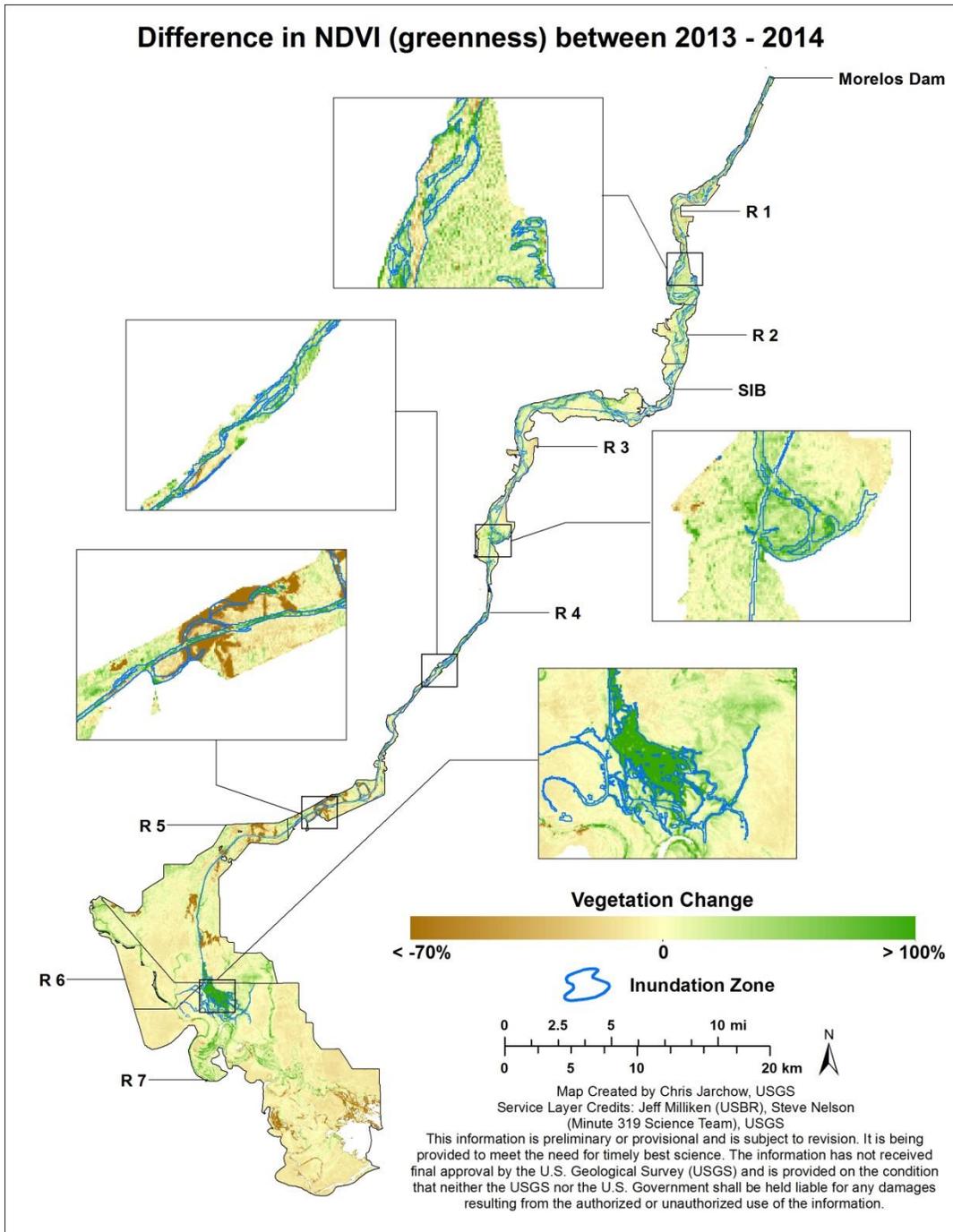


Ilustración 6-3. Zona de inundación del flujo pulso del 2014 y la diferencia en NDVI de agosto 2013 a agosto 2014. El color más verde indica un NDVI más alto que en el año anterior; el color café indica un NDVI más bajo que en el año anterior.

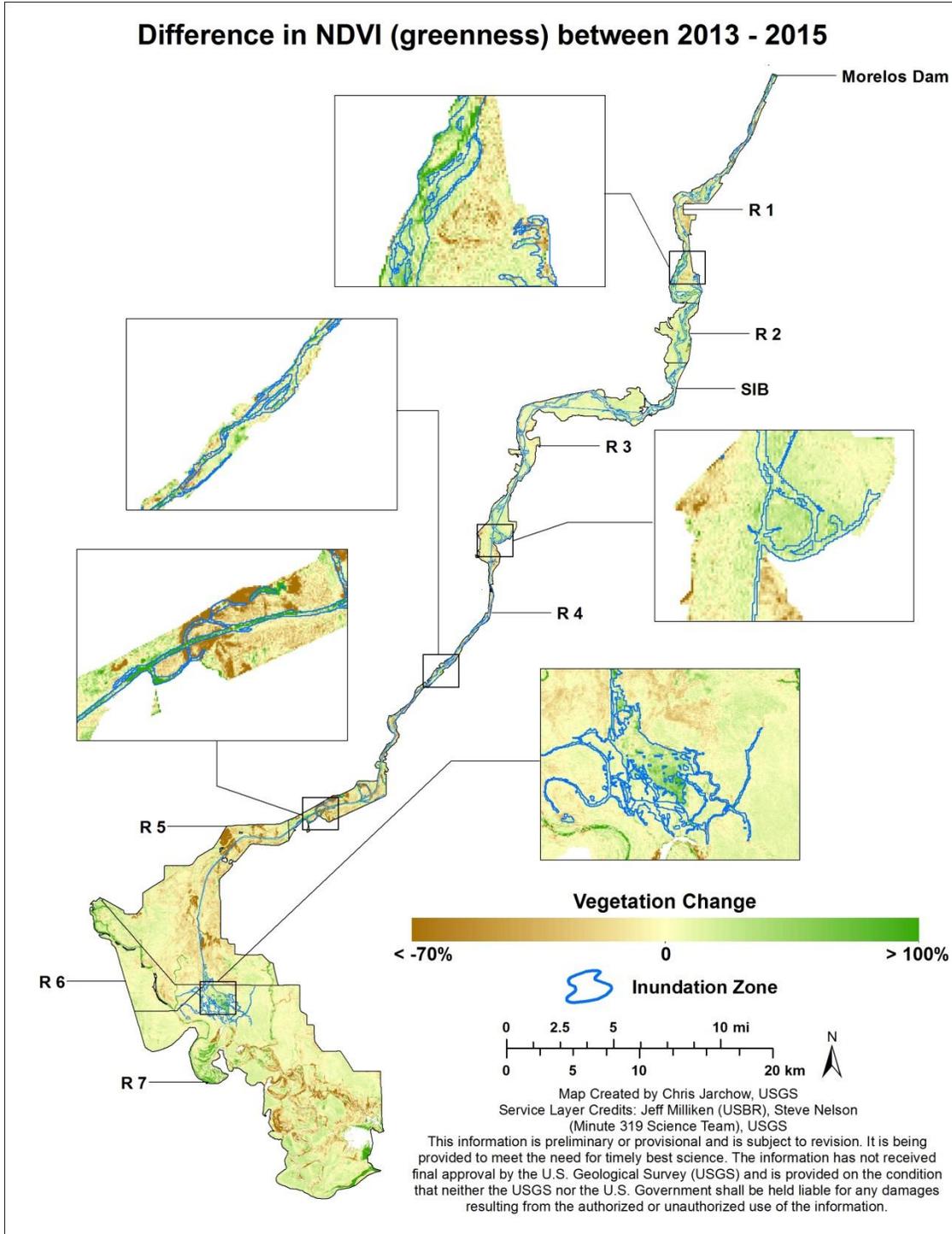


Ilustración 6-5. Zona de inundación del flujo pulso del 2014 y la diferencia en NDVI de agosto 2013 a agosto 2015. El color más verde indica un NDVI más alto que en 2013; el color café indica un NDVI más bajo que en el 2013.

Referencias citadas

- Groenveld, D.P., Baugh, W.M., Sanderson, J.S., Cooper, D.J. 2007. Annual groundwater evapotranspiration mapped from single satellite scenes. *Journal of Hydrology* 344:146-156.
- Hinojosa-Huerta. O., Nagler, P.L., Carillo-Guererro, Y.K. and Glenn, E.P., 2013. Effect of drought on birds and riparian vegetation in the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering* 59:104-110.
- IBWC, Water Data, gage 09-5222.00, Colorado River at the Southerly International Boundary, http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo2.htm, last visited December 2015.
- Nagler, P.L., Cleverly, J., Glenn, E. Lampkin, D., Huete, A., and Wan, Z., 2005a. Predicting riparian evapotranspiration from ODODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of Environment* 94: 17-30.
- Nagler, P.L., Scott, R.L., Westenburg, C., Cleverly J.R., Glenn, E., and Huete, A.R., 2005b. Evapotranspiration on western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen flux towers. *Remote Sensing of Environment* 97: 337-351.

Sección 7: Respuesta de la vida silvestre (aves)

Observaciones Clave:

1. La abundancia y diversidad de aves se incrementó en la planicie de inundación del Río Colorado en México después del flujo pulso del 2014. La respuesta se mantuvo en el 2015. Las aves acuáticas migratorias, las aves acuáticas anidantes y las aves riparias anidantes han aumentado su abundancia.
2. La abundancia combinada de 19 especies de interés para la conservación se incrementó en un 49% del 2013 al 2015, incluyendo el Carpintero de Gila, Vaquero Cabecicafé, Copetón Gorjicenizo, Gritón Pechiamarillo y Gorrión Cantor.
3. Los sitios de restauración tuvieron más abundancia, un mayor número de especies y mayor índice de diversidad por punto de aves que en el resto de la planicie de inundación.
4. La abundancia combinada de 19 especies de interés para la conservación fue 43% más alto en los sitios de restauración que en el resto de la planicie de inundación. El Bolsero Cuculado, Gritón Pechiamarillo, Mosquero Cardenalito, Carpintero de Gila y Matraca del Desierto aumentaron su abundancia.

Introducción

Los estudios de aves siguieron el protocolo descrito en Hinojosa-Huerta et. al. (2008, 2013). Las aves se monitorean en 200 sitios (agrupados en 25 transectos, con 8 puntos cada uno). Diecisiete transectos, todos ubicados aguas abajo del LIS, han sido estudiados desde el 2002. Se agregaron cuatro transectos en los sitios de restauración para documentar los cambios de la avifauna relacionados con los esfuerzos de reforestación en los sitios Miguel Alemán, Laguna Grande y CILA. Estos muestreos empezaron en el 2011. Para este esfuerzo, se agregaron cuatro transectos en la región Limítrofe del río, que fue estudiada por primera vez durante la primavera del 2014.

En el análisis de cambios de abundancia, no se incluyeron las detecciones de aves de paso y los conteos de las cuatro especies más abundantes (Paloma Huilota, Tordo Sargento, Ibis Cara Blanca y Tordo Cabeciamarillo), ya que se relacionan más con los cambios en las áreas agrícolas. Estas especies se incluyeron en el análisis de estructura de comunidad, diversidad y gremios.

Resultados

La comunidad de aves de la planicie de inundación

Diferentes especies de aves utilizan el hábitat en la planicie de inundación del Río Colorado en México de diferentes maneras. Se han detectado 192 especies de aves entre el 2002 y el 2015; esto incluye aves terrestres migratorias que o bien pasan el invierno ahí o la utilizan como un sitio para descanso, al igual que las aves acuáticas migratorias. La variación en abundancia de estas especies en la planicie de inundación depende de muchos factores que pueden afectar su presencia en el delta, incluyendo la calidad del hábitat a lo largo del río al igual que los cambios en sus territorios de reproducción y fluctuaciones anuales en patrones de migración fuera de la región del delta.

Cuadro 7-1. Abundancia por punto por visita (promedio y error estándar) para 19 especies con interés para la conservación en la planicie de inundación del Río Colorado y los sitios de restauración (Rest) en México, para 2013 y 2015.

Especie	2013		2015		Rest 2013		Rest 2015	
	Prom	SE	Prom	SE	Prom	SE	Prom	SE
Rascador Desértico	0.53	0.07	0.81	0.12	0.91	0.12	1.01	0.24
Copetón Gorjicenido	0.09	0.03	0.22	0.06	0.19	0.05	0.22	0.09
Vaquero Cabecicafé	0.19	0.06	0.71	0.14	0.56	0.11	0.74	0.37
Picogordo Azul	0.08	0.03	0.10	0.05	0.18	0.04	0.31	0.12
Mosquero Negro	0.10	0.04	0.17	0.10	0.18	0.03	0.19	0.10
Perlita de Cola Negra	0.25	0.05	0.49	0.08	0.35	0.07	0.58	0.22
Matraca del Desierto	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.06	0.06
Mascarita Común	0.18	0.06	0.28	0.09	0.39	0.07	0.38	0.19
Cuitlacoche Crisal	0.16	0.04	0.18	0.05	0.22	0.04	0.17	0.10
Carpintero de Gila	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.08	0.08
Bolsero Cuculado	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	0.04	0.08	0.06
Pico Mexicano	0.06	0.02	0.10	0.03	0.16	0.04	0.26	0.11
Tepetatero	0.41	0.14	0.30	0.12	0.13	0.05	0.07	0.11
Gorrión Cantor	0.09	0.03	0.21	0.07	0.22	0.06	0.29	0.14
Mosquero Cardenalito	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03
Verdin	0.64	0.09	0.71	0.11	1.22	0.09	1.19	0.25
Tirano Occidental	0.08	0.04	0.18	0.07	0.23	0.07	0.54	0.22
Paloma Alas Blanca	0.45	0.13	0.51	0.11	4.00	1.07	0.79	0.28
Gritón Pechiamarillo	0.01	0.01	0.02	0.01	0.15	0.05	0.18	0.14
Total	3.38	0.89	5.03	1.26	9.22	2.04	7.17	2.90

La planicie de inundación también provee un hábitat para especies residentes y de reproducción. Sus números se relacionan de cerca a la calidad del hábitat en el área. En este estudio, se presta particular atención a 19 especies con interés para la conservación, debido a su cercana relación con la calidad del hábitat ripario local (Cuadro 7-1).

El área de inundación también es habitada por especies que usan y dependen de los recursos de la agricultura en el Valle de Mexicali. Las cuatro especies más comunes en este grupo (Paloma HUILOTA, Ibis Cara Blanca, Tordo Sargento y Tordo Cabeciamarillo) representan juntas el 75% de todos los individuos detectados en la planicie de inundación. La variación de las poblaciones de estas especies se relaciona

más de cerca a la fluctuación de disponibilidad de recursos en las áreas agrícolas que a los cambios del hábitat en la planicie de inundación.

La abundancia y diversidad de aves es diferente a lo largo de las diferentes zonas en la planicie de inundación, con la mayor abundancia observada a lo largo de la Zona 1, seguido de la Zona 4, Zona 3 y Zona 5 (Ilustración 7-1). En las zonas 3 y 4, los patrones son similares en los márgenes izquierdo y derecho de la planicie de inundación, pero en la Zona 5 la abundancia promedio de aves es 1.6 veces mayor en el margen izquierdo que en el margen derecho.

La diversidad sigue un patrón diferente, con un índice de diversidad más alto en la Zona 4, seguido de la Zona 1, Zona 5 y Zona 3 (ilustración 7-1). Estas diferencias no sólo se dan por el número más alto de especies detectadas en el Zona 4 y Zona 1, sino que también por un nivel más alto de equidad en la estructura comunitaria y menor dominación de las especies más comunes en estas zonas.

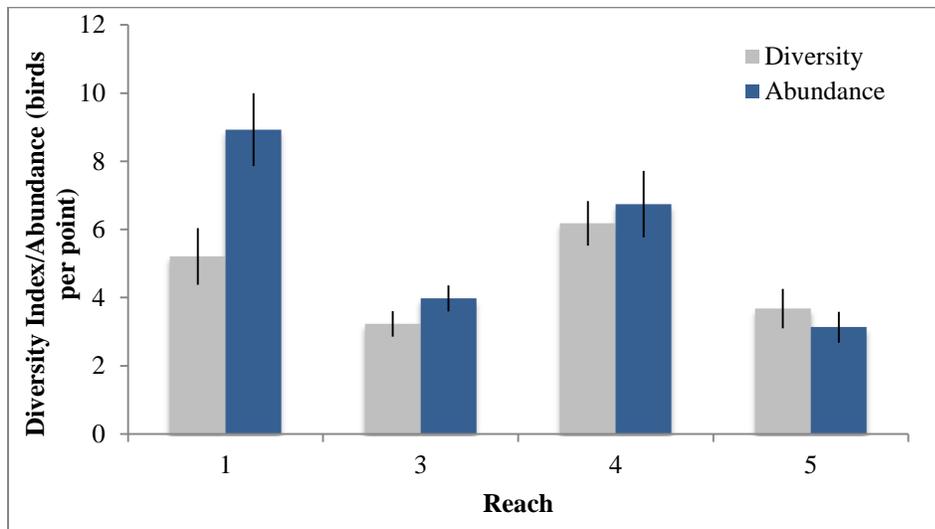


Ilustración 7-1. La diversidad (N2 por punto) y abundancia (promedio por punto) de aves en las diferentes zonas de la planicie de inundación del Río Colorado en México.

Cambios Relacionados a los Flujos Ambientales del Acta 319

Excluyendo la detección de aves de paso y las cuatro especies más comunes, la abundancia de aves durante la temporada de apareamiento en la planicie de inundación ha disminuido desde el 2003 (un promedio de reducción del 3.5% anual), con el 2013 siendo uno de los años con menor abundancia (un promedio de 115 aves por transecto contra 179 aves por transecto en el 2003; Ilustración 6-2).

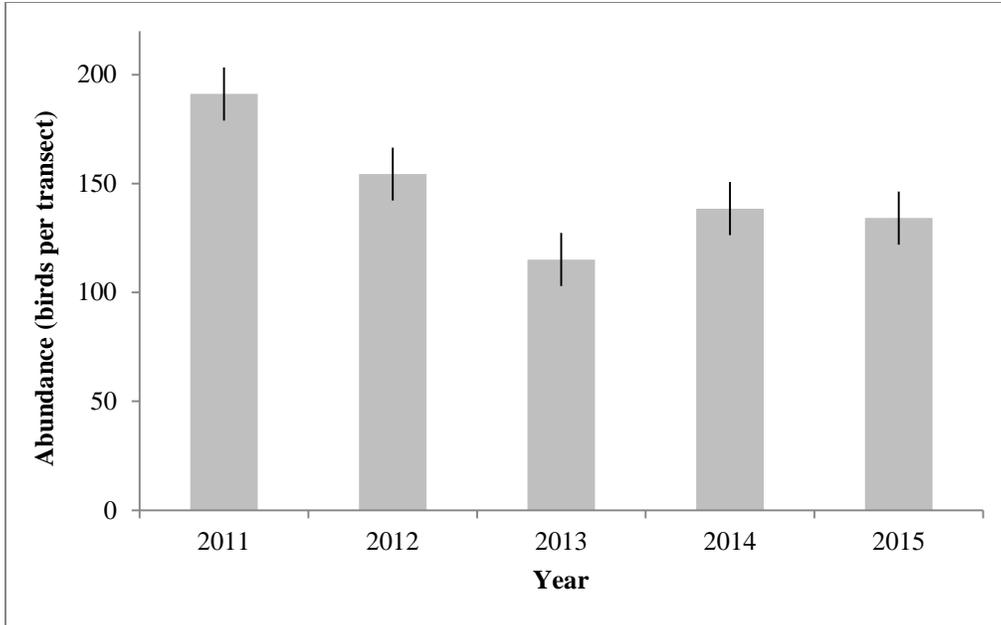


Ilustración 7-2. La abundancia de aves (promedio por transecto) en el área de inundación del Río Colorado en México desde el 2011 al 2015).

En el 2014, la abundancia tuvo un incremento relativo al 2013 (138 aves por transecto), y fue similar en el 2015 (134 aves por transecto). Los cambios mayores ocurrieron en la Zona 3, donde el incremento en el 2014 y 2015 en relación al 2013 fue del 51% y 47% respectivamente. En la Zona 4, hubo un ligero incremento del 5% y en la Zona 5 hubo una ligera disminución del 4.2%. En la zona limítrofe hubo un pico durante el verano del 2014, con un incremento de 3.9 veces en la abundancia de aves (un incremento de un promedio de 281 aves por transecto a 1,100 aves por transecto).

El índice de diversidad (N2) durante la temporada de apareamiento tuvo una tendencia a la baja desde el 2003, con el 2013 teniendo el número más bajo desde el 2003 (3.58 en 2013 contra 5.96 en el 2003). El índice de diversidad aumentó durante el 2014 en comparación con el 2013, y disminuyó en el 2015 pero siguió estando más alto que en el 2013 (ilustración 6-3). El cambio más grande ocurrió en la Zona 4, donde el índice de diversidad aumentó un 41% seguido de la Zona 5, con un incremento del 25% y la Zona 3 con un incremento del 20%.

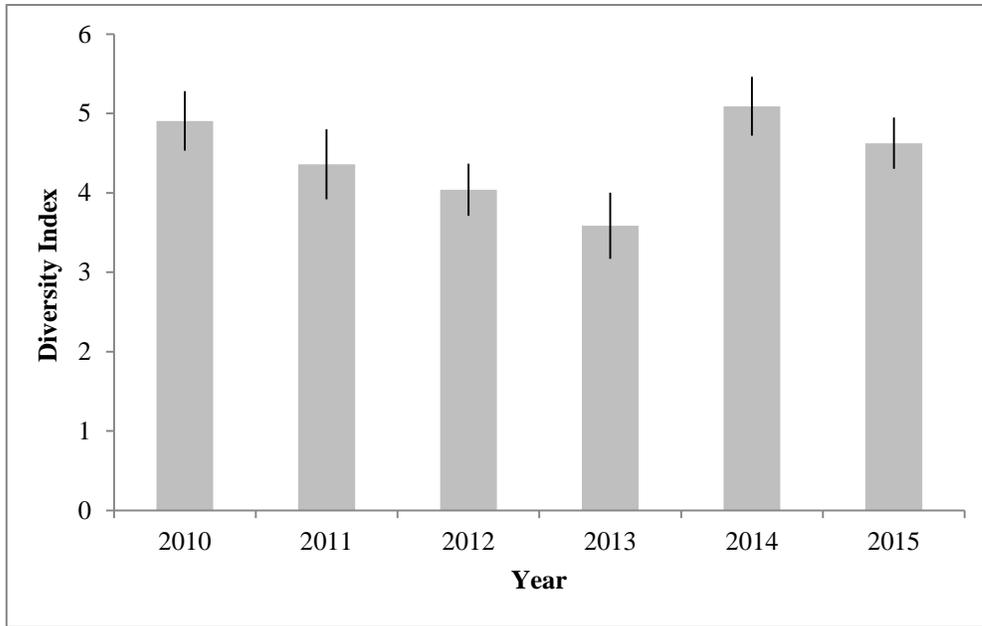


Ilustración 7-3. La diversidad de aves (N2 por punto) en la planicie de inundación del Río Colorado en México desde el 2010 hasta el 2015.

El gremio de Aves Terrestres Anidantes, que incluye especies de aves terrestres que se relacionan muy de cerca con la vegetación nativa riparia y otras que son residentes o visitantes de reproducción en el delta (Apéndice G) mostraron un incremento significativo del 22% durante el 2014 en comparación con el 2013. Su abundancia disminuyó en el 2015, pero siguió siendo más alta que en el 2013 (ilustración 6-4).

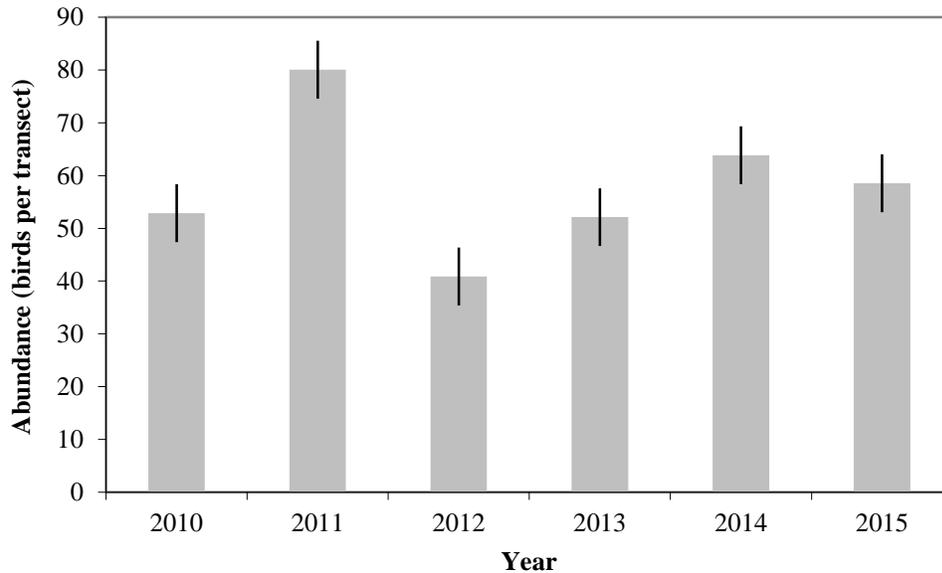


Ilustración 7-4. Abundancia promedio (aves por transecto) de aves terrestres anidantes en la planicie de inundación del Río Colorado en México del 2010 al 2015.

El grupo de Aves Acuáticas Anidantes, que incluye especies de patos y gansos, aves playeras, aves de marisma y aves acuáticas coloniales (como las garzas) que son residentes o visitantes de procreación en el delta (Apéndice G) también mostraron un incremento significativo (81%) en el 2014 en comparación con el 2013, y sus números también se vieron reducidos en el 2015, pero su abundancia siguió siendo 11% más alta que en el 2013 (ilustración 7-5).

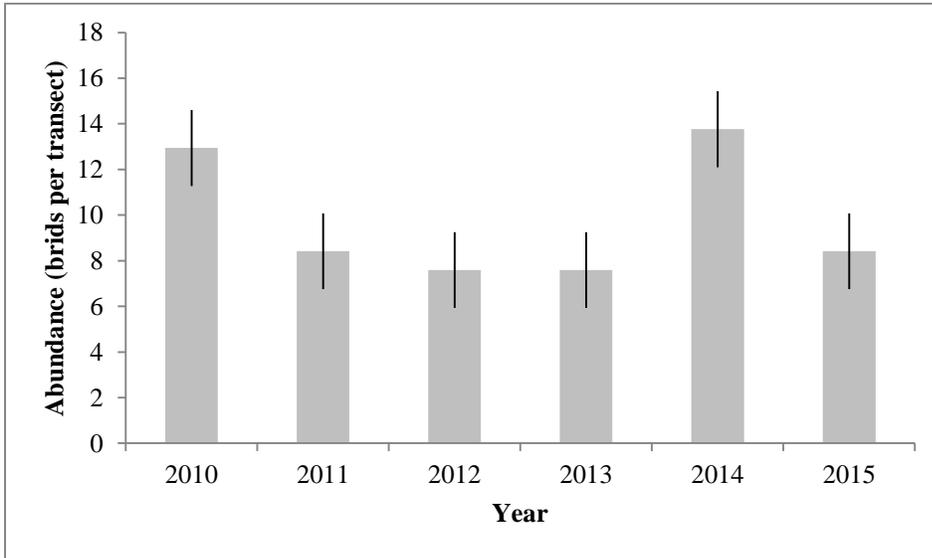


Ilustración 7-5. Abundancia promedio (aves por transecto) de aves acuáticas que anidan la planicie de inundación del Río Colorado en México del 2010 al 2015.

La respuesta más fuerte a lo largo de la planicie de inundación se observó en el grupo de Aves Acuáticas Migratorias (patos y gansos, aves playeras, aves marisma, y otras especies de aves acuáticas que no se reproducen en el delta, Apéndice G). Su abundancia se incrementó 4 veces en el 2014 en comparación con el 2013, y este fue el año con la mayor abundancia de este grupo registrada desde que inició el estudio en el 2002 (ilustración 7-6), con un promedio de 109 aves por transecto, o un estimado de abundancia en el área de inundación (Zona 1 a Zona 5) de 53,680 (\pm 7330) aves acuáticas migratorias durante el flujo pulso. La mayoría de las observaciones ocurridas en la Zona 1 y Zona 4, pero fue interesante notar la presencia de aves acuáticas migratorias a lo largo de la Zona 3 durante el flujo pulso.

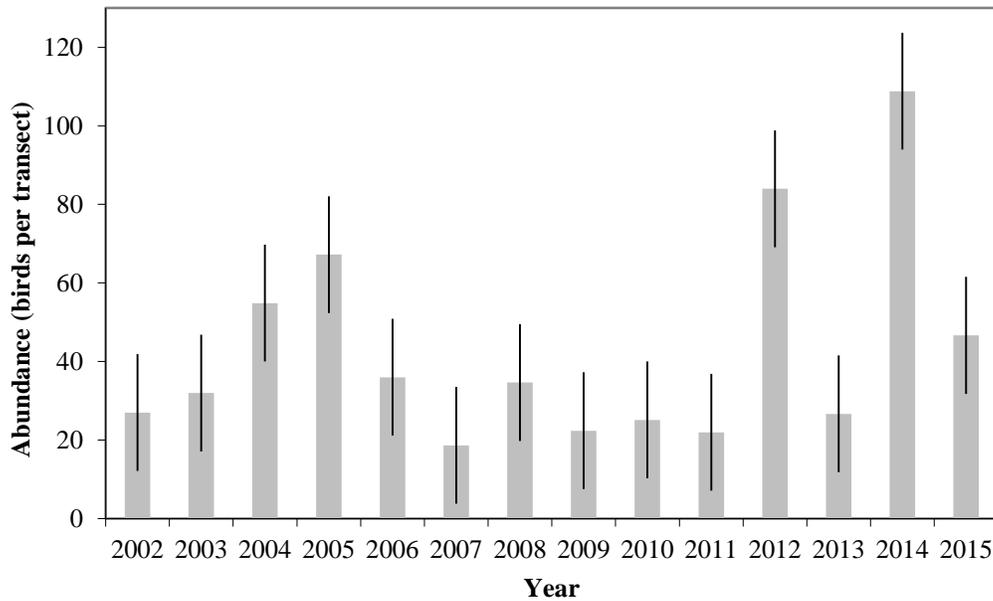


Ilustración 7-6. Abundancia promedio (aves por transecto) de aves acuáticas migratorias en la planicie de inundación del Río Colorado en México del 2003 al 2015.

En el 2015, la abundancia de aves acuáticas migratorias disminuyó a un promedio de 47 aves por transecto. Casi todos los registros ocurrieron en la Zona 1 y la Zona 4 – los tramos húmedos.

Usualmente el corredor de la planicie de inundación no es visitado por una abundancia de aves acuáticas migratorias, y estas especies tienden a visitar más la Ciénega de Santa Clara y el Río Hardy. Sin embargo, el hábitat acuático disponible durante el flujo pulso se utilizó por muchas de estas especies, en particular algunas especies de patos (Pato Cucharón, Pato de Collar y Cerceta Castaña), aves playeras (en la mayoría Playerito Mínimo, Pataamarilla, y Avoceta Americana) y aves de marisma (Gallareta Americana y Sora).

No se detectó ningún otro cambio mayor en los números de los otros gremios en la planicie de inundación (aves relacionadas con la agricultura, rapaces, aves migratorias, aves desérticas).

Cambios Relacionados a los Sitios de Restauración:

Durante la temporada de apareamiento de 2015, la abundancia en los sitios de restauración fue 50% más alta que en el resto del área de inundación, el número de especies detectadas por punto fue 33% más alta, y el índice de diversidad por punto fue 53% más alta (ilustración 7-7).

La abundancia combinada de las 19 especies de interés para la conservación fue 43% más alta en los sitios de restauración que en el resto del área de inundación en el 2015 (Cuadro 6-1). Este grupo incluye especies que están relacionadas de cerca al hábitat ripario, por ejemplo el Picogordo Azul, Mosquero Cardenalito, Gritón Pechiamarillo, Tepetatero, Tirano Occidental y Rascador Desértico. La especie con la mayor diferencia de abundancia entre los sitios de restauración y el resto de la planicie de inundación fue el Bolsero Cuculado (abundancia 15 veces mayor en los sitios de restauración), Gritón Pechiamarillo (8.9 veces mayor), Mosquero Cardenalito (4.3 mayor), Carpintero de Gila (4.2 veces mayor) y Matraca del Desierto (2.0 veces mayor). El Tepetatero tuvo una disminución del 76% y el Cuitlacoche Crisal tuvo una disminución del 7%.

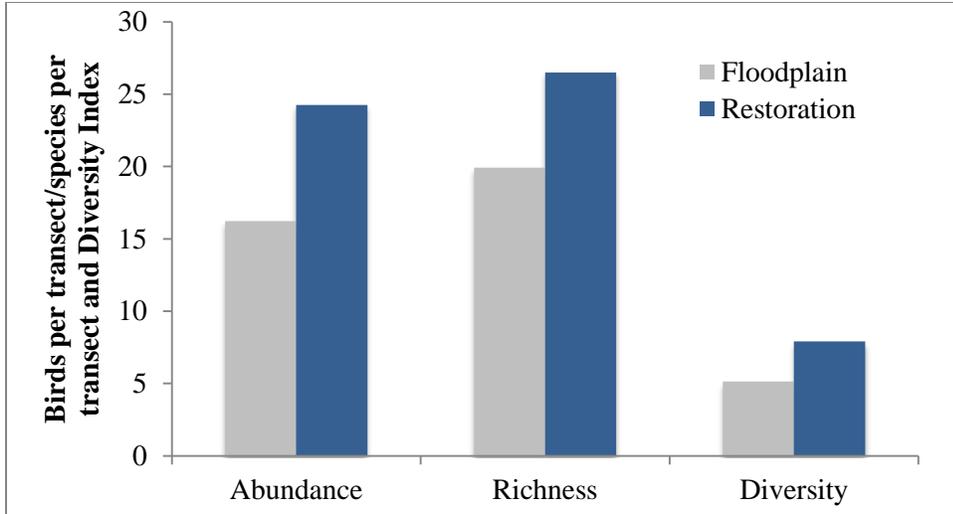


Ilustración 7-7. Abundancia promedio (aves por transecto), riqueza de especies (especies por transecto) y diversidad (N2 por punto) en los sitios de restauración y la planicie de inundación en el Río Colorado en México.

La abundancia combinada de estas 19 especies disminuyó en un 28% del 2013 al 2015 en los sitios de restauración (cuadro 7-1). Sin embargo, una gran porción de la abundancia del 2013 (43%) se le atribuye a Paloma Ala Blanca, que disminuyó un 80% entre 2013 y 2015. La abundancia relativa de la Paloma Ala Blanca para este grupo en el 2015 fue de tan sólo el 11%. Si esta especie fuera excluida del análisis, la abundancia combinada en general de las otras 18 especies de interés hubiera sido 22% más alta durante el 2015.

Trece de las especies de interés incrementaron en su abundancia en los sitios de restauración más de 10%, y cuatro tuvieron disminuciones (Paloma Ala Blanca, Tepetatero, Bolsero Cuculado y Cuitlacoche Crisal). Las especies con mayores incrementos en abundancia fueron el Carpintero de Gila, Matraca del Desierto, Tirano Occidental, Picogordo Azul y Carpintero Listado.

En la planicie de inundación, la abundancia de estas especies de interés incrementó en un 49% del 2013 al 2015 (Cuadro 6-1). Quince especies tuvieron más abundancia en el 2015, especialmente el Carpintero de Gila, Vaquero Cabecicafé, Copetón Gorjicenizo, Gritón Pechiamarillo y Gorrión Cantor. Cuatro especies mostraron una disminución en abundancia: Bolsero Cuculado, Mosquero Cardenalito, Tepetatero y Matraca del Desierto.

Referencias citadas

- Hinojosa-Huerta, O., Iturribarria-Rojas, H., Zamora-Hernandez, E and Calvo-Fonseca, A., 2008. Densities, species richness, and habitat relationships of the avian community in the Colorado River, Mexico. *Studies in Avian Biology* 37: 74-82.
- Hinojosa-Huerta, O., Nagler, P.L., Carrillo, Y.K. and Glenn, E.P., 2013. Effects of drought on birds and riparian vegetation in the Colorado River Delta, Mexico. *Ecological Engineering* 59: 104-110.

Sección 8: Canal Inferior y Estuario

Observaciones Clave:

1. Aproximadamente el 10 por ciento del agua del flujo pulso llegó a la parte superior de la Zona 5; el agua inundó e infiltró porciones de las zonas 5 y 7, dando sustento a la vegetación ahí.
2. Unca cantidad pequeña del agua del flujo pulso se mezcló con agua del Golfo de California.
3. El agua del Golfo de California se mezcla con el agua del Río Hardy durante las mareas altas de primavera, pero una barra de arena impide el regreso de esta mezcla al Golfo. La conectividad es mayormente de una sola vía.
4. El flujo pulso tuvo un impacto de menor a nulo en el zooplancton o fauna de peces en el estuario superior.
5. Con el fin de mejorar el hábitat y beneficiar a las especies marinas en el estuario superior, se requeriría una mayor cantidad de agua dulce, además de la mejora en la conectividad de las mareas por encima del banco de arena. Se requiere investigación adicional incluyendo modelado y flujo experimental de entregas, para estimar la cantidad y calendarización de los flujos requeridos para el mejoramiento del estuario.

Introducción

El cauce del bajo Río Colorado y su región del estuario (Zona 7) está fuera del alcance geográfico para el monitoreo binacional bajo el Acta 319. El Sonoran Institute (SI) aseguró apoyo independiente y trabajó con sus colaboradores para monitorear las condiciones biológicas e hidrológicas en la porción superior del estuario, antes, durante y después del flujo pulso. El propósito principal de este esfuerzo de monitoreo es determinar las condiciones base en el estuario e identificar los cambios causados por las liberaciones de flujos ambientales del Acta 319 y otras variables ambientales. El programa de monitoreo del SI en el estuario evalúa: 1) la conectividad entre el río y el mar, 2) calidad del agua, y 3) ictiología y poblaciones de zooplancton. El SI utilizó tanto muestreos terrestres así como técnicas de sensores remotos (imágenes satelitales y fotografía aérea). El SI continuará la recolección y análisis de datos para los componentes descritos en el estuario superior hasta junio del 2016.

Conectividad entre el río y el mar

Condiciones base del estuario:

La conectividad entre el río y el Golfo de California es importante para muchas especies marinas, de las cuales varias utilizan el estuario como territorio de apareamiento o de crianza, incluyendo especies de peces y camarón importantes comercialmente (Calderón y Flessa, 2009). Basándonos en condiciones históricas, un área de estuario más grande de agua dulce y salada mezclándose con conexiones frecuentes al Golfo de California pudiera suministrar los nutrientes al Golfo y proveer áreas para la crianza en el estuario, que daría sustento a grandes poblaciones de varias especies marinas.

El cauce del bajo Río Colorado y su estuario (ilustración 8-1), ubicado en la porción inferior del Delta del Río Colorado en México, es la sección del río sujeta a la influencia de mareas extremas del Alto Golfo de California (hasta 8.5 metros [28 pies] durante las mareas de primavera) (Thompson, 1968). La porción inter-mareas del río se extiende 56 km (35 millas) aguas arriba de la Isla Montague en la boca del río (Payne et al., 1992).

Debido al gran rango y poder de las mareas, el depósito de sedimentos dentro de la porción inter-mareal del Delta está sujeto a un equilibrio complejo de fuerzas fluviales y de mareas (Dalrymple and Choi, 2007). Las fuerzas de la marea han dominado durante periodos extendidos cuando el flujo fluvial

del río se reduce o es eliminado. Las fuertes corrientes de inundación de la marea atraen grandes cantidades de sedimento del cauce y de los bancos del canal del estuario bajo y las carga consigo aguas arriba donde se depositan en el canal y en las áreas de marea adyacentes en la convergencia de la sedimentación por cargas fluviales o de mareas (Zamora et. al., 2012). Esta barrera de sedimentos ubicada en la zona de convergencia de acarreos es referida aquí como el banco de arena de mareas del Río Colorado (ilustración 8-1, 8-3), cuya cresta emergente se encuentra a 35 km (22 millas) aguas arriba de la Isla Montague (Nelson et. al., 2013). Este banco de arena, cuando está completamente desarrollado, puede parcial o completamente obstruir hasta 29 km (18 millas) del cauce del estuario (ACOE, 1982). La ubicación de la cresta del banco de arena es afectada por la fuerza relativa de las fuerzas fluviales y de las mareas. El Terremoto del 2010 causó subsidencia en el estuario inferior, lo que incrementó la fuerza de las corrientes de inundación por marea (Nelson et. al., 2012). El LiDAR previo al flujo pulso sugiere que los cambios en los patrones de inundación por marea desde el sismo, pudieron haber causado que la cresta del banco de arena migrara aguas arriba desde el sismo del 2010 como respuesta a la fuerza incrementada de la inundación de marea.

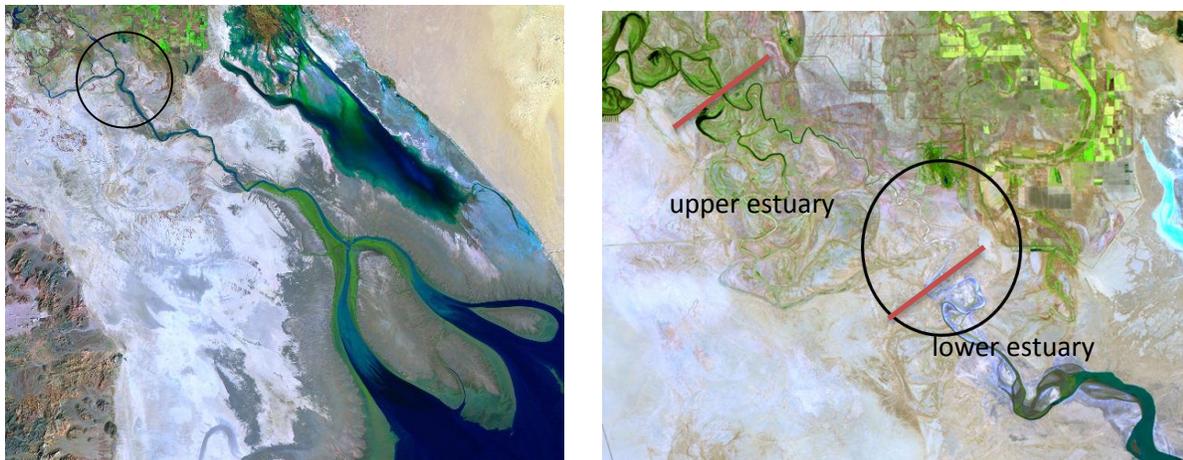


Ilustración 8-1. Izquierda: imagen Landsat del estuario del Río Colorado en 1987 cuando existía una conexión continua del canal al Golfo de California. Derecha: imagen Landsat del 2006 del banco de arena de mareas. La cresta del banco se indica con la línea roja dentro del óvalo, que divide el estuario en secciones superior e inferior. Los óvalos en ambas imágenes representan aproximadamente la misma área.

El banco de arena de mareas efectivamente corta el estuario en una sección superior y otra inferior, con conectividad limitada entre ellas. El banco de arena de mareas retiene el agua dulce que fluye del Río Colorado, Río Hardy y el Dren Ayala y previene que la mayoría de estos flujos lleguen al estuario inferior. Mientras que el estuario inferior sigue estando sujeto al efecto de las mareas, el flujo de mareas del Golfo en el estuario superior se limita a los periodos de mareas altas en primavera, cuando las aguas de la marea pueden sobrepasar el banco de arena. Aunque el agua de marea alcanza el estuario superior durante dichos eventos, el flujo subsecuente aguas abajo se restringe por el banco de arena; casi toda el agua de marea que cruza el banco queda atrapada en el estuario superior.

Las condiciones previas al pulso flujo se caracterizaban por 15 años de flujo limitado del río y consecuentemente una conectividad limitada entre el río y el mar. Esta conectividad ya limitada se redujo aún más por la licuefacción extensiva asociada con el sismo en Mexicali del 4 de abril. Esto resultó en aún más obstrucciones y completamente eliminó aproximadamente 8 km (5 millas) del cauce

de río existente en esta porción del estuario (Nelson et. al., 2013). En el 2012, el SI cavó un canal piloto a través de la porción superior del banco de arena para incrementar la conectividad entre el estuario superior e inferior.

En el 2011, el SI instaló medidores de agua automáticos en varias ubicaciones del estuario superior para medir la elevación de agua, temperatura y salinidad (ilustración 8-2). El sensor E3 se instaló en un punto cerca de la cresta del banco de arena y tiene el registro más largo de información. Basándose en estudios previos, el SI ha estado utilizando una elevación de agua mayor a 3.4 metros por encima del nivel medio del mar medido en el sensor E3 para calcular la cantidad de días que la marea sobrepasa el banco de arena. Tal como se menciona anteriormente, la cresta del banco de arena puede que ya haya migrado aguas arriba. Los estudios hechos en el 2011 determinaron que hubo mareas que alcanzaron al sensor E1 (6 km aguas arriba del E3) aproximadamente 12-18 veces por año (Nelson et al., 2013; Zamora et al., 2012).

Ilustración 8-2. Mapa de las ubicaciones de los sitios de monitoreo de SI en la región baja del Delta. Triángulos verdes: ubicaciones de monitoreo de peces; triángulos rosas: ubicaciones de monitoreo de



zooplankton; sonda = ubicaciones de sensores; círculos azul y blanco: estaciones de monitoreo de gastos.

Los impactos del flujo pulso en la conectividad:

Con base en datos de elevación de agua del sensor E3, se determinó que los flujos de marea sobrepasaron el banco de arena (elevación de agua mayor a 3.4 metros) un total de 39 días entre enero y diciembre del 2014 (ilustración 8-3). No queda claro si los métodos utilizados para calcular la cantidad de números de conectividad en la publicación de Nelson et. al. 2013 son los mismos métodos utilizados

actualmente para el sensor E3; por lo tanto una comparación directa de los días de conectividad no es posible. Sin embargo, la cantidad de días de conectividad en el 2014 probablemente no fue afectada por el flujo pulso, ya que sólo una pequeña cantidad de agua del flujo pulso llegó a esta área (ver siguiente sección). Como fue mencionado anteriormente, el mejorar la conectividad entre el Río Colorado y el mar no sólo depende de la cantidad y porcentaje de flujo de agua dulce al estuario, sino que también depende significativamente en la facilitación de la conectividad por el flujo de la marea a través del banco de arena.

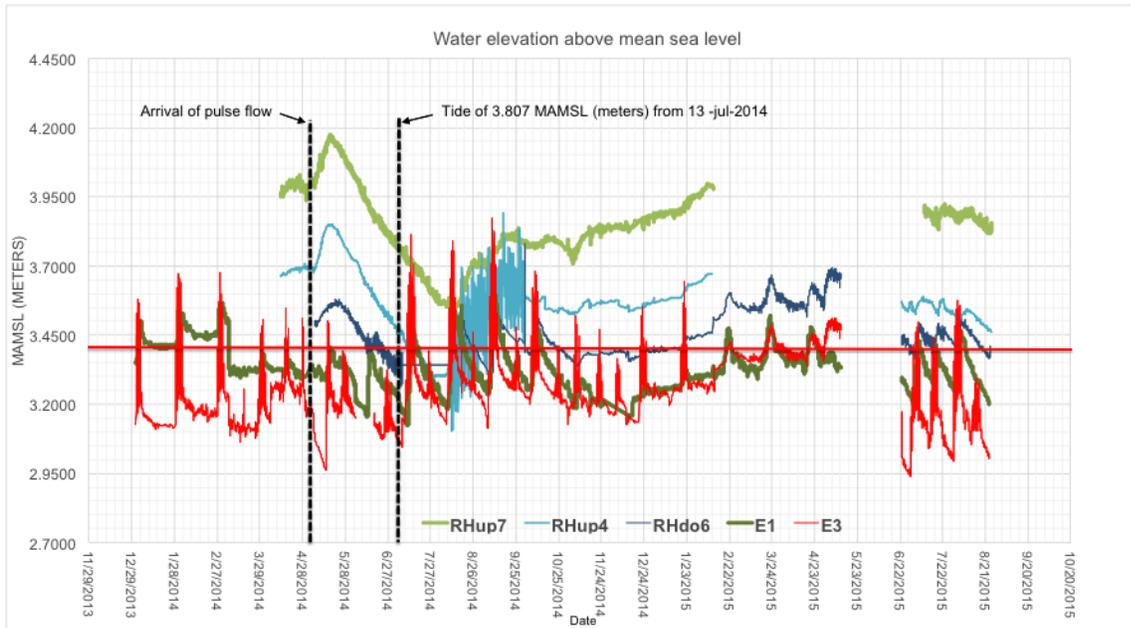


Ilustración 8-3. La elevación del agua en ubicaciones de muestreo antes, durante y después del flujo pulso. Los días en que la elevación del agua fue mayor a 3.4 metros (11.2 pies) por encima del nivel del mar (línea roja) en el sensor E3 se contabilizó como un día en el que la conectividad ocurrió entre los estuarios superior e inferior.

Análisis isotópico:

Un análisis isotópico de oxígeno e hidrógeno ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) se llevó a cabo en muestras de agua tomadas en el 2014 en ubicaciones del estuario superior y parte inferior del Río Hardy. El análisis provee información sobre la mezcla de agua dulce con agua salada, y revela tres grupos distintos de muestras de acuerdo a sus valores $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$ (ilustración 8-4).

El primer grupo (línea de tendencia superior) incluye muestras de agua de mar y agua de mar evaporada, por lo cual la mayoría de las muestras se ubican en el límite sur del estuario superior (E1 es la excepción). El segundo grupo (línea de tendencia inferior) incluye muestras de agua del Río Hardy a grados crecientes de evaporación. El tercer grupo (óvalo rojo) incluye muestras de mezclas de agua de mar, agua de mar evaporada y agua del Río Hardy del estuario superior (RHUP4 and RHDO6). Los resultados isotópicos muestran que el agua dulce fluye regularmente al estuario superior (ubicación RDH06 y E1), pero no llega al E1. Los datos muestran que durante las mareas altas el agua de mar es capaz de llegar a áreas aguas arriba más allá del estuario superior, conectando el estuario superior al

estuario inferior. Sin embargo, es sabido que la conectividad es de sólo una vía; el agua de marea (mar) llega al estuario superior, pero sólo una porción pequeña (inmensurable) de la mezcla resultante de agua de mar y agua del Río Hardy es capaz de cruzar la obstrucción del banco de arena en el retroceso de la marea hacia el Golfo. Gran parte de la mezcla atrapada de agua salada del Golfo y agua de río se evapora.

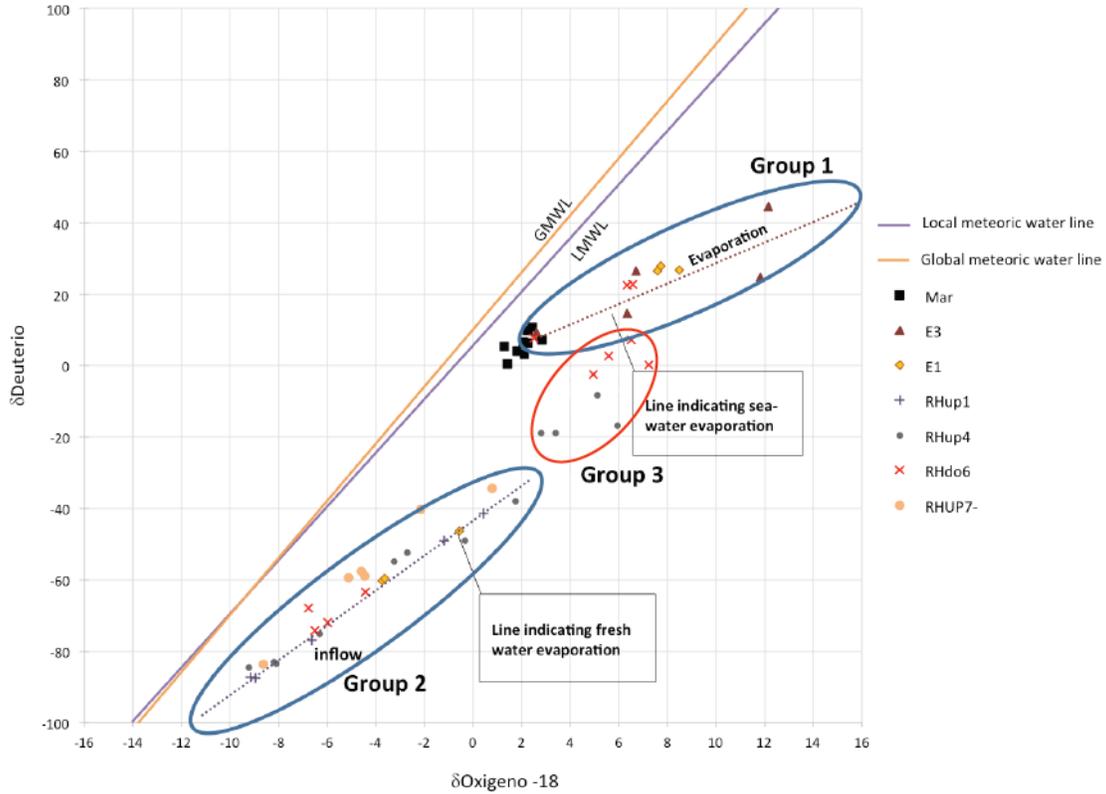


Ilustración 8-4. $\delta^{18}\text{O}$ y δD de muestras de agua tomadas mensualmente en el 2014 en diferentes ubicaciones en el estuario superior y parte inferior del Río Hardy. GMWL= Línea de Agua Global Meteórica; LMWL= Línea de Agua Local Meteórica.

El volumen del flujo pulso y la extensión de la inundación en la Zona 7

El Zona 7 empieza 106 km (66 millas) aguas abajo de la Presa Morelos. El equipo de ciencia del Acta 319 estableció una estación de medición de gastos (DMS-15) en la Zona 7, ubicada en el kilómetro de río 120 (milla de río 74). La llegada del flujo pulso en la DMS-15 se indicó al incrementar el gasto y tirante el 10 de mayo, y la disminución de conducción específica (una medida de salinidad) el 13 de mayo. El gasto y tirante del agua aún eran elevados el 25 de mayo, cuando cesaron las actividades diarias de monitoreo de la estación DMS-15. Las mediciones indicaron que aproximadamente 1.6 Mm³ (1,300 acre-pies) de agua del flujo pulso llegaron a la DMS-15 (ver Sección 2, ilustración 2-4).

Las imágenes Landsat 8 proveen información adicional sobre la llegada del flujo pulso y la extensión de la inundación en la Zona 7. El agua originaria del vertedor del km 27 (Zona 3) llegó a la DMS-12 (km 92/milla 57 en la Zona 5 superior) el 29 de abril, con un gasto de de 4.7m³s⁻¹ (166 p³s⁻¹) el 30 de abril. Las imágenes de Landsat nos muestran la llegada de esta agua 48 horas después (2 de mayo) en la parte

superior de la Zona 7 (km 106/milla 66, que está 14 km/9millas aguas abajo de la parte superior de la Zona 5). Las entregas adicionales de flujo pulso del km 18 causaron un gasto máximo en la DMS-12 de $7.1\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ($251\text{p}^3\text{s}^{-1}$) el 11 de mayo. Después del 11 de mayo, el área de inundación en la parte superior de la Zona 7 se expandió sustancialmente, indicando la llegada de las entregas del km 18. Estas observaciones sugieren que:

- 1) El cauce piloto en la Zona 5 fue bastante eficiente para transportar flujos a pesar del poco o nulo uso en la última década;
- 2) La tasa de infiltración en la Zona 5 fue más baja que en las zonas 2 y 3.

Por lo tanto, dependiendo de la magnitud del flujo, es probable que una porción del agua derivada en la parte inferior de la Zona 4 y superior de la Zona 5 fluirá a la Zona 7 debido a la baja infiltración y alta eficiencia del cauce.

Las imágenes Landsat también muestran que una porción del agua del flujo pulso fue desviada fuera del canal principal del río aguas arriba de la DMS-15. La imagen Landsat del 27 de mayo muestra un incremento en la inundación en las laguna al costado del río en el área entre el km 117 (milla 72) y el km 118 (milla 73.5), con la inundación más grande ocurriendo en la Laguna 1 (ilustración 8-5). La Laguna 1 se ubica en el punto de desviación donde los flujos altos se desvían fuera del canal principal hacia el canal del río viejo que se conecta a lagunas adicionales más al sur. Además de la expansión a la Laguna 1, la imagen del 27 de mayo muestra una inundación de 6.5 km (4 millas) del canal del río anterior al sur de la Laguna 1. Para el 3 de junio, un (1) km (0.6 millas) adicional del canal anterior se inundó. La cantidad de agua del flujo pulso que inundó la laguna y el canal anterior no se monitoreó y no se contabilizó en los estimados de cantidades de flujos en la estación DMS-15. Por lo tanto, un volumen real del agua entregada a la Zona 7 muy probablemente excedió los 1.6Mm^3 (1,300 acre-pies) calculados con los datos de la estación DMS-15.

Adicionalmente a las aforos diarios hechos por el Equipo de Hidrología del Acta 319 durante la liberación del flujo pulso (marzo-mayo 2014), el SI continuó la medición de gastos en tres ubicaciones (DMS 13, 14 y 15; ver ilustración 8-2) bimensualmente después del flujo pulso hasta septiembre del 2015. Iniciando en septiembre 2015, el SI midió los gastos en DMS 13, 14 y 15 mensualmente. Basándose en las mediciones previas (marzo 24 – mayo 11 2014) a la llegada del flujo pulso, el flujo promedio en el DMS-15 fue $0.388\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ($13.7\text{p}^3\text{s}^{-1}$); de septiembre 2014 – octubre 2015, el flujo promedio fue de $0.342\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ($12.1\text{p}^3\text{s}^{-1}$). El porcentaje promedio máximo durante el flujo máximo en el DMS-15 fue $0.6\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ($21.2\text{p}^3\text{s}^{-1}$) el 15 de mayo. Esto sugiere casi una duplicación del porcentaje base de flujo en la DMS-15 durante el flujo pulso.

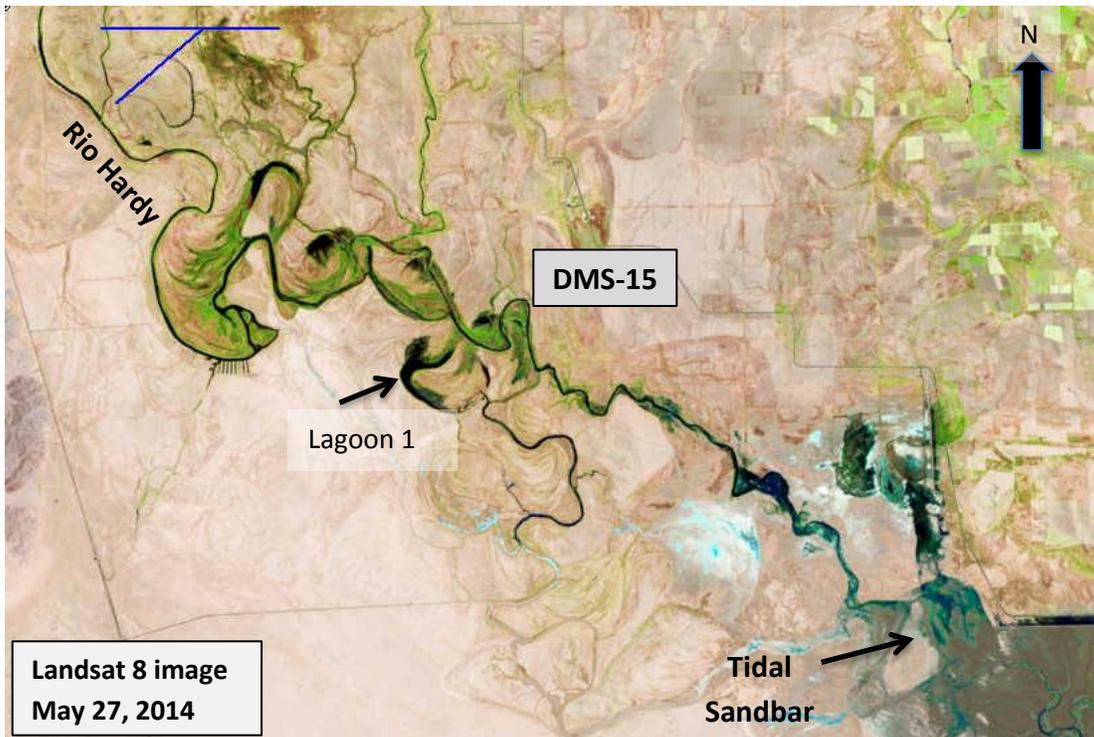


Ilustración 8-5. Mapa del cauce inferior del Río Colorado y estuario superior. Las líneas azules en la parte superior izquierda nos muestra la frontera entre la Zona 5 (arriba de la línea horizontal), Zona 6 [al este (izquierda)] y la Zona 7 (al sur y oeste, arriba y abajo). DMS = estación de medición de gastos.

Calidad del Agua

El SI monitorea los parámetros de calidad de agua en siete ubicaciones en el estuario superior y el Río Hardy; cinco de estos puntos de monitoreo están co-ubicados con sensores (ilustración 8-2) y los dos puntos adicionales están ubicados aguas arriba en el Río Hardy. El objetivo de esta labor es determinar las condiciones base al igual que detectar cualquier cambio de los parámetros fisicoquímicos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y pH) y nutrientes, bacterias, pesticidas, contaminantes y metales pesados en el transcurso del tiempo.

La salinidad del agua disminuyó en los sitios RDH06 y E1 (por encima del banco de arena) cuando llegó el flujo pulso al estuario superior en el 2014, y regresó a un nivel de salinidad más alto después en ese mismo año (cuadro 8-1). El volumen del flujo pulso probablemente no fue suficiente para reducir los niveles de salinidad en la ubicación E3; es probable que las aguas de marea que llegaron al E3 durante la marea alta causaran una disminución (ilustración 8-6).

Las concentraciones de nitratos, fosfatos y amonio fueron más altas a mediados de mayo de 2014 tanto en E1 como en E2 comparadas a las fechas de muestreo posteriores en el año. Sin embargo, para el amonio y nitrato, sólo hubo dos fechas de muestras en el 2014; por lo tanto, es difícil determinar una tendencia en el año y en particular, cualquier cambio causado específicamente por el flujo pulso.

Además, los cambios en concentración también pudieron ser debido a la influencia del flujo del Río Hardy. Las concentraciones de coliformes totales (Σ BC) tanto en E1 y E3 en mayo del 2014 fueron similares a las concentraciones en octubre y diciembre del 2014 (<1.1 NMP/100ml). Las concentraciones de coliformes en agosto fueron más altas que en todas las otras fechas de muestreo tanto para E1 como para E3; de nuevo, los flujos del Río Hardy pudieran estar influenciando estas concentraciones. Las concentraciones de coliformes totales en el 2014 estuvieron muy por debajo del límite para el contacto directo con humanos (240 NMP/100ml) establecido en la Norma Mexicana de Calidad de Agua NOM-003-ECOL-1997 (NOM, 1997).

Las concentraciones de cobre y mercurio en mayo del 2014 fueron más altas que las concentraciones de muestras tomadas en el 2010, cuando las concentraciones estaban debajo del límite de detección (cuadro 8-2). Los niveles de arsénico en las muestras de agua del E1 y E3 mayo del 2014 fueron mucho más bajos que la concentración del 2010. Las concentraciones de cobre y mercurio en mayo del 2014 estuvieron por encima de la concentración de efecto crónico (Buchman, 2008), mientras los de selenio y arsénico estaban por debajo. Tal como con las concentraciones de nutrientes y salinidad, es difícil determinar si los impactos fueron causados por el flujo pulso u otras influencias. Sin embargo, se observaron cambios similares en concentraciones de metales pesados tanto en E1 como en E3 desde el 2010 hasta el 2014. Esto sugiere que los cambios *probablemente no* se deban al flujo pulso porque sólo una pequeña cantidad de agua del flujo pulso llegó al E3; el E1 y E3 hubieran sido afectados de manera diferente si los cambios hubieran sido ocasionados sólo por el flujo pulso.

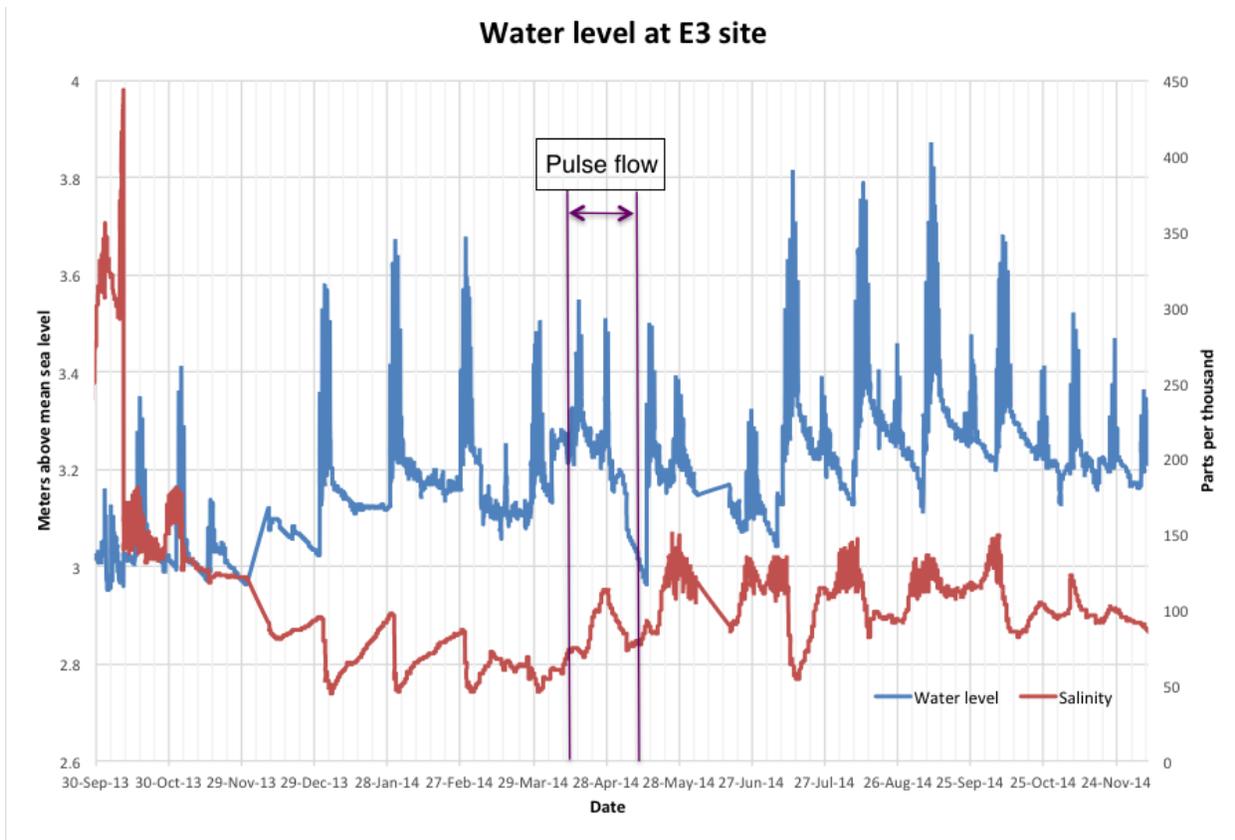


Ilustración 8-6. Tirante y salinidad del agua en el sitio de monitoreo E3.

Cuadro 8-1. Concentraciones de nutrientes, salinidad y coliformes para los sitios de muestreo E1 y E3 en el estuario superior.

Water Quality Parameter	Location	E1				E3			
	Date	5/12/14	8/28/14	10/28/14	12/9/14	5/12/14	8/28/14	10/28/14	12/9/14
Nitrates (ppm)		2.0	1.0	-	-	1.0	0.0	-	-
Nitrites (ppm)		0.029	0.223	0.135	0.032	0.064	0.148	0.114	0.168
Ammonia (ppm)		0.83	-	-	0	0.68	-	-	0
Phosphates (ppm)		0.43	0.12	0.01	0	0.12	0.00	0.03	0
Salinity (ppt)		6.24	99.8	117.55	140.58	94.66	120.66	147.04	56.25
ΣBHC (NMP/100ml)		< 1.1	8	<1.1	<1.1	< 1.1	4.6	<1.1	<1.1

Cuadro 8-2. Concentraciones de metales pesados en el 2014 en comparación a concentraciones del 2010 (*García-Hernández et al. 2010). La línea base del 2010 se fundamentó en la concentración promedio de 5 sitios de muestreo en el estuario superior. <DL significa que está por debajo de un nivel detectable.

Heavy Metal (ppm)	2010 Baseline*	May 12, 2014 Sample	
		E1	E3
Selenium	ND	0.000011	0.000678
Arsenic	1.86	0.003266	0.003622
Copper	<DL	0.066667	0.220000
Mercury	<DL	0.001211	0.000478

Las poblaciones de ictiofauna y zooplancton

El Sonoran Institute ha estado monitoreando las especies de ictiofauna (peces) y zooplancton en el estuario superior desde el 2011. En el 2014, las poblaciones de peces se muestrearon cuatro veces desde julio hasta diciembre en seis ubicaciones, dos en el estuario superior y cuatro en el Río Hardy. Se muestreó el zooplancton ocho veces desde marzo a octubre 2014 en dos ubicaciones del estuario: una aguas arriba y otra aguas abajo del sensor E3.

Se identificaron cinco especies de peces y dos de crustáceos durante los muestreos de peces (ilustración 8-7). *Elops affinis*, una especie de pez de agua salada, fue la más abundante, mientras que el *Micropterus salmoides*, una especie de agua dulce, fue la menos abundante. También se capturaron dos crustáceos, *Procambarus clarkii* y *Callinectes arcuatus*, en las redes durante los muestreos de peces.

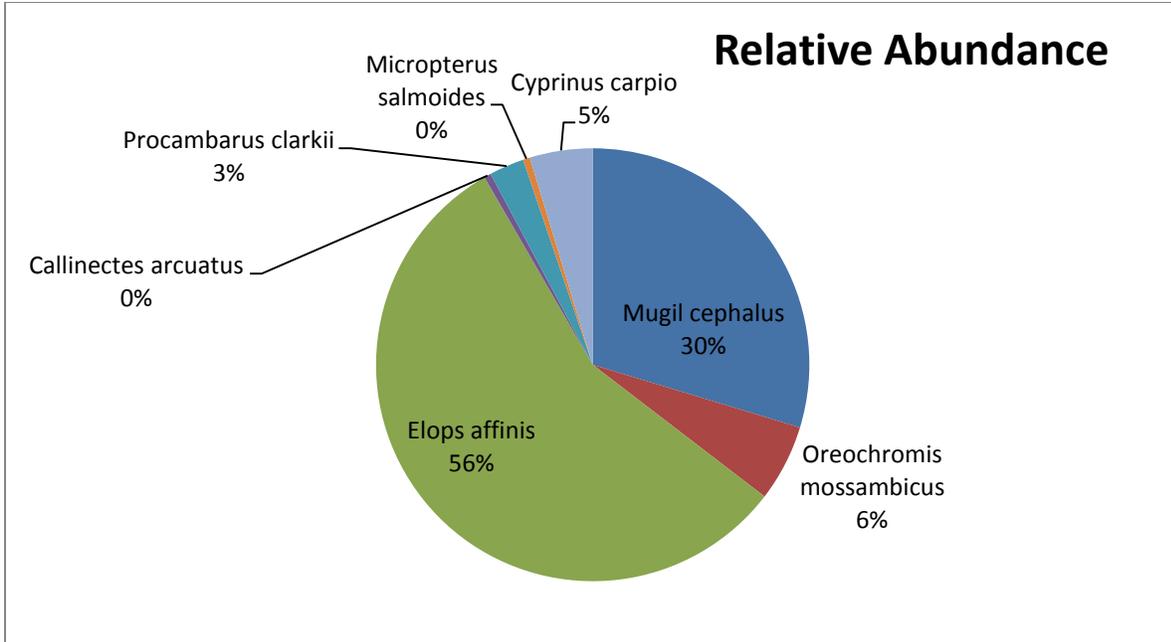


Ilustración 8-7. La abundancia relativa de especies de peces y crustáceos identificadas durante los sondeos de peces en seis sitios de monitoreo en el estuario superior en el 2014.

El análisis de los muestreos de zooplancton antes se enfocaban sólo en la postlarva de camarón, pero en el 2014 se identificaron especies de otros grupos taxonómicos también. Las especies de camarón identificadas en el 2014 incluyen al camarón café (*Farfantepenaeus californiensis*) y al camarón azul (*Litopenaeus stylirostris*). Sólo cuatro individuos de estas especies se encontraron en la ubicación aguas arriba del E3 en mayo y en julio (ilustración 8-8), mientras que se encontraron números más altos en la ubicación aguas abajo del E3 de marzo a octubre del 2014 (ilustración 8-9). Esto es un indicador biológico de que la conectividad por encima del banco de arena (y el sensor E3) es limitada.

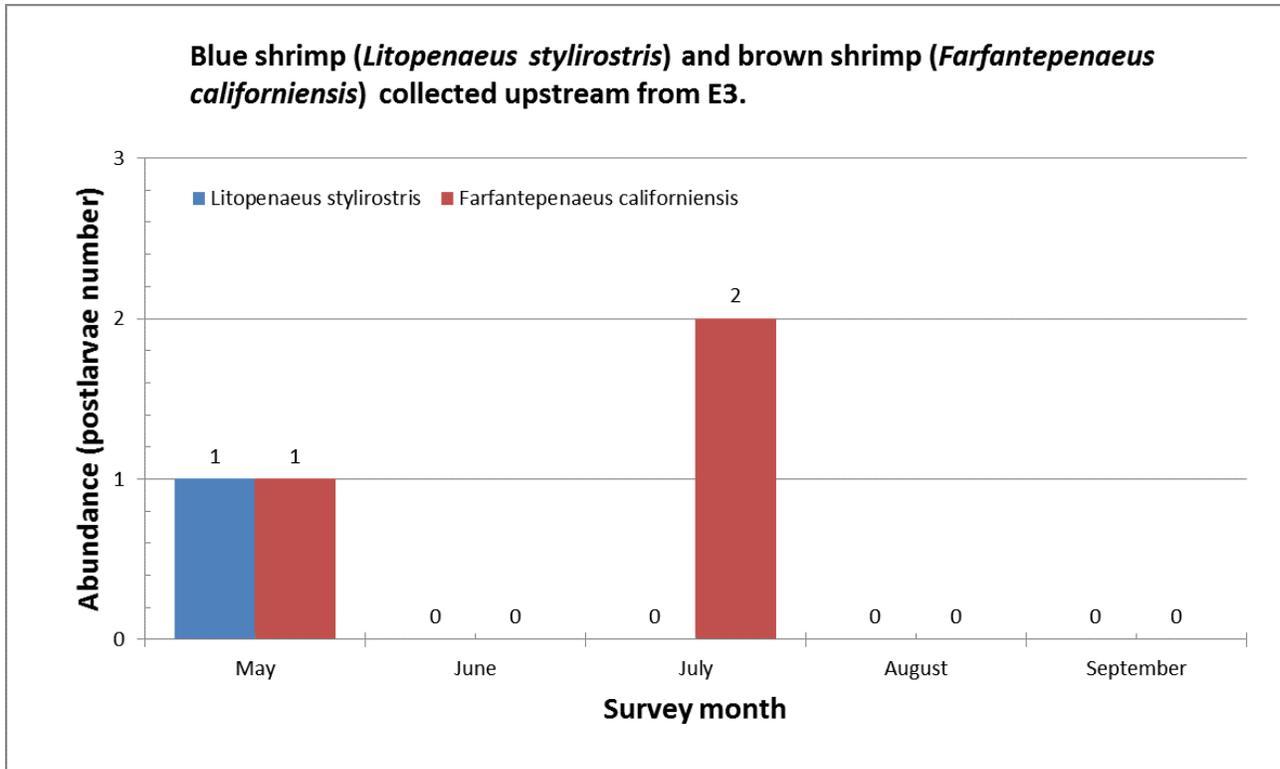


Ilustración 8-8. La abundancia de dos especies de camarón encontradas aguas arriba del E3 en el estuario durante el 2014.

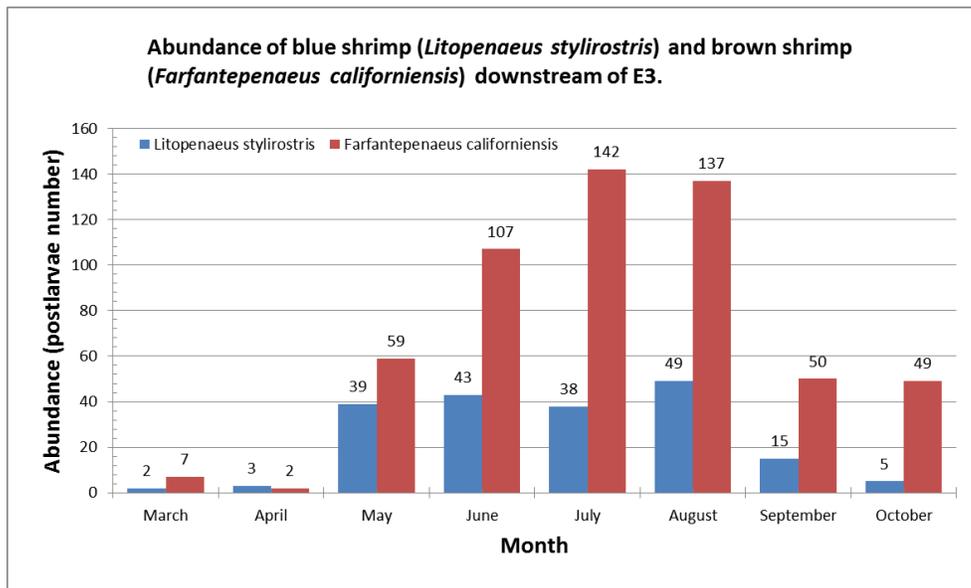


Ilustración 8-9. La abundancia de dos especies de camarón encontradas aguas abajo del E3 en el estuario durante el 2014.

Las especies relevantes de otros grupos taxonómicos, encontrados aguas abajo del E3: larvas, juveniles y adultos del *Gillichthys detrusus*, un pez marino endémico al Delta (Swift et. al., 2011); larvas y juveniles de *Cynoscion othonopterus*; y huevos de un scianido que no se ha podido identificar aún, pero podría ser *Totoaba macdonaldi*.

Los resultados no muestran evidencia de algún impacto que el flujo pulso haya tenido sobre las comunidades de peces y zooplancton. Esto se debe probablemente a la pequeña cantidad y corta duración del agua dulce traída por el flujo pulso al estuario superior.

Referencias citadas

- ACOE (U. S. Department of Defense, Army Corps of Engineers, Los Angeles District), 1982. Colorado River Basin, Hoover Dam, Review of flood control regulation, final report. Government Printing Office, Washington.
- Buchman, M.F. 2008. NOAA Screening Quick Reference Tables. Office of response and restoration Division, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA, p.34.
- Calderon-Aguilera, L.E. and Flessa, K.W., 2009. Just add water? Transboundary Colorado River flow and ecosystem services in the upper Gulf of California. pp. 154-169, in López-Hoffman, L., McGovern, E.D., Varady, R.G. and Flessa, K.W., eds., Conservation of Shared Environments: Learning from the United States and Mexico. University of Arizona Press, Tucson.
- Dalrymple, R.W., Choi, K., 2007. Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. Earth-Sci. Rev. 81 (3-4), 135-174.
- García-Hernandez, J., Glenn, E.P., Flessa, K. 2013. Identification of chemicals of potential concern (COPECs) in anthropogenic wetlands of the Colorado River delta. Ecological Engineering (59):52-60.
- Nelson, S.M., Fielding, E.J., Zamora-Arroyo, F., Flessa, K., 2012. Delta Dynamics: Effects of a major earthquake, tides, and river flows on Ciénega de Santa Clara and the Colorado River Delta, Mexico. Ecol. Eng. (In press), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.1009.1004>.
- Nelson, S.M., Zamora-Arroyo, F., Ramirez-Hernandez, J., Santiago-Serrano, E., 2013. Geomorphology of a recurring tidal sandbar in the estuary of the Colorado River, Mexico: Implications for restoration. Ecol. Eng. Vol 59, 121-133.
- Payne, J.M., Reid, F.A., Gonzalez, E.C., 1992. Feasibility study for the possible enhancement of the Colorado Delta Wetlands, Baja California, Mexico. Ducks Unlimited/Ducks Unlimited Mexico, Rancho Cordova, CA.
- Swift, C.C., Findley, L.T., Ellingson, R.A., Flessa K.W. and Jacobs, D.K. 2011. The Delta Mudsucker, *Gillichthys detrusus*, a valid species (Teleostei: Gobiidae) endemic to the Colorado River Delta, northernmost Gulf of California, Mexico. Copeia 2011 (1):93-102.
- Thompson, R.W., 1968. Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, northwestern Gulf of California. Bull. Geol. Soc. Am. Memoir 107, 1-133.
- Zamora, H.A., Nelson, S.M., Flessa, K.W and Nomura, R., 2013. Post-dam sediment dynamics and processes in the Colorado River estuary: Implications for habitat restoration. Ecological Engineering 59: 134-143.