

# **Dinámica del Agua Subterránea en el Tramo Limítrofe del Río Colorado**



# **Dinámica del Agua Subterránea en el Tramo Limítrofe del Río Colorado**

por  
Michael Cohen  
Mayo 2013



**PACIFIC  
INSTITUTE**

Pacific Institute  
654 13th Street, Preservation Park  
Oakland, California 94612

[www.pacinst.org](http://www.pacinst.org)

teléfono: 510.251.1600

[info@pacinst.org](mailto:info@pacinst.org)

© Copyright 2013 Todos los derechos reservados

ISBN: 1-893790-38-x

ISBN 13: 987-1-893-790-38-4

## Sobre el autor

Michael Cohen es investigador adjunto en el Pacific Institute, con sede en Boulder Colorado. Es autor titular de varios reportes del Instituto y co-autor de varios artículos de revistas, sobre agua y medio ambiente en la región fronteriza.

## Sobre Pacific Institute

Pacific Institute es, a nivel mundial, una de las principales organizaciones de la sociedad civil dedicada a la investigación y a la educación para crear un planeta más saludable y comunidades sustentables. Con base en Oakland, California y oficinas en Boulder, Colorado, realizamos investigación interdisciplinaria y nos asociamos con las partes interesadas para generar soluciones que favorezcan la protección ambiental, el desarrollo económico y la igualdad social – en California, a nivel nacional e internacional. Trabajamos para cambiar las políticas y encontrar soluciones en el mundo real para problemas como la escasez de agua, la destrucción de hábitats, calentamiento global e injusticias ambientales. A partir de nuestra fundación en 1987, el Pacific Institute se ha convertido en un foco para el pensamiento independiente e innovador que trasciende los campos tradicionales de estudio, permitiéndonos establecer contactos y lograr acercamientos entre grupos opuestos. El resultado es soluciones efectivas, factibles que dan respuesta a problemas en las áreas de recursos de agua dulce, cambio climático, justicia ambiental y globalización. Para mayor información sobre el Instituto y nuestro personal, directores, fundadores y programas, consulte [www.pacinst.org](http://www.pacinst.org).

## Agradecimientos

Este estudio fue financiado por la *Walton Family Foundation*. Las perspectivas y opiniones contenidas en este reporte son del autor y no necesariamente reflejan las perspectivas y opiniones de la Fundación.

Este reporte no podría haber sido terminado sin la ayuda y el apoyo de muchas personas.

A través del largo proceso de preparación de este reporte, Margaret Bowman, Todd Bricker, Bill Greer, Matthew Heberger, Osvel Hinojosa-Huerta, Mary Kelly, Guillermo Martinez, Jennifer Pitt, Jack Schmidt, John L. Scott, Jack Stanford, and Sam R. Walton aportaron valiosos comentarios, recomendaciones y sugerencias. Reconozco con agradecimiento su perspicacia y el tiempo que le dedicaron. Los errores nuevos y restantes son totalmente míos.

También agradezco a las siguientes personas por su consejo, apoyo, información, mapas, fotografías y sugerencias: Gilbert Anaya, Melissa Beckwith, Laura Belanger, Brian Cohen, Peter Culp, Keith Goldfeld, Allen Haden, Bob Isakson, Paula Luu, Pete McBride, Josué Medellín-Azuara, Anna Morales, John Nickell, Fred Phillips, Jorge Ramírez Hernández, Nancy Ross, Lorraine Siano, Kevin Wheeler, y Stephanie Yard.

Agradezco a María Isabel de la Parra la traducción de este documento al español, y a Eliana Rodríguez Burgueño por revisar la traducción. Los errores de traducción nuevos y restantes son totalmente míos.

Este reporte está disponible en inglés, en <http://www.pacinst.org/publication/groundwater-dynamics-in-the-colorado-river-limitrophe/>.

## Portada

La imagen de la portada, tomada en mayo de 2001, muestra uno de los pozos de extracción de agua subterránea de México en la Mesa Arenosa.

Fotografía del autor.

## Resumen

Los sedimentos del delta del Río Colorado cubren alrededor de cinco millones de km<sup>2</sup> en la región fronteriza cercana a Yuma, Arizona y Mexicali, Baja California (ver Figura 1). En el transcurso del último siglo, la mayoría de estas tierras han sido convertidas a agricultura de riego. El mismo Río Colorado, derivado y canalizado, así como intensivamente controlado, sólo en raras ocasiones (<10 por ciento de los días) lleva suficiente agua para fluir al menos 32 km más allá de la Presa Morelos, la última presa sobre el río, cerca de la frontera California/Arizona/Baja California. El corredor límite del río – el tramo de aproximadamente 36 km de Andrade a San Luis que separa Baja California de Arizona (ver Figura 2) – es generalmente considerado la parte más alta del remanente del delta del Río Colorado, con algunas de las zonas más extensas de álamos y sauces nativos que quedan en el bajo Río Colorado y una de las pocas áreas donde el río aún tiene, ocasionalmente, agua suficiente para sobrepasar sus márgenes y alcanzar su planicie aluvial. Por este motivo, durante más de una década, se ha generado un enorme interés en la restauración del tramo límite. En años recientes, sin embargo, ha habido una creciente preocupación de que el deterioro en las condiciones del agua subterránea en la parte baja del tramo límite, coarte el éxito de los esfuerzos de restauración.

El objetivo de este estudio es (1) proporcionar una clara descripción de, y una explicación para, las condiciones cambiantes del agua subterránea en el tramo límite del Río Colorado y las zonas adyacentes; y (2) determinar, hasta donde sea posible, el impacto que la extracción por bombeo de agua subterránea tiene en estas condiciones de sobre extracción.

La pregunta clave subyacente en este estudio indaga cómo las condiciones cambiantes del agua subterránea en el corredor límite pudieran afectar la sustentabilidad de los proyectos planeados de restauración de hábitats. El reciente declive en las elevaciones del agua del subsuelo en este cuarto final del tramo límite representa un riesgo potencial para estos esfuerzos de restauración y fue lo que dio origen a esta investigación.

El tramo límite se encuentra en una de las regiones más calientes y secas de Norteamérica. Aparte de una precipitación pluvial menor a los 7 cm anuales, las únicas aguas superficiales que ingresan en el área de estudio provienen de descargas de la Presa Morelos y de varios pequeños canales de desagüe que descargan agua del sistema de riego de Yuma. Grandes diques en ambos lados del río impiden que cualquier escorrentía superficial llegue al río y constriñen los movimientos del río. Bajo la superficie, el agua subterránea fluye hacia el Oeste, a la parte alta del tramo límite, alimentada por los campos agrícolas intensamente irrigados del área de Yuma. Una cantidad limitada de agua subterránea también ingresa al corredor límite como un sub-flujo bajo la Presa Morelos y por filtraciones del Canal Reforma de México, inmediatamente al Oeste del tramo límite. Estas fuentes generan un nivel freático relativamente elevado en la parte alta del tramo límite, suficiente para sostener flujos perennes en el cauce del río, al menos en la parte alta del tramo límite.

Sin embargo, aguas abajo, el nivel freático desciende de tal manera que el cauce del Río Colorado permanece seco la mayor parte del tiempo. Hay dos factores responsables por el declive de las elevaciones del agua subterránea a lo largo de la última década, particularmente en el último cuarto del corredor límite. El dramático descenso en los flujos superficiales aguas abajo de la Presa Morelos a partir de 2005, ha disminuido notablemente la recarga y la elevación del agua subterránea más abajo de Gadsden, Arizona. Otro factor que contribuye a este declive y que probablemente se relaciona con el descenso de los flujos superficiales que llegan a la Presa Morelos, ha sido el incremento en la extracción por bombeo dentro de la zona de exclusión de 8 km, a lo largo de la frontera Arizona-Sonora. La magnitud de los flujos superficiales parece ser el factor principal que afecta las condiciones del agua subterránea en el tramo límite, directamente por vía de las filtraciones e indirectamente al promover un incremento en la extracción por bombeo – especialmente por parte de México – en la zona de exclusión de 8 km en la frontera Arizona-Sonora, cuando los flujos que llegan a la Presa Morelos descienden a menos de 1,850 MMC.

Este estudio describe y evalúa las condiciones del agua subterránea en el tramo límite del Río Colorado, utilizando información disponible – no se realizaron nuevas mediciones para elaborar este reporte. Las fuentes de información incluyen varias dependencias estatales y federales, que reportan información de medidores de caudal existentes y de pozos de monitoreo y de extracción. La precisión de esta información reportada varía, desde un alto nivel para los pozos de monitoreo, a un margen de 10 por ciento para algunos de los medidores, hasta un nivel muy bajo para los flujos de caudal calculados aguas abajo de la Presa Morelos y a través del tramo límite. A partir de 2005, el último medidor sobre el Río Colorado, en el extremo aguas abajo del tramo límite, ha sido temporal, instalado y monitoreado únicamente cuando se anticipa que haya flujos de caudal. La información existente sobre movimientos de agua subterránea hacia el área de estudio tiene más de 40 años de antigüedad, de un tiempo en que las condiciones en el área eran muy diferentes. No obstante, la información existente permite elaborar observaciones generales sobre las tendencias actuales y nos da la posibilidad de inferir el movimiento del agua subterránea a grandes rasgos.

Las condiciones del agua subterránea en el área de estudio y en las regiones circundantes han sido muy dinámicas a lo largo de los 57 años de observaciones registradas en los pozos. La elevación del nivel freático con frecuencia fluctúa de un mes a otro, aunque la tendencia a largo plazo en el área de estudio, sobre todo hacia el extremo aguas abajo del área de estudio, ha sido descendente. En el extremo aguas abajo, el nivel freático descendió 9.4 m de septiembre de 1983 a octubre de 2009. Las condiciones recientes del agua subterránea se parecen poco a las condiciones pre-desarrollo, cuando el Río Colorado recargaba el acuífero y las elevaciones del nivel freático declinaban a medida que se alejaban del río. Hoy en día, el río gana agua del acuífero subyacente o está totalmente desconectado del mismo.

Las condiciones del agua del subsuelo en el área de estudio se han deteriorado a lo largo de los últimos 57 años, y los impactos se han vuelto progresivamente más pronunciados en el cuarto meridional del área de estudio. Aun cuando los registros de los pozos de monitoreo son esporádicos en algunos periodos clave (tales como a inicios de los años noventa), varias tendencias generales son evidentes. El nivel freático a través del área de estudio alcanzó su máxima elevación en cuatro periodos definidos: enero de 1955, enero de 1958, septiembre de 1983 y enero de 1998, con un pico menos pronunciado en diciembre de 1980. A lo largo de la última década, el nivel freático cerca de la Presa Morelos ha sido aproximadamente 0.6 m menor a las elevaciones promedio en la década de los sesentas y setentas. Al aproximarse al extremo aguas abajo del tramo límite, las elevaciones del nivel freático descendieron en octubre de 2009 a su elevación más baja registrada, a aproximadamente 8.2 m de su elevación en 1960. Además de esta pronunciada caída en la elevación del nivel freático en el extremo aguas abajo del área de estudio, dichas elevaciones han sido mucho más variables que las registradas cerca de la Presa Morelos. En algunas ocasiones, las elevaciones del nivel freático aguas abajo se han disminuido y aumentado, y caído de nuevo más de 3 m en el lapso de un par de meses, denotando suelos porosos y una rápida reacción a factores externos.

Varios factores ayudan a explicar estas condiciones dinámicas del agua subterránea. La variabilidad puede describirse como una función de la diferencia entre los caudales afluentes y los efluentes. Los caudales afluentes al acuífero pueden provenir tanto de la recarga por medio de aguas superficiales que se infiltran a través del suelo, como del movimiento de aguas del subsuelo. En el caso del área de estudio, el riego intensivo de unas 30,000 ha en el Condado de Yuma que drena, al menos parcialmente, hacia el área de estudio, la recarga periódica a través del cauce y la planicie aluvial del Río Colorado, las filtraciones de los canales de irrigación, los escasos eventos de precipitación pluvial significativa, y el movimiento de agua del subsuelo del área de Yuma hacia el cauce del río, todos ellos son factores que contribuyen a la recarga del agua subterránea en el tramo límite. Algo de recarga ocurre por filtraciones del Canal Reforma, inmediatamente al Oeste del área de estudio, afectando el tramo límite directamente abajo de la Presa Morelos.

Los efluentes incluyen la extracción por bombeo, la extracción por las raíces de las plantas, el movimiento de agua del subsuelo hacia afuera del área de estudio y las descargas hacia la superficie, a manera de fuentes y filtraciones. En el área de Yuma, los irrigadores utilizan el bombeo y las zanjas de drenado para mantener el nivel freático por debajo de la zona de las raíces, para permitir un mejor manejo del riego y para evitar que se quemen las raíces de las plantas por el agua subterránea

salada. En algunas áreas del Condado de Yuma, se extrae agua subterránea para riego y, de pozos a mayor profundidad, para uso doméstico. En México, los irrigadores bombean agua subterránea para complementar el agua superficial, y para uso doméstico. En una franja de 8 km de la frontera Arizona-Sonora, ambas naciones operan extensos campos de pozos, extrayendo en años recientes más de 250 MMC de agua subterránea por año entre los dos países. Las plantas riparias y las de mayor elevación también extraen agua del acuífero subyacente, afectando directamente las condiciones en el área de estudio. Las operaciones de extracción por bombeo al Oeste y al Sureste del tramo límite extraen agua subterránea del área de estudio, abatiendo las elevaciones del agua subterránea. En los puntos en donde el nivel freático y la superficie del terreno tienden a intersectarse, como ocurre en la parte alta del tramo límite, descargas del aluvión generan flujos base en el cauce del río.

Se desarrollaron dos balances de agua relacionados, para rastrear los diversos factores descritos anteriormente. Estos balances dan cuenta de los caudales afluentes y efluentes a los sistemas de agua subterránea y superficial, para los años 1990-2010. Separar los dos sistemas, entrelazados pero de alguna manera diferenciados, el agua superficial y el agua subterránea en el área de estudio, permite un análisis más cuidadoso de los términos individuales involucrados. Se seleccionó el periodo de tiempo para evitar la distorsión de los impactos de flujos muy altos del Río Colorado a mediados de los ochentas, cuando miles de millones de metros cúbicos fluyeron por el tramo límite. Las Tablas R 1 y 2 muestran los balances de agua superficial y agua subterránea en el área de estudio, respectivamente; incluyen los flujos (en millones de metros cúbicos por año) como valor promedio y, además, los desglosan en años “húmedos” y años “normales”, basado en si

**Tabla R-1. Balance de agua de flujos superficiales en el área de estudio (MMC por año)**

Afluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
flujos abajo de la Presa Morelos	1990-2010	calculado	451	1,140	29.0
flujos base		conjetura	2	2	2
canal de desagüe Milla-11	1990-2010	dispositivo de medición	5.2	5.8	4.8
precipitación	1990-2010	dispositivo de medición	1.9	2.5	1.5
canal de desagüe Milla-21	1990-2010	dispositivo de medición	1.6	1.5	1.7
canal de desvia LIS	2004-2010	dispositivo de medición	0.5	0.09	0.6
<b>Total</b>			<b>463</b>	<b>1,150</b>	<b>39.9</b>
Efluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
evaporación		estimado	3	3	3
infiltración	1990-2000	conjetura	18	23	14
Q en LIS	1990-2010	dispositivo de medición	458	1,170	18.6
<b>Total</b>			<b>479</b>	<b>1,200</b>	<b>35</b>
<b>Residual</b>			<b>(16)</b>	<b>(48)</b>	<b>4.5</b>

hubo más o menos de 1,850 MMC de flujo a la Presa Morelos.<sup>1</sup> Las dos tablas incluyen la fuente para los diferentes valores.

En la Tabla R-2, varios datos son meras conjeturas, dada la falta de información. El movimiento del agua subterránea como caudal afluente viene de una investigación de 40 años de antigüedad, que probablemente es obsoleta, ya que precede a la operación de los campos de pozos en la zona de cinco millas (8 km) que amortigua la frontera Arizona-Sonora; los grandes volúmenes extraídos de los pozos estadounidenses y mexicanos en esta zona han cambiado supuestamente la dirección de algunos movimientos de agua subterránea, particularmente cerca de la frontera. El movimiento del agua subterránea como efluente refleja el hecho de que en el tramo límite, abajo de Gadsden, el manto freático no tiene conexión con el cauce superficial y el agua subterránea supuestamente fluye por esa área sin mermas. Sin embargo, en las tres cuartas partes superiores del corredor límite, existen conexiones entre el manto freático y la superficie (incluyendo vegetación riparia que se alimenta de este manto freático), por lo que es probable que este efluente se consume, tanto por los flujos base como por la evapotranspiración. El cambio en el almacenamiento estimado en la Tabla R-2 complementa el volumen de movimiento de agua subterránea.

La extracción de agua subterránea en la zona de amortiguamiento de 8 km a lo largo de la frontera Arizona-Sonora se ha incrementado notablemente a lo largo de los últimos 35 años. La extracción anual promedio en Estados Unidos, en la zona de amortiguamiento, durante los años 1996-2002, fue menos del 10 por ciento de su extracción anual promedio en 2007-2009; la

**Tabla R-2. Balance de agua subterránea en el área de estudio (MMC por año)**

Afluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
Subflujos por debajo de la Presa Morelos		conjetura	1	1	1
infiltración		conjetura	18	23	14
filtraciones del Canal Reforma		Conagua 2004	12.2	14.1	10.2
recarga de riego agrícola entre los diques, al Este del río		calculado	3.5	3.5	3.5
recarga de riego agrícola entre los diques, al Oeste del río		calculado	9.7	9.7	9.7
movimiento de agua subterránea	1973	Olmsted	40.4	40.4	40.4
<b>Total</b>			<b>85</b>	<b>92</b>	<b>79</b>
Efluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
evaporación y ET	1997-2007	LCRAS	25.9	24.4	27.2
extracción entre los diques - México		calculado	32.2	32.2	32.2
extracción entre los diques - EE.UU.		calculado	12.5	12.5	12.5
cambio en almacenamiento	1990-2010	estimado	(3.4)	7.5	(9.7)
movimiento de agua subterránea		conjetura	40	40	40
<b>Total</b>			<b>107</b>	<b>117</b>	<b>103</b>
<b>Residual</b>			<b>(22)</b>	<b>(25)</b>	<b>(24)</b>

<sup>1</sup> Años “húmedos” fueron 1993, 1995, 1997-2001, y 2010; años “normales” fueron 1990-92, 1994, 1996, y 2002-09.

extracción en los pozos no federales en el lado estadounidense de la zona de exclusión, se incrementó por alrededor de 35 por ciento entre estos dos periodos. México se aproximó a su límite anual de 197 MMC en 2007 y de nuevo en 2009. El promedio para los años 1975-2000 fue 109 MMC, incrementándose a 208 MMC para los años 2001-2009. Para los años 2005-2009, la cantidad anual extraída por bombeo, reportada para ambos países fue casi 250 MMC, más del doble de la tasa para los primeros 25 años registrados.

Las condiciones y la dinámica del agua subterránea en el tramo límite han cambiado fundamentalmente en los últimos 70 años. El Río Colorado solía ser una fuente neta de recarga para el acuífero local en el tramo límite. El río estaba estrechamente conectado con el acuífero; la profundidad al agua subterránea se incrementaba a mayor distancia del río. Las inundaciones del río provocadas por el deshielo, anegaban las tierras circundantes, recargando aún más el acuífero y aportando flujos base durante periodos de bajo flujo. La derivación de esencialmente todo el flujo del río aguas arriba del área de estudio, combinada con la pérdida de sedimentos tras las presas ubicadas aguas arriba y la subsecuente incisión del cauce del río aguas abajo de la Presa Morelos, significa que el río es ahora un sumidero en la parte alta del tramo límite y está completamente desconectado del acuífero en el último cuarto del tramo límite. Por medio del riego, el río todavía ‘inunda’ las tierras adyacentes, recargando el acuífero. En la parte alta del tramo límite, la recarga proveniente de este riego es suficiente para mantener elevados los niveles de agua subterránea y la conectividad con el río. Pero la extracción excesiva por bombeo a lo largo de la línea divisoria, al Este del extremo aguas abajo del tramo límite y al Oeste del río han hecho descender el nivel freático en el último cuarto del tramo

límite, volviendo efímero al Río Colorado, unos 60 km abajo de Gadsden.

Estas diversas tendencias resaltan las dramáticas diferencias en las condiciones del agua superficial y subterránea, a lo largo de los aproximadamente 36 km de cauce que comprende el área de estudio. La cuarta parte o el tercio superior del Río Colorado aguas abajo de la Presa Morelos parece mantenerse húmedo permanentemente, sostenido por filtraciones y por descargas periódicas de la presa y del canal de desagüe Milla-11, así como, particularmente, por flujos base generados por un nivel freático relativamente alto. En ésta, la sección más alta, el nivel freático se ha mantenido relativamente estable por más de cincuenta años, con algunos picos causados por las notables inundaciones del Río Colorado a mediados de los

ochentas y finales de los noventas. La parte media del área de estudio, que aguas abajo se extiende hasta el área de la curva de Gadsden, parece tener flujos periódicos o intermitentes y un nivel freático un poco menor; aunque todavía es relativamente estable. Aunque el agua superficial pierde su conexión con el acuífero en esta parte, el nivel freático aún se mantiene al alcance de las raíces de la vegetación riparia nativa establecida. En el último tramo del área de estudio, más abajo de Gadsden, se pierde incluso esta conectividad a nivel de la zona de las raíces, a medida que el nivel freático desciende precipitadamente. Este último tramo del área de estudio experimenta fluctuaciones dramáticas en el acuífero, como una reacción a pulsos de agua superficial cada vez menos frecuentes. Como se reporta en el último medidor sobre el río, desde 2005, el cauce en el tramo final del área de estudio ha estado seco durante más del 90 por ciento de los días. En *Hunter's Hole*, justo al sur de Gadsden, reportes anecdóticos indican que la vegetación riparia se ha mantenido gracias a riego suplementario, aún en sitios donde el nivel freático ha caído por debajo del alcance de las raíces de álamos y sauces; pero la escasa vegetación en otras áreas abajo de Gadsden indica que el nivel freático ya no sostiene la vegetación riparia que depende de un manto freático accesible.

Hay dos factores relacionados que explican el reciente declive dramático en la elevación del nivel freático pasando el último cuarto del área de estudio: la reducción significativa en los flujos de aguas superficiales y un incremento en el volumen de agua extraída por bombeo de los pozos mexicanos y estadounidenses en la franja de 8 km que amortigua la frontera entre Arizona-Sonora. Este volumen se incrementó de un promedio de 110 MMC anuales para los años 1975-2000, a un promedio de casi 240 MMC por año en 2005-2009.

Este estudio indica que, incluso después del periodo excepcionalmente seco de 2005-2009, cuando en el 90 por ciento de los días los flujos superficiales no alcanzaban a llegar al medidor aguas abajo del tramo límite, más de un tercio del canal en el corredor límite todavía mostraba conectividad con el manto freático, y aproximadamente dos tercios del tramo límite todavía tenía un nivel freático al alcance de las raíces de álamos y sauces. La caída en picada del nivel freático en el extremo aguas abajo del tramo límite indica que los últimos 8 km del río en el corredor límite pudieran no reaccionar a los esfuerzos para restaurar el hábitat ripario, por lo menos no sin un compromiso a largo plazo de riego suplementario; aunque las áreas aguas arriba parecen estar a salvo del reciente abatimiento del nivel freático.

Las tendencias recientes, tales como el rápido crecimiento poblacional a lo largo de la frontera, el incremento en la extracción por bombeo en la zona de exclusión de 8 km y la ausencia en general de descargas significativas de la Presa Morelos, sugieren que en los años venideros, es probable que continúe la pronunciada caída del nivel freático que se observa abajo de Gadsden. Sin embargo, la recarga proveniente de descargas periódicas promovidas por lluvia, de la Presa Morelos, y la continua recarga de agua subterránea que fluye de las tierras irrigadas en el Valle de Yuma hacia la parte alta del área de estudio, parecen aportar flujos base en el tramo superior del cauce, así como un

nivel freático relativamente alto a través de buena parte del área de estudio. Dados los retos hidrológicos impuestos en 2005-2009, éstas son noticias alentadoras. Este estudio claramente indica que los proyectos de revegetación y restauración en los dos tercios superiores del área de estudio, podrán ser exitosos a largo plazo y que vale la pena emprenderlos.

## Recomendaciones

Este estudio representa la evaluación más exhaustiva realizada a la fecha, de las condiciones y la dinámica del agua subterránea en el tramo límite aguas abajo de la Presa Morelos. Además, los estudios sobre sitios más específicos se verían beneficiados por investigación adicional (descrita abajo). No obstante, aún sin estas nuevas investigaciones, este estudio claramente indica que los proyectos de revegetación y restauración en los dos tercios superiores del área de estudio, podrán ser exitosos a largo plazo y que vale la pena emprenderlos.

La IBWC ha planeado provisionalmente conducir un nuevo levantamiento del cauce límite en el futuro próximo, el primero desde 1999. Un nuevo levantamiento mejoraría en gran medida la comprensión de la dinámica reciente del canal, incluyendo el transporte de sedimentos, y proporcionaría un fundamento para futuros esfuerzos de restauración. Este levantamiento debe realizarse lo antes posible, y debe coordinarse con un nuevo levantamiento de la vegetación en el corredor límite.

Para proporcionar una medida de los flujos reales en la parte más alta del delta del Río Colorado, a diferencia de los flujos calculados con base en los registros de medidores corriente arriba, la IBWC debe instalar un nuevo medidor de caudal inmediatamente aguas abajo de la Presa Morelos.

Pozos de observación o piezómetros adicionales, especialmente en el lado estadounidense del río, mejorarían enormemente la comprensión de las condiciones reales que son relevantes para los esfuerzos de restauración. Actualmente, dicha información se interpola a partir de datos de los pozos de monitoreo cuyo propósito es cubrir una necesidad muy diferente. También sería esclarecedor realizar análisis SIG adicionales, graficando las profundidades al agua subterránea en otras fechas de interés y resaltando las diferencias entre fechas.

La relación entre los flujos calculados en la Presa Morelos, los flujos registrados en el último medidor sobre el río y las elevaciones del nivel freático en el tramo límite, amerita la realización de un estudio más a fondo. Dicho estudio sería crítico para determinar los requerimientos de aguas superficiales para los esfuerzos de restauración del tramo límite. La evaluación preliminar descrita en este estudio indica que, bajo las condiciones actuales, los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos que exceden 25 m<sup>3</sup>/s pueden fluir sin interrupción a través del tramo límite, tardando aproximadamente un día en recorrerlo; aunque en otros momentos, hay flujos aguas abajo de la Presa Morelos que exceden los 30 m<sup>3</sup>/s, que no generan flujos reportados en el extremo final del área de estudio. Esto podría simplemente ser un reflejo de diferentes condiciones en el cauce, o podría deberse a errores en la información reportada y calculada.

**Indice**

Resumen	i
Abreviaturas y definiciones	vii
<b>Capítulo I - Introducción</b>	1
Objetivo del estudio	3
Antecedentes	3
Medio ambiente físico	4
Medio ambiente construido	9
<b>Capítulo II – Metodología</b>	13
Límites del área de estudio	13
Fuentes y limitaciones de la información	13
<b>Capítulo III – Condiciones del agua subterránea</b>	19
Condiciones históricas del agua subterránea	19
Condiciones recientes del agua subterránea	20
<b>Capítulo IV – Dinámica del agua subterránea</b>	25
Recarga	27
Extracción	29
<b>Capítulo V – Flujos superficiales</b>	35
El cauce principal y los canales de desagüe	36
Flujos superficiales y de agua subterránea	39
<b>Capítulo VI – Conclusiones y recomendaciones</b>	44
Recomendaciones	46
Fuentes de Información y Bibliografía	48
<b>Anexo A - Los Pozos de Monitoreo de los EE.UU.</b>	51
<b>Anexo B</b>	52

**Figuras**

1. El delta del Río Colorado.	1
2. El corredor límite.	2
3. Cambios en niveles freáticos, dic. 2004 - dic. 2009.	3
4. Concentraciones de sedimentos suspendidos en el Río Colorado, en el LIN, Nov. 1982-Sept. 2008.	5
5. Desplazamiento lateral del cauce con referencia a la alineación de 1982.	6
6. Cambios en elevaciones de la vaguada, 1942-1999.	7
7. Perfil de elevaciones del terreno en el KM 17.2 del río.	7
8. Precipitación y flujos en el tramo límite, enero, 2010.	8
10. La Presa Morelos	10
11. Derivaciones no autorizadas de agua en el tramo límite.	10
12. Pozo 737, cercano a la Colonia Reforma.	11
13. La profundidad al agua subterránea para el pozo "13 3/4S-10 3/4W," I de diciembre, 2009 – 7 de febrero, 2010.	16
14. Descarga promedio diaria aguas abajo de la Presa Morelos en años en que no hubo descargas reportadas en el LIS.	17
15. Contornos del nivel de agua promedio, 1939.	19
16. Elevaciones históricas del nivel freático, 1954-2010.	20
17. Profundidad al agua subterránea en los pozos a lo largo del corredor límite, dic. 2004 – dic. 2010.	21
18. Elevaciones del nivel freático en los pozos a lo largo del corredor límite, dic. 2004 – dic. 2010.	21
19. Cambios en el nivel freático, dic. 2004 – dic. 2009. .	21
20. Perfil del corredor ripario y las elevaciones del nivel freático en dic., 2009.	22
23. Profundidad al agua subterránea 1980-2004, al oeste del cauce del río.	22
24. Profundidad al agua subterránea en pozos de monitoreo emparejados en lados opuestos del canal del río, 2009-2010.	23
25. Profundidad al agua subterránea en el tramo límite, dic., 2009.	24
26. Caudales afluentes y efluentes del área de estudio.	25
28. Derivaciones anuales y flujos de retorno de los distritos de riego del área de Yuma, 1990-2010.	28
29. Derivaciones mensuales reportadas, YCWUA.	28
30. Flujos de retorno totales reportados como porcentaje total de derivaciones reportadas para los distritos de riego de Yuma, 1990-2010.	28
32. Extracción municipal de agua subterránea cerca del corredor límite.	29

**Tablas**

R-1. Balance de agua de flujos superficiales en el área de estudio (MMC por año)	ii
R-2. Balance de agua subterránea en el área de estudio (MMC por año)	iii
1. Usos de la tierra río abajo de la Presa Morelos, entre los diques, junio 2002.	15
2. Número de habitantes en comunidades dentro del corredor límite y en zonas aledañas al mismo.	12
4. Balance del flujo de agua superficial en el área de estudio (MMC)	26
5. Balance del agua subterránea en el área de estudio (MMC).	27
6. Comunidades de vegetación en el tramo límite.	32
7. Flujos mensuales en el LIS, por décadas.	37
8. Estadísticas sumarias para la Figura 47.	39



33. Ubicaciones de pozos de irrigación y de monitoreo cercanos al LIS.	30	55. Elevaciones del nivel freático cerca de <i>West Cocopah</i> y diferencias entre los flujos calculados del Río Colorado aguas abajo de la Presa Morelos y flujos reportados en el LIS, julio de 1997-marzo de 1998.	42
34. Extracción de agua subterránea y elevaciones del nivel freático cerca del LIS, 1990-2010.	30	56. Elevaciones del nivel freático y flujos diarios en el tramo límite, 1 de julio, 2009-4 de enero, 2011.	42
35. Extracción de agua subterránea y elevaciones del nivel freático cerca de <i>West Cocopah</i> , 1997-1998.	31	57. Entregas del Río Colorado y extracción por bombeo en la zona de exclusión, 1975-2010.	43
36. Distrito de riego 014, con límites de los módulos y pozos.	31	58. Entregas en el LIN y extracción por bombeo en la zona de exclusión, 1975-2010.	43
37. Volúmenes de extracción en el Módulo 7, 1984-2001.	31		
38. Volúmenes mensuales de extracción reportados en el Módulo 7 y elevaciones del nivel freático reportadas, 1984-2001.	32		
39. ET de la vegetación riparia en la porción estadounidense del corredor límite, 1997-2007.	32		
40. Cantidad total reportada de agua subterránea extraída dentro de los 8 km del LIS, en México y en Estados Unidos, 1975-2010.	33		
41. Elevaciones del nivel freático y extracción total en las zonas de exclusión, 1975-2010.	34		
42. Uso consuntivo anual del Río Colorado (E.E.U.U.) y entregas a México, 1950-2010.	35		
43. Flujos mensuales del Río Colorado en el LIN y en el LIS, 1950 a 2010.	36		
44. Flujo mensual del Río Colorado en el LIN y en el LIS, enero de 2000 a diciembre de 2010.	37		
45. Promedio móvil de 5-días del flujo calculado aguas abajo de la Presa Morelos y flujos reportados en el LIS, 2002-2003.	37		
46. Flujos diarios aguas abajo de la Presa Morelos y en el LIS, 1° de marzo – 15 de abril, 2002.	38		
47. Flujo en el LIS y pérdidas al canal aguas abajo de la Presa Morelos, 2001 – 2010.	38		
48. Histograma de frecuencias que muestra la distribución de los volúmenes de descarga diaria en el tramo límite y en el LIS.	39		
49. Elevaciones del nivel freático vs. flujos mensuales en el LIS, 1950-2010.	40		
50. Elevaciones del nivel freático vs. flujos mensuales en el LIS, 1965-1975.	40		
51. Elevaciones del nivel freático cerca de <i>Hunter's Hole</i> y flujos mensuales en el LIS, 1960-2010.	41		
52. Elevaciones del nivel freático cerca de <i>Hunter's Hole</i> y flujos mensuales en el LIS, 1960-1979.	41		
53. Elevaciones del nivel freático cerca de <i>Hunter's Hole</i> y flujos superficiales, 2002-2010.	41		
54. Elevaciones del nivel freático cerca de <i>West Cocopah</i> y flujos del Río Colorado, julio de 1997-marzo de 1998.	42		

## Abreviaturas y definiciones

### Abreviaturas

ADWR	<i>Arizona Department of Water Resources</i> [Departamento de Recursos Hidráulicos de Arizona]
AZMET	<i>Arizona Meteorological Network</i> [Red Meteorológica de Arizona]
BLM	<i>Bureau of Land Management</i> [Agencia de Administración de Tierras]
CILA	Comisión Internacional de Límites y Aguas
Conagua	Comisión Nacional del Agua (anteriormente abreviado CNA)
ET	evapotranspiración
ha	hectárea
IBWC	<i>International Boundary and Water Commission</i> [Sección estadounidense de la Comisión Internacional de Límites y Aguas]
km	kilómetro
km <sup>3</sup>	kilómetro cúbico
LCRAS	<i>Lower Colorado River Accounting System</i> [Sistema del Buró de Reclamación para la Contabilidad del Bajo Río Colorado]
LIN	Lindero Internacional Norte, que se refiere al punto donde el Río Colorado cruza la Línea Divisoria
LIS	Lindero Internacional Sur, que se refiere al punto donde el Río Colorado cruza la Línea Divisoria
m <sup>3</sup> /s	metros cúbicos por segundo
m	metro
mg/L	miligramos por litro
MMC	millones de metros cúbicos
MODE	<i>Main Outlet Drain Extension</i> [Extensión del Dren de la Descarga Principal]
MSNM	metros sobre el nivel del mar
PNN	Pronatura Noroeste
PRPU	<i>Protective and Regulatory Pumping Unit</i> [Unidad Protectora y Reglamentaria de Bombeo]
Q	descarga (flujo; generalmente expresado en m <sup>3</sup> /s, m <sup>3</sup> /día, o MMC/año)
Reclamation	<i>Bureau of Reclamation</i> [Buró de Reclamación <sup>2</sup> ]
SIG	Sistema de Información Geográfica
UABC	Universidad Autónoma de Baja California
USGS	<i>United States Geological Survey</i> [Servicio Geológico de Estados Unidos]
YCWUA	<i>Yuma County Water Users Association</i> [Asociación de Usuarios del Agua del Condado de Yuma]

### Definiciones

área de estudio	las ~6,500 ha de tierra entre los diques, desde la Presa Morelos hasta el LIS
Delta del Río Colorado	el alcance total del delta, que abarca ~5 millones de kilómetros cuadrados.
límitrofe <sup>3</sup>	el tramo del Río Colorado que va del LIN al LIS
plantilla de canal	un punto que muestra la elevación más baja del canal
remanente del delta	el área entre los diques aguas abajo de la Presa Morelos, mas el río Hardy, los humedales de El Indio y la Ciénega de Santa Clara
vaguada	la parte más profunda de la corriente; un rasgo lineal que corre a lo largo del cauce

<sup>2</sup> 'Buró de Reclamación' es la traducción convencional del nombre de la agencia estadounidense conocida en inglés como el 'Bureau of Reclamation', que es la responsable de administrar el agua del Río Colorado en Estados Unidos. [n. del t.]

<sup>3</sup> El diccionario de Oxford define *límitrofe* como "Situado en la frontera; colindante con, adyacente a (otro país). Una tierra fronteriza."

## Capítulo I - Introducción

El alcance geológico del delta del Río Colorado abarca aproximadamente cinco millones de km<sup>2</sup>, incluyendo el bajo Valle de Coachella, y los Valles de Mexicali e Imperial; se extiende hacia el este más allá de Yuma y hacia el Sur, hasta el Golfo de California (Figura 1) (Sykes 1937). Aldo Leopold visitó el delta

en la década de los veinte y luego escribió sobre su tremenda vitalidad, una mezcla de tierra y agua que exudaba abundancia y languidez (Leopold 1949). La subsecuente construcción de más de veinte grandes presas sobre el Río Colorado y sus tributarios, la imposición de una serie de estrictos controles institucionales

para dirigir la operación de estas estructuras, y la conversión de la mayor parte de la superficie del delta a agricultura de riego, se combinaron para reducir dramáticamente la vitalidad y la capacidad de recuperación del delta. Lo que ahora comúnmente se conoce como el delta es una serie inconexa de humedales alimentados por drenaje y un estrecho corredor ripario, así como un río intermitente aguas abajo de la Presa Morelos, que en conjunto comprenden menos del 10% del alcance geológico del delta (Zamora-Arroyo et al. 2005). Tras más de veinte años de estudios y llamados para la rehabilitación de porciones del delta, y doce años después de la celebración de un acuerdo de cooperación binacional para la restauración del delta, se están realizando algunos esfuerzos de restauración activa de hábitats en ambos lados de la línea divisoria internacional. Después de años de negociaciones binacional de agencias del agua, los representantes de los estados, y de las organizaciones de medio ambiente de ambos países, el 20 de noviembre de 2012, la CILA adoptado el Acta 319.<sup>4</sup> Este nuevo acuerdo incluye una disposición dedicando aproximadamente 193 MMC de agua en porciones del corredor ripario.

La disminución en los flujos hacia el corredor ripario en la última década amenaza estos logros. Estos flujos disminuidos realzan la necesidad de lograr una mejor comprensión de las condiciones actuales e históricas, a fin de que se puedan implementar las acciones apropiadas para proteger los recipientes esfuerzos de restauración de hábitats y para asegurarse de que dichos esfuerzos puedan ser exitosos a largo plazo.

El tramo límiterofe del Río Colorado, el único tramo del río que divide a México de Estados Unidos, mide<sup>5</sup>

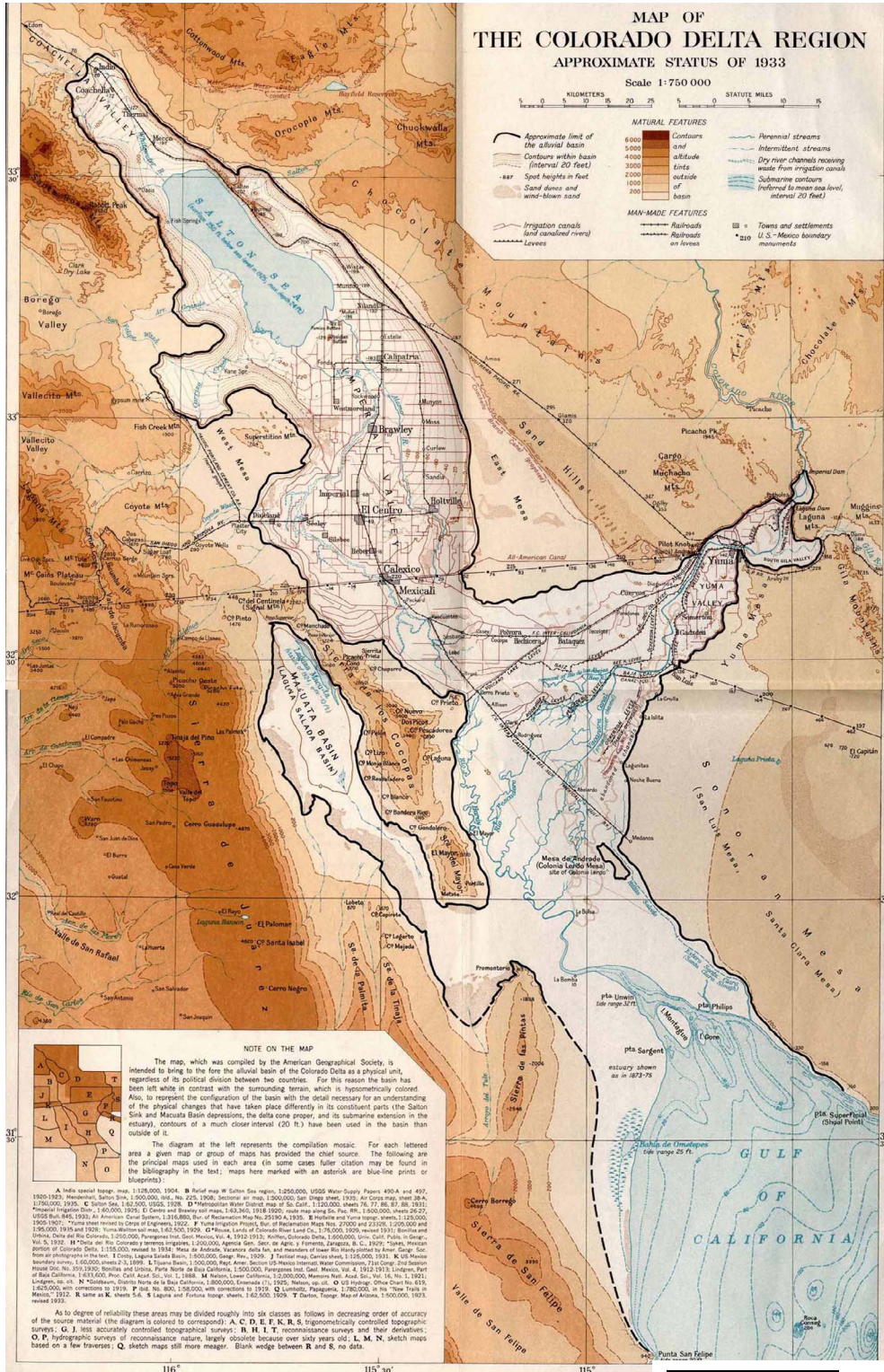


Figura 1. El delta del Río Colorado. Fuente: Sykes (1937).

<sup>4</sup> Ver <http://www.sre.gob.mx/cilanorte/images/stories/pdf/319.pdf>.

<sup>5</sup> Convencionalmente, el tramo límiterofe se describe como una extensión de 38 km desde el LIN hasta el LIS (consulte el sitio web del IBWC en <http://www.ibwc.state.gov/>), pero la longitud real del río en 2006 entre estos dos puntos era aproximadamente 36 km.

aproximadamente 36 km, desde el Lindero Internacional Norte (LIN) cerca de Andrade, California y Algodones, Baja California, hasta el Lindero Internacional Sur (LIS) cerca de San Luis, Arizona y San Luis Río Colorado, Sonora, como muestra la Figura 2. Aproximadamente a 2 km aguas abajo del LIN se encuentra la Presa Morelos, la última presa sobre el Río Colorado. En la mayoría de los años, la Presa Morelos deriva casi todo el flujo remanente del

río al Canal Reforma, en México, para usos agrícolas y municipales (Dickinson et al. 2006).

Sin embargo, tormentas aisladas que depositan lluvia en las tierras irrigadas con agua del Río Colorado, pueden inducir a los irrigadores a cancelar pedidos de agua o a incrementar los flujos del Río Colorado más allá de las necesidades inmediatas de derivación en México, generando grandes – aunque generalmente

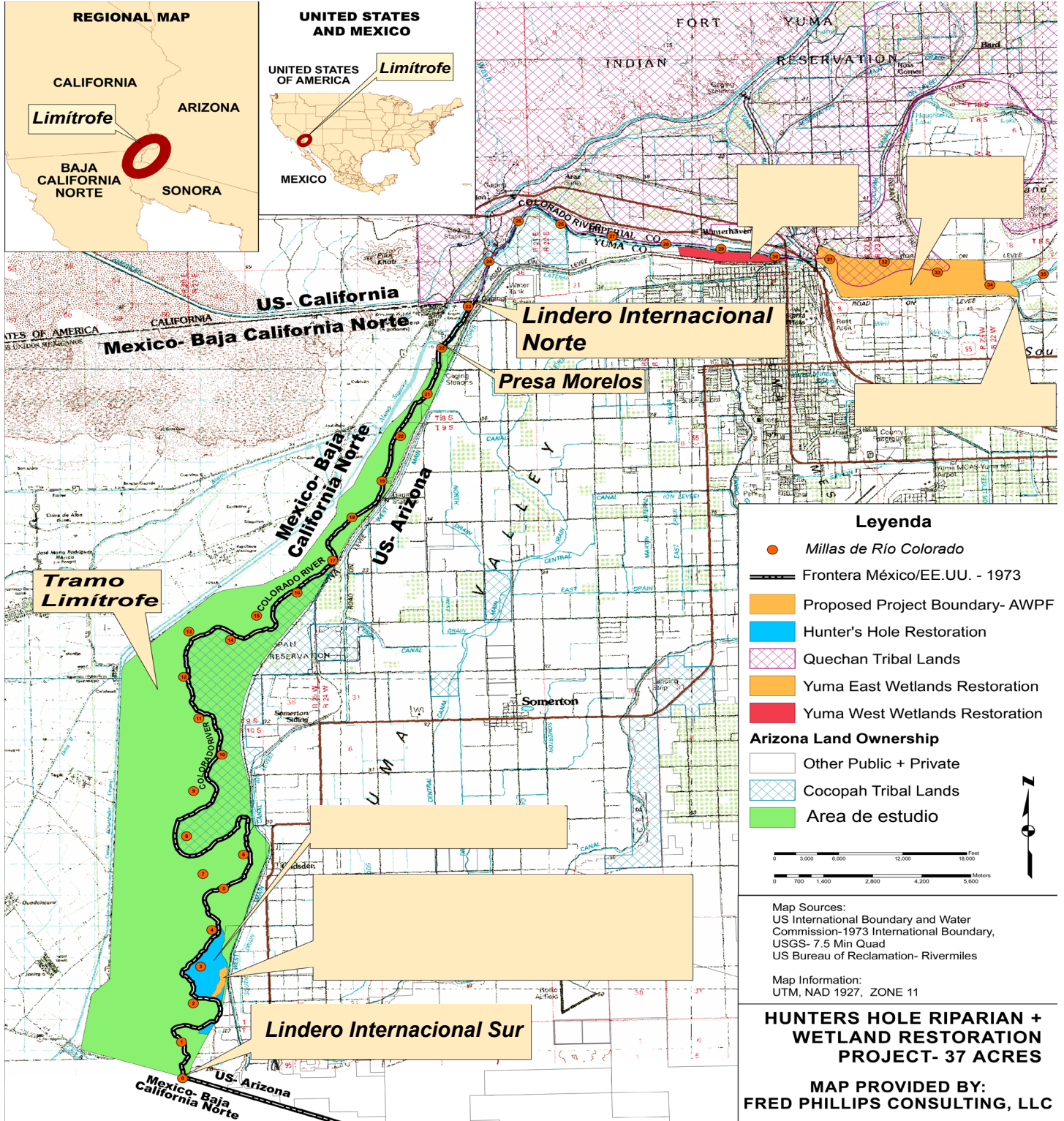


Figura 2. El corredor límitefo. Mapa cortesía de Fred Phillips Consulting, LLC. Consulte [www.fredphillipsconsulting.com](http://www.fredphillipsconsulting.com).

breves – flujos aguas abajo de la presa (Dickinson et al. 2006). Estos flujos, unidos a las grandes descargas de presas aguas arriba a fines de los años noventa, promovió la regeneración de una de las zonas más grandes y densas de vegetación riparia nativa a lo largo del bajo Río Colorado (Zamora-Arroyo et al. 2005). Una vez establecida, esta vegetación riparia depende de las corrientes subterráneas al alcance de sus raíces (Nagler et al. 2008).

La elevación del nivel freático es un factor determinante del éxito potencial de la vegetación riparia – una cuestión que impulsó en gran medida este estudio. Como se describe a continuación, la pérdida de conectividad con el manto freático estresará y matará la vegetación riparia. Los objetivos de este estudio son determinar en qué punto ocurre la pérdida de conectividad y los factores que causaron el descenso en el nivel freático.

En años recientes, particularmente durante el periodo 2005-2009, la elevación máxima de estas corrientes subterráneas (conocidas como el nivel freático) ha caído, dramáticamente en algunos sitios, amenazando la supervivencia de la vegetación riparia existente aguas abajo de la Presa Morelos y el éxito de los esfuerzos de restauración actuales y planeados en la región límite. La Figura 3, preparada por el *Bureau of Reclamation*, muestra los cambios en el nivel freático entre diciembre de 2004 y diciembre de 2009. Nótese que al norte de Gadsden, Arizona, el nivel freático disminuyó menos de 2 m en ese periodo; pero al sur de Gadsden, los niveles del manto freático mostraron un descenso muy

marcado, cayendo más de 6 m en la zona cercana al LIS. Varias áreas aguas abajo de Gadsden, tanto en el lado estadounidense como en el lado mexicano de la frontera, están en proceso de restauración de hábitat o han sido identificados como sitios potenciales para restauración de hábitat. El reciente descenso en el nivel freático en este último cuarto de la zona límite pone potencialmente en riesgo estos esfuerzos de restauración de hábitat y fue lo que motivó el presente estudio.

Este reporte describe las condiciones recientes e históricas de las corrientes subterráneas en el tramo límite del Río Colorado y evalúa los diversos factores que influyen en estas condiciones. El resto de este capítulo describe el objetivo de este estudio y proporciona antecedentes sobre el medio ambiente físico y la infraestructura que dan forma y afectan el corredor límite. El capítulo II describe los métodos utilizados en este estudio, incluyendo las fuentes de información y las dificultades que se presentaron con algunos datos. El Capítulo III describe condiciones recientes e históricas de las corrientes subterráneas en el corredor límite. El Capítulo IV presenta un balance general para el agua en el corredor y evalúa los factores que afectan la recarga del manto freático y las tasas de extracción, así como su impacto en el nivel freático. El Capítulo V sintetiza la escorrentía superficial a lo largo del tramo y su impacto en las condiciones del agua subterránea. El Capítulo VI ofrece algunas conclusiones y recomendaciones.

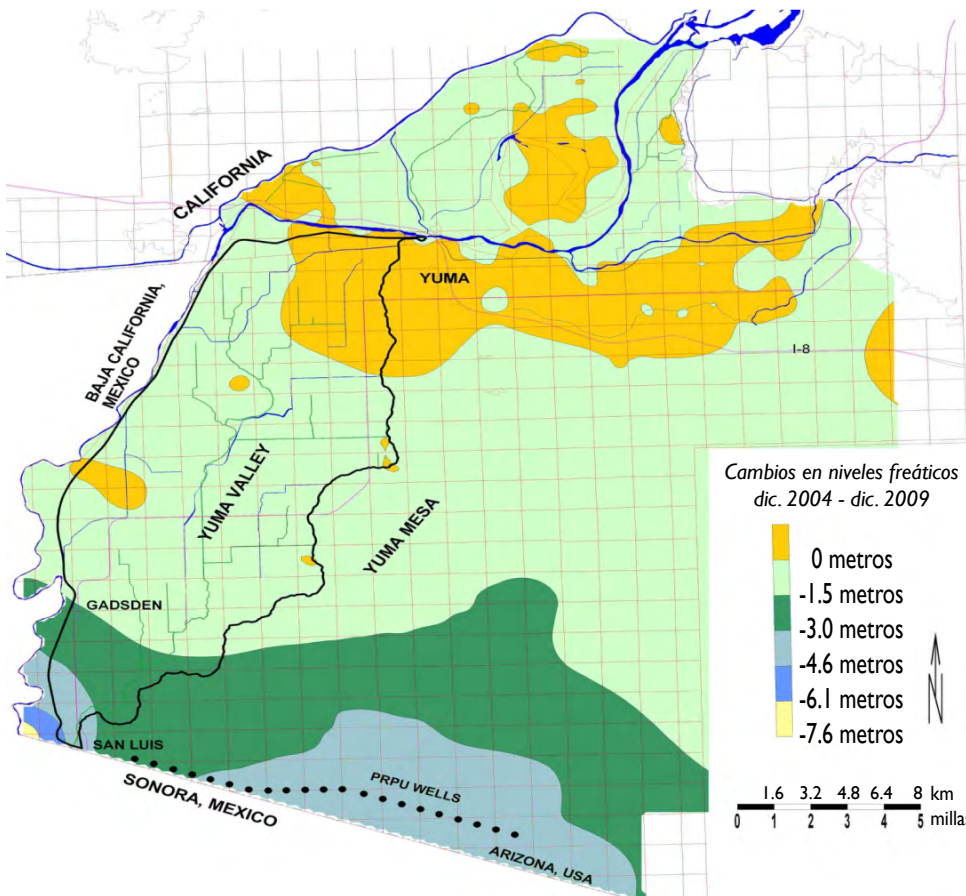


Figura 3. Cambios en niveles freáticos, diciembre 2004-diciembre 2009. Fuente: Reclamation.

## Objetivo del estudio

El objetivo de esta investigación es proporcionar una clara descripción y una explicación para los cambios en las condiciones del agua subterránea en el corredor límite del Río Colorado y las zonas adyacentes; así como determinar, hasta donde sea posible, el impacto que el bombeo de agua subterránea ejerce en estas condiciones de sobre-extracción.

## Antecedentes

Los investigadores han estudiado el remanente del delta del Río Colorado durante más de veinte años, señalando la degradación del delta y su futuro incierto, a la vez que resaltan la existencia de extensos humedales de agua salobre y una de las zonas de vegetación más grandes de álamo y sauce nativos que quedan en el bajo Río Colorado (cf. Ezcurra et al. 1988, Glenn et al. 1992, Glenn et al. 1996, Cohen et al. 2001, Zamora-Arroyo et al. 2001, Nagler et al. 2008). Estos estudios cuestionan la creencia generalizada que el delta del Río Colorado ha sido irrevocablemente degradado (cf. Fradkin 1981). Más recientemente, varios reportes y estudios han identificado el potencial para la restauración de algunas partes

del remanente del delta (cf. Briggs y Cornelius 1998, Pitt et al. 2000, Zamora-Arroyo et al. 2005, Medellín et al. 2007). Estas investigaciones y las voces que se alzan en defensa de la zona han promovido la celebración de tres acuerdos entre México y Estados Unidos, para cooperar en la protección de los hábitats del delta,<sup>6</sup> y las negociaciones en curso en relación a la entrega de flujos ambientales destinados, pasando la Presa Morelos.

Varios proyectos de restauración de hábitats han sido planeados o ya están en proceso en el remanente del delta, incluyendo esfuerzos de restauración de humedales en el sistema del Río Hardy, a lo largo del cauce principal del Río Colorado, aproximadamente 50 km aguas abajo del LIS y dentro del mismo corredor límite. Proyectos de restauración de hábitat dentro del área de estudio incluyen propuestas para restaurar *Hunter's Hole*, proyectos continuos de restauración de plantas nativas en las tierras tribales de los Cucapah, aguas abajo de la Presa Morelos, y proyectos propuestos para la Colonia Miguel Alemán, en la margen derecha del río, frente a *Hunter's Hole*. *Hunter's Hole*, un área de vegetación, de aproximadamente 45 ha, antiguamente un remanso 3 km al norte del LIS y 4 km al sur de Gadsden, recibe agua de escorrentía de diversas fuentes, incluyendo el canal de desagüe Milla-21, un sifón del canal *Bypass Extension* y de por lo menos un pozo de agua subterránea. Sin embargo, como se describe a continuación, el nivel freático en el área circundante descendió más de 3 m de 2004 a 2009, indicando que la vegetación existente y los esfuerzos futuros de restauración podrían estar en riesgo.

Varios estudios han investigado las condiciones del agua subterránea en el área de Yuma, inmediatamente al este del área bajo investigación, incluyendo Olmsted et al. (1973), Harshbarger (1977), Hill (1993),<sup>7</sup> el texto "Particle Tracking Study" [*Estudio de rastreo de partículas*] de Reclamation (sin fecha) y Dickinson et al. (2006). El USGS ha publicado estudios que describen la "superficie de contabilidad" para el bajo Río Colorado, incluyendo información general sobre las elevaciones y las fuentes del agua subterránea en el área de Yuma (Owen-Joyce et al. 1996, Wiele et al. 2009). Sin embargo, ninguno de estos estudios se ha enfocado

<sup>6</sup> El Acta 306, "Marco conceptual entre México y Estados Unidos, para el desarrollo de estudios que permitan emitir recomendaciones respecto a la ecología ribereña y del estuario del tramo límite del Río Colorado y su delta," firmada el 12 de diciembre, del 2000; el Acta 316, "Uso del dren de desvío Wellton-Mohawk y de la infraestructura necesaria en Estados Unidos, para la conducción de agua de México y organizaciones no gubernamentales de ambos países hacia el Humedal de Santa Clara, durante la prueba piloto de la planta desaladora de Yuma," firmada el 16 de abril, de 2010; y el Acta 317, "Marco Conceptual para las conversaciones México - Estados Unidos relativas a las acciones de cooperación sobre el Río Colorado," firmado el 17 de junio, de 2010. Las actas están disponibles en <http://portal.sre.gob.mx/cianorte/index.php?option=displaypage&Itemid=57&op=page&SubMenu=>

<sup>7</sup> El modelo de agua subterránea desarrollado por el *Arizona Department of Water Resources* para el área de Yuma a principios de los noventa (descrito en Hill 1993 y Hill 1996) utilizó condiciones hidrológicas de mediados y fines de los ochentas, después del evento de inundación de 250-300 años ocurrido en 1983 (Holburt 1984) en el bajo Río Colorado, que anegó buena parte de la región del delta e incrementó de manera notable la elevación del manto freático en el área. Además, el modelo de agua subterránea de Arizona presupone condiciones constantes de flujo de agua a lo largo del Lindero Internacional Sur que divide Arizona de Sonora. Estos dos parámetros del modelo no reflejan las condiciones actuales.

en las condiciones del agua subterránea, específicamente en el tramo límite, y todos anteceden el reciente declive en los niveles freáticos en el corredor límite. Pronatura Noroeste y el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California recientemente completaron estudios iniciales del acuífero aluvial en el corredor límite, que aportaron información importante sobre las tendencias actuales dentro del mismo corredor ripario (Ramírez Hernández et al. 2010, 2011).

## Medio ambiente físico

El tramo límite se encuentra en el desierto del Colorado, conocido también como la división del valle del bajo Río Colorado en el Desierto de Sonora, una de las regiones más calientes y secas en Norteamérica. Durante el periodo registrado (1987-2010) en la estación climatológica de El Valle de Yuma,<sup>8</sup> la precipitación media anual fue de sólo 6.5 cm, con una máxima de 15 cm en 2010 y una mínima de 0.10 cm en 2002. Las temperaturas máximas anuales en la región exceden los 41° C durante más de sesenta días al año, mientras que las temperaturas mínimas promedian alrededor de los 7° C. La referencia anual promedio para la tasa de evapotranspiración (ET<sub>o</sub>) en la estación de El Valle de Yuma para el periodo registrado fue de 218 cm, más de 2.1 m/año mayor que la tasa de precipitación. La precipitación local rara vez genera escurrimientos mensurables en el tramo límite directamente, aunque podría llevar a los irrigadores locales a cancelar pedidos de agua. Si hay insuficiencia de capacidad de almacenamiento en el Río Colorado para captar estos pedidos cancelados, el agua continuará su curso fluyendo hacia México. Si México no deriva estos flujos que exceden el programa de entregas a su propio sistema de entregas, los eventos de precipitación local pueden indirectamente generar flujos a través de la Presa Morelos, que lleguen al corredor límite.

El tramo límite se ubica en un área de poca elevación, una cuenca por lo general plana, compuesta por sedimentos locales y suelos deltaicos depositados por el Río Colorado. La mesa de Yuma, hacia el este, era antiguamente una terraza de río, a una altura de 15 a 24 m sobre el Valle de Yuma (Dickinson et al. 2006). El delta del Río Colorado, incluyendo el tramo límite, llena la parte superior del *Salton Trough*, una extensión geológica de la parte superior del Golfo de California. Es un área sísmicamente activa, con varias fallas orientadas hacia el Noroeste que atraviesan el Valle de Yuma y el tramo límite (Dickinson et al. 2006).

El corredor límite contiene suelos aluviales de permeabilidad moderada a rápida. El estudio de suelos realizado en la región por el *U.S. Department of Agriculture* (Barmore 1980) señala que los suelos del tramo límite incluyen suelos arenosos completamente drenados, suelos franco arenosos y suelos franco limosos, caracterizados por escurrimientos superficiales muy lentos, debido a "suelos un tanto drenados en exceso," con una permeabilidad de 15-50 cm por hora.

<sup>8</sup> La estación climatológica del Valle de Yuma (<http://ag.arizona.edu/azmet/02.htm>) se encuentra en la *University of Arizona Yuma Agricultural Center Valley Station, 6425 W. 8th Street, Yuma (32° 42' 45" N 114° 42' 18" W)*.

El mismo Río Colorado inicia a gran altura en las Montañas Rocosas de Colorado, a unos 2100 km aguas arriba del tramo límite. La estimación por computadora del promedio anual del “flujo natural”<sup>9</sup> del Río Colorado en Lees Ferry<sup>10</sup> para el periodo 1906-2008 es ligeramente mayor a 18.5 km<sup>3</sup> (18,500 MMC). La estimación por computadora del promedio anual del flujo natural del Río Colorado en la Presa Imperial – el último punto donde se realizan dichas estimaciones, 43 km aguas arriba de la Presa Morelos – para el mismo periodo es de 20.1 km<sup>3</sup> (20,100 MMC), reflejando ganancias netas de los tributarios abajo de Lees Ferry. El Río Gila descarga al caudal principal del Río Colorado 24 km aguas abajo de la Presa Imperial, pero los flujos naturales para el Río Gila aún no han sido calculados. El Capítulo V trata en detalle la hidrología superficial del corredor límite.

Como se menciona en el capítulo V, el Río Colorado generalmente desaparece antes de alcanzar el LIS. En efecto, no hubo descargas registradas en el LIS durante todo el 2006, 2007 y 2009. El 28 de junio de 2007, una imagen de satélite muestra agua en el canal del Río Colorado fluyendo de la Presa Morelos a un punto aproximadamente 13 km aguas arriba del LIS. El 31 de agosto de 2003, el río se terminaba aproximadamente 3.6 km aguas arriba del LIS. Aún en años secos, algo de agua aparece en el canal justo abajo del LIS, alimentado por descargas del canal de desagüe del KM 27 en México. Aparte de esta breve aparición de agua estancada, en condiciones típicas, el cauce del Río Colorado se mantiene seco desde Gadsden a lo largo de unos 40 km aguas abajo, donde descargas de drenaje agrícola del subsuelo intersecan el cauce, generando un flujo base. Como se describe a continuación, un nivel freático relativamente alto genera flujos base en la porción superior del tramo límite, pero un descenso en el nivel freático en el sur genera un tramo de pérdidas<sup>11</sup> para el río que recorre distancia considerable en territorio mexicano.

La construcción de presas, obras en las márgenes y diques a lo largo del cauce principal y de los tributarios del río, así como estrictos criterios operativos para los embalses, han eliminado casi completamente las inundaciones periódicas de las márgenes en el bajo Río Colorado aguas arriba de la Presa Morelos. Tales inundaciones promovían la regeneración de vegetación riparia nativa y aportaban un enlace del río con su planicie aluvial, arrastrando nutrientes hacia el río y extrayendo sales del suelo. Las inundaciones también permitían la recarga del acuífero aluvial. La reglamentación del río y la extensa infraestructura física han eliminado en gran medida estas funciones. El riego intensivo a lo largo de todo el año ha remplazado esta función de recarga en algunas áreas, incluyendo las tierras adyacentes al corredor

<sup>9</sup> “Flujo natural” se refiere al flujo del río en ausencia de pérdidas ocasionadas por derivaciones de agua aguas arriba y evaporación en los embalses; los flujos reales registrados son significativamente menores. Las estimaciones de flujo natural por parte del Bureau of Reclamation están accesibles en <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/NaturalFlow/index.html>.

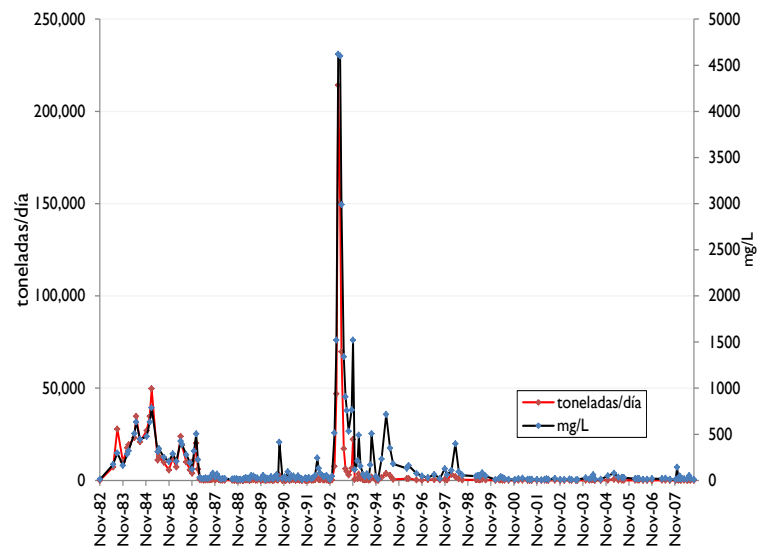
<sup>10</sup> Lees Ferry se encuentra justo arriba de la división entre la cuenca alta y la cuenca baja del Río Colorado y es el punto de medición tradicional para la descarga del Río Colorado. Lees Ferry se ubica 1070 km aguas arriba de la Presa Morelos.

<sup>11</sup> Para información general relacionada con ganancias y pérdidas de tramos, consulte “Using Temperature to Study Stream-Ground Water Exchanges,” USGS Fact Sheet 2004-3010 en <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3010/>.

límite, aunque dicho riego tiende a degradar la calidad del agua al introducir una mayor concentración de sales, nutrientes, plaguicidas y otros contaminantes. En algunas áreas cercanas a Yuma, años de riego intensivo incrementaron el nivel del acuífero subterráneo a niveles problemáticos. El gobierno federal ha venido extrayendo agua de los pozos profundos para controlar el nivel freático en el Valle de Yuma por más de 50 años.<sup>12</sup> Estos niveles freáticos elevados, típicamente empujan el flujo de aguas del subsuelo hacia el oeste, bajo el cauce del río, y hacia el Sur, hacia las operaciones de bombeo a gran escala en la “Unidad Protectora y Reglamentaria de Bombeo” en los Estados Unidos y el campo de pozos de la Mesa Arenosa en México (Freethey y Anderson 1986, Reclamation sin fecha). Consulte particularmente el Capítulo III, y el resto de este estudio en general, para una discusión a fondo de las condiciones del agua del subsuelo en el corredor límite.

### Sedimentos

El transporte de sedimentos es una función importante desempeñada por los ríos. El Río Colorado históricamente ha arrastrado una carga muy pesada de sedimentos, esculpiendo el Gran Cañón, el Cañón de Glen y muchos otros, y creando el enorme delta en la parte superior del Golfo de California, que en algunos sitios tiene más de 1.6 km de profundidad. El viejo adagio en relación al río es que era “demasiado espeso para beberlo, y demasiado aguado para ararlo.” La construcción de múltiples presas a lo largo del Río Colorado ha afectado esta función al grado que las pesadas cargas de sedimento antiguamente arrastradas por el río – que en efecto, dieron origen al nombre del Colorado – ahora son capturadas por las presas aguas arriba y el río se encuentra en gran medida claro y hambriento, llevando mucho menos sedimento de lo que su descarga podría sugerir. Los trabajos de desazolve del Canal Todo Americano disminuyen



**Figura 4. Concentraciones de sedimentos suspendidos en el Río Colorado, en el LIA, Nov. 1982-Sept. 2008. Fuente: USGS.**

<sup>12</sup> El Bureau of Reclamation actualmente cuenta con un permiso (No.30-001, Arizona Department of Water Resources, Permit to Transport Groundwater Withdrawn from the Yuma Groundwater Basin) para el transporte de hasta 30.8 MMC por año de agua del subsuelo de la Cuenca de Yuma.

aún más la carga de sedimentos del río – sólo alrededor de una cuarta parte del volumen entregado a México en el LIN realmente fluye a través de la Presa Laguna; el resto pasa a través de los dispositivos de desazolve o son flujos recapturados de los campos aguas abajo de la Presa Imperial. La media de concentraciones de sedimentos suspendidos para el río durante el periodo de noviembre 1982 a septiembre 2008 fue de sólo 38.5 mg/L. Como se muestra en la Figura 4 en la página previa, durante el evento de inundación del Río Colorado de 250-333 años a mediados de los ochentas, estas concentraciones aumentaron por más de un orden de magnitud. Las concentraciones de sedimento aumentaron por dos órdenes de magnitud durante las inundaciones del Río Gila, en 1993, afectando la alineación y la morfología del canal.

La página [web<sup>13</sup>](#) del “Colorado River Front Work and Levee System” [Sistema de Diques y Obras en las Márgenes del Río Colorado’] de Reclamation, ofrece la siguiente descripción de las operaciones de dragado aguas abajo de la Presa Morelos:

El Río Colorado en la Presa Morelos y aguas abajo de la misma, constituye la línea divisoria entre Estados Unidos y México. Al avanzar aguas abajo, por una distancia de [32 km], la margen izquierda (oriental) del río se encuentra en Estados Unidos y la margen derecha (occidental) se encuentra en México. El río tiene diques en ambos lados; el dique del lado mexicano es aproximadamente [1.2 m] más alto que el dique en el lado estadounidense.

Las condiciones entre la Presa Morelos y el Lindero Internacional Sur no eran típicas de las condiciones normales del río, ya que no existía degradación aguas abajo de la presa. En efecto, la parte de compuertas de la estructura no siempre formaba el control de la superficie del agua que normalmente sería el caso. Un tapón de sedimento aguas abajo, introducido en el canal pasando la Presa Morelos, controlaba algunas veces la altura de la superficie del agua a través de la estructura de compuertas.

El tapón de sedimento no fue creado de manera intencional por un operativo mexicano de dragado en la cuenca de asentamiento en la cabecera del Canal Reforma, y por el método de disposición de sedimentos que México aplicó en la Presa Morelos. La cuenca de desazolve del Canal Reforma es una sección del canal con mayor anchura y profundidad, que corre generalmente de manera paralela al río. Durante varios años que siguieron a la terminación de la Presa Morelos, el sedimento era extraído por bombeo de la cuenca de desazolve y depositado en el terreno entre la cuenca y el río [ver la Figura 10]. Tras varios años, el área de disposición fue incrementándose por la deposición de los productos de dragado, hasta que el sedimento no se pudo bombear más alto.

El sedimento se bombeó entonces al río y a la orilla entre el dique mexicano y el río. En algunas ocasiones, el depósito de sedimento ha desviado la corriente del río contra la margen del lado estadounidense del río, erosionándola. Cuando esto ocurrió, México depositó parte de los productos de sedimentación del lado estadounidense, para reparar la erosión y regresar al río al centro del cauce. Este tipo de operación ha mantenido al río alejado del dique estadounidense, pero ha cubierto el lecho del río con un tapón de sedimento que consiste en varios [metros] cúbicos de material.

El resto del canal del río de la Presa Morelos al Lindero Internacional Sur ha sido históricamente asfixiado por sedimento arrastrado aguas abajo desde el tapón de sedimento. Asimismo, como México normalmente deriva la mayoría de su agua proveniente del Río Colorado hacia el Canal Reforma, arriba de la Presa Morelos, el flujo aguas abajo de la Presa Morelos generalmente es mínimo, y el cauce está sobrepoblado de vegetación, reduciendo gravemente la capacidad del cauce para contener inundaciones. Periódicamente se han realizado trabajos en el corredor límite para dar solución a esta situación.

### Morfología del Cauce

El Río Colorado serpentea entre diques abajo de la Presa Morelos. La actual alineación del cauce se parece poco a la ubicación que en 1973 se utilizó para determinar la frontera oficial entre México y Estados Unidos,<sup>14</sup> lo que ha generado discusiones para realinear el cauce y mejorar su capacidad de contención.<sup>15</sup> La Figura 5, adaptada de *Natural Channel Design* (2006), muestra el desplazamiento lateral del cauce en relación a la alineación de 1982. Los cambios en la morfología del cauce afectan el establecimiento de la vegetación riparia y la distancia a que sus raíces necesitan extenderse para conectarse con el manto freático. El dinamismo y los cambios sufridos por el río a causa de las inundaciones desde principios de los ochentas (Tiegs y Pohl 2005) constituyen un reto a los esfuerzos por correlacionar las profundidades al agua subterránea reportada en pozos de observación ubicados en las orillas del área de estudio, con las profundidades al agua subterránea dentro del mismo corredor ripario.

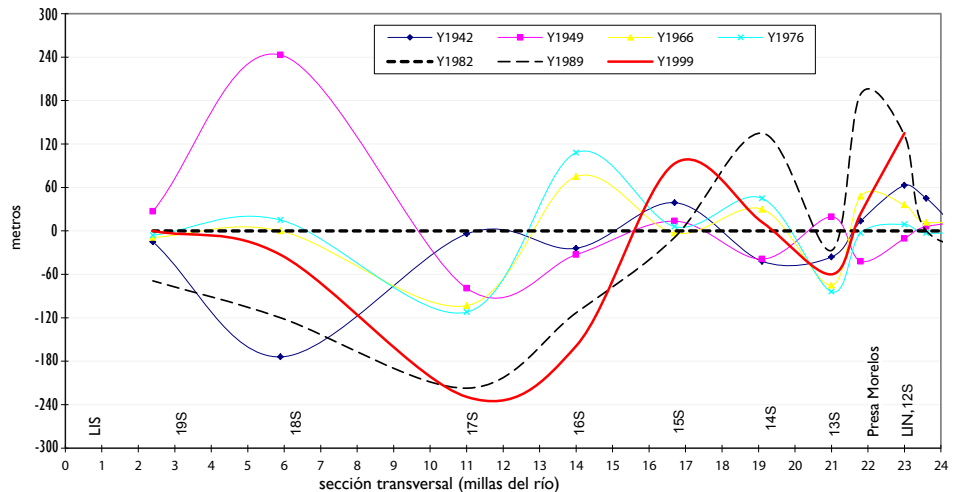


Figura 5. Desplazamiento lateral del cauce con referencia a la alineación de 1982. Adaptado de *Natural Channel Design* 2006.

Un reporte realizado como parte de los esfuerzos de la IBWC para rectificación del río (TetraTech 2004) proporciona información de un estudio de elevaciones de la vaguada<sup>16</sup> y señala que las elevaciones del cauce se han incrementado cerca del LIS,

<sup>14</sup> Para una imagen histórica que muestre la antigua alineación del canal con una imagen superpuesta de la alineación del canal más reciente (sin fecha), consulte [http://www.ibwc.state.gov/Files/ColoradoRNIB\\_LIS\\_.pdf](http://www.ibwc.state.gov/Files/ColoradoRNIB_LIS_.pdf).

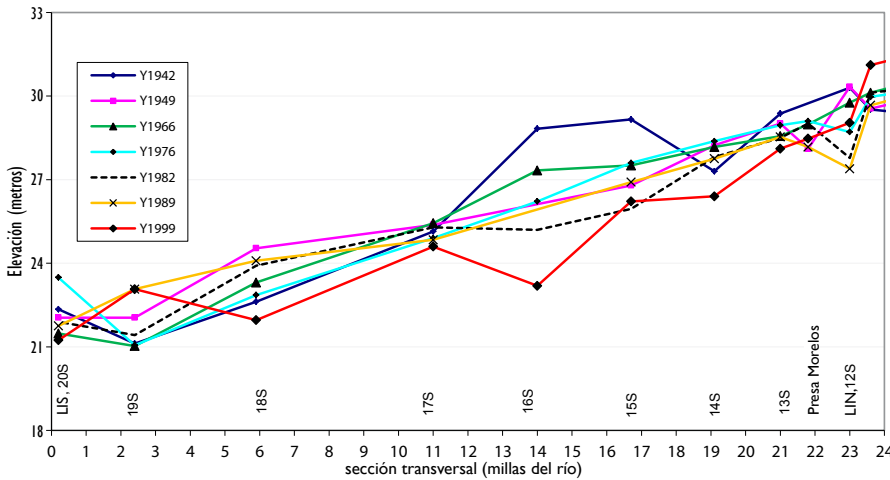
<sup>15</sup> Consulte *Lower Colorado River Boundary and Capacity Preservation Project*, disponible en <http://www.ibwc.state.gov/EMD/lcrbcpposit2.pdf>

<sup>16</sup> La vaguada es un trazo lineal que denota la parte más profunda de un cauce de río.

<sup>13</sup> Visitado por última vez el 14 de septiembre, de 2011.

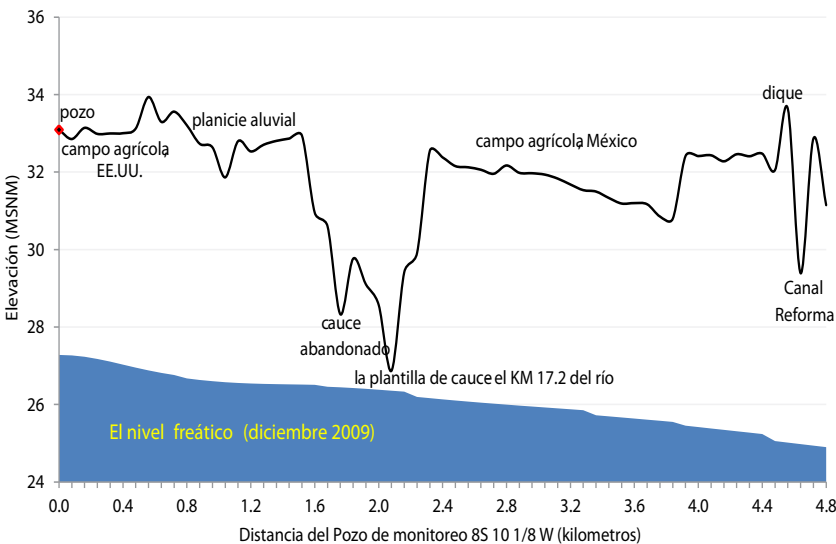


reflejando azolvamiento causado por los bajos flujos y por la insuficiencia de energía para arrastrar los sedimentos aguas abajo. Estas condiciones dinámicas complican los esfuerzos para valorar a largo plazo las tendencias en la profundidad del agua subterránea en el corredor ripario. La Figura 6, adaptada de *Natural Channel Design* (2006), muestra una gráfica de elevaciones de la vaguada originada de levantamientos del cauce realizados a lo largo de más de cincuenta años. Desafortunadamente, el levantamiento más reciente del cauce se realizó en 1999; el IBWC ha programado un levantamiento para realizarse en 2012. Nótese la erosión del canal entre los levantamientos de 1989 y 1999, quizá producida por los eventos de flujos elevados en 1993 o 1998.



**Figura 6. Cambios en elevaciones de la vaguada, 1942-1999.** Adaptado de *Natural Channel Design* 2006.

La Figura 7 presenta el perfil de elevación de un transecto que va de oeste a sudoeste (de acuerdo con la dirección de flujo reportada para corrientes subterráneas en la región (Dickinson et



**Figura 7. Perfil de elevaciones del terreno natural en el KM 17.2 del río.** Derivado de un transecto con rumbo 240° partiendo del pozo 8S-10 1/8W. Fuente: USGS.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Información de la USGS "Imperial County, California, and Yuma County, Arizona, along the Mexico Border, 2007, 1/9-Arc Second National Elevation Dataset."

al. 2006)), perpendicular al río en el KM 17.2, iniciando en el pozo de monitoreo 8S 10 1/8W<sup>18</sup> de *Reclamation*. La figura muestra la diferencia entre la elevación del pozo de monitoreo y el cauce, demostrando que las profundidades reportadas para llegar al agua del subsuelo en el sitio del pozo no pueden, de manera razonable, tomarse como un sustituto para las profundidades que la vegetación necesita alcanzar a lo largo del cauce del río para alcanzar el agua subterránea. La figura también muestra la elevación interpolada de la superficie del manto freático en diciembre de 2009, una de las elevaciones más bajas registradas. Como se describe a continuación, en la sección sobre Vegetación, la profundidad que necesita alcanzar la vegetación para llegar al

agua subterránea en el cauce del río y el cauce abandonado del río en esta área, se aproxima a los límites de la vegetación riparia nativa.

Nótese que la elevación de la superficie del terreno del pozo de monitoreo es similar a la de las terrazas más altas en la margen izquierda del río, pero aproximadamente 6 m más alta que la plantilla del cauce<sup>19</sup> y aproximadamente 4 m más alta que la del cauce abandonado del río. Por lo tanto, la profundidad reportada para el agua subterránea en el pozo de monitoreo no debe utilizarse como sustituto para la profundidad del agua subterránea dentro del corredor ripario en sí, ya que la superficie del terreno para la vegetación en este caso podría ser de 4-6 m más baja que en la ubicación del pozo. Es decir, el manto freático podría sostener vegetación riparia en esta área aun cuando las profundidades reportadas al agua del subsuelo en el pozo de monitoreo fueran de 6-7 m.

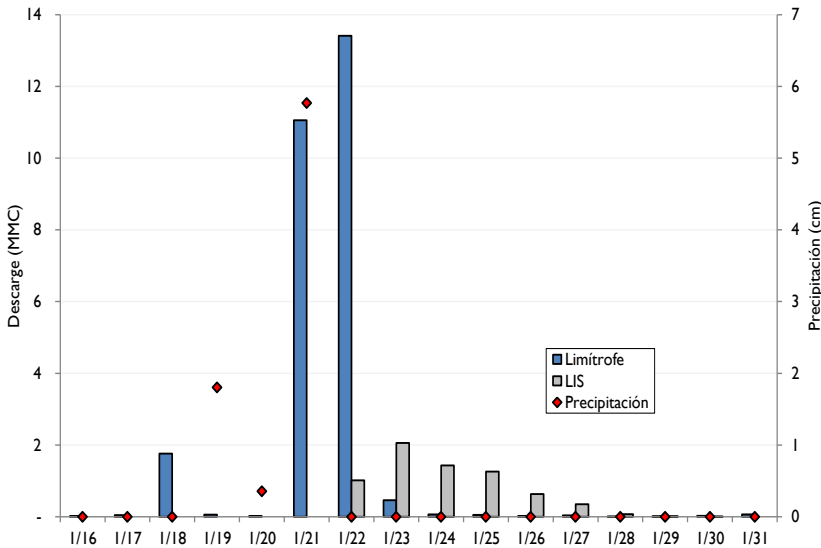
Como se expone detalladamente en el Capítulo V, desde 2005, el último punto de medición en el Río Colorado, en el LIS, ha reportado la ausencia total de flujos medibles durante más de 90% de los días. En esas raras ocasiones cuando se registra un flujo medible en el LIS, parece haber un rezago de uno a dos días en el trayecto entre el momento en que el agua pasa por la Presa Morelos y cuando llega al LIS. Por ejemplo, en el periodo de siete días iniciado el 4 de abril, de 2010 (la fecha del sismo de Pascua, que destruyó y dañó parte de la infraestructura para entrega de agua en el Valle de Mexicali), más de 18 MMC fluyeron por el corredor límite, con una descarga máxima por día de 59 m<sup>3</sup>/sec. La medición de los flujos registrados en el LIS que corresponde mejor se presenta con un rezago de dos días, cuando aproximadamente 62% de los flujos calculados en el tramo límite llegaron al LIS ( $r^2 = 0.81$ ).

En otro ejemplo, casi 40 por ciento de la precipitación total en 2010 cayó el 21 de enero; un total de 7.92 cm se precipitó en tres días, terminando el 21 de enero. No hubo flujos registrados en el LIS (el extremo del tramo

<sup>18</sup> El pozo de monitoreo 8S 10 1/8W se localiza a 32° 36' 40.30", 114° 47' 20.89".

<sup>19</sup> La plantilla de cauce es un punto que muestra la elevación más baja del canal.

límite aguas abajo) el día 21; pero el día 22, un MMC pasó por el LIS y al día siguiente, el doble de esa cantidad pasó por el LIS. Sin embargo, el flujo reportado en el LIS no es representativo de las condiciones hidrológicas del tramo límite en su totalidad. Aunque no existen dispositivos para medir el flujo entre la Presa Morelos y el LIS, mis cálculos indican que del 21 al 22 de enero, casi 25 MMC fluyeron aguas abajo de la Presa Morelos hacia la parte superior del tramo límite. La Figura 8 muestra la influencia de la tormenta de mediados de enero sobre los flujos a través del tramo límite. La figura también resalta, tanto los rezagos entre las descargas de la Presa Morelos y los flujos en el LIS, a unos 34 km aguas abajo, como la pérdida de unos 20 MMC al cauce, entre la presa y el LIS, a lo largo de la última mitad de enero de 2010.



**Figura 8. Precipitación y flujos en el tramo límite, enero, 2010.** Fuentes: IBWC, AZMET.

### Vegetación

En el remanente del delta del Río Colorado, el pino salado (*Tamarix ramosissima*), una especie nativa a Eurasia central, ha desplazado en gran medida a las especies riparias nativas, tales como el álamo (*Populus fremontii*) y el sauce (*Salix gooddingii*), excepto en la mitad norte del corredor límite. Según un levantamiento del corredor límite realizado en junio de 2002, álamos y sauces cubrían 83 ha, mientras que arbustos y hierbas, tales como pino salado (*Tamarix ramosissima*) y cachanilla (*Pluchea sericea*) cubrían 1071 ha (Nagler et al. 2008). Álamos y sauces comprendían el 18% de la vegetación riparia en la mitad norte del corredor límite, siendo remplazados aguas abajo por pino salado (predominantemente) y hierbas. La transición de especies arbóreas en la porción superior del corredor límite a especies arbustivas en la parte baja del corredor, reduce la altura del dosel arbóreo y la heterogeneidad estructural, disminuyendo la diversidad y el alcance vertical del hábitat en el corredor ripario (Lite y Stromberg 2005).

La vegetación riparia establecida, típicamente extrae agua del acuífero aluvial, afectando las condiciones del agua subterránea (Nagler et al. 2008). Snyder y Williams (2000) descubrieron que los sauces dependían exclusivamente del agua subterránea; mientras que los álamos adyacentes a los arroyos efímeros

obtenían hasta una tercera parte del agua que requieren de las capas superiores no saturadas del suelo. Estudios previos han investigado las profundidades óptimas y las profundidades límite del agua subterránea para álamos, sauces y pino salado (Mahoney y Rood 1998, Shafroth et al. 2000, Stromberg 2001, Amlin y Rood 2002, Lite y Stromberg 2005, Scott et al. 2008). Los investigadores señalan que dichas profundidades son específicas para cada sitio, ya que diversos factores, entre los que destacan tipo de suelo, clima, calidad del agua, así como factores tales como pastoreo o incendios, pueden afectar estos valores.

En el Río San Pedro, al sur de Arizona, los álamos y sauces predominan sobre el pino salado, donde el nivel freático es menor a 2.6 m bajo la superficie y el río fluye durante más de 76 por ciento del tiempo (Lite y Stromberg 2005). Los sauces eran menos tolerantes que los álamos al incremento en profundidad al agua subterránea y a las fluctuaciones en la elevación del nivel freático. El pino salado presentaba la mayor tolerancia a niveles freáticos bajos y fluctuantes y a la baja frecuencia de flujos superficiales (Lite y Stromberg 2005). Otros estudios han encontrado una baja concentración de álamos y sauces donde las profundidades al agua subterránea exceden los 3.5 m, así como nula supervivencia cuando la profundidad al agua subterránea excede los 5.1 m (Lite y Stromberg 2005). El pino salado, por otra parte, tolera una profundidad al agua subterránea de 6 m o más (Nagler et al. 2005). Shafroth et al. (2000) señalan que los niveles freáticos fluctuantes pueden estresar a los álamos y los sauces; un manto freático más profundo y más estable puede sostener un mayor número de estos árboles que un nivel más superficial pero altamente variable. Amlin y Rood (2002) descubrieron que un declive gradual en nivel freático, de 1-2 cm por día, promovía el desarrollo de las raíces, mientras que un declive más abrupto reducía la supervivencia. En un estudio en el oeste de Montana, Harner y Stanford (2003) encontraron que los álamos crecen más rápidamente en tramos del río donde el manto freático genera flujo base, más que en tramos que pierden agua al subsuelo, donde el nivel del río se encuentra por encima del nivel freático.

Además, las profundidades límite para el agua subterránea varían a lo largo del ciclo de vida de álamos y sauces. Mahoney y Rood (1998) determinaron que:

Las raíces de los álamos crecen aproximadamente 0.5 a 1 cm por día o 60 a 100 cm en el primer año... Un borde capilar existe sobre el manto freático y con frecuencia tiene una elevación de 30 a 40 cm, pero puede oscilar entre 5 a 130 cm, dependiendo de la textura del substrato. La combinación del crecimiento de las raíces con el borde capilar define el éxito de la banda de regeneración, que generalmente se encuentra a una elevación de 0.6 a 2 m sobre el nivel freático... La velocidad de declive del nivel del arroyo también es crítica para la supervivencia de los retoños y no debe ser mayor a 2.5 cm por día.

La calidad del agua también afecta el vigor y la capacidad de recuperación de la planta: el pino salado tolera una mayor salinidad que los álamos y sauces (Glenn et al. 1998).

Agravando el estrés causado por niveles freáticos bajos y fluctuantes, Nagler et al. (2005) señalan que los álamos y sauces

en el corredor límitefofe padecen una tasa de pérdidas anuales del 20 por ciento, ocasionada en gran parte por incendios. Esta tasa elevada de pérdidas, combinada con condiciones no muy favorables de agua subterránea pasando Gadsden, explica el número muy reducido de álamos y sauces en la mitad inferior del corredor límitefofe.

### Medio ambiente construido

El medio ambiente construido, a diferencia del medio ambiente natural, se refiere a estructuras e infraestructura creada por

el ser humano. Actualmente, el Río Colorado sólo puede ser comprendido en el contexto de este medio ambiente construido, que constriñe los flujos y meandros naturales del río y que ha alterado completamente el sistema de agua subterránea en la región, transformándolo de un sistema recargado por medio de la inundación periódica del río, a uno recargado por el riego intensivo y manejado por una extensa red de pozos de drenado. La Figura 9 presenta un esquema preparado por Reclamation, que muestra la infraestructura para entrega de aguas superficiales (en azul) e infraestructura de drenaje (en dorado) en el área de Yuma,

de la Presa Imperial al LIS. Las siguientes secciones describen la infraestructura dentro del área de estudio en sí.

La Presa Morelos (Figura 10), la última gran estructura sobre el Río Colorado, se localiza a 1.7 km aguas abajo del LIN y marca el límite superior del remanente del delta. La presa, una estructura de concreto reforzado, abarca 427 m y contiene 20 compuertas radiales a lo ancho del Río Colorado. La Presa Morelos, terminada en 1950, no tiene capacidad de almacenamiento. Normalmente deriva casi todo el flujo superficial restante del Río Colorado hacia el Canal Reforma, vía una obra de toma con 12 compuertas radiales, con una capacidad diseñada de 226 m<sup>3</sup>/sec. La estructura de la presa y los pilotes de acero bajo la misma, se extienden aproximadamente 6.7 m bajo la superficie del cauce, obstruyendo, al menos parcialmente, el subflujo del Río Colorado, impidiéndole pasar por debajo de la presa para llegar al tramo aguas abajo. Se desconocen los volúmenes totales y las

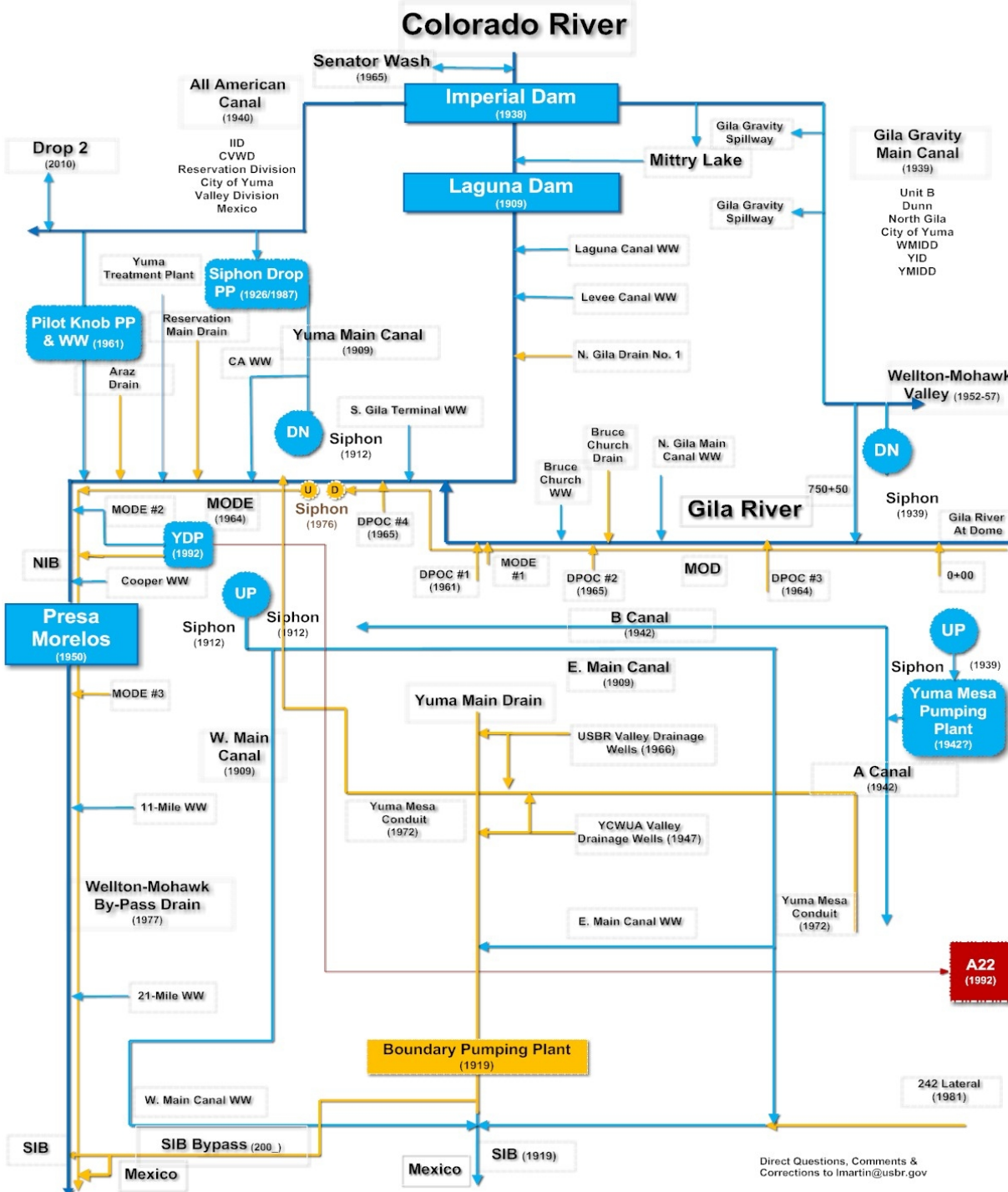


Figura 9. Infraestructura en el área de Yuma. Imagen cortesía de Reclamation.

velocidades de dichos subflujos. México opera la Presa Morelos bajo la supervisión del IBWC.<sup>20</sup>



**Figura 10. La Presa Morelos y el tramo superior del corredor límite.** Derechos de autor Peter McBride. Utilizado con autorización. Consulte [www.petemcbride.com](http://www.petemcbride.com).

En la Figura 10, el lado estadounidense de la frontera, incluyendo parte del *Bypass Extension del Main Outlet Drain Extension (MODE)*, aparece del lado izquierdo de la imagen; el Canal Reforma, de México, aparece en la parte superior derecha de la imagen. Un gran montículo de residuos de dragado aparece entre el Canal Reforma y el estrecho corredor ripario.

Múltiples dispositivos de medición registran los flujos del Río Colorado y los volúmenes de agua descargados al río en diversos puntos dentro del área de estudio. La IBWC reporta el volumen de agua derivado en la Presa Morelos hacia el Canal Reforma, la descarga superficial es cuantificada por medidores en el cauce principal del Río Colorado en el LIN y en el LIS, así como en el canal de desagüe Cooper, arriba de la Presa Morelos y en los tres canales de desagüe aguas abajo de la presa: Wellton-Mohawk MODE #3, Milla-11 y Milla-21.<sup>21</sup> Cerca del canal de desagüe de la Milla-21, un sifón periódicamente deriva pequeños volúmenes de agua del estancamiento en la *MODE Bypass Extension a Hunter's Hole*. En casos de emergencia, el drenaje de Wellton-Mohawk puede descargarse al río inmediatamente pasando la presa, a través del canal de desagüe MODE #3. El canal de desagüe Milla-11 descarga al río agua del *Yuma Project*, el *Valley Division's West Main Canal*, 5.1 km aguas abajo de la Presa Morelos. El canal de desagüe de la Milla-21 también descarga agua del *Yuma Project*, *Valley Division's West Main Canal*, a *Hunter's Hole*, 28.0 km aguas abajo de la Presa Morelos y 3.5 km aguas arriba del LIS. En combinación, estos tres

<sup>20</sup> *International Boundary and Water Commission* (Sección estadounidense de la Comisión Internacional de Límites y Aguas), [www.ibwc.state.gov/Water\\_Data/Colorado/Index.html](http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/Colorado/Index.html).

<sup>21</sup> Estos y otros datos de la IBWC están disponibles en [www.ibwc.state.gov/Water\\_Data/histflo2.htm](http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo2.htm).

canales de desagüe aportaron un promedio anual de 7.75 MMC y una descarga media anual de 5.47 MMC al tramo límite,

aguas abajo de la Presa Morelos, durante el periodo de 1990-2008. Estos volúmenes constituyen el 1.5 por ciento del flujo promedio anual en el LIS, pero 11 por ciento del flujo medio anual en el LIS. En México, los canales de desagüe KM 27 y KM 28 descargan al Río Colorado, aguas abajo del LIS.

Los diques que delimitan el tramo límite evitan de manera efectiva que cualquier otro escurrimiento superficial se introduzca en el tramo límite. No existen derivaciones autorizadas legalmente en el tramo límite abajo de la Presa Morelos, aunque el autor ha observado operaciones temporales que extraen agua del río en el tercio superior del tramo límite, en la margen derecha del río (Figura 11). Los volúmenes de agua derivados en este proceso no han sido determinados.



**Figura 11. Derivaciones no autorizadas de agua en el tramo límite.** Fotografía del autor, 2001.

Por lo menos diez pozos extraen agua subterránea dentro de una distancia de 0.8 km del dique del lado estadounidense del tramo límite, mientras que los registros de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) en México indican que entre los diques del lado mexicano del río hay 42 pozos.<sup>22</sup> En años recientes, *Reclamation* ha calculado que la cantidad de agua que se bombea de los pozos

<sup>22</sup> Consulte la siguiente sección, "Fuentes y limitaciones de la información" para una exposición sobre la incertidumbre en relación a la ubicación de algunos pozos mexicanos.

estadunidenses que suministran agua para riego dentro de los diques alcanza los 5,100 m<sup>3</sup>/ha, ascendiendo a un total de 12 MMC de agua extraída del subsuelo anualmente, aunque esto es simplemente un estimado basado en la extensión cubierta, más que en volúmenes medidos. Aproximadamente la mitad de la superficie total estadounidense de riego y supuestamente un porcentaje similar del total del agua extraída del subsuelo, se ubica en el área de estudio al sur de Gadsden. Los volúmenes totales reportados para la extracción de agua de pozos mexicanos dentro de los diques alcanzó un promedio de cerca de 16MMC a mediados de los años noventa; pero, si suponemos que 3,000 ha de dichas tierras reciben el promedio estatal de 3,000 m<sup>3</sup>/ha (Medellín et al 2007) este dato sugiere que el total de agua extraída del subsuelo en el lado mexicano del corredor límite se aproxima más bien a los 32 MMC. El total anual de agua utilizada (incluyendo agua superficial) en la parte mexicana del corredor límite, según reportes promedia 37 MMC por año (Hinojosa-Huerta 2007). La Figura 12 muestra el pozo mexicano 737, cerca de la Colonia Reforma. Los estimados del total anual de agua subterránea extraída en el Valle de Mexicali, al oeste y al suroeste del corredor límite y en la Mesa Arenosa, al sureste del corredor límite, oscilan entre 680 MMC en los años de altos flujos<sup>23</sup> a más de 900 MMC en años de flujo normal, cuando la disponibilidad limitada de agua superficial lleva a los irrigadores a extraer más agua subterránea (Cohen y Henges-Jeck 2001).



**Figura 12. Pozo 737, cercano a la Colonia Reforma.**  
Fotografía del autor.

La ciudad de San Luis Río Colorado, justo al Sureste del extremo sur del corredor límite, es el principal extractor municipal que afecta al corredor límite. En 2005, la ciudad entregó más de 30.1 MMC, mayormente (89%) para uso residencial. Parte de esta agua proviene del campo de pozos de la Mesa Arenosa, aunque mucha

<sup>23</sup> Yo defino años de altos flujos como aquéllos en que el flujo total en el LIN excede 1.8 km<sup>3</sup> (1,850 MMC). Consulte Cohen y Henges-Jeck 2001).

se extrae de pozos dentro de los límites de la ciudad. Según los reportes, mucha de la infraestructura en México padece de altas pérdidas en su conducción (>30%), lo cual sugiere que el total de agua extraída del subsuelo por parte de la ciudad, puede haber excedido 43 MMC en 2005.

### Pozos de Monitoreo

Desde 1954, la sección estadounidense del IBWC ha monitoreado una serie de 40 pozos, que corren de forma más o menos paralela al Río Colorado desde la Presa Laguna hasta el LIS. A través del tiempo, muchos de estos pozos han sido remplazados y en algunos casos han sido reubicados desplazándolos hasta 0.8 km, aunque la designación del pozo por parte de la IBWC no ha cambiado. En 1986, Reclamation instaló una serie de pozos poco profundos para observación, a lo largo del MODE y la Bypass Extension que corre a lo largo del borde este del tramo límite. Desde 2002, Reclamation ha registrado elevaciones del agua subterránea en estos pozos con una frecuencia mensual aproximada (con algunas interrupciones importantes). Antes de 2002, hay interrupciones extensas en los registros. Muchos de estos pozos de monitoreo han sido remplazados al paso del tiempo (J. Nickell, comunicación personal, abril 2010). El Arizona Department of Water Resources lleva un inventario de los pozos de extracción y de monitoreo en la región,<sup>24</sup> aunque estos registros son incompletos. El U.S. Geological

Survey (USGS) también mantiene registros extensos de las elevaciones del agua del subsuelo en Estados Unidos, incluyendo cuatro pozos activos de observación de agua subterránea en el Condado de Yuma. Sin embargo, buena parte de la extensa base de datos de la USGS para la región, incluye pozos con un solo punto de información. Conagua mantiene un inventario de pozos federales y particulares a lo largo de todo el Distrito de Riego 014, que abarca los valles tanto de Mexicali como de San Luis. Conagua recopila información de la extracción de agua subterránea por medio de pozos, así como de medidas anuales de niveles estáticos del agua subterránea, obtenidas tras un periodo de 72 horas después de que se realiza el paro total de todos los pozos federales.

### Uso de la tierra

Las tierras que rodean el corredor límite en ambos lados de la frontera son mayormente de agricultura de riego. La Tabla I muestra las clasificaciones del uso de la tierra y la extensión aproximada de su superficie entre los diques, de la Presa Morelos al LIS.

<sup>24</sup> Consulte <https://gisweb.azwater.gov/waterresourcedata/GWSI.aspx>.

**Tabla 1. Usos de la tierra río abajo de la Presa Morelos, entre los diques, junio 2002.**

	ha
Agricultura	4,100
<i>México</i>	3,400
<i>Estados Unidos</i>	700
Vegetación riparia	1,150
<i>Arbustos</i>	1,070
<i>Árboles nativos</i>	83
Suelo descubierto	1,000
Pantano	150
Otros (caminos, etc.)	100
Laguna abierta	12
Árboles muertos	12
<b>TOTAL (redondeado)</b>	<b>6,500</b>

Fuentes: Nagler et al. 2008, Hinojosa-Huerta et al. 2007, *Natural Channel Design* 2006, estimado del SIG [*Sistema de Información Geográfica*] de la extensión de tierras agrícolas en Estados Unidos.

De acuerdo a *Lower Colorado River Accounting System (LCRAS)* (Reclamation 2008), las principales cosechas sembradas en tierras estadounidenses cercanas al corredor límite incluyen algodón, verduras crucíferas, sorgo, cereales de grano pequeño, lechuga y melón. También se siembra una gran cantidad de alfalfa en las tierras de *West Cocopah* [Reserva Cucapah Oeste], pero el LCRAS no reporta si estos cultivos se encuentran en parcelas entre los diques. En México, con frecuencia se siembra cebolla y trigo, en las tierras entre los diques, aunque no se obtuvo información precisa sobre la superficie real.

## Población

La Tabla 2 muestra el número de habitantes de las comunidades cercanas al corredor límite. Nótese el alto índice de crecimiento poblacional de las comunidades estadounidenses más cercanas al corredor. San Luis, San Luis Río Colorado y Somerton, todas dependen del agua subterránea, afectando la dinámica del agua del subsuelo en el tramo límite. Existen también varios pueblos pequeños hacia el oeste del río entre los diques, aunque la población total de estas comunidades es menos de 1000

**Tabla 2. Número de habitantes en comunidades dentro del corredor límite y en zonas aledañas al mismo.**

	1990	2000	2010	Crecimiento 1990-2010
San Luis Río Colorado	110,530	145,006	178,380	61%
Ciudad de Yuma	54,923	77,515	93,064	69%
Ciudad de San Luis	4,212	15,322	25,505	170%
Ciudad de Somerton	5,282	7,266	14,287	506%
Gadsden	?	953	678	--

Fuentes: Censo de Estados Unidos, INEGI.

habitantes. El crecimiento poblacional en San Luis Río Colorado ha sido de cuatro por ciento anual (Medellín et al. 2007), mientras que la ciudad estadounidense de San Luis, adyacente al LIS, ha tenido un índice aproximado de crecimiento de cinco por ciento anual. La ciudad de Somerton, varias millas al este de Gadsden ha crecido aún más rápidamente, aunque su población sigue siendo equivalente a menos de la décima parte de la de San Luis Río Colorado.

## Capítulo II – METODOLOGÍA

Este estudio describe y evalúa las condiciones recientes del agua subterránea en el tramo límite del Río Colorado, utilizando la información disponible y estimada de flujos superficiales y de extracción de agua del subsuelo, así como datos de evapotranspiración. No se realizaron nuevas mediciones para este estudio. Este capítulo describe los límites del área de estudio, las fuentes y las limitaciones de la información, y los métodos utilizados para determinar la profundidad al agua subterránea en diferentes puntos dentro del corredor límite.

### Límites del área de estudio

Este estudio investiga las condiciones del agua subterránea en el tramo límite del Río Colorado, desde la Presa Morelos hasta el LIS, abarcando unos 34.2 km del río<sup>25</sup> y aproximadamente 25 km lineales. En este tramo del río hay diques que lo constriñen; la distancia entre diques va en aumento, desde 0.8 km en la Presa Morelos a unos 4.5 km en el LIS. El tramo límite del río técnicamente se extiende 1.7 km adicionales río arriba, corriendo desde el LIN hasta el LIS. En este reporte, el “área de estudio” se refiere específicamente a la parte del corredor límite contenida entre los diques, de la Presa Morelos al LIS (ver Figura 2). El “Delta” se refiere al alcance total geológico del delta del Río Colorado, que aparece en la Figura 1. El “remanente del delta” del río se refiere al área entre los diques aguas abajo de la Presa Morelos, mas el río Hardy, los humedales de El Indio y la Ciénega de Santa Clara (Zamora-Arroyo et al. 2005).

La hidrología de la cuenca del Río Colorado impacta directamente las condiciones del agua superficial y del subsuelo dentro del área de estudio. El agua subterránea en el área de estudio tiende a fluir hacia el oeste, desde Yuma Mesa y El Valle de Yuma, pasando por abajo del cauce del río, hacia las numerosas bombas de agua subterránea en el lado mexicano del río (Dickinson et al. 2006). El agua subterránea también fluye hacia el Sur, hacia la frontera entre Arizona/Sonora, hacia los campos de pozos estadounidenses del Acta 242 y los campos de pozos mexicanos de la Mesa Arenosa. Las prácticas de riego y de extracción de agua del subsuelo en ambos países afectan directamente estas condiciones del agua subterránea. Además, la cantidad de vegetación dentro del área de estudio en sí, ocasiona pérdidas por evapotranspiración (ET) de agua extraída predominantemente del acuífero subyacente.

### Fuentes y limitaciones de la información

La información para este estudio proviene de diversas fuentes, incluyendo el *U.S. Bureau of Reclamation (Reclamation)*, la Sección estadounidense del *International Boundary and Water Commission*

<sup>25</sup> Aguas abajo de la Presa Morelos, el río escapa en gran medida a los proyectos de canalización y rectificación que lo han fijado en el paisaje aguas arriba. Aun cuando en 2003 la IBWC propuso un proyecto de rectificación y canalización para el tramo límite, y Conagua dragó un canal piloto aguas abajo del LIS, en el tramo límite, el río actualmente serpentea entre los diques. Este serpenteo y dinamismo significa que todas las designaciones de las millas del río en este reporte (y en otras partes) son aproximadas. Las designaciones de las millas del río en este reporte se basan en las condiciones de noviembre, 2006.

(IBWC), el *U.S. Geological Survey (USGS)*, el *Arizona Department of Water Resources (ADWR)*, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y las ciudades y distritos de riego individuales dentro de Estados Unidos y en México. Desde 2007 Pronatura Noroeste (PNN) ha colaborado con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), haciendo un levantamiento de una red de monitoreo de agua subterránea a lo largo del lado mexicano del corredor límite, cerca del cauce del río en sí. Para obtener una lista completa, favor de consultar las “fuentes de información” en la sección de Referencias. Tanto México como Estados Unidos monitorean las condiciones del agua del subsuelo en las zonas aledañas al corredor límite, por medio de un monitoreo independiente y/o de pozos de extracción de agua subterránea (ver Capítulo 1).

México típicamente mide las condiciones ‘estáticas’ del agua subterránea en el Distrito de Riego 014, requiriendo que todas las bombas federales cesen sus operaciones durante un periodo de 72 horas, conocido como el “paro de septiembre” (la fecha específica cambia de un año a otro), permitiendo al agua estabilizarse en un punto de equilibrio y midiendo la profundidad al agua en cada uno de los pozos. En Estados Unidos, pozos independientes de monitoreo miden las condiciones dinámicas y por lo tanto, son afectados por las diferentes tasas de extracción de los pozos de agua subterránea en la zona.

### Agua superficial

La IBWC reporta la información sobre descargas superficiales para diversos puntos en el tramo límite, incluyendo el LIN, el LIS, cuatro canales de desagüe y un canal de derivación en la margen izquierda del río, así como derivaciones en la Presa Morelos.<sup>26</sup> La IBWC generosamente proporcionó información inédita, hasta diciembre 2010, para suplementar la información publicada en el internet. Esta información se presenta en la forma de descarga promedio diaria en metros cúbicos por segundo y se agrupa en totales mensuales y anuales. Con frecuencia, la descarga reportada para el Río Colorado en el LIS (medidor 09-5222.00 del IBWC) se utiliza como un aproximado para los flujos al remanente del delta del Río Colorado (cf. Pataki et al. 2005, Medellín et al. 2007, Nagler et al. 2008). Sin embargo, los datos del LIS reflejan de manera incompleta los flujos que atraviesan el corredor límite en sí. Como se expone en el Capítulo V, hay agua que fluye aguas abajo de la Presa Morelos, siendo incrementada por descargas de canales de desagüe a lo largo de cierta porción del tramo, antes de ser absorbida por el cauce o ser consumida por evapotranspiración, sin ser registrada en el LIS. Es decir, la porción superior del tramo límite podrá gozar de flujos ambientales aun cuando el cauce en el LIS esté seco.

<sup>26</sup> Los datos están publicados en [http://www.ibwc.state.gov/Water\\_Data/histflo2.htm](http://www.ibwc.state.gov/Water_Data/histflo2.htm).

Para complementar la información hidrológica incompleta que representan los datos del medidor del LIS, calculé los flujos en el tramo límite como la suma<sup>27</sup> de los reportes de

- Descargas del Río Colorado en el LIN (medidor 09-5220.00 del IBWC)
- Descarga del canal de desagüe Cooper (09-5318.50)
- Descarga de Wellton-Mohawk MODE Outlet #3 (09-5319.00)
- Descarga del canal de desagüe Milla-11 (09-5325.00)  
*menos las derivaciones reportadas en*
- La Presa Morelos (09-5220.30 “Bocatoma en la estructura de derivación Morelos”)

Nótese que los flujos calculados en el tramo límite promedian menos de tres por ciento del flujo medido en el LIN y en la Bocatoma de la Presa Morelos. Este valor relativamente pequeño bien puede caer dentro del margen de error de los flujos medidos, por lo que la confianza en la precisión de los flujos estimados para el tramo límite es muy baja. Desafortunadamente, en ausencia de un medidor ubicado inmediatamente pasando la presa, hay poca confianza en la precisión de este factor que es fundamental para determinar la velocidad de recarga del manto freático en el área de estudio.

Los flujos diarios calculados inmediatamente pasando la Presa Morelos (= LIN + Canal de desagüe Cooper – Bocatoma) incluyen algunos números negativos, indicando un error en valores reportados para una de las estaciones de medición o puede ser atribuible a la pequeña diferencia en la hora de las mediciones entre los flujos en el LIN y las derivaciones en la presa, 1.7 km aguas abajo. Para el periodo 1980-2010, aproximadamente el cinco por ciento de los valores diarios calculados inmediatamente pasando de la presa fueron negativos, aunque 30 por ciento de dichos valores fueron negativos en 2009 y en 2010. Los valores negativos típicamente fueron menores a 0.012 MMC, aunque el valor negativo más grande durante el periodo de 1980-2010 fue -0.73 MMC. Ajusté todos los valores negativos mencionados a cero, pero no hice correcciones para cualquier error probable pero no identificado que hubiera exagerado los flujos calculados inmediatamente pasando la Presa Morelos.<sup>28</sup>

<sup>27</sup> Nótese que este cálculo no incluye la descarga reportada del canal de desagüe Milla-21, porque los volúmenes de estas descargas típicamente son insuficientes para generar una conexión hacia el cauce principal; Supongo que los flujos del canal de desagüe Milla-21 son consumidos por la vegetación emergente y se infiltran al acuífero local, donde son extraídos por la vegetación riparia.

<sup>28</sup> A diferencia de la IBWC, CILA reporta valores diarios para los flujos aguas abajo de la Presa Morelos, calculados como LIN + canal de desagüe Cooper – derivaciones en la Presa Morelos, en m<sup>3</sup>/s (datos cortesía de O. Hinojosa-Huerta). Sin embargo, aunque CILA ajusta a cero todos los valores negativos así calculados, también redondea valores calculados menores de 0.049 m<sup>3</sup>/s/día a cero. Las mínimas derivaciones diarias en la Presa Morelos andan en alrededor de tres órdenes de magnitud más grandes que este valor umbral, que cae holgadamente dentro del error de medición reportado en el canal de entrada. Las compuertas de la Presa Morelos no sellan completamente a prueba de agua; volúmenes no cuantificados de agua del Río Colorado se fugan a través de las estructuras para control de agua de la presa, y un volumen adicional no medido de agua pudiera infiltrarse bajo la presa misma. Para aproximar estos volúmenes no medidos, este estudio ajusta a cero sólo los valores

Este estudio distingue el agua superficial del agua subterránea, aunque ambas están estrechamente conectadas en los dos tercios superiores del tramo límite. Partes del Río Colorado fluyen por debajo de la superficie del canal, resurgiendo cuando el manto freático interseca la superficie del terreno. No hubo información disponible sobre el volumen de agua que fluye por debajo de la Presa Morelos como subflujo. Buena parte del manto freático medido por pozos de monitoreo y piezómetros es escorrentía sub-superficial de los campos en el área de Yuma regados con agua del Río Colorado; parte de esta escorrentía sub-superficial fluye hacia el cauce del río en el tramo límite, como se describe en el Capítulo V.

## Agua subterránea

Los datos obtenidos de los pozos de monitoreo de *Reclamation* proporcionan la mayoría de la información para este estudio, sobre niveles freáticos y profundidades al agua subterránea, suplementado por datos adicionales de los piezómetros de la UABC/PNN en México e información anual limitada sobre elevaciones de agua estática, por parte de Conagua. La base de datos de *Reclamation* incluye información sobre la ubicación de los pozos, elevaciones del campo y de las bocas de pozo, profundidad al agua subterránea medida con cinta, y la elevación estimada del nivel freático, así como comentarios (tales como reubicaciones de los pozos). La información de los piezómetros incluye ubicación de los pozos y profundidad al agua subterránea, pero no elevaciones absolutas del nivel freático. La base de datos de Conagua incluye información sobre ubicación de los pozos, volúmenes exactos por mes y elevaciones anuales del nivel freático estático.

La profundidad al agua subterránea es el factor clave que afecta a la composición de especies en el tramo límite. La profundidad al agua subterránea es también un criterio importante para determinar la idoneidad de ciertas áreas para esfuerzos de restauración de vegetación nativa. Sin embargo, profundidad al agua subterránea es una medida relativa, que depende tanto de la superficie del terreno como las elevaciones del nivel freático. Mediciones de profundidad al agua subterránea en los pozos de monitoreo de *Reclamation*, que típicamente están ubicados a lo largo del canal de extensión del *Bypass* y frecuentemente están 5 m o más, arriba de la elevación del corredor ripario, necesitan ser ajustadas para reflejar profundidades al agua subterránea en el corredor ripario.

Un análisis SIG, utilizando información del *USGS 2007 National Elevation Dataset*,<sup>29</sup> interpoló la elevación reportada para diciembre 2009, de los niveles freáticos de los pozos de monitoreo de *Reclamation*, con la información para diciembre 2009 obtenida de piezómetros de la UABC/PNN, para obtener las profundidades

negativos calculados para los flujos aguas abajo de la Presa Morelos, pero no redondea valores positivos pequeños a cero.

<sup>29</sup> Datos del USGS “*Imperial County, California, and Yuma County, Arizona, along the Mexico Border, 2007, 1/9-Arc Second National Elevation Dataset.*” Consulte <https://webmail.sonic.net/atmail/mime.php?file=meta1.html&name=meta1.html>.



al agua del subsuelo en el mismo corredor ripario.<sup>30</sup> El análisis SIG muestreó datos de elevaciones cada 0.08 km a lo largo de un transecto de 4.8 km que se iniciaba en cada pozo y se extendía hacia el oeste-suroeste, de acuerdo con los reportes publicados sobre la dirección en que fluye el agua subterránea, para generar perfiles de la superficie del terreno. La interpretación de imágenes de satélite determinaron luego el (los) punto(s) que representaba(n) la elevación del corredor ripario y la profundidad al agua subterránea asociada a dicho punto. Estas interpretaciones brindan una comprensión más matizada de las profundidades al agua subterránea en sitios potenciales para restauración de hábitats en el tramo límite, que la que aportan los datos crudos de los pozos de monitoreo en sí, pero estos datos ajustados son simplemente aproximaciones a las profundidades al agua subterránea en estos sitios. Debido a las limitaciones del estudio, el análisis SIG sólo grafica los datos de los pozos para diciembre 2009, el último mes utilizado para desarrollar la Figura 3.

## Vegetación

Con base en estudios previos, esta investigación presupone que las profundidades al agua subterránea menores a 2.6 m son óptimas para álamos y sauces en el corredor ripario límite; que con profundidades mayores a 3 m, estas especies se estresan y cuando las profundidades exceden los 5 m, mueren. (Lite y Stromberg 2005). Estas profundidades fueron calculadas utilizando la información sobre elevaciones señaladas anteriormente, para áreas identificadas como parte del corredor ripario, más que para los sitios donde están ubicados los pozos de monitoreo.

Las tasas de evapotranspiración (ET) publicadas para la vegetación límite varían dramáticamente. Nagler et al. (2009) calcularon la ET del pino salado en 1.15 m por año en el *Cibola National Wildlife Refuge*, en el bajo Río Colorado. Las tasas de ET calculadas para el álamo son casi indiferenciables, a 1.2 m por año (Nagler et al.), aunque otros investigadores (Schaeffer et al. 2000) han reportado tasas de ET para el álamo que son la mitad de las tasas de ET para pino salado. Leenhouts et al. (2006) reportan el uso de agua del álamo en tramos perennes, en la cuenca del Río San Pedro – un sitio más fresco que el área de estudio – en cerca de 0.97 m por año y aproximadamente la mitad de eso en tramos intermitentes. Dickinson et al. (2006) enumeran coeficientes para las cosechas y tasas anuales de ET promedio para diversas clases de vegetación del corredor límite, incluyendo el pino salado de alta densidad (1.6 m) y el álamo (1.5 m). Los reportes anuales de LCRAS incluyen tablas detalladas que contienen tasas de ET mensuales y anuales para diversas cosechas y grupos de vegetación riparia. Estos valores varían anualmente, con base en la temperatura y precipitación reportada por AZMET, pero generalmente concuerdan con Dickinson et al. (2006).

<sup>30</sup> La elevación para cada pozo es asignada a partir de información NED a través de la función *Point Intersect*. La elevación del nivel freático en cada pozo se calculó restando la distancia al agua subterránea de la elevación del pozo. Se interpoló una capa de elevación del nivel freático utilizando Ponderación de Distancia Invertida (*IDW* por sus siglas en inglés). La profundidad final al agua subterránea se calculó restando la capa de la elevación del nivel freático de la capa de la elevación NED.

Este estudio compara las tasas de evapotranspiración riparia reportada por LCRAS (para el lado estadounidense del corredor límite, para “*West Cocopah [Cucapah Oeste]*” y para la “*State of Arizona-Limitrophe Section*” [Sección Límite del Estado de Arizona]) con la evapotranspiración de la vegetación límite considerada como las tasas de ET publicadas para álamo (1.2 m por año) y pino salado (1.15 m por año) (Nagler et al. 2009) y la extensión de la vegetación (*Natural Channel Design 2006, Reclamation 2007, BLM 2008, Nagler et al. 2008*). Estos valores son menores a los reportados por Dickinson et al. (2006) y, por lo tanto, pueden llevarnos a subestimar la ET total. Nagler et al. (2008) es el único levantamiento de vegetación (para el año 2002) que incluye estimados de extensión de la vegetación en el lado mexicano del corredor límite; los otros levantamientos (para los años 1986, 1997, 2004 y 2005) sólo incluyen las áreas de vegetación para el lado estadounidense del corredor límite, limitando la capacidad para identificar tendencias para el corredor límite como un todo.

## Limitaciones y errores en la información

La confiabilidad y la precisión de la información utilizada en este estudio son variables.<sup>31</sup> Los datos sobre flujos superficiales en el área de estudio provienen de registros de descargas diarias reportadas por el Río Colorado en el medidor del LIS (medidor 09-5222.00 de la IBWC)<sup>32</sup> y de los flujos estimados aguas abajo de la Presa Morelos. Ambas fuentes son problemáticas. Debido a dificultades ocasionadas por vandalismo y robo, desde 2005, el medidor del LIS se instala únicamente cuando el personal de la IBWC considera que habrá flujos que medir. Es probable que este proceso de instalación y desinstalación afecta la calibración del medidor y la precisión de las mediciones (ver Anexo B). Esto también significa que el medidor del Río Colorado en el LIN (medidor 09-5220.00 de la IBWC) es el último medidor permanente en el río.

Como se señaló anteriormente, el flujo calculado inmediatamente pasando la Presa Morelos fue negativo en aproximadamente cinco por ciento de los días, durante el periodo 1980-2010.

## Errores en la información sobre el agua subterránea

La información sobre el agua subterránea a lo largo de toda la región incluye muchas interrupciones; algunas de ellas, con varios años de duración. Conagua reporta las condiciones estáticas del agua subterránea, con mediciones anuales una vez que todos los pozos

<sup>31</sup> Consulte Gleick (1993) en relación a los errores y la falta de confiabilidad de la información medida y derivada.

<sup>32</sup> El medidor 09-5222.00 (“Río Colorado en el LIS”) es operado y monitoreado por personal de la Sección estadounidense del IBWC. Oficialmente, de acuerdo a un documento publicado en el sitio web de la IBWC en [www.ibwc.gov/crp/documents/IBWCGages.xls](http://www.ibwc.gov/crp/documents/IBWCGages.xls), el medidor opera en una ubicación en la margen derecha del río (en México) aproximadamente 305 metros aguas arriba del Lindero Internacional Sur, 3.2 kilómetros al oeste de San Luis, Arizona, a 32°29'39"N, 114°48'49"W, al norte del puente sobre la carretera. Sin embargo, según personal local de la IBWC y confirmado por observaciones personales (O. Hinojosa-Huerta, 2011), la plataforma del medidor realmente se encuentra al sur del puente de la carretera, a 32°29'28.92"N, 114°48'47.40"W.

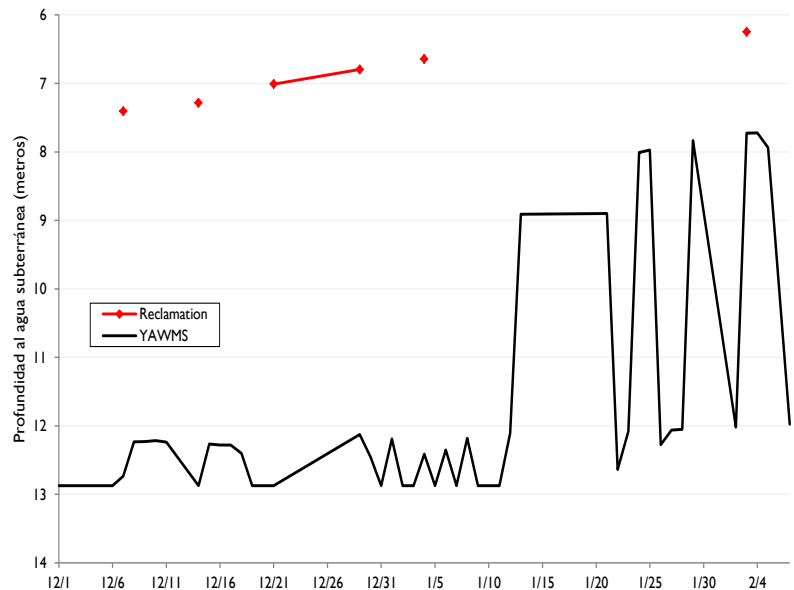
han cesado de operar durante 72 horas, mientras que los pozos de observación en Estados Unidos reportan niveles dinámicos de agua del subsuelo, generalmente con una frecuencia mensual. La información sobre agua subterránea extraída de pozos cercanos al corredor límite es especialmente problemática: mucha de esta información se genera por auto-reporte y probablemente subestima la cantidad de agua extraída (Reclamation 1996). Los volúmenes extraídos por bombas eléctricas son frecuentemente difíciles de rastrear, ya que se basan en ‘factores de bombeo’ u otras constantes que pudieran no reflejar condiciones operativas. Para algunas bombas de diesel próximas al LIS, Reclamation simplemente calcula los volúmenes basándose en la extensión en acres. Esta incertidumbre proviene al menos en parte de una regla propuesta por Reclamation, que el agua extraída en todas las áreas del Valle de Yuma al sur del LIS, se considere agua subterránea de Arizona y por lo tanto no está sujeta a los requerimientos de contabilidad del Río Colorado.<sup>33</sup>

A lo largo del año calendario 2003, los *Decree Accounting Reports*<sup>34</sup> [Reportes de Contabilidad por Decreto] anuales de Reclamation contienen una relación de los volúmenes mensuales de agua extraída del subsuelo para pozos en la Reserva Cucapah, al norte de Gadsden. Sin embargo, los *Decree Accounting Reports* de Reclamation no incluyen información sobre volúmenes “extraídos de pozos, West Cocopah” después de 2003. Estos pozos de la Reserva Cucapah, supuestamente afectan los niveles freáticos en el área, lo cual se vería reflejado en los pozos de monitoreo, como el 8S-10 1/8W. Desafortunadamente, estos pozos no reportan observaciones desde febrero, 1990 hasta julio, 1997; así como de abril, 1998 hasta julio, 2003, impidiendo la comparación entre las tasas de extracción en los pozos de West Cocopah y la elevación del manto freático en el pozo de monitoreo cercano. En la década de los setentas, el agua extraída reportada de todos los pozos de la Reserva Cucapah fue menor a 0.06 MMC al año. Esta incompatibilidad en las series de datos dificulta los esfuerzos para evaluar los impactos de la extracción de agua del subsuelo en áreas limitadas, sobre las condiciones locales del agua subterránea.

La información sobre un pozo de riego conocido como “(C-11-25) 3DAC” ubicado aproximadamente a 1.6 km al

noreste del LIS<sup>35</sup> demuestra las limitaciones y la incertidumbre que rodea las extracciones reportadas para pozos en el área de estudio. En 2004, se instaló una bomba de diesel cerca de la antigua bomba eléctrica. A lo largo de 2003, Reclamation calculó el agua extraída del subsuelo en este pozo a partir de los registros mensuales de corriente eléctrica y las mediciones de la corriente descargada. Para el pozo de diesel, Reclamation calculó el gasto anual con base en una tasa fija de 1.8 o 1.9 m de agua aplicada por cada 120 ha de tierras. De acuerdo a los reportes anuales de contabilidad, la extracción de agua se incrementó de 0.40 MMC en 2003 (medidos por la bomba eléctrica) a un estimado de 2.31 MMC en 2004 (por la bomba de diesel). Durante el periodo 1998-2003, la cantidad extraída del pozo promedió 0.404 MMC/año. Lo interesante es que durante el periodo 1991-1997, el gasto medido de la bomba promedió 2.30 MMC/año, similar al gasto estimado post-2003 (la bomba no está incluida en los reportes de contabilidad para 1989 o 1990). Este estudio utiliza los volúmenes de extracción de agua subterránea reportados por Reclamation, aunque realmente son estimados, más que volúmenes obtenidos por medición.

Algunos de los datos publicados sobre las condiciones del agua subterránea han sido engañosos. El “Yuma Area Water Management System” (YAWMS) [Sistema de Manejo de Agua en



**Figura 13. Reporte oficial de Reclamation versus reportes de YAWMS sobre la profundidad al agua subterránea para el pozo “13 3/4S-10 3/4W,” cerca de Hunter’s Hole, 1 de diciembre, 2009 – 7 de febrero, 2010.**

el Área de Yuma] anteriormente proporcionaba actualizaciones del monitoreo en tiempo real, de 97 pozos de bombeo de agua subterránea y 57 pozos de observación cercanos al corredor límite.<sup>36</sup> La figura 13 muestra la profundidad al agua subterránea

<sup>33</sup> Según el personal de Reclamation, de la Oficina del Área de Yuma, “La regla administrativa en relación al uso fuera de contrato del agua del Río Colorado, que incluye la metodología de la contabilidad superficial, todavía no ha sido aprobada. Si la regla entra en vigor y cuando eso ocurra, el agua subterránea en esencialmente todo El Valle de Yuma al sur del LIS, será considerada agua del subsuelo de Arizona y no agua del Río Colorado. La elevación del nivel freático con respecto a una superficie de contabilidad no tendrá que ver con esta determinación. Aunque la regla aún no ha sido aprobada, creo que la contabilidad del agua en El Valle de Yuma se está llevando a cabo como si las disposiciones relevantes de la regla estuvieran en vigor.”

<sup>34</sup> *Compilation of Records in Accordance with Article V of the Decree of the Supreme Court of the United States in AZ vs. CA dated March 9, 1964 (Decree Accounting Reports)*, [La recopilación de registros de acuerdo al Artículo V del decreto de la Suprema Corte de Estados Unidos, en el caso de Arizona vs. California, de fecha 9 de marzo, 1964], disponible en <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/wtracct.html>.

<sup>35</sup> Este pozo, denominado “Hughes, Earl” en los reportes anuales de contabilidad de Reclamation (disponibles en <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/wtracct.html>) para los años 1991-2001 y “Earl Hughs” [sic] en los años 2002-2009, se describe (2002) como ubicado a 32°29'55.8"N 114°48'25.6"W.

<sup>36</sup> Antes de marzo, 2011, esta información aparecía publicada en <http://www.usbr.gov/lc/yuma/programs/YAWMS/index.html>.

para el Pozo 13 3/4S-10 3/4W, un pozo de observación cerca de la parte superior de *Hunter's Hole*, de acuerdo al reporte de YAWMS y a información proporcionada por el personal de *Reclamation*. El sitio YAWMS proporcionaba datos para este pozo con una frecuencia casi diaria; los datos aportados por *Reclamation* son menos constantes, con una frecuencia semanal aproximada, desde diciembre hasta la primera semana de enero, 2010. Nótese que las cifras oficiales de *Reclamation* para este sitio son casi 4.6 m más altas que los datos de YAWMS para el mismo sitio. Los datos de YAWMS también presentan fluctuaciones de 4.3 m, en algunos casos, día a día. El mismo sitio de internet de YAWMS<sup>37</sup> presentaba la siguiente advertencia:

13 3/4S-10 3/4W es uno de muchos pozos de "observación" operadas por el *Bureau of Reclamation* en el Valle del Río Colorado. El objetivo de estos pozos es monitorear los niveles del agua del subsuelo. **Estamos experimentando dificultades técnicas con algunos de nuestros instrumentos que nos han arrojado lecturas incompletas o incorrectas. Durante este tiempo, no presentaremos las lecturas en este sitio web. Ofrecemos una disculpa por este inconveniente, entretanto trabajamos activamente para resolver estos problemas.** [énfasis en el original]

El personal de *Reclamation* señaló además que "Cualquier información en el sitio web es preliminar y no es apta para ser utilizada en análisis" (J. Scott, comunicación personal 2010). La información de YAWMS sólo aparece en la Figura 13; no se utiliza en ninguna otra parte de este reporte.

Estas discrepancias resaltan el reto más amplio que presentan las inconsistencias y las lagunas en la información. Varios pozos en la región tienen datos reportados por el *Arizona Department of Water Resources*, *USGS* y el *Bureau of Reclamation*, comúnmente a diferentes frecuencias y ocasionalmente con diferentes observaciones para el mismo pozo en el mismo día. Algunos de los pozos de monitoreo reportan una ausencia de lecturas por periodos de hasta 7.5 años; otros pozos fueron dañados, destruidos o reubicados, generando lagunas en la información. Otros obstáculos incluyen errores evidentes en la transcripción de la información, tales como los que existen en la base de datos de Conagua, que contiene una relación de las coordenadas para los pozos en el Distrito 014 en México (abarcando el Valle de Mexicali y San Luis). Estas coordenadas ubican ocho de los pozos (de los 815 incluidos en la relación) al este del Río Colorado en Arizona, uno en Mississippi y uno en el Atlántico, cerca de las Bermudas. Aun cuando estos errores son evidentes, menos clara es la precisión de los reportes de las profundidades al agua del subsuelo y de los volúmenes extraídos, que aparecen en algunas series de datos.<sup>38</sup>

<sup>37</sup> [http://www.usbr.gov/lc/yuma/programs/YAWMS/WELLS\\_DATA.cfm?wellname=13%203/4S-10%203/4W%20&SiteID=2761](http://www.usbr.gov/lc/yuma/programs/YAWMS/WELLS_DATA.cfm?wellname=13%203/4S-10%203/4W%20&SiteID=2761), visitado el 19 de diciembre 2012.

<sup>38</sup> *Reclamation* señala, "Aunque existen algunas deficiencias en la información, están bien reconocidas por *Reclamation* y *Reclamation* invierte mucho trabajo para asegurar y verificar la calidad de su información, así como hacer correcciones y mejoras en sus métodos donde se requiere."

## Errores en los medidores de caudal

Como se muestra a continuación, el volumen y la duración de los flujos del Río Colorado pasando la Presa Morelos afectan enormemente las condiciones del agua del subsuelo en el corredor límite. Los medidores de caudal proporcionan información sobre la descarga, aunque esta información trae consigo cierto grado de error, como se describe a continuación. En este estudio se presentaron tres retos claves en relación a la información obtenida de los medidores de caudal: 1) los flujos calculados pasando la Presa Morelos típicamente son menores que los flujos reportados en el LIN por tres órdenes de magnitud, por lo que holgadamente caen dentro del margen de error, lo cual aminora la confianza en su exactitud; 2) la ausencia de un medidor de caudal entre el LIN y el LIS dificulta los esfuerzos para determinar flujos reales aguas abajo de la presa y el volumen de agua absorbido por el cauce; y 3) la descarga reportada por el medidor en el LIS aparentemente subestima los flujos reportados.

La Figura 14 muestra la descarga diaria calculada (en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ )) pasando la Presa Morelos<sup>39</sup> durante los cuatro años en que no hubo flujo registrado en el LIS. Nótese que en el año 1996, el máximo flujo calculado pasando la Presa Morelos era menor a  $0.6 m^3/s$ . En 2005, debido a problemas con la seguridad, la IBWC empezó a instalar el medidor en el LIS únicamente cuando anticipaban flujos en el sitio, por lo que en los años de 2006, 2007 y 2009, el medidor puede no haber estado instalado para registrar las descargas mucho mayores que se produjeron esos años. Nótese que el eje Y está acortado, para presentar la variabilidad diaria en flujos calculados pasando la presa, truncando los valores mucho más altos de la descarga que se ha producido en años recientes. Estos valores de descarga pico son señalados en la gráfica. Nótese que en 2006 se presentaron dos eventos en los que la descarga diaria aguas abajo de la presa

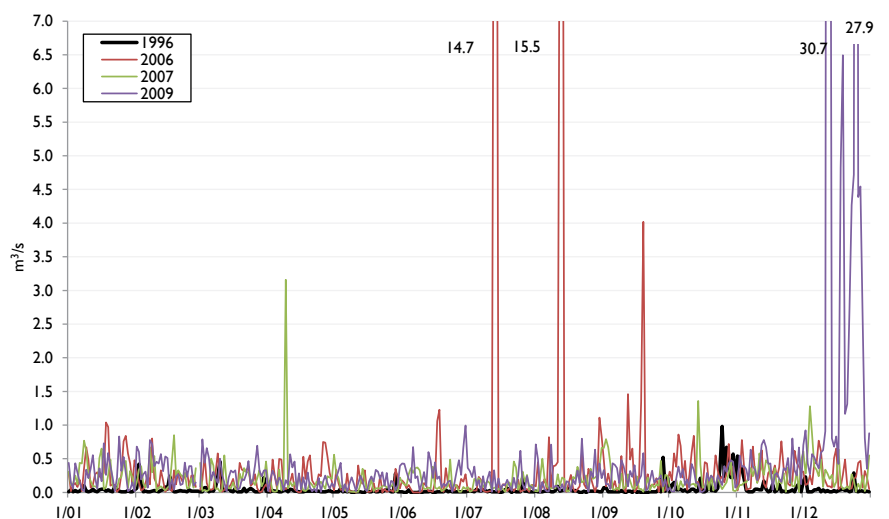


Figura 14. Descarga promedio diaria ( $m^3/s$ ) aguas abajo de la Presa Morelos en años en que no hubo descargas reportadas en el LIS. Fuente: IBWC.

<sup>39</sup> La descarga pasando la Presa Morelos calculada como flujos en el LIN + Desagüe Cooper + Desagüe MODE #3 + Desagüe Milla-11 + Desagüe Milla-21, menos derivaciones en la Presa Morelos.

sobrepasó los 14 m<sup>3</sup>/s y en 2009 se observaron dos flujos pico pasando la presa, que excedieron 28 m<sup>3</sup>/s, pero no hubo flujos registrados en el LIS. Los registros de los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos, de diciembre 12-25, 2009, indican que 8.9 MMC fluyeron por el Río Colorado en el transcurso de esos 14 días; sin embargo, no hubo flujos registrados en el LIS. Esto sugiere que el medidor no estaba instalado para registrar estos eventos de flujos elevados.

Puede establecerse una comparación interesante entre la descarga calculada en los cuatro años presentados en la Figura 14 y en los años 1990 y 1991. Esos dos años tuvieron descargas diarias pico similares – de 38.1 y 31.0 m<sup>3</sup>/s – pero en 1990 esas descargas pico fueron seguidas, con un rezago de uno a dos días, por descargas (mucho más pequeñas) registradas en el LIS. Aunque este estudio no llevó a cabo un análisis riguroso de la relación entre flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos y flujos registrados en el LIS, una valoración somera sugiere que la información obtenida por el medidor del LIS probablemente subestima los reportes de las descargas reales en el LIS en los años en que el medidor ha sido un aditamento temporal, quizá como resultado de no tener instalado el medidor en cada ocasión en que hay flujos presentes en el LIS. Esta subestimación en los reportes representa un error crítico en la información, que ocasiona que los cálculos de los flujos que son absorbidos por el cauce o que se pierden por evapotranspiración entre la Presa Morelos y el LIS, parezcan mayores de lo que en realidad son.

Una complicación añadida a la dificultad que representa la subestimación potencial en los valores reportados en el LIS, es la falta de precisión en los medidores en sí. La Tabla 3 muestra las limitaciones relacionadas con la información sobre el caudal para este tramo del río.

**Tabla 3. Precisión de registros selectos de estaciones de medición de caudal.**

Nombre de la estación	Medidor	Error
LIN	09522000	~10%
Bocatoma en la Presa Morelos	09522030	~15% - ~10%
LIS	09522200	>15%

Fuente: Hill (1993).

Nótese que los errores incluidos en la Tabla 3 se propagan a través de los cálculos subsiguientes. En particular, los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos se distorsionan, tanto por el error reportado en el medidor del LIN y en el de la bocatoma de la Presa Morelos, como por los errores no reportados de los flujos mucho más pequeños en los canales de desagüe. El error total en los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos, en la parte superior del corredor límite, puede expresarse por medio de la siguiente ecuación<sup>40</sup>:

$$S_x = \sqrt{(S_{LIN}^2 + S_{Cooper}^2 + S_{Bocatoma}^2 + S_{milla-11}^2)}$$

Donde  $S_x$  = la incertidumbre (error) en el flujo calculado pasando la Presa Morelos y  $S_{LIN}$  = al error reportado en el medidor de corriente dado. Si partimos del supuesto de un error de diez por ciento para los dos canales de desagüe, obtenemos un error total de casi 23 por ciento para el flujo calculado aguas abajo de la Presa Morelos. De esta misma ecuación se desprende que, las pérdidas calculadas aguas abajo de la Presa Morelos (eg, flujo pasando la Presa Morelos menos flujo reportado en el LIS) tendrían un error de por lo menos 27 por ciento.

Típicamente, los estudios utilizan un análisis de regresión para determinar la relación entre la variable dependiente – la elevación del nivel freático en un sitio determinado – y una o más variables independientes, tales como tasas de extracción mensuales o anuales, caudales ecológicos o pérdidas al cauce aguas abajo de la Presa Morelos. Parte de la información, particularmente los reportes de las elevaciones del nivel freático en los pozos de monitoreo de *Reclamation*, goza de un alto nivel de precisión (W. Greer, comunicación personal 2010). Como se mencionó anteriormente, la información sobre otras variables clave, tales como tasas de extracción y volúmenes diarios de caudal, presenta un riesgo más elevado de error. Los modelos estándar de regresión presuponen que las variables independientes no contienen error. Los modelos complejos de regresión (cf. Fuller 1987) que se requieren para dar cuenta de los errores de medición del caudal y en las tasas de extracción, van mucho más allá del alcance de este estudio, por lo que únicamente se efectuó un análisis de regresión limitado para determinar las correlaciones existentes entre las variables manejadas en este estudio.

<sup>40</sup> Fuente: "Error Analysis," en <http://science.widener.edu/svb/stats/error.html>

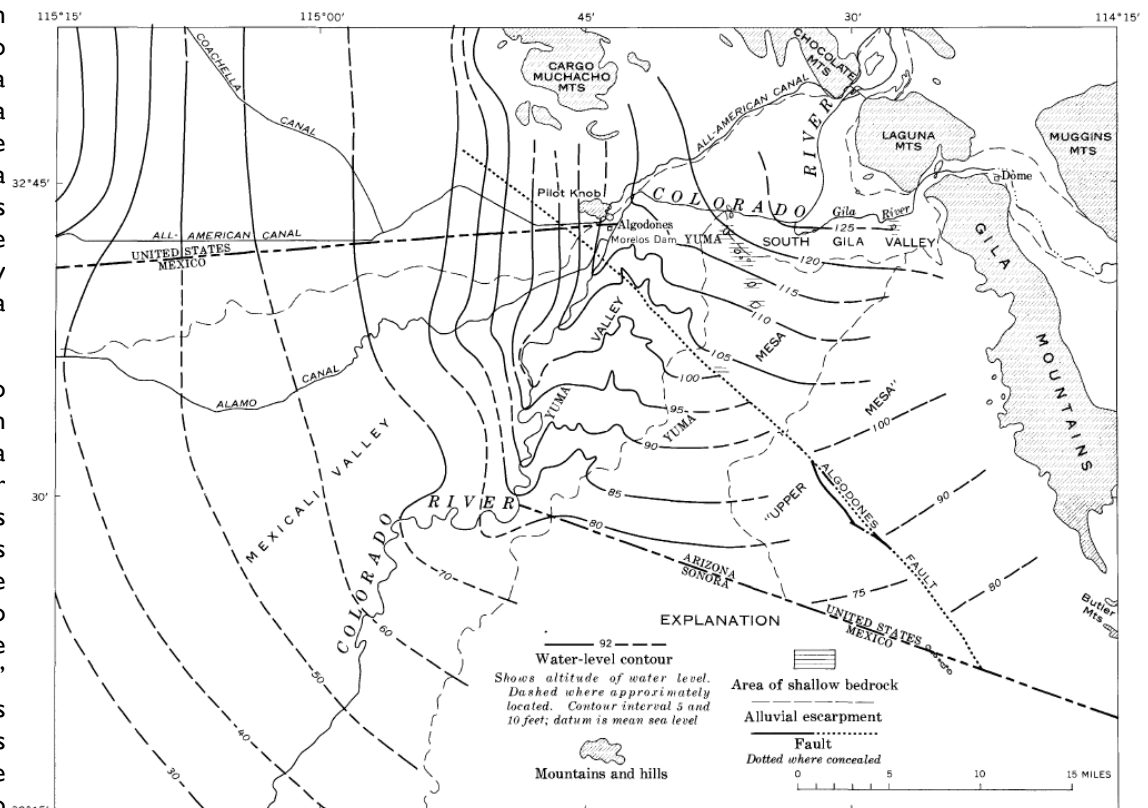
## Capítulo III – Condiciones del agua subterránea

Las condiciones del agua subterránea en el área de estudio y la región circundante son muy dinámicas, esto se refleja tanto en los registros a largo plazo, como en los de años recientes. La elevación del nivel freático fluctúa de un mes a otro, aunque la tendencia a largo plazo en el área de estudio y especialmente en el LIS, ha sido descendente. Ambos lados de la frontera padecen extracción a gran escala de agua subterránea, tanto para riego y, especialmente en el área de Yuma, para drenaje de riego. Las condiciones del agua subterránea en el área se parecen poco a las condiciones prevalentes antes del desarrollo, cuando el Río Colorado era la fuente principal de recarga y las elevaciones del nivel freático declinaban a medida que se alejaban del río. Hoy en día, el río obtiene agua del acuífero subyacente o está totalmente desconectado del mismo. Aunque el agua del Río Colorado aún recarga el acuífero ubicado bajo su planicie aluvial, esa agua hoy en día es incorporada a través de canales, que transportan el agua derivada del río varias millas aguas arriba. Este capítulo describe las condiciones históricas y recientes del agua subterránea en el área de estudio.

Tanto México como Estados Unidos monitorean las condiciones del agua subterránea cerca del corredor límite, por medio de pozos de monitoreo independientes y/o pozos de extracción de agua del subsuelo (ver Capítulo I). México típicamente mide las condiciones 'estáticas' del agua del subsuelo en los Valles de Mexicali y San Luis (conocido colectivamente como el Distrito de riego 014), requiriendo que todas las bombas federales para extracción de agua subterránea cesen sus operaciones durante un periodo de 72 horas, conocidas como el "paro de septiembre" (la fecha específica varía de un año a otro), permitiendo que el nivel freático se equilibre y midiendo la profundidad al agua subterránea en cada uno de los pozos. En Estados Unidos, se utilizan pozos exclusivamente de monitoreo para medir las condiciones dinámicas, ya que se ven afectados por las tasas de extracción de los pozos vecinos. Desde 2007, Pronatura Noroeste ha colaborado con el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, haciendo un levantamiento de una red de monitoreo de agua subterránea a lo largo del lado mexicano del corredor límite, cerca del cauce mismo del río. Estas tres fuentes de información proporcionan la base para la siguiente visión de conjunto de las condiciones recientes del agua subterránea en el área de estudio.

### Condiciones históricas del agua subterránea

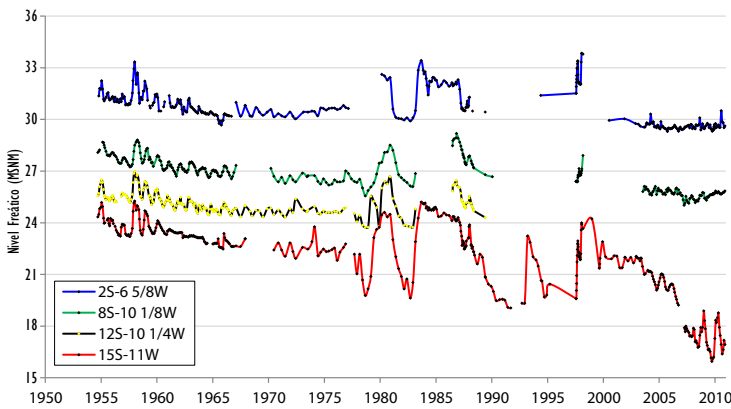
Como muestra la Figura 15, las condiciones del agua subterránea en el área de estudio eran muy diferentes hace 70 años, poco tiempo después de la construcción de la Presa Hoover, pero antes de la construcción de las presas Imperial y Morelos. La población de Yuma en 1940 era de 5,325 habitantes. Sin embargo, en 1903 se había formado la *Yuma County Water Users Association*, la cual se encarga de irrigar 18,000 ha de campos agrícolas en la planicie de inundación del Río Colorado, al este del área de estudio, por lo que las tierras en el área han sido sujetas a riego intensivo por más de un siglo.



**Figura 15. Contornos del nivel de agua promedio (en pies), 1939.** Fuente: Olmsted 1973, Figura 28, p.H86.

En 1939, el Río Colorado era una fuente de recarga neta para los acuíferos locales, como muestran los contornos más elevados a lo largo del río. Nótese que la elevación del nivel freático en el LIS en 1939 era aproximadamente de 26 m, alrededor de 13 m más alto que las elevaciones actuales. En 1939, la elevación del nivel freático era superior a los 34 m cerca de la parte superior del corredor límite, alrededor de 3 m más alto que la elevación actual.

La Figura 16, en la página siguiente, muestra las elevaciones del nivel freático en cuatro pozos de monitoreo, con observaciones iniciales que datan del 16 de septiembre, 1954. Nótese que hay dificultades con los registros a largo plazo para estos pozos,



**Figura 16. Elevaciones históricas del nivel freático, 1954-2010.** Fuente: Reclamation. El pozo 12S-10 1/4W fue destruido en 1990.

dados los cambios en la ubicación y los remplazos de pozos que ha habido en el transcurso de estos cincuenta y siete años de registros.<sup>41</sup> El pozo 2S-6 5/8W está ubicado cerca del dique, aproximadamente 0.7 km al sur de la Presa Morelos y cerca de 11.2 km al noreste del pozo 8S-10 1/8W. El pozo 12S-10 1/4W, que fue destruido por los altos flujos del Río Colorado en 1983, estaba ubicado justo al oeste de Gadsden. El pozo 15S-11W se encuentra cerca de 1.9 km al noreste del LIS y aproximadamente 0.9 km al sur del extremo aguas abajo de *Hunter's Hole*. Nótese que durante los años 1960-1977, las elevaciones del nivel freático en los tres pozos aguas arriba se encontraban esencialmente en un equilibrio dinámico, aproximadamente a 4.6-6.1 m por debajo de la superficie del pozo. Es interesante que la elevación del nivel freático por debajo del pozo 15S-11W descendió 3 m durante este periodo.

El pozo 15S-11W ha registrado mucha mayor variabilidad en elevaciones del nivel freático que la registrada en pozos ubicados aguas arriba. Este pozo localizado aguas abajo, también ha sufrido

<sup>41</sup> El pozo 2S-6 5/8W (también conocido como IBWC-28 hasta el 7 de julio, 2003, cuando esta designación fue transferida al pozo 2 1/2S-6 7/8W) nos da un buen ejemplo de algunos de estos obstáculos en la información. En enero de 1965, un nuevo pozo con el mismo nombre empezó a operar a aproximadamente un metro al sur del pozo original. En febrero de 1974, las anotaciones y las ubicaciones indican que el pozo original era funcional de nuevo. Aparentemente, este pozo fue destruido en junio de 1977 y un nuevo pozo inició operaciones en el mismo sitio en marzo 1980. El 7 de julio de 1986, otro nuevo pozo con el mismo nombre (y también designado BD-32) entró en funcionamiento aproximadamente 76 m al sur del pozo original. Siete lecturas en 1987 y 1988 indican que el pozo estaba seco a 6.4 m o más. En julio, 2000, tras más de dos años sin registrar una lectura, se instaló otro pozo, aproximadamente 21 m al noroeste del pozo anterior. Antes de esta reubicación de julio, la profundidad reportada al agua subterránea variaba por sólo 0.03 m entre el viejo pozo y su remplazo, en concordancia con las tendencias generales de profundidad al agua subterránea. Sin embargo, entre la lectura de marzo de 1998 y la de julio de 2000 en el pozo de remplazo, la profundidad al agua subterránea cayó por 3.9 m en el sitio. El pozo 3 1/8S-7 1/8W, aproximadamente 2.6 km al suroeste del pozo 2S-6 5/8W, aporta los registros para este periodo, con la profundidad reportada al agua subterránea descendiendo 0.7 m desde septiembre 1999 hasta septiembre 2000; pero no existen registros para el pozo 3 1/8S-7 1/8W a lo largo de los cuatro años anteriores al dato de 1999, por lo que no está claro si el enorme descenso en el nivel freático en el pozo 2S-6 5/8W reflejaba condiciones actuales u otros factores.

el mayor descenso en elevaciones del agua subterránea a lo largo del periodo registrado, de 9.4 m, desde septiembre de 1983 hasta octubre 2009.

Los registros para los dos pozos de monitoreo ubicados aguas arriba están incompletos para el periodo 2000-2010; pero en general, las elevaciones del agua subterránea en estos dos sitios son de 11-19 por ciento más bajas que lo que eran en 1960-1977.

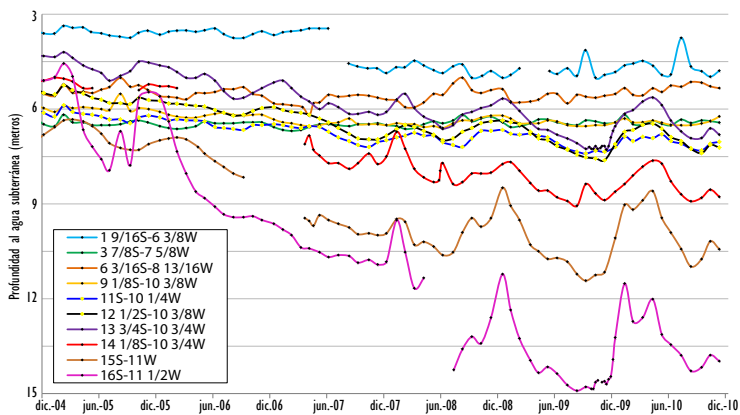
## Condiciones recientes del agua subterránea

Dickinson et al. (2006) escriben que la dinámica del agua subterránea en el área de Yuma ha sufrido cambios mayores desde la construcción de las presas ubicadas aguas arriba. El más dramático de estos cambios es que el Río Colorado ahora actúa como un sumidero para el acuífero vecino, en lugar de ser una fuente de recarga. A consecuencia del riego, los niveles del agua subterránea son mucho más altos en el área de Yuma que lo que han sido históricamente, sobre todo bajo Yuma Mesa. Dickinson et al. (2006) estimaron que la acumulación de agua subterránea bajo la mesa contiene 700-1,000 MMC, que bajo la superficie empujan radialmente hacia afuera.

Como se muestra en la Figura 3, “Cambios en los niveles de agua en el área de Yuma de dic., 2004 – dic. 2009,” hubo un leve descenso general en las elevaciones del agua subterránea en la tres cuartas partes superiores del corredor límite, pero un descenso pronunciado, acelerado en las elevaciones del agua subterránea desde Gadsden hacia el sur hasta el LIS. El personal de Reclamation señaló que la información de un pozo cercano al LIS, conocido como “16S-11 1/2W,” refleja el descenso más significativo (J. Nickell, comunicación personal 2010). Sin embargo, otros pozos de monitoreo localizados aguas arriba del LIS también reflejan esta tendencia generalizada. Nótese que el cono de depresión aparente en la Figura 3, en el LIS, es geográficamente diferenciable del declive general en elevaciones del agua subterránea registrado en el campo de pozos del Acta 242, a lo largo de la frontera Arizona/Sonora, al este de San Luis Río Colorado, aunque es probable que los recientes incrementos en la extracción de agua del subsuelo en este grupo de pozos haya contribuido al declive en ambas áreas (consulte el Capítulo IV para una exposición general sobre extracción de agua subterránea). La Figura 17 muestra esta información subyacente como profundidad al agua subterránea en los pozos de monitoreo a lo largo del borde este del corredor límite.

La leyenda de la Figura 17 contiene una relación de los pozos de monitoreo en orden, de Norte a Sur. El primer pozo mencionado se encuentra justo al este de la Presa Morelos y aproximadamente 0.3 km al este del cauce del río. Los primeros cinco pozos de monitoreo mencionados se encuentran al norte de Gadsden, con una separación aproximada de tres a cinco km entre cada uno. Los últimos cinco pozos mencionados se encuentran al sur de Gadsden (consulte la Figura 25 para la ubicación de los pozos de monitoreo). Nótese que los tres pozos localizados más al sur presentan mucha mayor variabilidad y un declive general mucho más pronunciado en la profundidad al agua subterránea, que los

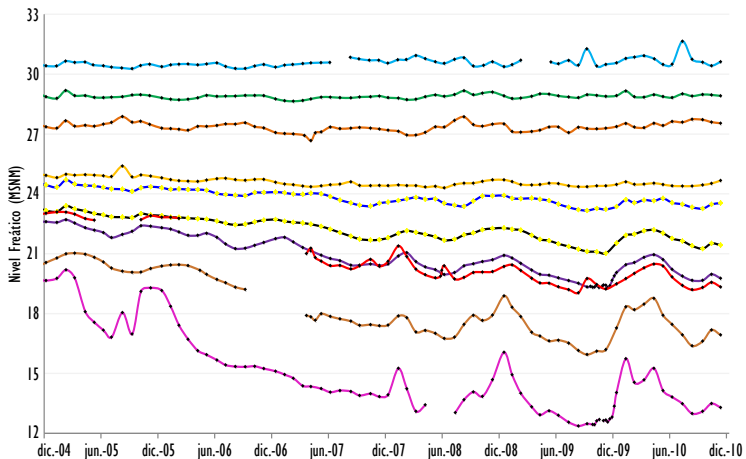
Dinámica del agua subterránea en el límite



**Figura 17. Profundidad al agua subterránea en los pozos de monitoreo estadounidenses ubicados a lo largo del corredor límite, dic. 2004 – dic. 2010.** Fuente: Reclamation.

otros siete pozos. En el pozo 16S-11 1/2W, el más cercano al LIS, la profundidad al agua subterránea se incrementó casi 10 m de marzo 2005 a diciembre 2009. En el pozo 14 1/8S-10 3/4W, cerca del sitio de restauración de *Hunter's Hole*, la profundidad al agua subterránea se incrementó 3.9 m durante ese lapso. En el mismo periodo, la profundidad al agua subterránea en el pozo 3 7/8S-7 5/8W, 4.0 km aguas abajo de la Presa Morelos, se incrementó menos de 0.3 m. Nótese que la gráfica muestra profundidad al agua subterránea; éstos son valores relativos, más que elevaciones absolutas del agua subterránea. Estas profundidades reportadas no reflejan la profundidad al agua subterránea dentro del corredor ripario.

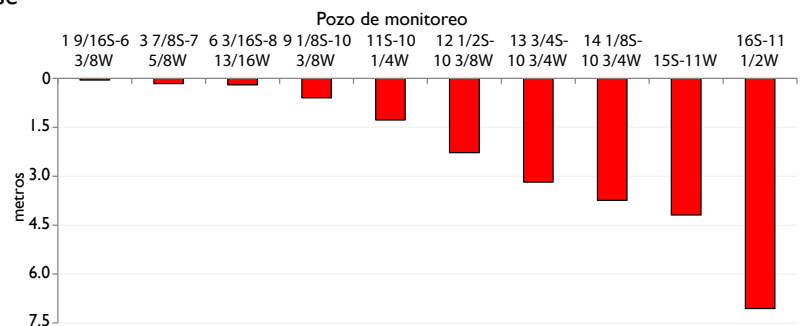
En la Figura 17, nótese la laguna de información faltante en junio de 2008, para el pozo 16S-11 1/2W y el declive de 3 m en la profundidad al agua subterránea reportada de mayo a agosto 2008. Los registros indican que este pozo fue remplazado durante ese periodo y que el nivel de la superficie del terreno en el sitio del nuevo pozo era 2.6 m sobre la ubicación anterior. Al revisar la elevación real del nivel freático subyacente, encontramos que el nivel freático descendió sólo 0.4 m de mayo a agosto de 2008,



**Figura 18. Elevaciones del nivel freático en los pozos de monitoreo estadounidenses a lo largo del corredor límite, dic. 2004 – dic. 2010.** Fuente: Reclamation.

en lugar de los 3.0 m que indican los registros de profundidad al agua subterránea, subrayando los problemas relacionados con basarse en las profundidades al agua subterránea reportadas y la necesidad de valorar cuidadosamente la información. La Figura 18 presenta las elevaciones del nivel freático reportadas, a diferencia de las profundidades al agua subterránea, para los mismos pozos, a lo largo del mismo periodo que la Figura 17. Una comparación de ambas revela una menor variabilidad y una caída menos pronunciada en las elevaciones del nivel freático que lo que sugieren los datos crudos de la profundidad al agua subterránea. Nótese que las elevaciones del nivel freático fueron en gran parte estables para los cuatro pozos situados más al norte. Debido a diferencias en elevaciones absolutas del nivel freático, el eje vertical en la Figura 9 abarca 21 m, mientras que el eje vertical en la Figura 18 abarca sólo 12 m, por lo que la Figura 18 parece comprimir la caída y la variabilidad en el nivel freático reflejadas en la Figura 17.

La Figura 19 muestra el cambio en las elevaciones del nivel freático en los diez pozos presentados en las figuras 17 y 18, entre diciembre 2004 y diciembre 2009 (en concordancia con el periodo presentado en la Figura 3). Nótese el incremento en la velocidad de declive de las elevaciones del nivel freático a medida que los pozos se alejan de la Presa Morelos y se aproximan al LIS (de izquierda a derecha en la figura).



**Figura 19. Cambios en la elevación del nivel freático, dic. 2004 – dic. 2009.** Fuente: Reclamation.

Las Figuras 17-19 presentan información a través del tiempo para ubicaciones de pozos estáticos. En la pagina siguiente, la Figura 20 presenta diferencias espaciales en un punto específico en el tiempo. La Figura 20 muestra las elevaciones y las ubicaciones aproximadas de los pozos de monitoreo de Reclamation en relación a las millas del Río,<sup>42</sup> junto con las elevaciones del corredor ripario y las elevaciones interpoladas del nivel freático subyacente en estos sitios del corredor ripario, en diciembre 2009. Debido a que éstos son datos interpolados y no mediciones empíricas, deben interpretarse como un reflejo de las tendencias generales en las elevaciones del nivel freático y no como valores precisos. Para efectos de comparación, también aparecen representadas las elevaciones de la plantilla del cauce, obtenidas de levantamientos realizados en 1976 y 1999. Nótese que esta figura combina información de cuatro periodos diferentes: los levantamientos del cauce de 1976 y 1999, las elevaciones de la superficie del

<sup>42</sup> Nótese que los pozos de monitoreo se ubican en términos generales a intervalos regulares a lo largo del dique este, mientras que el río serpentea; las designaciones de millas del río para los pozos de monitoreo se basan en la ubicación más cercana del río.

Dinámica del agua subterránea en el límite

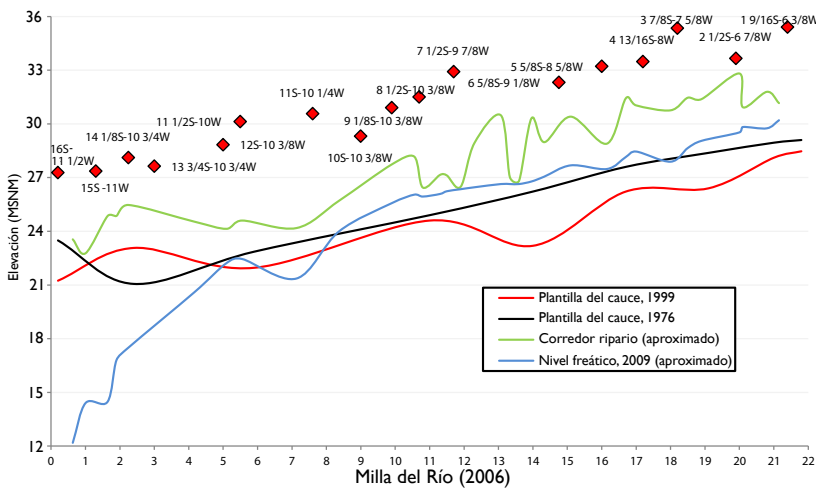


Figura 20. Perfil del corredor ripario y las elevaciones del nivel freático en dic., 2009.

terreno de 2007 y la información sobre el nivel freático de 2009. Nótese también que el nivel freático está sobre la plantilla del cauce de 1999 hasta aproximadamente la milla 8 del río y se eleva de nuevo aproximándose a la milla 5 del río, cerca de Gadsden, indicando que el río es un tramo con ganancias hasta ese punto. Esto concuerda con las observaciones de agua en el cauce, aunque la diferencia real de elevación puede no ser precisa, dados los cambios que probablemente han tenido lugar en las elevaciones del cauce desde 1999.

La Figura 21, del lado izquierdo, de Conagua en México, muestra las profundidades en metros al agua subterránea del lado mexicano del corredor límite, a partir de información de 2006. Nótese que la profundidad al agua subterránea que Conagua reporta de aproximadamente 12 m cerca del LIS en 2006 es más de 2 m por debajo de la elevación más baja reportada en 2006 por el pozo de monitoreo 16S-11 1/2W, el pozo más cercano al LIS en Estados Unidos,

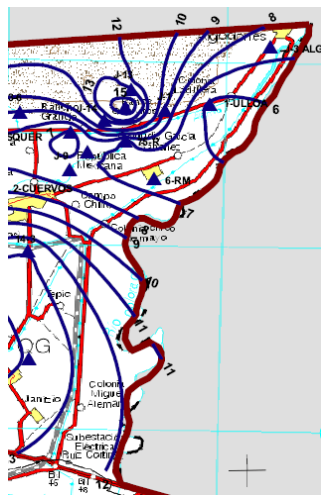


Figura 21. Profundidad al agua subterránea, México, 2006. Fuente: Conagua.

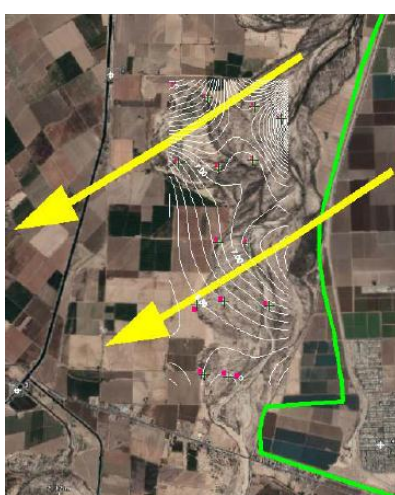


Figura 22. Movimiento del agua subterránea, México. Fuente: Hinojosa-Huerta et al. 2007.

aunque esto pudiera simplemente reflejar diferencias en elevaciones de los pozos más que diferencias en elevaciones del nivel freático. La Figura 22 en el lado derecho también muestra los contornos de la elevación del agua subterránea y la dirección del flujo que se deduce para la misma, basada en información de 15 piezómetros en diciembre de 2007, cerca de la Colonia Miguel Alemán. Nótese que la información de Conagua refleja elevaciones estáticas del agua del subsuelo, mientras que la información de los piezómetros en la Figura 22 refleja las condiciones dinámicas del agua subterránea. La profundidad media al agua subterránea registrada por estos piezómetros es de 7.7 m. Aun cuando existe información extensa sobre la ubicación y capacidad de los 41 pozos del lado mexicano del corredor límite, dentro de los diques (y de manera más general, en el Distrito 014 en México), la información sobre tendencias en elevaciones del agua subterránea, sobre todo en el área cercana al corredor límite, es limitada.

La Figura 23 muestra la profundidad al agua subterránea en cuatro sitios al oeste del corredor límite, en México. El pozo #311 queda justo al sur del medidor de caudal del LIS e incluye

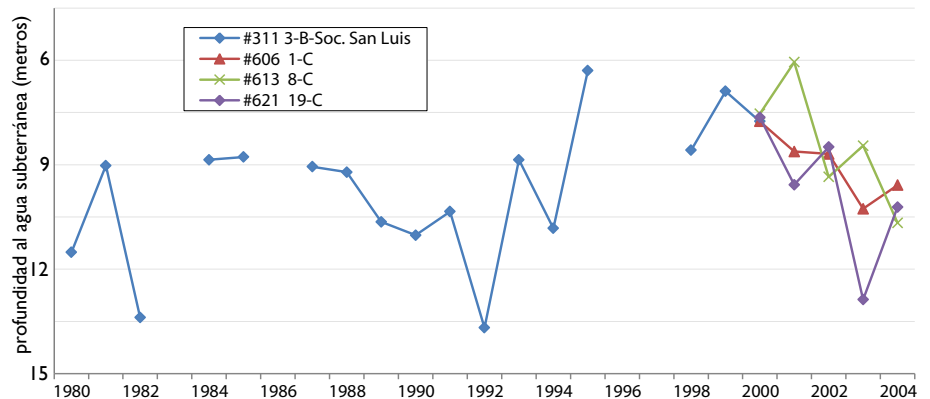
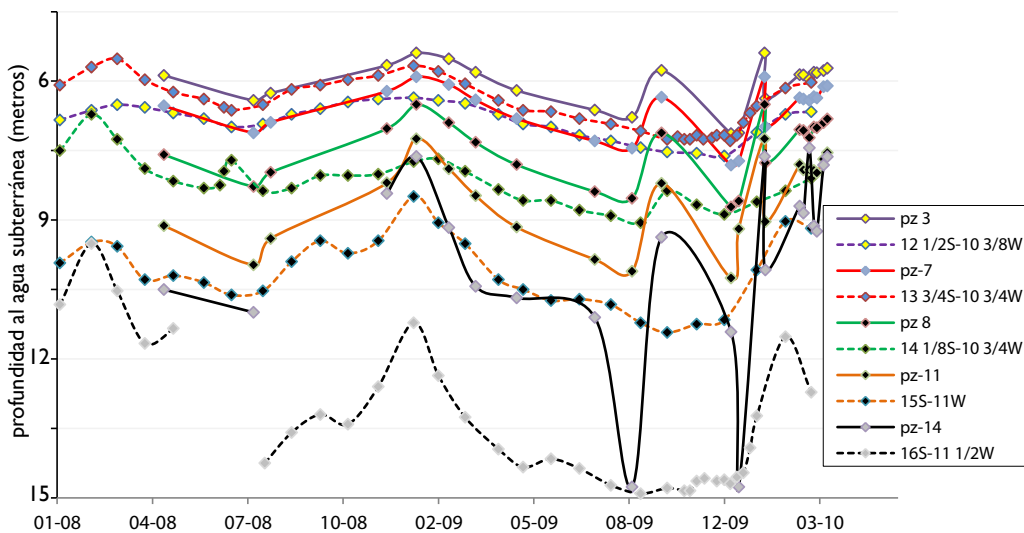


Figura 23. Profundidad al agua subterránea 1980-2004, al oeste del cauce del río. Fuente: Conagua.

elevaciones anuales 'estáticas' del agua subterránea, para la mayoría de los años de 1980-2000. Los otros tres pozos se encuentran varias millas aguas arriba, y sólo incluyen información para los años 2000-2004. Nótese la ausencia de cualquier tendencia constante en la profundidad al agua subterránea para estos tres pozos, con el pozo intermedio mostrando una tendencia en la dirección opuesta a los otros dos, en cada observación anual. Sin embargo, la tendencia 2000-2004 para cada uno de los pozos, es un declive general global de 3 m en la elevación del agua subterránea.

En la página siguiente, la Figura 24 compara las profundidades al agua subterránea en los pozos de monitoreo estadounidenses y los piezómetros mexicanos en distancias aproximadamente equivalentes a la Presa Morelos y al cauce del río en sí, para el periodo de enero de 2008 (abril de 2008 para la información de los piezómetros) hasta marzo de 2010. La ubicación de estos sitios se muestra en la Figura 25. Para efectos de comparación, los sitios emparejados se muestran en el mismo color, con los pozos estadounidenses marcados por líneas discontinuas. A excepción del





**Figura 24. Profundidad al agua subterránea en pozos de monitoreo emparejados en lados opuestos del canal del río, 2009-2010.** Fuentes: Reclamation, Hinojosa-Huerta.

pozo 12 1/2S, todos los pozos muestran un alza definida en la elevación del agua subterránea en enero de 2009. Nótese que, con la posible excepción del pozo 14 1/8S, los pozos de monitoreo estadounidenses no reflejan el incremento en las elevaciones del agua del subsuelo que la información de los piezómetros revela para el 26 de septiembre de 2009. El incremento de septiembre probablemente refleja el “paro de septiembre” de Conagua, de todas las bombas de extracción y la consiguiente recuperación de las elevaciones del agua subterránea, aunque aparentemente, este efecto se limitó a la parte oeste del cauce del río. Se desconocen las causas de las caídas anómalas en las elevaciones del agua subterránea en el piezómetro 14, en agosto de 2009 y en enero de 2010. Una simple correlación entre las profundidades mensuales promedio al agua subterránea en el piezómetro número 3 y las profundidades mensuales al agua subterránea en el pozo de monitoreo 12 1/2S-10 3/8W nos muestra una concordancia de casi el 70 por ciento.

En la página siguiente, la Figura 25 presenta las ubicaciones de los pozos de monitoreo de Reclamation y los piezómetros (denominados “PZ-1,” etcétera, o simplemente numerados). La imagen muestra la diferencia en elevación entre el nivel freático de diciembre 2009 y la superficie del terreno a lo largo del tramo límite como un todo. La Figura 25 interpola la elevación del nivel freático, con base en las elevaciones del agua reportadas en diciembre, 2009, utilizando información digital de elevaciones del 2007. Los diferentes tonos de colores reflejan el incremento en las profundidades al agua subterránea, de Norte a Sur, a lo largo del corredor límite. El montículo de residuos de dragado<sup>43</sup> es evidente inmediatamente al sur de la Presa Morelos (en la parte superior de la primera imagen), entre el cauce del río y el Canal Reforma. Nótese que el cauce del río se encuentra por debajo de la superficie del nivel freático interpolado para aproximadamente dos tercios del tramo aguas abajo de la presa, indicando que éste es

un tramo con ganancias, lo cual concuerda con el flujo superficial observado. Pasando *Hunter’s Hole* (cerca del pozo 13 3/4S-10 3/4W), el nivel freático claramente cae muy por debajo de la superficie.

Las condiciones del agua subterránea en el área de estudio se han ido deteriorando a lo largo de los últimos 57 años, siendo el impacto progresivamente más pronunciado en el cuarto ubicado más al sur dentro del área de estudio. Aun cuando los registros de los pozos de monitoreo son esporádicos durante algunos periodos claves (tales como a inicios de la década de los noventa), hay varias tendencias generales que son

evidentes. El nivel freático a través del área de estudio alcanzó su máxima elevación en cuatro tiempos bien identificados: enero de 1955, enero de 1958, septiembre de 1983 y enero de 1998, con un pico menor en diciembre de 1980. A lo largo de la última década, el nivel freático cerca de la Presa Morelos se ha mantenido aproximadamente a 0.6 m por debajo de las elevaciones promedio en la década de los sesenta y los setenta. Más cerca del LIS, las elevaciones del nivel freático cayeron aproximadamente 8.2 m de su elevación en 1960 a su elevación más baja registrada, en octubre de 2009. Aparte de este declive pronunciado en la elevación del nivel freático en la zona cercana al LIS, dichas elevaciones han sido mucho más variables que las que se presentan más cerca de la Presa Morelos. Bajo el pozo más cercano al LIS, las elevaciones del nivel freático en ocasiones han caído y se han elevado de nuevo más de 3 m, en cuestión de un par de meses, indicando la presencia de un suelo poroso y una rápida respuesta a factores externos.

<sup>43</sup> Ver la discusión en la página 10 sobre el montículo de residuos de dragado.

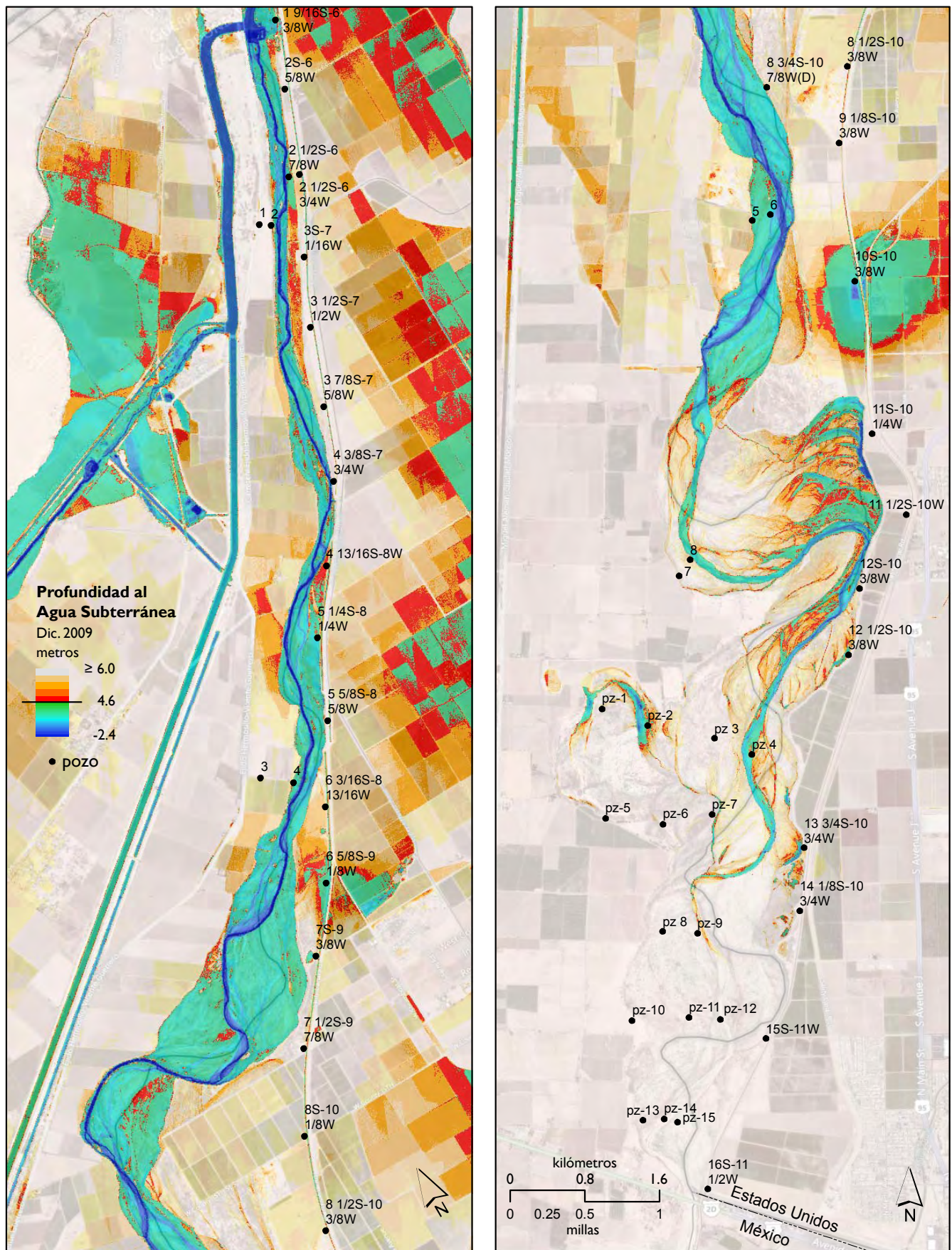


Figura 25. Profundidad al agua subterránea en el tramo límite, dic., 2009.

Fuentes: Reclamation, Hinojosa-Huerta, USGS.<sup>44</sup>

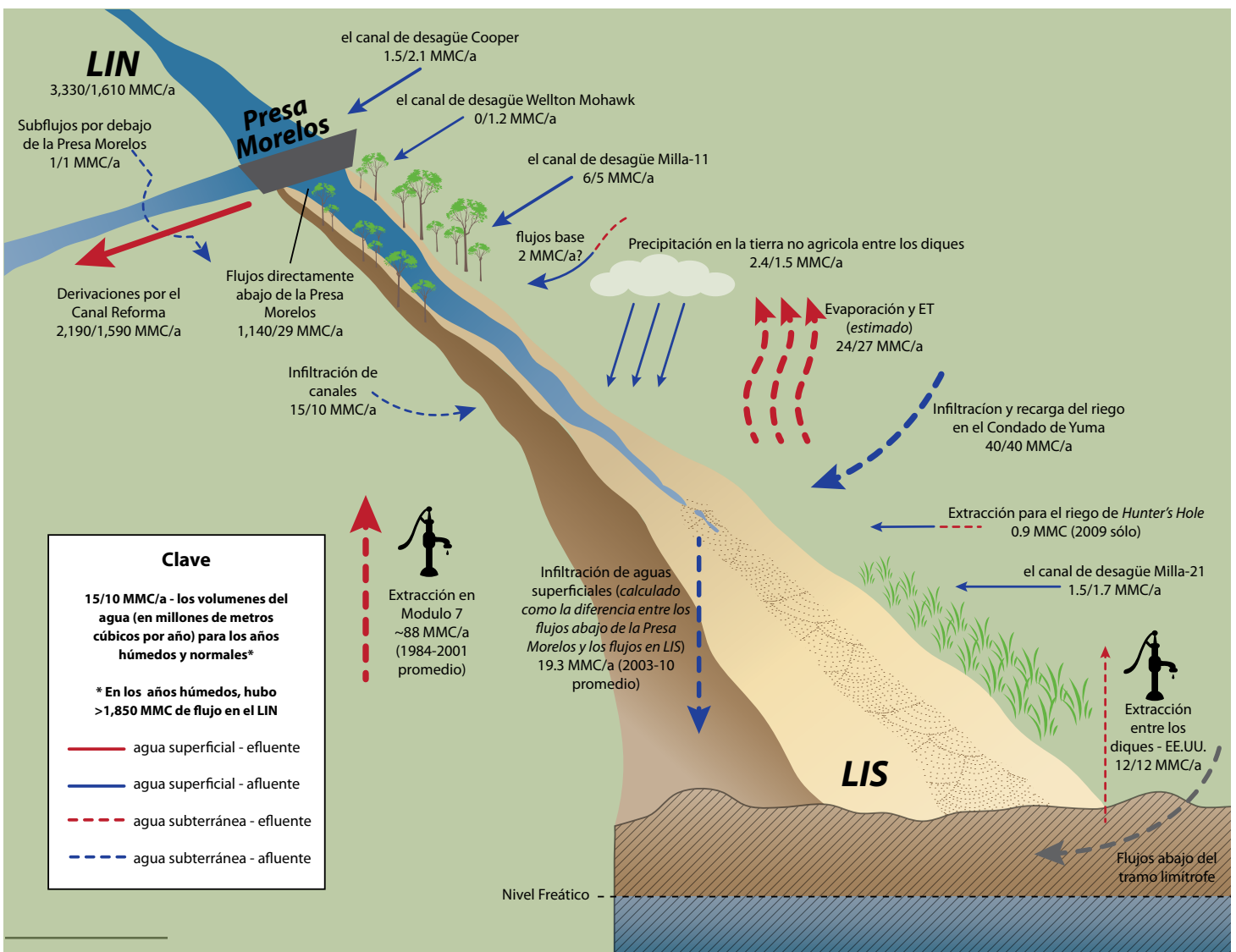
<sup>44</sup> Información subyacente del USGS "Imperial County, California, and Yuma County, Arizona, along the Mexico Border, 2007, 1/9-Arc Second National Elevation Dataset."

## Capítulo IV – Dinámica del agua subterránea

Diversos factores ayudan a explicar la variabilidad en las elevaciones del agua subterránea mencionada en el Capítulo III. Esta variabilidad puede describirse en función de la diferencia entre los caudales afluentes y los efluentes. Aportaciones a los caudales afluentes incluyen la recarga de aguas superficiales que se infiltran a través del suelo, y movimientos de aguas subterráneas. En el caso del área de estudio, el riego intensivo de unas 30,000 ha en el Condado de Yuma, que drena al menos en parte hacia el área de estudio,<sup>45</sup> la recarga periódica por medio del Río Colorado y su planicie de inundación, filtraciones de los canales de irrigación, los poco frecuentes eventos de precipitación pluvial abundante, y el movimiento de agua subterránea del área de Yuma hacia el cauce del río, todos son factores que contribuyen a la recarga de agua subterránea en el tramo límite. El estudio de PNN/UABC (Ramírez et al. 2011) también sugiere que algo de recarga ocurre

debido a filtraciones del Canal Reforma, que afecta al corredor límite directamente abajo de la Presa Morelos.

Los efluentes incluyen extracción de agua subterránea por bombeo, extracción por las raíces de las plantas, movimientos de agua subterránea alejándose del área de estudio, y la descarga hacia la superficie, a manera de fuentes y filtraciones. En el área de Yuma, los irrigadores utilizan bombas para extraer agua subterránea y zanjas para drenar<sup>46</sup> para mantener el nivel freático por debajo de la zona de las raíces, para permitir una mejor administración del riego y para evitar quemar las raíces de las plantas con agua salada del subsuelo. En algunas partes del Condado de Yuma, se extrae agua para irrigación y, de pozos más profundos, para uso municipal. Dentro de un margen de 8 km de la frontera Arizona-Sonora, ambas naciones operan extensos campos de pozos,



<sup>45</sup> El total de la extensión en acres de las cosechas en el Condado de Yuma en 2008, incluyendo árboles y viñedos, fue de 106,273 ha. La mayor parte de esta extensión drena hacia el norte, hacia los ríos Colorado y Gila, y hacia el sur, donde es interceptado por coladeras superficiales o bombas a lo largo de la frontera Sonora-Arizona. Fuente: *Arizona Cooperative Extension*.

**Figura 26. Caudales afluentes y efluentes del área de estudio.**

<sup>46</sup> Según *Reclamation*, los drenajes “franceses” no se utilizan en el área de Yuma.

extrayendo en años recientes, entre los dos países, más de 250 MMC por año de agua subterránea. La vegetación riparia y las plantas de mayor elevación, que también extraen agua del acuífero subterráneo, afectan directamente las condiciones en el área de estudio. Las operaciones de bombeo al oeste y al sureste del corredor límite extraen agua del área de estudio, abatiendo las elevaciones del agua subterránea. En los puntos donde el nivel freático interseca la superficie del terreno, como ocurre en la porción alta del tramo límite, las descargas del aluvión generan un flujo base en el cauce del río. A excepción del agua superficial y la precipitación pluvial (ver la discusión en el Capítulo V), cada uno de estos factores son tratados a continuación.

En la página previa, la Figura 26 presenta un panorama simplificado del movimiento del agua entrando y saliendo del tramo límite, como fue descrito anteriormente. La figura incluye volúmenes reportados y estimados para años “normales” y años “húmedos” a lo largo de las dos últimas décadas. “Normales” son aquellos años en que el volumen de agua que pasa por el LIS fue menor a 1.85 km<sup>3</sup> (1,850 MMC); los años húmedos tuvieron una cantidad de agua mayor a esta cantidad.

El Capítulo III describe las condiciones variables del agua subterránea en el área de estudio, resaltando el dramático descenso de las elevaciones del nivel freático cerca del LIS, a lo largo de los últimos 57 años y las elevaciones más estables que se presentan cerca de la Presa Morelos. Se desarrollaron dos balances de agua relacionados, para rastrear los diversos factores que afectan las condiciones del agua subterránea en el área de estudio. Estos balances dan cuenta de los caudales afluentes y efluentes en los sistemas de agua subterránea y superficial, para los años 1990-2010. Separar los sistemas de agua superficial y subterránea, que aun estando vinculados también son de cierta manera diferenciables, permite un análisis más cercano de los términos individuales involucrados. Se eligió este periodo de tiempo para evitar los impactos distorsionantes de los flujos muy elevados del Río Colorado a mediados de los ochentas, cuando miles de MMC fluyeron por el LIS. Las Tablas 4 y 5 presentan respectivamente los balances para el agua de la superficie y la del subsuelo en el área de estudio e incluyen los flujos (en MMC) como un valor promedio, desglosando éstos, además en años “húmedos” y años “normales”, con base en si más o menos de 1,800 MMC fluyeron por el LIS.<sup>47</sup> Las dos tablas incluyen la fuente para los valores que contienen: información de medidores, a excepción del medidor en el LIS en años recientes, generalmente tienen un error reportado de 15% o menos. Los valores calculados tienen un mayor margen de error, reflejando el efecto de combinar varios términos de error, y la diferencia en

magnitud entre los flujos reportados en el LIS y las derivaciones en la Presa Morelos, con los flujos calculados aguas abajo de la presa. Los valores estimados son cálculos basados en datos del levantamiento, con una superficie calculada de terreno, que puede no ser enteramente confiable. “Conjeturas” son simples conjeturas informadas, esencialmente marcadores de posición que reflejan una falta de información para fundamentar un cálculo razonable. Los “flujos base” podrían calcularse con un modelo sofisticado del tramo límite, usando la geometría actual del canal y una serie de interpolaciones de las elevaciones del nivel freático a lo largo del tramo, así como información más completa sobre transmisividad de los suelos límites. En otras secciones de este reporte, se ha supuesto que “Infiltración” es la diferencia entre los caudales afluentes y efluentes totales al tramo límite, pero eso tendría un efecto circular sobre este balance. En lugar de eso, el valor para el año normal es calculado con base en esta diferencia, pero el año “húmedo” simplemente se supone que tendrá un valor mayor, aun cuando el residuo sugiere que ése, o algún otro término en los efluentes, pudiera ser ya de por sí demasiado grande.

**Tabla 4. Balance del flujo de agua superficial en el área de estudio (MMC)**

Afluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
flujos abajo de la Presa Morelos	1990-2010	calculado	451	1,140	29.0
flujos base		conjetura	2	2	2
canal de desagüe Milla-11	1990-2010	dispositivo de medición	5.2	5.8	4.8
precipitación	1990-2010	dispositivo de medición	1.9	2.5	1.5
canal de desagüe Milla-21	1990-2010	dispositivo de medición	1.6	1.5	1.7
canal de desvía LIS	2004-2010	dispositivo de medición	0.5	0.09	0.6
<b>Total</b>			<b>463</b>	<b>1,150</b>	<b>39.9</b>
Efluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
evaporación		estimado	3	3	3
infiltración	1990-2000	conjetura	18	23	14
Q en LIS	1990-2010	dispositivo de medición	458	1,170	18.6
<b>Total</b>			<b>479</b>	<b>1,200</b>	<b>35</b>
<b>Residual</b>			<b>(16)</b>	<b>(48)</b>	<b>4.5</b>

En la Tabla 5 (en la página siguiente), varios puntos son simples conjeturas, dada la falta de información. El movimiento de agua subterránea como caudal afluente es un valor reportado por Olmsted (1973) y es probablemente obsoleto, ya que es anterior a la operación de los pozos del Acta 242, que supuestamente han cambiado la dirección de parte del movimiento de agua subterránea, sobre todo cerca de la frontera. El movimiento de agua subterránea como efluente refleja el hecho de que, en el tramo límite pasando Gadsden, el manto freático no tiene conexión con el cauce superficial y el agua subterránea supuestamente fluye a través de esa área sin ningún obstáculo. Sin embargo, en las tres cuartas partes superiores del tramo límite existe una conexión entre el manto freático y la superficie (incluyendo vegetación riparia que extrae agua del manto freático), por lo que es probable

<sup>47</sup> Años “húmedos” son 1993, 1995, 1997-2001, 2010; Años “normales” son 1990-92, 1994, 1996, 2002-09.

**Tabla 5. Balance del agua subterránea en el área de estudio (MMC).**

Afluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
Subflujos por debajo de la Presa Morelos		conjetura	1	1	1
infiltración		conjetura	18	23	14
filtraciones del Canal Reforma		Conagua 2004	12.2	14.1	10.2
recarga de riego agrícola entre los diques, al Este del río		calculado	3.5	3.5	3.5
recarga de riego agrícola entre los diques, al Oeste del río		calculado	9.7	9.7	9.7
movimiento de agua subterránea	1973	Olmsted	40.4	40.4	40.4
<b>Total</b>			<b>85</b>	<b>92</b>	<b>79</b>
Efluentes	Anos	Fuente	Promedio	Humedo	Normal
evaporación y ET	1997-2007	LCRAS	25.9	24.4	27.2
extracción entre los diques - México		calculado	32.2	32.2	32.2
extracción entre los diques - EE.UU.		calculado	12.5	12.5	12.5
cambio en almacenamiento	1990-2010	estimado	(3.4)	7.5	(9.7)
movimiento de agua subterránea		conjetura	40	40	40
<b>Total</b>			<b>107</b>	<b>117</b>	<b>103</b>
<b>Residual</b>			<b>(22)</b>	<b>(25)</b>	<b>(24)</b>

que este efluente esté agotado, tanto por flujos base como por evapotranspiración. El cambio en el término de almacenamiento complementa por lo tanto los términos de movimiento de agua subterránea, aun cuando está calculado con base en el cambio promedio de elevaciones del agua y el estimado de Ramírez et al. (2011) del volumen de agua requerido para incrementar las elevaciones del agua.<sup>48</sup>

## Recarga

Hay dos fuentes clave para la recarga del acuífero somero en el área de estudio: drenaje subterráneo de riego agrícola en el Condado de Yuma, y filtración de los flujos superficiales del Río Colorado aguas abajo de la Presa Morelos. Ambas son tratadas a detalle en lo que resta de este reporte. Varias fuentes menores de recarga también contribuyen a este acuífero somero: precipitación pluvial directa, subflujos por debajo de la Presa Morelos y filtraciones del Canal Reforma. El *Bypass Extension* del canal de drenado Wellton-Mohawk, recubierto de concreto, aporta al área una cantidad insignificante de filtraciones. En 2009 se terminó un proyecto de \$300 millones de dólares para recubrir<sup>49</sup> 37 km del Canal Todo Americano, evitando que se filtrara al subsuelo un estimado de 83.5 MMC a través del canal. La mayor parte de estas filtraciones fluían hacia el Sur a México. Dados los gradientes del subsuelo en el área, la mayor parte de estas filtraciones fluían supuestamente hacia el Suroeste, hacia Mesa Andrade y el Valle de Mexicali, más que hacia el área de estudio.

<sup>48</sup> Ramírez et al. (2011) estimaron que “Se necesitan aproximadamente 6.7 MMC para incrementar el nivel del acuífero 0.5 m.”

<sup>49</sup> En realidad, el proyecto de “recubrimiento” del canal consistió en la construcción de un nuevo canal paralelo, más que en recubrir el canal existente.

Es probable que los subflujos del Río Colorado aguas arriba de la Presa Morelos aporten al agua subterránea en el área de estudio, en un volumen no determinado. La recarga por filtraciones a través del no recubierto Canal Reforma, identificadas por Ramírez (2011), pudiera aportar 12 MMC al año adicionales.<sup>50</sup> La precipitación pluvial directa sobre el área de estudio aporta en promedio, anualmente, aproximadamente 4.2 MMC, una pequeña fracción del potencial de evapotranspiración en el tramo. Debido a la extensa infraestructura de drenado en el área de Yuma, ni siquiera los grandes eventos de precipitación pluvial incrementan directamente el flujo superficial o de agua subterránea al área de estudio: la escorrentía de

dichos eventos es interceptada por coladeras superficiales y transportada al Río Colorado o al punto de entrega en la frontera terrestre. Sin embargo, grandes eventos de precipitación pluvial tienen un impacto *indirecto* significativo en la recarga del área de estudio, ocasionando que los irrigadores de los valles de Yuma, Imperial, Coachella y Mexicali cancelen pedidos de agua. Aunque el nuevo embalse de *Brock Reservoir*<sup>51</sup> agrega una limitada capacidad de almacenamiento al sistema de entregas del Río Colorado, la mayoría de estos pedidos de agua cancelados fluyen a través de la Presa Morelos y llegan al área de estudio, causando flujos pico e incrementando dramáticamente el volumen de agua que se infiltra al cauce y se acumula en los remansos.

Antes de la construcción de las presas y las derivaciones, el Río Colorado proporcionaba la principal fuente de recarga para el agua subterránea en el área de estudio, tanto durante los flujos altos como en los bajos. Olmsted et al. (1973) señalan que en 1925, el río generó una marcada cresta en el subsuelo que se alejaba en declive del cauce. Con la construcción de presas y

<sup>50</sup> Este estimado se basa en Conagua (2004), que reporta 60 MMC/año en pérdidas de la “infraestructura principal.” Supuse que 10 MMC (como un estimado de una orden de magnitud) fluyen hacia el corredor límite y el resto se filtra de partes no adyacentes al tramo límite o que de cualquier manera fluye hacia el oeste, con base en las relativas longitudes de la infraestructura principal:

Canal Reforma - 27 km de longitud; capacidad de 14 MMC por día.

Canal Revolución – 4 km de longitud; capacidad de 3.3 MMC por día.

Sin embargo, los reportes indican que el 97.2% de la “infraestructura principal” está recubierta; Conagua no reporta que parte de las pérdidas se originan de la porción no recubierta.

<sup>51</sup> Conocido anteriormente como el embalse *Drop 2*.

derivaciones, los flujos del Río Colorado han disminuido y las cargas de sedimento han descendido, ocasionando que el río aguas abajo de la Presa Laguna haya desgastado su antigua planicie de inundación de 3-6 m. En esta baja elevación, el río ahora drena agua del subsuelo de los terrenos circundantes, una completa inversión de las condiciones previas a la construcción de la presa (Olmsted et al. 1973).

### Extensión de tierras de riego

La Figura 27 muestra los distritos de riego del área de Yuma. De éstos, la Yuma County Water Users Association irrigó 21,000 ha, Yuma Mesa irrigó casi 7,100 ha y Unit B irrigó 1,100 ha en 2008. Flujos de retorno de otros distritos no afectan al área de estudio directamente.<sup>52</sup>

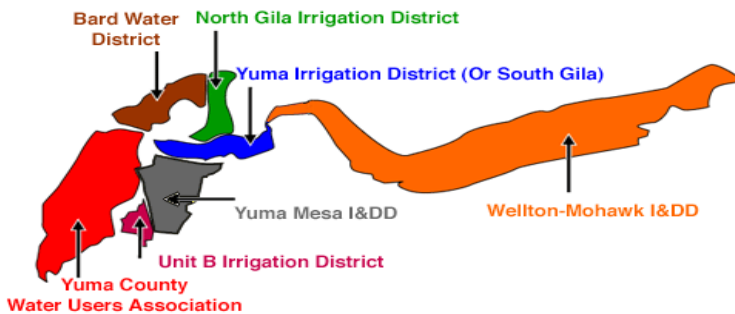


Figura 27. Distritos de riego del área de Yuma. Fuente: Yuma Area Ag Council (<http://www.yaac.net/irrigation.html>)

La Figura 28 muestra las derivaciones anuales de aguas superficiales y los flujos de retorno para estos tres distritos de riego. Nótese que en 2003, Reclamation empezó a dar crédito a contratistas individuales por 'flujos de retorno no medidos'.<sup>53</sup> Como muestra la gráfica, esta nueva contabilidad generó para Yuma Mesa un promedio de 38 MMC/año en nuevos créditos por flujos de retorno, y unos 47 MMC/año para los tres distritos combinados. Nótese también que los flujos de retorno reportados por Yuma Mesa se incrementaron por 173% de 1990 a 2009, mientras que al

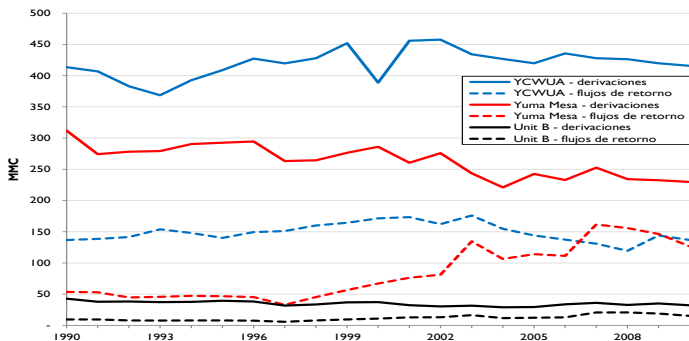


Figura 28. Derivaciones anuales y flujos de retorno de los distritos de riego del área de Yuma, 1990-2010. Fuente: Reportes anuales de Reclamation de contabilidad por decreto.

<sup>52</sup> Rara vez, pequeños volúmenes de drenaje agrícola que son extraídos por bombeo de debajo de Wellton-Mohawk, se extraen con sifón del MODE Bypass Extension hacia Hunter's Hole.

<sup>53</sup> Antes de 2003, los flujos de retorno no medidos eran acreditados al estado en su totalidad, y no a los contratistas individuales.

mismo tiempo las derivaciones totales disminuyeron por 25%. Los flujos de retorno reportados por YCWUA se incrementaron por 5%, mientras que el total de derivaciones reportadas disminuyó en un 1% durante el mismo periodo. El total acumulado de las derivaciones para los tres distritos disminuyó por 90.0 MMC (12%) de 1990-2009, mientras que el reporte combinado de los flujos de retorno de los tres distritos se incrementó por 110 MMC (55%). De acuerdo a la Ley del Río (cf. Nathanson 1980), dichos flujos de retorno deben estar disponibles para entrega a usuarios del agua aguas abajo o para cumplir con las obligaciones del Tratado con México; los flujos de retorno del subsuelo<sup>54</sup> que ingresan en el tramo límite aguas abajo de la Presa Morelos no se contabilizan y por lo tanto no aparecen reflejados en la Figura 28.

La Figura 29 es una gráfica de las derivaciones mensuales para la YCWUA (que abarca la Valley Division del Yuma Reclamation Project) para varios años, mostrando la variabilidad estacional en la aplicación de agua de riego. Nótese los picos en el riego, en primavera y en octubre de la mayoría de los años, que reflejan los patrones de cosecha.

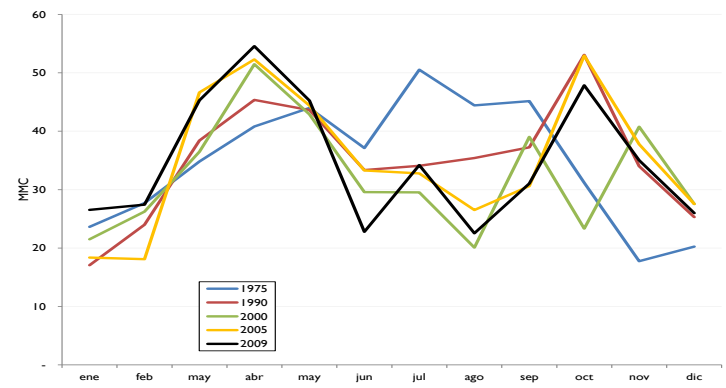


Figura 29. Derivaciones mensuales reportadas, YCWUA. Fuente: Reportes anuales de Reclamation de contabilidad por decreto.

La Figura 30 es una gráfica de los flujos de retorno como porcentaje de las derivaciones tanto para Yuma Mesa como para la YCWUA, para los años 1990-2009. El incremento drástico en retornos para Yuma Mesa refleja el incremento de extracción por

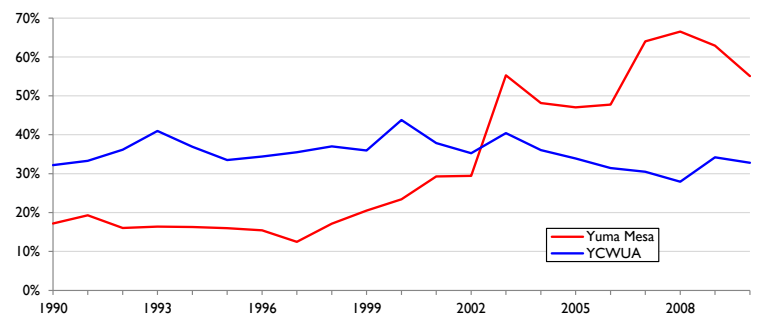


Figura 30. Flujos de retorno totales reportados como porcentaje total de derivaciones reportadas para los distritos de riego de Yuma, 1990-2010. Fuente: Reportes anuales de Reclamation de contabilidad por decreto.

<sup>54</sup> Nótese que los flujos de retorno superficiales, vía los diversos canales de desagüe, son acreditados como flujos de retorno.

bombeo de agua subterránea en años recientes,<sup>55</sup> para reducir los niveles de agua subterránea en el condado de Yuma; pero los cambios más significativos son institucionales, tales como el reporte de flujos de retorno no medidos para contratistas individuales implementado a partir de 2002.<sup>56</sup> Nótese que los valores para *Yuma Mesa* post-2002 son excepcionalmente altos, aproximándose a dos tercios del volumen de agua derivado. Parte de este incremento puede explicarse por los volúmenes de extracción incrementados en los pozos del Acta 242, a partir de 2002. Aunque *Yuma Mesa* recibe crédito por flujos de retorno del año en curso por esta agua extraída, hay un rezago en el movimiento del agua subterránea de la mesa al campo de pozos.<sup>57</sup> La contabilidad de estos flujos subterráneos de retorno es mucho menos precisa que para los retornos superficiales.

Hasta 2006, el poblado no incorporado de Gadsden, Arizona, a 5 km al norte de San Luis y a 3.6 km al norte de *Hunter's Hole*, carecía de servicios de tratamiento de aguas residuales; la mayoría de los habitantes utilizaba fosas sépticas y campos de infiltración para descargar aproximadamente 0.06 MMC/año al acuífero. Otras ciudades y poblados tratan el agua residual y la descargan al drenaje de Yuma para su entrega a México en la frontera terrestre, cerca del LIS.

El borrador del estudio de partículas de *Reclamation* (sin fecha), basado en el modelo de agua subterránea de ADWR y utilizando el alto nivel freático de fines de los ochentas, calculó que 76 MMC de agua subterránea fluía anualmente del área de Yuma al sur, hacia los pozos de la Mesa Arenosa en México, y que 23 MMC adicionales fluyen anualmente al área de estudio. El estudio de rastreo de partículas también estimó que 28 MMC fluían anualmente desde el bajo Río Colorado a Estados Unidos.

## Extracción

Los reportes anuales de *Reclamation* de contabilidad por decreto ya no incluyen información sobre la extracción de agua del subsuelo para sitios cercanos al corredor límite,<sup>58</sup> aun cuando la USGS continúa calculando la cantidad de agua extraída en sus reportes anuales sobre los pozos de bombeo. No fue posible obtener

<sup>55</sup> Según un revisor, “de finales de los años noventa hasta 2008, la descarga del conducto de Yuma Mesa fue minimizada en los reportes – por lo que el incremento es en parte resultado de reportes más precisos.”

<sup>56</sup> Se puede ver el resumen para el Yuma Mesa Division del Gila Project, que abarca el Distrito de Riego y Drenaje de North Gila Valley, el Distrito de Riego de Yuma, y el Distrito de Riego y Drenaje de Yuma Mesa, en página 11 de <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/4200Rpts/DecreeRpt/2008/2008.pdf>.

<sup>57</sup> *Reclamation* señala que, “No se tiene la intención de determinar los flujos de retorno para dar crédito sólo por las aguas retornadas en el mismo año en que fueron aplicadas como riego. En muchos casos, los tiempos de desplazamiento desde el punto de aplicación como riego hasta el punto de descarga son de décadas a cientos de años o más.”

<sup>58</sup> En 2004, el director regional de *Reclamation* determinó que “La extracción en pozos continuará siendo contabilizada únicamente en las áreas donde el agua subterránea fluye hacia el tramo del Río Colorado ubicado aguas arriba del Lindero Internacional Norte (LIN) con México” (carta fechada el 7 de noviembre de 2005, al presidente de la Reserva Cucupah; énfasis en el original).

registros recientes sobre la extracción de agua subterránea en el lado mexicano del corredor límite. Dickinson et al. (2006) compilaron y estimaron los volúmenes anuales de extracción de agua subterránea para el área de Yuma, el Valle de Mexicali y para “irrigación en Sonora Mesa”, para los años 1970-1999. La Figura 31 muestra las tendencias en la extracción dentro del área de Yuma. Para el periodo 1970-1998, Dickinson et al. (2006) reportaron 541 MMC al año de agua subterránea extraída de pozos del “Gobierno” en México y 188 MMC al año de agua subterránea extraída de pozos “Particulares” en México.

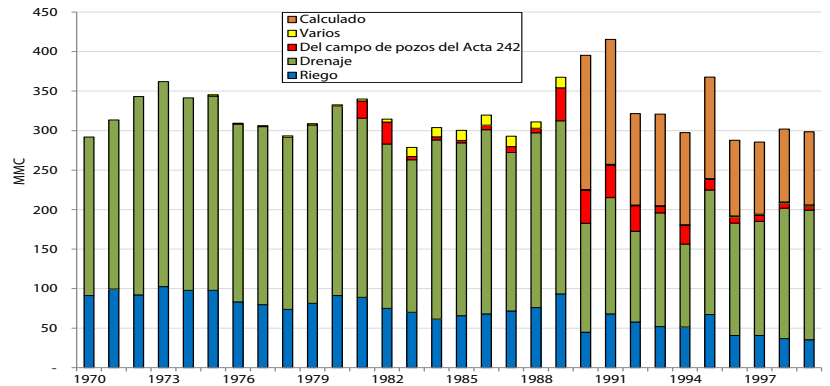


Figura 31. Extracción de agua subterránea en el área de Yuma,<sup>59</sup> 1970-1999. Fuente: Dickinson et al. 2006.

La extracción de agua subterránea para entregas municipales en el área es un factor pequeño, pero que va en aumento. Como presenta la Tabla 2, las poblaciones de las ciudades de San Luis y San Luis Río Colorado (SLRC) están creciendo muy rápidamente. Ambas ciudades extraen agua del subsuelo dentro de la zona de exclusión de ocho kilómetros, por lo que sus volúmenes extraídos también son reportados en otros apartados. Sin embargo, es importante subrayar estos volúmenes, dado el rápido crecimiento de estas ciudades. A diferencia de la agricultura en el área, que está sujeta a la presión de las áreas urbanas para ceder su agua, estas ciudades están fijas en el paisaje. Ambas ciudades extraen agua de pozos ubicados muy cerca del Río Colorado en el LIS, aunque sus pozos típicamente extraen agua de una profundidad

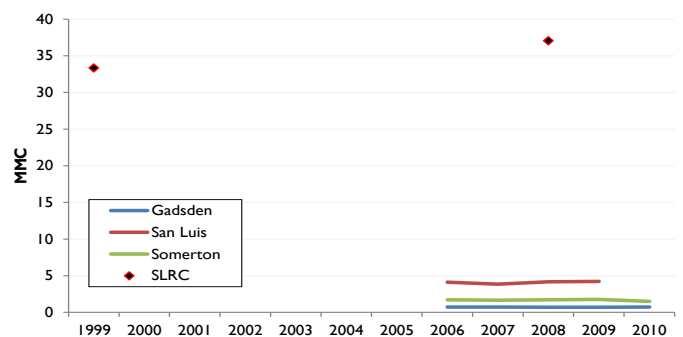


Figura 32. Extracción municipal de agua subterránea cerca del corredor límite.

<sup>59</sup> Dickinson et al. (2006) definen el área de Yuma abarcando muchas de las tierras en Estados Unidos aguas abajo de la Presa Laguna, que son irrigadas con agua del Río Colorado, incluyendo la región *Bard* en el sureste de California, el sur de *Gila Valley*, y *Yuma Mesa* y el Valle de Yuma.

mayor a 60 m. La tasa de entregas per cápita para San Luis es baja (comparada con las tasas en Estados Unidos), alrededor de 450 litros per cápita por día; lo que sugiere que el crecimiento poblacional a futuro probablemente ocasionará un crecimiento casi linear en entregas de agua. En la pagina previa, la Figura 32 muestra el total de agua subterránea extraída por las ciudades en el área inmediata, para las que se cuenta con información.

### Extracción y el nivel freático

La elevación del nivel freático en el pozo 8S-10 1/8W, ubicado aproximadamente 12 km aguas abajo de la Presa Morelos, cayó 0.9 m de octubre de 2006 a abril de 2007, posiblemente como resultado del “Pozo Núm. 6 de West Cocopah”, que estaba en operación en febrero de 2007. Este pozo se señaló como no operativo en octubre de 2009, aunque la fecha real en que el pozo dejó de funcionar no está señalada. Los volúmenes reales de agua extraída por la bomba ya no son reportados.

Los registros para 13 3/4S-10 3/4W, ubicado a 3.9 km al norte del LIS, en el extremo norte de *Hunter’s Hole*, muestran un descenso de 3 m en las elevaciones del nivel freático de diciembre de 2002 a diciembre de 2009 y una caída de aproximadamente 8.2 m de agosto de 1999 a octubre de 2009 (aunque los registros de 1999 fueron obtenidos de una ubicación ligeramente diferente). Los registros de *Reclamation* señalan que una bomba de diesel estaba “Encendida” en abril de 2008, aunque la elevación superficial del agua del subsuelo ya había caído por casi 2 m para entonces. En junio de 2008, los registros señalan que el “pozo de *Hunter’s Hole*” estaba encendido, tal vez esto da cuenta de la caída de 0.6 m en dos meses. El incremento de 0.9 m de junio de 2008 a enero de 2009 no ha sido explicado. En octubre de 2009, cuando la elevación del nivel freático había bajado otros 0.6 m, los registros indican que el “pozo de *Hunter’s Hole*, ENCENDIDO, sifón de *Hunter’s Hole*, Apagado.” Los registros para 13 3/4S-10 3/4W indican que el nivel freático descendió 0.19 m del 4 de septiembre al 26 de octubre de 2009. Según los reportes, la bomba en *Hunter’s Hole* opera a una tasa aproximada de 15 m<sup>3</sup> por minuto (M. Brabec, comunicación personal 2010), o aproximadamente 0.02 MMC por día. Esta bomba estuvo en operación las 24 horas del día del 15 de septiembre al 25 de octubre de 2009 (M. Brabec, comunicación personal 2010), extrayendo aproximadamente 0.9 MMC durante este periodo.

La Figura 33 muestra la ubicación de dos pozos de monitoreo estadounidenses – “16S-11 1/2W” y “15S-11W” – y tres pozos de irrigación, incluyendo el pozo *Earl Hugh(e)s* ubicado en el extremo sur, “(C-11-25) 3DAC/ADW-12/AEW-33.” La figura muestra San Luis, Arizona y aproximadamente los cuatro últimos kilómetros del tramo límite, centrándose en las tierras administradas por el BLM entre el río y el *Bypass Canal* [Dren de Desvío Wellton-Mohawk]. La Figura 34 es una gráfica de las elevaciones reportadas del nivel freático en “16S-11 1/2W” en verde contra los volúmenes de extracción reportados en el pozo *Hughes*, en rojo. Para efectos de comparación, la gráfica también muestra las elevaciones del nivel freático en “15S-11W” en negro, contra los volúmenes de extracción reportados por el cercano pozo *Brown*, en morado. Los valores en el eje-Y

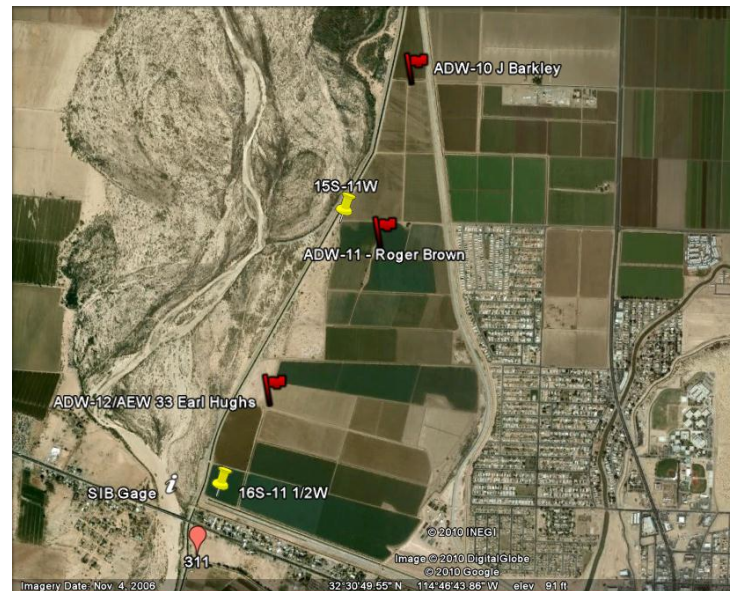


Figura 33. Ubicaciones de pozos de irrigación y de monitoreo cercanos al LIS.

secundario está en orden inverso, para facilitar la comparación con las elevaciones del nivel freático. El rápido declive en el uso del pozo *Hughes* de 1997 a 1998 aparentemente tiene una correlación positiva con el incremento significativo en las elevaciones del agua subterránea en “16S-11 1/2W;” aunque un incremento similar en “15S-11W” no muestra una correlación con el uso en el vecino pozo *Brown*. Una regresión lineal de volúmenes mensuales de extracción en el pozo *Hughes*, comparada con los cambios en las elevaciones mensuales en el pozo de monitoreo 16S-11 1/2W genera un valor de r<sup>2</sup> menor a 0.1; aunque una regresión de volúmenes anuales de extracción comparada con elevaciones en diciembre en los pozos de monitoreo arroja un valor de 0.5 para r<sup>2</sup>. Sin embargo, una comparación similar de volúmenes anuales de extracción en el pozo *Brown* con las elevaciones reportadas en diciembre en el pozo 15S-11W arroja un valor de 0.1 para r<sup>2</sup>. Es decir, parece haber muy poca correlación entre las tasas de extracción local de agua subterránea y las elevaciones del nivel

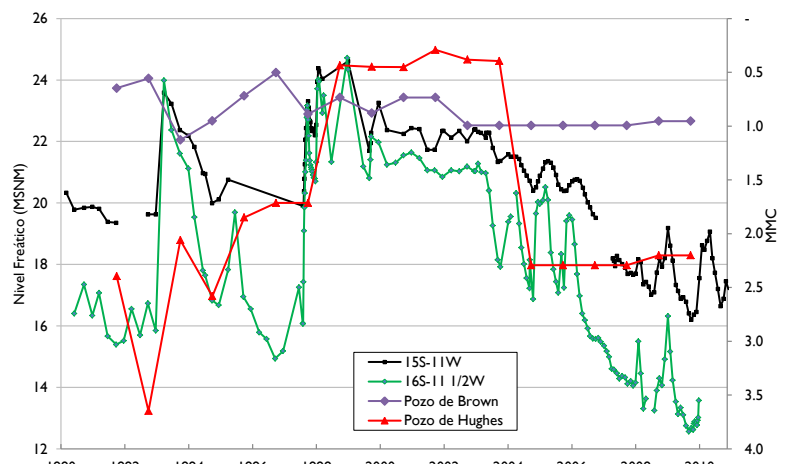
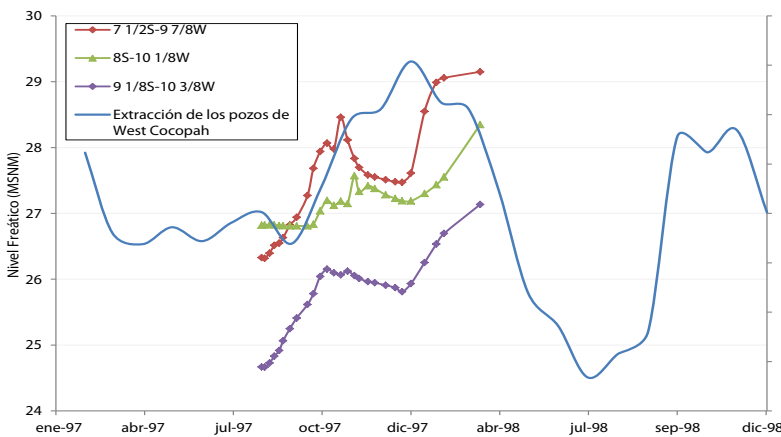


Figura 34. Extracción de agua subterránea y elevaciones del nivel freático cerca del LIS, 1990-2010. Fuente: *Reclamation*. Los valores en el eje-Y secundario están en orden inverso.

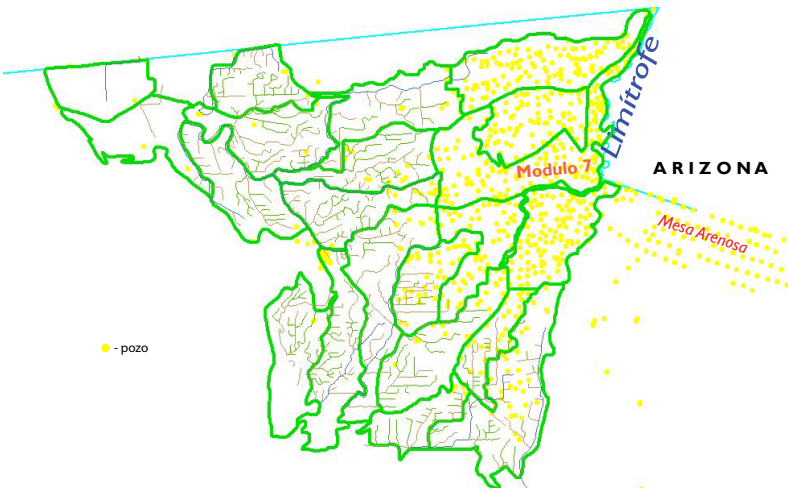


freático, según se reporta en los pozos de monitoreo cercanos. Para los años después de 2002, los volúmenes de extracción en pozos reflejados en la Figura 25 están basados en una tasa fija supuesta de 1.8 o 1.9 metros.

La Figura 35 compara volúmenes de extracción reportados con las elevaciones próximas del nivel freático, utilizando los volúmenes reportados de los pozos de *West Cocopah*. Para facilitar la comparación, los volúmenes de extracción anuales están mostrados en orden inverso. Debido a que los pozos de monitoreo cercanos tienen extensas lagunas en su información, la figura muestra únicamente la extracción reportada de agua subterránea y las elevaciones del nivel freático para 1997-1998. Después de 2003, estos volúmenes de extracción no son reportados. Nótese que las elevaciones del nivel freático para el pozo 8S-10 1/8W, en julio-septiembre de 1997, no reflejan la tendencia ascendente que es evidente en los otros dos pozos. De agosto a octubre de 1997, las elevaciones del nivel freático reportadas muestran una correlación esperada con los volúmenes de extracción reportados, pero el declive en el nivel freático que se refleja pasando octubre, especialmente en el pozo 7 1/2S-9 7/8W, no tiene correlación con las cantidades descendentes de agua extraída en los pozos



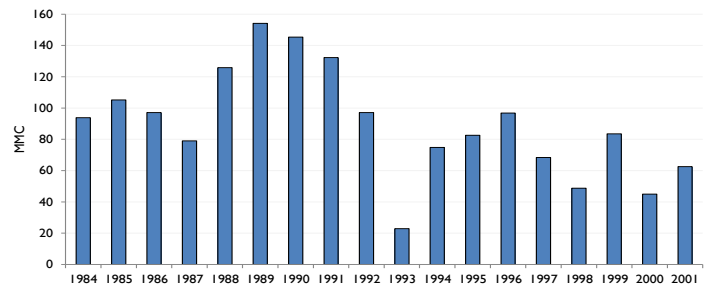
**Figura 35. Extracción de agua subterránea y elevaciones del nivel freático cerca de *West Cocopah*, 1997-1998.**  
Fuente: Reclamation. Los valores en el eje-Y secundario están en orden inverso.



**Figura 36. Distrito de riego 014, con límites de los módulos y pozos.** Fuente: Hinojosa-Huerta.

cercanos. Es decir, el nivel freático continuaba descendiendo aun cuando se estaba extrayendo menos agua de los pozos. Esto sugiere que hay otros factores que ejercen una mayor influencia sobre la elevación del nivel freático.

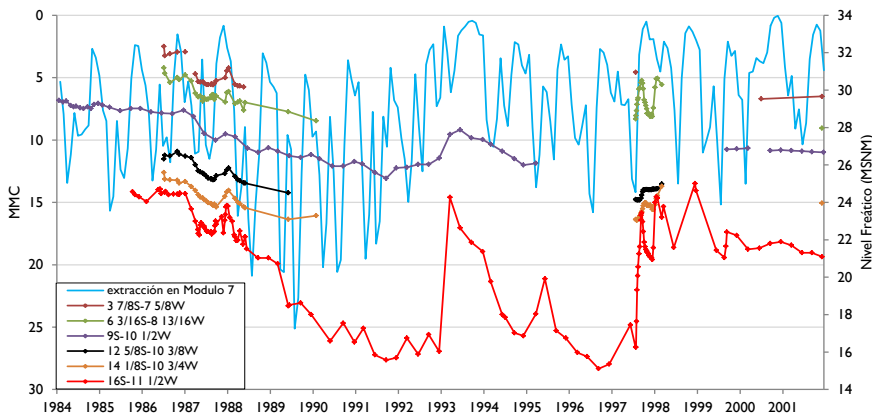
Conagua reporta mensualmente la información sobre la extracción para la mayoría de los pozos en el Distrito de Riego 014. Se obtuvo esta información para los años 1984-2001. La Figura 36 muestra la ubicación de los “módulos” dentro del distrito, así como la ubicación de los pozos registrados. El Módulo 7 colinda con el



**Figura 37. Volúmenes de extracción reportados en el Módulo 7, 1984-2001.** Fuente: Conagua.

Río Colorado, extendiéndose hacia el oeste del tramo límitefre; incluye aproximadamente 13,000 ha de campos de riego. La Figura 37 muestra el total anual de extracción para el Módulo 7, para los años 1984-2001. La extracción anual promedio durante estos años fue de 93.2 MMC. No se sabe por qué la extracción total reportada en 1993 fue menos de la mitad del siguiente volumen más bajo; podría ser que los flujos del Río Colorado en ese año redujeron la necesidad de agua subterránea, aunque no se observó una reducción similar en extracción durante los altos flujos de mediados de los ochentas. La cantidad total de pozos registrados en el Módulo 7 era 113 en 2001; aunque de éstos, únicamente 54 reportaron extracción ese año. Carrillo-Guerrero (2009) reporta un total de extracción para riego de por lo menos 50 MMC en el año hidrológico 2007-08, aunque no se pudo obtener información más específica.

En la pagina siguiente, la figura 38 compara los volúmenes mensuales de extracción en el Módulo 7, al oeste del corredor límitefre, con las elevaciones del nivel freático reportadas en los pozos de monitoreo de *Reclamation* inmediatamente al este del corredor límitefre. Para facilitar la comparación, los volúmenes de extracción se presentan en orden inverso. Aun cuando el agregado de la información de extracción no refleja las diferencias espaciales en la ubicación de los pozos – diferencias que afectan los tiempos y la magnitud de los impactos en la información de los pozos de monitoreo – proporcionan un esquema de la variabilidad mensual de la extracción y de las tendencias generales. Estas tendencias no presentan una buena correlación con las fluctuaciones en el nivel freático: un análisis de regresión indica que la magnitud de la extracción mensual en el Módulo 7 da cuenta de sólo 31 por ciento de la varianza en las elevaciones del nivel freático reportadas en el pozo 16S-11 1/2W.



**Figura 38. Volúmenes mensuales de extracción reportados en el Módulo 7 y elevaciones del nivel freático reportadas, 1984-2001.** Los valores en el eje-Y primario se presentan en orden inverso. Fuentes: Conagua, Reclamation.

**Vegetación**

La vegetación riparia establecida típicamente extrae agua del acuífero aluvial, agotando el agua subterránea (Glenn et al. 2008). La información sobre volúmenes de agua extraída por la vegetación en el área de estudio y la superficie total cubierta por dicha vegetación, proviene de varias fuentes. La Tabla 6 presenta diferentes estimados de vegetación y cobertura de suelo en el tramo límite, proporcionados por *Natural Channel Design* (2006), BLM (2007) y Nagler (2008). Nótese que únicamente Nagler et al. (2008) explícitamente reportan las superficies de extensiones de vegetación para el tramo límite en su totalidad; los otros levantamientos se limitan al lado estadounidense del río. Sin embargo, las superficies reportadas por los diferentes estudios son muy similares para las diferentes clases de vegetación, sugiriendo que sus levantamientos fueron más amplios de lo reportado, que hay cambios marcados que ocurrieron al paso del tiempo o que diferentes métodos para hacer los levantamientos generaron resultados muy diferentes. Nótese que nuestro análisis SIG indica que el total de superficie en el área de estudio – de

**Tabla 6. Comunidades de vegetación en el tramo límite (en ha).**

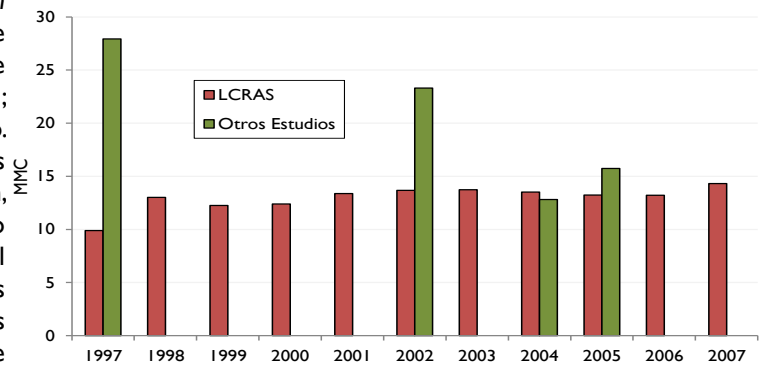
Comunidad	1986	1997	2002	2004*	2005†
Pino salado	645	2,065	1,925	1,034	1,212
Alamo-Sauce	516	411	151	107	185
<b>Vegetación Riparia (total)</b>	<b>1,161</b>	<b>2,476</b>	<b>2,076</b>	<b>2,822**</b>	<b>1,397</b>
Mezquite	-	40	2	25	26
Humedales			12	22	20
Suelo			1,447		
Agua abierta			99	26	
<b>Total</b>	<b>1,161</b>	<b>2,517</b>	<b>3,635</b>	<b>2,895</b>	<b>1,444</b>

Fuentes: *Natural Channel Design* (2006), †*Reclamation* (2007), \*BLM (2008), Nagler et al. (2008). \*\*Según BLM, ésta es la superficie total de vegetación riparia en el tramo límite, aunque el levantamiento reportó únicamente las superficies de comunidades para la porción estadounidense del tramo límite.

la Presa Morelos hasta el LIS, entre los diques – es aproximadamente 6,500 ha, de las cuales unas 4,000 ha estaban destinadas a la agricultura en 2010, sugiriendo que la información de los levantamientos de 2002 y 2004 que muestra la Tabla 6 podría haber sobre estimado la extensión de las comunidades de vegetación en el área de estudio, o podrían haber contado parte de las tierras agrícolas como “suelo descubierto”.

Los reportes LCRAS anuales de *Reclamation* proporcionan superficies y ET para tierras en el lado estadounidense del tramo límite, divididas en “*West Cocopah*” y “*State of Arizona-Limitrophe*.” LCRAS (2005) reportó un total de 5.5 ha de hábitat de álamo-sauce en las tierras de *West Cocopah* y cero acres en las tierras de *State of Arizona-Limitrophe* en 2005, más de un orden de magnitud menor que la información presentada en la Tabla 6 del levantamiento de 2005 por parte de *Reclamation* (2007). LCRAS reportó la extensión total de pino salado en 2005, incluyendo pino salado en baja densidad y en comunidades mixtas, en 530 ha, menos de la mitad reportada por la información del levantamiento de 2005 por parte de *Reclamation* (2007).

La Figura 39 compara la ET riparia total para “*West Cocopah*” y “*State of Arizona - Limitrophe*” (LCRAS anual) con la ET calculada



**Figura 39. ET de la vegetación riparia en la porción estadounidense del corredor límite, 1997-2007.**

para pino salado, álamos y sauces de las extensiones de vegetación incluidas en la Tabla 6. Supuestamente, la vegetación riparia toma casi toda su agua del acuífero aluvial. La ET riparia anual promedio reportada para el periodo 1997-2007, sólo para el lado estadounidense del corredor límite, fue de 13 MMC (LCRAS anual); los volúmenes calculados a partir de la información del levantamiento que aparece en la Tabla 6 no fueron coherentes. El “*State of Arizona – Limitrophe*” incluye aproximadamente 450 ha de tierras, en su mayoría al sur de Gadsden, y representa aproximadamente 40 por ciento de la ET riparia reportada en todos los años a excepción de 1997, cuando la ET reportada fue menos de la mitad de la reportada para todos los demás años (LCRAS anual).

El descenso de los niveles freáticos afecta directamente las tasas de extracción vegetativa. Como se señaló en el Capítulo I, el descenso en los niveles freáticos puede estresar y a la larga matar la vegetación riparia. Los bajos niveles freáticos probablemente explican la poca abundancia de álamos y sauces cerca de la parte inferior del tramo límite, y pudiera explicar el declive observado en tasas de ET en *Hunter's Hole*, de 2004 a 2008.

### Campo de pozos del Acta 242

El Acta Núm. 242, un acuerdo entre la sección mexicana y la estadounidense de la IBWC, con fecha del 30 de agosto, 1973, incluye lo siguiente:

Mientras se llega a la celebración por los Gobiernos de México y los Estados Unidos de un convenio de alcance general sobre aguas subterráneas en las áreas fronterizas, cada país limitará el bombeo de las aguas subterráneas en su propio territorio, dentro de los 8 kilómetros (5 millas) de la línea divisoria entre Sonora y Arizona y cerca de San Luis, a 197 358 000 metros cúbicos (160 000 acres-pies) anuales.

Las operaciones al amparo del acta se iniciaron en junio de 1974, tras la entrada en vigor del Acta de Control de la Salinidad de la Cuenca del Río Colorado. A la fecha, Estados Unidos ha construido 21 de los 35 pozos planeados dentro de su *Protective and Regulatory Pumping Unit (PRPU)*, también conocida como el campo de pozos del Acta 242. Estados Unidos mezcla su agua del subsuelo del PRPU con agua de drenaje del *East Main Canal Wasteway* [Canal de Desagüe Principal Este], como parte de las entregas totales de agua a México en la frontera terrestre cerca de San Luis. De acuerdo al Acta 242, México extrae agua del subsuelo de su campo de pozos de la Mesa Arenosa, para suplementar las entregas de agua superficial y para

mezclar con las entregas de agua del Río Colorado por parte de Estados Unidos en la frontera terrestre, en el Canal Sánchez Mejorada, aunque la calidad del agua subterránea sea inferior a las de las entregas del río y a la del agua subterránea extraída de tierras al Oeste del corredor límite (Carrillo-Guerrero 2009). Entidades particulares y municipales también operan pozos independientes dentro de esta zona

de exclusión de 8 km, principalmente para usos municipales en las ciudades de San Luis y San Luis Río Colorado. La extracción de agua subterránea de estos pozos independientes se incluye dentro del total reportado anualmente para los datos de extracción de cada país.

La Figura 40 muestra el total extraído dentro de la zona de exclusión, para los años 1975-2010. La extracción por parte de México se redujo a cero durante los años 1998-2000, debido a la disponibilidad de grandes volúmenes de agua de mejor calidad del Río Colorado. El promedio anual de extracción por parte de Estados Unidos en su campo de pozos PRPU, en los años 1996-2002 fue menos de 10% de su promedio anual de extracción en 2007-2009; la extracción no-federal dentro del lado estadounidense de la zona de exclusión se incrementó aproximadamente 35% entre estos dos periodos. Nótese que México se aproximó a su límite anual de 197 MMC en 2007 y de nuevo en 2009. La Figura 40 también muestra la tendencia en aumento de la extracción total dentro de la zona de exclusión de ocho kilómetros. Nótese que el promedio para los años de 1975-2000 fue de 109 MMC, incrementándose a 208 MMC para los años de 2001-2009. Para los años de 2005-2009, la extracción anual reportada para ambos países fue casi 250 MMC, más del doble de la tasa de los primeros 25 años registrados. Nótese que la cantidad total extraída descendió por 33% de 2009 a 2010, probablemente como resultado del sismo de Pascua de 2010, que dañó una gran parte de la infraestructura de riego en México, reduciendo la demanda de agua.

La Figura 41, en la página siguiente, es una gráfica de las elevaciones del nivel freático en los cuatro pozos estadounidenses de monitoreo ubicados en el extremo sur, contra la cantidad total reportada

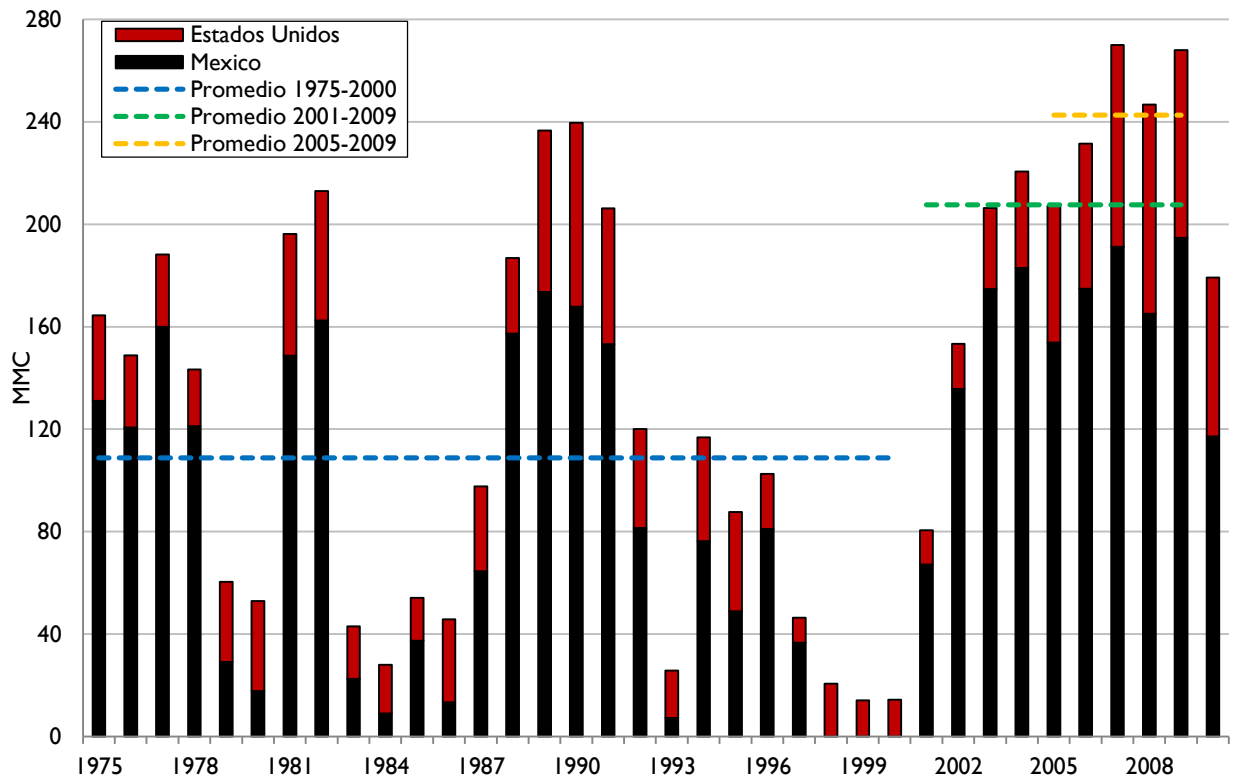
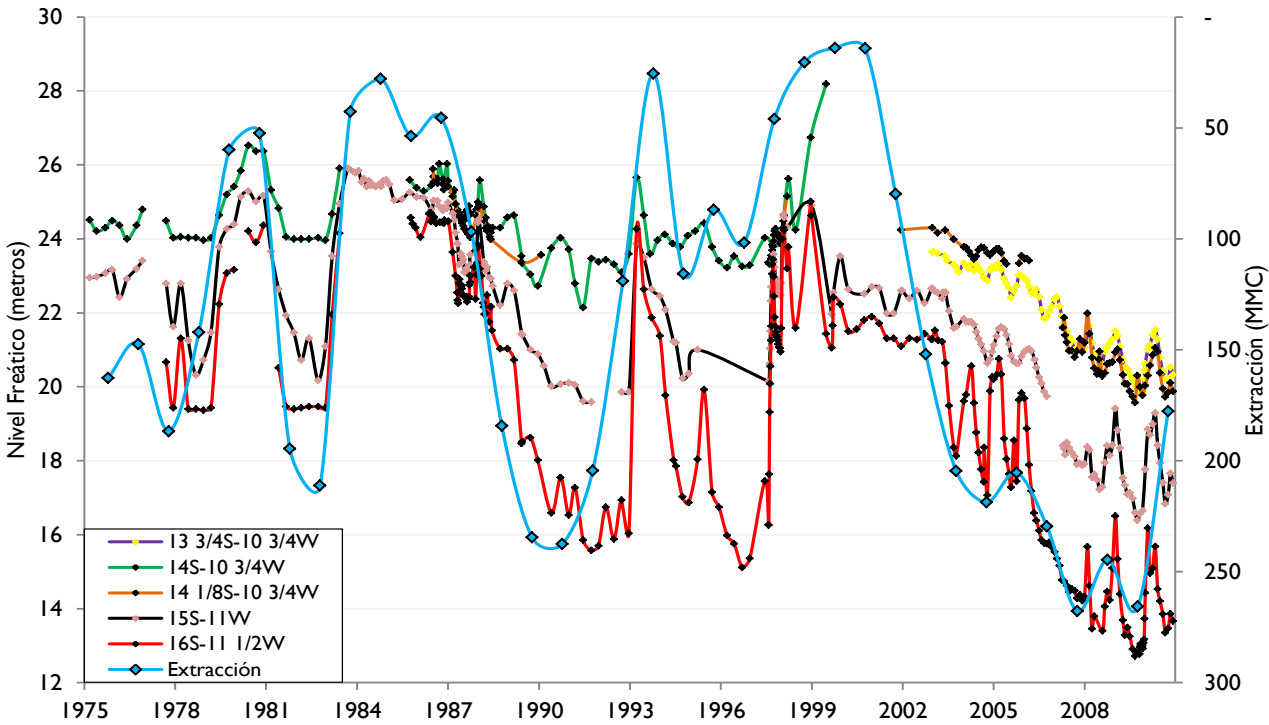


Figura 40. Cantidad total reportada de agua subterránea extraída dentro de los 8 km del LIS, en México y en Estados Unidos, 1975-2010. Fuente: IBWC.



**Figura 41. Elevaciones del nivel freático y extracción total en las zonas de exclusión, 1975-2010.** Nótese que los valores en el Segundo eje-Y están en orden inverso. Fuentes: *Reclamation, IBWC.*

de agua subterránea extraída dentro del margen de 8 km de la frontera, en México y en Estados Unidos.

Nótese que los volúmenes de extracción de agua subterránea, en el eje-Y secundario, están en orden inverso, para facilitar la comparación con las elevaciones de los niveles freáticos. Nótese también que las elevaciones del nivel freático son de fechas específicas, mientras que los volúmenes extraídos son cifras anuales; para facilitar la comparación con las condiciones cambiantes del agua subterránea, estos valores anuales han sido arbitrariamente graficados a fines de septiembre de cada año. Los volúmenes de extracción se correlacionan bien con la profundidad cambiante al agua subterránea en los pozos en la parte sur del corredor límite, sugiriendo que la extracción a gran escala en la zona de exclusión desvía el agua subterránea que de otra manera fluiría hacia el tramo límite. El cambio en elevaciones del nivel freático de 2004-2009 (ver Figura 3) se correlaciona con el reciente periodo de aumento en la extracción, dando explicación a la zona de bajas elevaciones del nivel freático en torno al campo de pozos del Acta 242, al Este de San Luis. Sin embargo, como se menciona en el capítulo V, estos descensos en el nivel freático también se correlacionan bien con la reducción significativa de los flujos del Río Colorado a través del tramo límite, lo que complica la interpretación de estos resultados. Aun cuando esta extracción no explica directamente el cono de depresión centrado en el LIS, sugiere que los flujos de agua subterránea derivados pueden exacerbar otros factores que afectan la tercera parte inferior del corredor límite, como se describe en el Capítulo V.

## Capítulo V – Flujos superficiales

La Cuenca del Río Colorado cubre cerca de 632,000 km<sup>2</sup>, aproximadamente 99% dentro de Estados Unidos y el 1% restante en el noroeste de México. La cuenca del Río Colorado se caracteriza por una tremenda disparidad en la distribución espacial y temporal del agua. Más del 80% de la escorrentía en la cuenca se origina de menos del 20% de la cuenca, generalmente en las Montañas Rocosas a alturas que sobrepasan los 2500 metros (Hoerling et al. 2009). El Colorado es alimentado mayormente por el deshielo: un 70% del flujo anual pre-embalse del río ocurría de mayo a julio (Harding et al. 1995). Buena parte de la cuenca, especialmente en la región fronteriza, es extremadamente árida, con menos de 8 cm de precipitación pluvial al año. El mismo río recorre más de 2,300 km desde su origen hasta su desembocadura en el Golfo de California; aunque en años recientes, el Río Colorado rara vez ha tenido suficiente agua para fluir ininterrumpido hasta el LIS. Durante esas ocasiones poco frecuentes en que hay agua pasando por el LIS, el río a veces recorre otros 121 km a su desembocadura en el Golfo de California.

A partir de la terminación de la Presa de Glen Canyon en 1963, el flujo anual del río, medido en el LIN, ha excedido los 2.0 km<sup>3</sup> (2,000 MMC)<sup>60</sup> en menos de la tercera parte de las ocasiones. El flujo anual promedio registrado en el LIN para el periodo 1950-2010 fue de 3,770 MMC; mientras que la media para el periodo fue de 1,900 MMC, reflejando los flujos elevados anteriores a la terminación de la Presa de Glen Canyon y el periodo de flujos altos en 1983-1988. En el LIS, aproximadamente 35 km aguas abajo del LIN, el flujo anual promedio registrado de 2001-2010 fue de 33 MMC; en 2006, 2007 y de nuevo en 2009, no hubo descarga medible registrada en el LIS.<sup>61</sup>

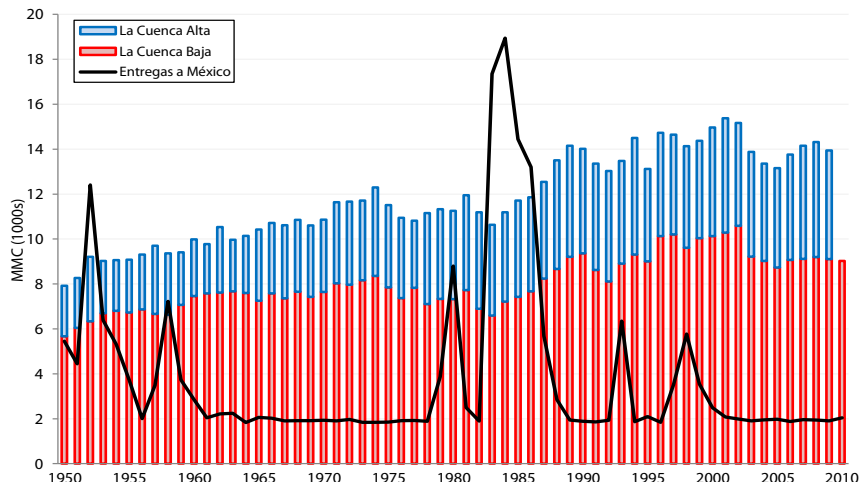
La Ley del Río<sup>62</sup> gobierna las asignaciones, los flujos y el uso del agua, controlando y monitoreando el río de una forma más estricta quizá que cualquier otro río en el mundo (Getches 1985). Por tratado<sup>63</sup>, Estados Unidos entrega anualmente un mínimo de 1,850 MMC de agua a México, dentro de un margen prescrito de salinidad. De este volumen, hasta 180 MMC pueden ser entregados en la frontera terrestre, cerca de San Luis. A la fecha, Estados Unidos nunca ha dejado de entregar por lo menos 1,850 MMC de agua del Río Colorado a México. Dentro de Estados Unidos, la Ley del

<sup>60</sup> Un kilómetro cúbico (km<sup>3</sup>), la unidad de medida convencional para dichos volúmenes de agua, es igual a 1,000 MMC, la unidad de medida convencional en la que dichos volúmenes se expresan típicamente, para los flujos del Río Colorado dentro de México.

<sup>61</sup> Ver la discusión sobre la precisión del medidor del LIS.

<sup>62</sup> La “Ley del Río” se refiere al conjunto cambiante de leyes, tratados, decretos, reglamentos, contratos y otras decisiones legales que determinan y guían el manejo y la asignación del agua del Río Colorado. Ver D. Getches, 1985, *Competing demands for the Colorado River*, University of Colorado Law Review 56: 413-479, y U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2010, *Colorado River Documents 2008*, Denver: U.S. Government Printing Office.

<sup>63</sup> Tratado entre México y Estados Unidos relativo al aprovechamiento de las aguas de los ríos Colorado y Tijuana, y del Río Bravo (Grande) (1944).



**Figura 42. Uso consuntivo anual del Río Colorado (E.E.U.U.) y entregas a México, 1950-2010.** Fuente: Reclamation. (El uso consuntivo de la cuenca superior es provisional de 2006 a 2009.)

Río generalmente otorga el derecho a aproximadamente 18,500 MMC/año de agua del Río Colorado, divididos entre la cuenca alta (integrada por los estados de Colorado, Nuevo México, Utah y Wyoming) y la cuenca baja (integrada por los estados de Arizona, California y Nevada).

Diez grandes presas en el caudal principal y más de 80 puntos de derivación a lo largo del río controlan y derivan el agua del Río Colorado. Estados Unidos tiene la suficiente capacidad de almacenamiento para retener la cantidad correspondiente a cuatro años de flujo del Río Colorado. Sin embargo, México carece de capacidad de almacenamiento para el agua del Río Colorado, dependiendo en cambio del agua del subsuelo, recargada principalmente por flujos de inundación del Río Colorado y la infiltración del agua de riego, para suplementar las entregas de agua superficial. Los agricultores a lo largo de la cuenca derivan un estimado de 70-80% del agua del río para el riego de unos 12,000 km<sup>2</sup>.

Como se muestra en la Figura 42, el uso consuntivo<sup>64</sup> del agua del Río Colorado dentro de Estados Unidos ha crecido paulatinamente de 7,900 MMC en 1950 a un máximo de 15,400 MMC en 2001, pero esta cifra descendió hasta aproximadamente 13,400 por año de 2003-2007, y luego se incrementó de nuevo a aproximadamente 15,000 MMC en 2008. Varios factores han contribuido al reciente declive, particularmente un descenso en el consumo por parte de California, desde un máximo de más de 6,600 MMC en 2002 hasta aproximadamente 5,300 MMC en los años siguientes. Otros factores incluyen la sequía de varios años que ha restringido las derivaciones no reguladas en la cuenca superior, y la baja en la economía, que ha reducido el consumo municipal, especialmente en el Estado de Nevada.

<sup>64</sup> Según se define en la *Supreme Court's Consolidated Decree of 2006* [Decreto consolidado de la Suprema Corte, de 2006] “uso consuntivo” significa “derivaciones del caudal menos el flujo de retorno correspondiente según sean disponibles para uso consuntivo en Estados Unidos o para satisfacer las obligaciones del Tratado con México.”

Aunque los registros de las entregas totales del Río Colorado hacia México están fácilmente accesibles, no es así con los registros del consumo a largo plazo en México. En 1995, los irrigadores mexicanos utilizaron 1,850 MMC de agua del Río Colorado, una cantidad aproximadamente equivalente a la entrega total de este año. En 1999, utilizaron 1,680 MMC, menos de la mitad de la entrega de ese año. El consumo municipal total en la porción mexicana de la cuenca, en su mayor parte obtenido por extracción de agua subterránea, es menor a los 500 MMC anuales (Cohen y Henges-Jeck 2001). En vista de que México carece de capacidad de almacenamiento para el agua del Río Colorado, las entregas que exceden la demanda directa para riego y los limitados volúmenes que se utilizan para recarga del manto freático (70 MMC por año), fluyen por el cauce hacia el Golfo de California, como lo evidencian los registros de la estación de medición en el LIS. Desde la terminación de la Presa Morelos en 1950, la diferencia en los flujos anuales promedio registrados en el LIN y en el LIS promedio 2,000 MMC, con una media de 1,800 MMC. Desafortunadamente, no existe actualmente una estación de medición que opere aguas abajo del LIS, para medir el volumen de agua del Río Colorado que fluye al Golfo de California (Cohen et al. 2001). A pesar de estos flujos muy escasos y de reportes de fines de los setentas (Fradkin 1981) y de años recientes (Waterman 2010) sobre la sequedad del Río Colorado, los reportes anecdóticos indican que el río fluye periódicamente sin interrupción hasta el golfo (Hinojosa-Huerta, comunicación personal, 2010).

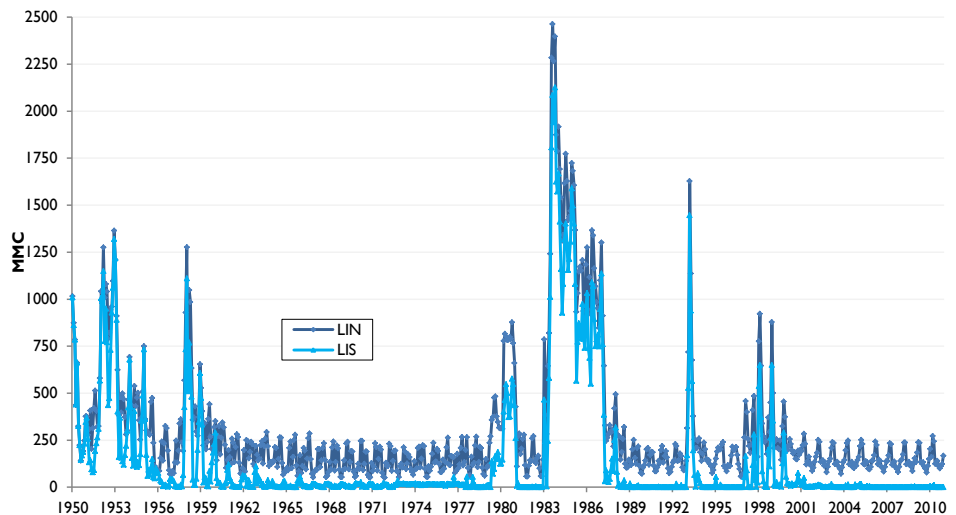
El año hidrológico 2011 (iniciado en octubre 2010) tuvo nevadas más densas de lo común en la parte norte de la cuenca del Río Colorado y una precipitación pluvial arriba del promedio en primavera y verano, a lo largo de buena parte de la cuenca alta. Según información proporcionada por *Reclamation*, los flujos no regulados observados entre abril – julio 2011 que ingresaron a Lake Powell fueron de 15,760 MMC o 162% del promedio. La escorrentía total en el año hidrológico 2011 fue de 139 por ciento del promedio, frenando – al menos temporalmente – la década de sequía que disminuyó la escorrentía de 2000 a 2009. En ese periodo de diez años, los flujos naturales anuales excedieron el promedio de los últimos cien años en sólo en dos ocasiones. Los flujos anuales de 2000-2009 fueron aproximadamente 75 por ciento del promedio histórico, pero no generaron reducciones en las entregas a la cuenca baja o a los usuarios mexicanos. En lugar de reducir las entregas a los usuarios, el déficit fue absorbido por los embalses, ocasionando que la reserva total del sistema se redujera por aproximadamente 28,000 MMC – alrededor de 150 por ciento del flujo anual del río.

Gracias a la muy elevada escorrentía del año hidrológico 2011, la elevación superficial de Lake Mead ascendió a más de 11 m sobre las elevaciones de 2010. Pero un año húmedo no contrarresta el desbalance que existe a largo plazo entre el abastecimiento y la demanda de agua del Río Colorado. Las demandas totales en el Río Colorado ya exceden el abastecimiento: los usuarios del Río

Colorado enfrentan ahora un déficit estructural. A la fecha, los usuarios del agua en la cuenca han superado este desbalance en el abastecimiento recurriendo a la reserva, pero este no es un manejo sustentable a largo plazo. El rápido crecimiento poblacional en la región y la probabilidad de que el cambio climático reduzca el abastecimiento<sup>65</sup> no pueden sino exacerbar este desbalance en los años venideros.

## El cauce principal y los canales de desagüe

La Figura 43 muestra el flujo mensual reportado del Río Colorado en el LIN y en el LIS, de 1950 a 2010. Nótese que la precisión en el LIS ha sido caracterizada como muy precaria (Hill 1993); desde 2005, el medidor ha sido temporal, instalado únicamente cuando el personal de la IBWC anticipa flujos. En la Figura 43, nótese los flujos pico periódicos en los años cincuenta, los años ochenta, 1993 y al inicio del siglo. De 1963 a 1980, el agua del Río Colorado que excedía la requerida para cubrir las entregas en Estados Unidos y las del tratado, fue utilizada por *Reclamation* para llenar el Lago Powell, lo cual explica la ausencia de flujos pico en el LIN y en el LIS durante este periodo extenso. En la escala de esta figura, los flujos mensuales reportados en el LIS en la década de los sesentas y la de los setentas aparentemente son similares a los flujos reportados en el LIS en la década del 2000. Sin embargo, como muestra la Tabla 7, los valores reales reportados en estos dos periodos difieren dramáticamente entre sí. En los sesentas, sólo el cinco por ciento de los meses registraron ausencia de flujos (“Q=0”) en el LIS; en la década



**Figura 43. Flujos mensuales del Río Colorado en el LIN y en el LIS, 1950 a 2010.** Fuentes: USGS, IBWC.

<sup>65</sup> Consulte, por ejemplo Christensen, N.S., y D.P. Lettenmaier, 2007. *A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin*, *Hydrology and Earth Systems Sciences* 11: 1417-1434; Barnett, T.P., y T.W. Pierce, 2009, *Sustainable water deliveries from the Colorado River in a changing climate*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0812762106](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0812762106); y *Reclamation*, 2011, *SECURE Water Act Section 9503(c) – Reclamation Climate Change and Water, Report to Congress*. Disponibles en <http://www.usbr.gov/climate/SECURE/docs/SECUREWaterReport.pdf>.

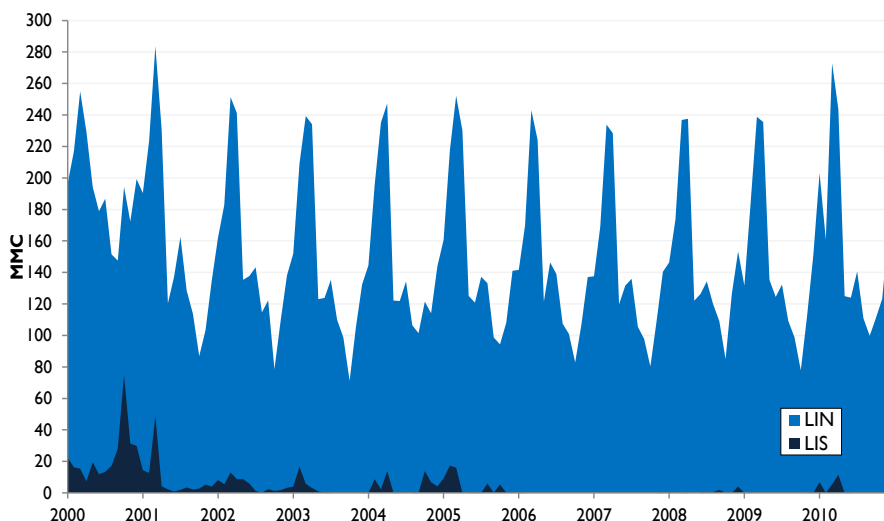
**Tabla 7. Flujos mensuales en el LIS, por décadas.**

MMC	promedio	mediano	máximo	mínimo	Q=0 (número de meses)
1950s	300	170	1,300	2.0	-
1960s	18	7.9	290	-	6
1970s	21	15	190	-	10
1980s	500	260	2,100	-	24
1990s	75	-	1,400	-	61
2000s	4.9	0.0	75	-	60

Fuente: IBWC.

del 2000, la mitad de los meses presentaron la ausencia de flujos en el LIS. Nótese también la diferencia significativa en la media de los flujos entre los sesentas – setentas y la década del 2000; dicha información ilustra claramente la tendencia descendiente de los flujos a través del tramo límite. En la década de los noventas, hubo más meses sin flujos registrados en el LIS que los que se presentaron en la década del 2000, pero la gran inundación de 1993 y los altos flujos de 1997 y 1998 significaron que mucha más agua fluyó en total por el LIS en los noventas. Desafortunadamente, existen grandes lagunas en la información en los registros de los pozos de monitoreo en los noventas, impidiendo las comparaciones significativas entre las dos décadas.

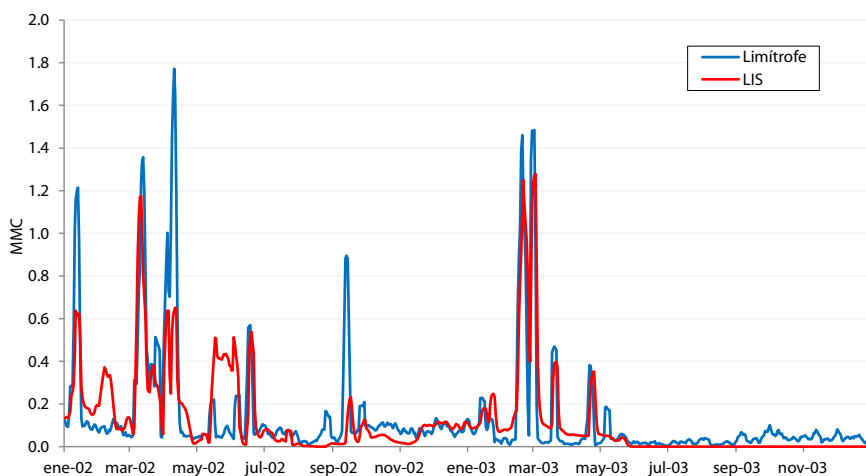
La Figura 44 muestra los flujos mensuales del tramo límite del Río Colorado con una escala más fina, enfocándose en el periodo entre enero de 2000 y diciembre de 2010. Nótese que la escala vertical es aproximadamente una décima parte de la de la Figura 43. Ambas gráficas muestran la marcada variabilidad estacional en las entregas en el LIN, con las entregas típicamente llegando a un pico en marzo de cada año, con un volumen de más del doble que el de las entregas de septiembre-octubre.



**Figura 44. Flujo mensual del Río Colorado en el LIN y en el LIS, enero de 2000 a diciembre de 2010.** Fuentes: USGS, IBWC.

La Figura 44 también muestra que el flujo reportado en el LIS en la primera mitad de la década del 2000 fue mayor que en la segunda mitad. Entre noviembre 2005 y diciembre 2009, el flujo mensual reportado en el LIS sobrepasó 0.1 MMC en sólo cuatro ocasiones. Según los reportes, de noviembre, 2005 a diciembre, 2009, un total combinado de 6.89 MMC fluyeron por el LIS.

La descarga reportada en el LIS con frecuencia se toma como una aproximación de los flujos en el remanente del delta del Río Colorado. Sin embargo, puede haber flujos de agua en la porción superior del tramo límite sin que lleguen al LIS. Por ejemplo, varios años han registrado cero flujos en el LIS, pero los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos y los flujos reportados en los canales de desagüe Milla-11 y Milla-21, han sido mucho mayores a cero en esos años. La Figura 45 es una gráfica de flujos calculados en el tramo límite aguas abajo de la Presa Morelos contrastados con flujos en el LIS para los años 2002-2003. Los valores para cada uno están graficados como un promedio móvil de 5-días, para suavizar la variabilidad abrupta de algunos de los



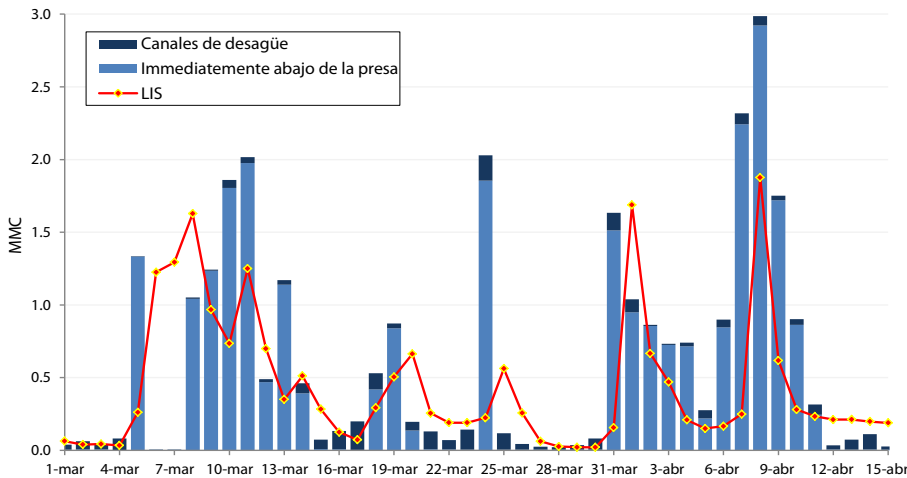
**Figura 45. Promedio móvil de 5-días del flujo calculado aguas abajo de la Presa Morelos y flujos reportados en el LIS, 2002-2003.** Fuente: IBWC.

valores diarios. Nótese que los flujos reportados en el LIS excedieron el flujo calculado para el tramo límite varias veces a lo largo de estos años, tales como en la segunda mitad de mayo de 2002. No está claro si este rezago tras los flujos pico calculados para el tramo límite a mediados de abril, refleja un pulso de flujos que se mueven lentamente bajo la superficie o simplemente refleja errores en los reportes. La relación entre tasas de descargas, las condiciones de saturación de suelos y el tiempo de desplazamiento entre la Presa Morelos y el LIS, son temas que ameritan una investigación más a fondo.

Nótese que no hubo flujos registrados en el LIS del 27 de mayo al 31 de diciembre de 2003, aun cuando el flujo diario calculado aguas abajo de la Presa Morelos promedió 0.03 MMC en el mismo periodo. De estos flujos calculados, 99.3 por ciento proceden de los canales de desagüe Milla-11 y Milla-21. Aparte

de las pérdidas limitadas por ET, este flujo aguas abajo de la Presa Morelos y de los canales de desagüe aparentemente se infiltró en el cauce y recargó el manto freático local. El volumen total de estos flujos calculados y reportados aguas abajo de la Presa Morelos del 27 de mayo al 31 de diciembre de 2003, cuando no hubo flujo reportado en el LIS, fue de aproximadamente 6.8 MMC.

La Figura 46 ilustra la relación entre los flujos en el tramo límite y los flujos en el LIS, representados en la Figura 45, durante el periodo del 1° de marzo al 15 de abril de 2002. A diferencia de los promedios móviles mostrados en la Figura 45, la Figura 46 presenta



**Figura 46. Flujos diarios aguas abajo de la Presa Morelos y en el LIS, 1° de marzo – 15 de abril, 2002.** Fuente: IBWC.

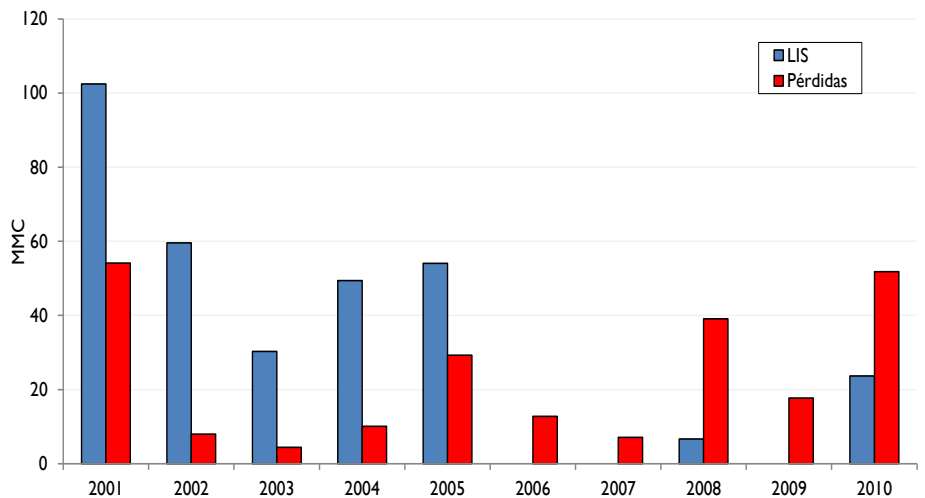
los flujos diarios reportados para los canales de desagüe Milla-11 y Milla-21 (combinados como “canales de desagüe” en la figura) y los flujos calculados inmediatamente pasando la Presa Morelos. Esta observación más detallada revela varios errores. El 5 de marzo de 2002 los flujos totales calculados en el tramo límite<sup>66</sup> fueron 1.4 MMC; los flujos totales calculados para el 5-7 de marzo fueron 0.014 MMC más altos. Sin embargo, los valores correspondientes para el flujo reportado en el LIS fueron 0.26 y 2.8 MMC. Es decir, según los reportes, más del doble de agua fluyó por el LIS que la que fluyó aguas abajo de la Presa Morelos durante el periodo de estos tres días. El pequeño evento de flujo del 17-22 de marzo, con flujos totales calculados para el tramo límite de 2.0 MMC, aparentemente provocaron que aproximadamente 2.0 MMC fluyeran por el LIS durante ese periodo. Sin embargo, durante el periodo del 23-28 de marzo, los flujos calculados de 2.4 MMC para el tramo límite generaron sólo 1.4 MMC en el LIS.

Hay varias explicaciones posibles para la diferencia reportada en los flujos del LIS que siguieron a los flujos del tramo límite del 17-22 de marzo y del 23-28 de marzo. Aunque se esperaba que

<sup>66</sup> El volumen total calculado del flujo inmediatamente pasando la Presa Morelos, mas la suma del flujo reportado de los dos canales de desagüe.

este último periodo presentara flujos mayores en el LIS, ya que el canal ya estaría mojado, reduciendo la infiltración, el alto flujo del 24 de marzo en el tramo límite pudiera haber incrementado el nivel del río, posiblemente llenando remansos o desviando el flujo del cauce principal a canales secundarios que no recibían agua con un nivel del río más bajo. O pudiera haber habido errores en los flujos calculados y/o reportados.

La Figura 47 compara el flujo reportado en el LIS con la diferencia entre los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos<sup>67</sup> y el flujo en el LIS, para el periodo de enero de 2001 – diciembre de 2010. En los años de altos flujos de 1998-2000, esta diferencia fue un valor negativo – el flujo reportado en el LIS era mayor que los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos. Varios factores pudieran explicar este valor negativo: errores en la información, descargas de aguas almacenadas en las márgenes, y el periodo en que la información fue reportada.<sup>68</sup> La explicación más simple para este inesperado valor negativo es que los valores registrados en uno o más de los medidores contenían errores. Históricamente, el medidor en el LIS ha tenido un error reportado de más de 15%, significativamente más grande que la diferencia de 3.5 por ciento en los flujos calculados y medidos en el LIS en 1999. Sin embargo, en 2000, esta diferencia se elevó a 39 por ciento, por lo que es probable que la culpa no radique en un error en el medidor. Una posible explicación es que el flujo adicional en el LIS provino del retorno de aguas almacenadas en las márgenes. En diciembre de 1998, la profundidad al agua subterránea en el



**Figura 47. Flujo en el LIS y pérdidas al canal aguas abajo de la Presa Morelos, 2001 –2010.** Fuente: IBWC.

<sup>67</sup> Ver el Capítulo II para una descripción del método utilizado para calcular estos flujos.

<sup>68</sup> Dependiendo de la magnitud de los flujos, el agua descargada de la Presa Morelos puede tomar desde varias horas hasta varios días para viajar aguas abajo hasta el medidor del LIS. Aunque descargas de gran magnitud pueden ser registradas aguas abajo el mismo día, flujos bajos, constantes pudieran no llegar al LIS sino hasta dos o tres días después; lo cual pudiera ocasionar que los flujos pasando la Presa Morelos se registren en meses diferentes, o incluso en años diferentes que los flujos registrados en el LIS.

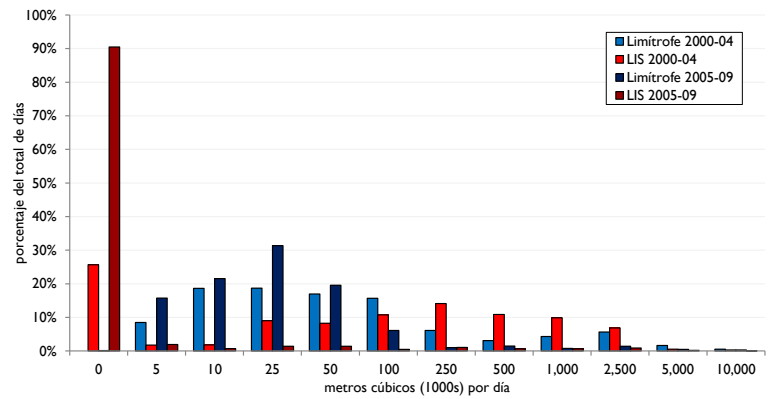


pozo de monitoreo 16S-11 1/2W, cerca del LIS, se elevó a 0.43 m de la superficie bajo el pozo en sí. Al extrapolar la elevación del nivel freático con base en el análisis SIG de las condiciones del terreno en 2007 y las elevaciones del cauce del río en 1999, hay indicios de que el nivel freático pudiera haber estado 3 m sobre el fondo del cauce del río en el LIS en diciembre de 1998, lo que explicaría los altos flujos base calculados en esa ocasión.

En la Figura 47, nótese que la diferencia total entre los flujos límite calculados y los flujos reportados en el LIS fue mayor en 2006 (12.9 MMC) que en 2003 (4.4 MMC), a pesar de que el volumen total de los flujos límite fue mucho mayor en 2003 (35 MMC) que en 2006 (12 MMC). Esta discrepancia ilustra la importancia de la velocidad de descarga. Como aparece en la Figura 45, la mayoría de los flujos totales de 2003 ocurrieron en dos grandes flujos pico y dos flujos pico más pequeños; la máxima descarga calculada de la Presa Morelos fue más de 44 m<sup>3</sup>/s el 27 de febrero de 2003, sugiriendo que los flujos pulso mayores pudieran moverse demasiado rápido para ser absorbidos por el cauce. Nótese también que antes de 2006, el volumen de flujos “perdidos” aguas abajo de la Presa Morelos fue siempre menor que el volumen de flujos registrados en el LIS. En lo que podría ser sólo una coincidencia, este periodo coincide con el tiempo en que el medidor del LIS era un instrumento fijo; después de 2005, la IBWC ha instalado el medidor del LIS de manera temporal. La inconsistencia de los flujos reportados en el LIS en relación a los flujos calculados en el tramo límite sugiere que el medidor pudiera no haber estado instalado en todas las ocasiones en que hubo flujos en el canal, dando origen a la discrepancia mostrada en la Figura 47.

El Anexo B describe una comparación preliminar de velocidades de descarga diaria aguas abajo de la Presa Morelos y en el LIS. La relación entre la descarga y la infiltración en el cauce en el tramo límite, es importante para entender las entregas de flujos ambientales y las interacciones entre el agua superficial y el agua subterránea, por lo que amerita un estudio más detallado. Dicha evaluación deberá incluir también un levantamiento actualizado del cauce.

La figura 48 muestra la frecuencia, considerada como un porcentaje del total de días, con la que una determinada descarga diaria ocurrió en los años de 2000-2004, y en los años de 2005-2009. Por ejemplo, para “5”, la barra representa el porcentaje del número total de días en que el flujo registrado fue mayor a cero pero menos de cinco. Nótese que los valores del tramo límite son datos derivados, más que datos reportados del medidor; y aún más, que dichos valores han sido ajustados para eliminar valores negativos, los cuales se dan en más del cinco por ciento de las velocidades de descarga calculadas aguas abajo de la Presa Morelos, a medida que las derivaciones reportadas en la presa excedieron la combinación de los flujos registrados en el LIS y los del canal de desagüe Cooper. Nótese la diferencia significativa de los flujos entre los periodos previos y el periodo posterior. Durante los años de 2000-2004, más del 74 por ciento de los días tuvieron flujo en el LIS. Durante los años de 2005-2009, menos del 10 por ciento de los días tuvieron flujo alguno registrado en el LIS. Esto ha sido un cambio drástico reciente. La Tabla 8 muestra las



**Figura 48. Histograma de frecuencias que muestra la distribución de los volúmenes de descarga diaria en el tramo límite y en el LIS.** Fuente: IBWC.

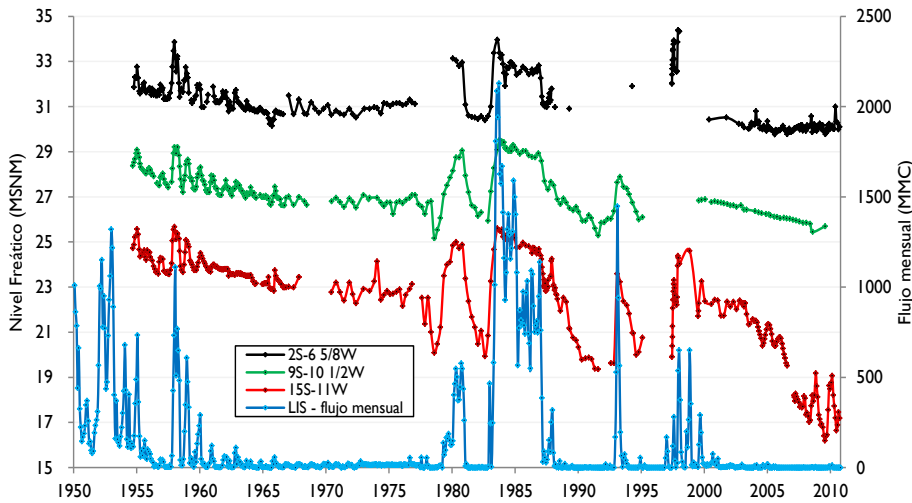
estadísticas sumarias para estos valores. En la Tabla 8, nótese que los valores promedio y medios para el LIS para el periodo previo son más altos que los valores correspondientes para el tramo límite, reflejando altos flujos base para los inicios de la década.

**Tabla 8. Estadísticas sumarias para la Figura 47.**

metros cúbicos (1000s) por día	Límite		LIS	
	2000-2004	2005-2009	2000-2004	2005-2009
promedio	259	88.7	290	33
medio	29.1	15.0	62	0
máximo	11,950	7,415	10,970	5,220
número de días	1,827	1,826	1,827	1,826

## Flujos superficiales y de agua subterránea

El drástico descenso en los flujos superficiales en el LIS en la segunda mitad de la última década tiene implicaciones evidentes para la recarga del agua del subsuelo, las elevaciones del nivel freático y la salud del corredor ripario. Esta sección evalúa los impactos de los flujos descendentes en la parte baja del tramo límite, sobre las elevaciones del agua subterránea local. En la página siguiente, la Figura 49 es una gráfica de las elevaciones del nivel freático reportadas en los pozos de monitoreo en la parte alta, media y baja del corredor límite, contrastadas con los flujos superficiales mensuales en el LIS, para el periodo registrado. Nótese que las elevaciones del nivel freático en los tres pozos alcanzaron un pico al mismo tiempo, en respuesta a las inundaciones de 1983-1988; aunque en cada caso, estas elevaciones máximas del nivel freático superaron por menos de 0.3 m las elevaciones máximas mostradas en 1957. En estos pozos (para los que existe información) también se reportaron elevaciones del nivel freático ligeramente menores en respuesta a las inundaciones de 1980 y 1998, aunque estos eventos fueron de mucho menor magnitud. El notable descenso en el flujo mensual promedio en el LIS, a partir de la década de los cincuentas, a los sesentas y los setentas, probablemente explica la caída de alrededor de 1.5 m en las



**Figura 49. Elevaciones del nivel freático vs. flujos mensuales en el LIS, 1950-2010.** Fuentes: Reclamation, IBWC.

elevaciones del nivel freático en el pozo 1S5-11W y los declives ligeramente menores en los pozos aguas arriba, aunque no las fluctuaciones en estas elevaciones.

Nótese que no hubo flujos registrados en el LIS desde enero de 2006 hasta diciembre 2007, y de nuevo durante todo el 2009, mostrando una buena correlación con la caída significativa de las elevaciones del agua subterránea en el pozo 1S5-11W y en menor medida con el descenso gradual en el pozo 9S-10 1/2W, cerca de Gadsden. Los flujos calculados inmediatamente aguas abajo de la Presa Morelos probablemente explican las relativamente bajas fluctuaciones en las elevaciones del nivel freático reportadas por el pozo cercano a la Presa Morelos. Los flujos pulso en 1993, a inicios y a fines de 1998 y a fines de 1999 tienen una buena correlación con el aumento de las elevaciones del agua subterránea, al igual que pulsos breves, más pequeños ocurridos en octubre de 2000 y marzo de 2001. La ausencia de flujos en 2009 claramente contribuyó al descenso en las elevaciones del agua subterránea en los pozos del LIS y de Gadsden; pero de nuevo, pareció no afectar el pozo cercano a la Presa Morelos. Los pequeños flujos en enero y marzo de 2010 aparentemente incrementaron las elevaciones del agua subterránea cerca del LIS por más de 3 m.

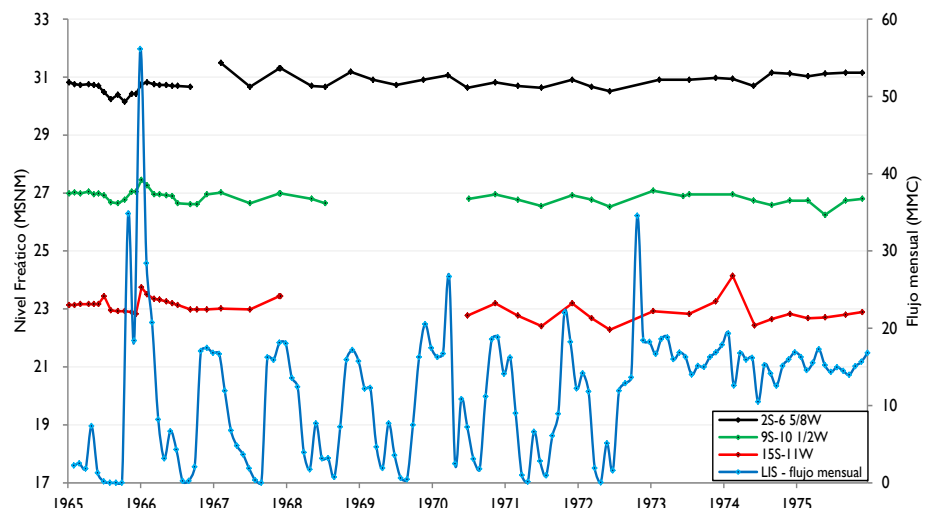
La Figura 50 representa la variabilidad estacional de los flujos del Río Colorado en el LIS, particularmente de 1965-1972, y la respuesta del nivel freático a esta variabilidad. Nótese que las elevaciones del nivel freático en los tres pozos – ubicados respectivamente cerca de la Presa Morelos, alrededor de la parte media del tramo límite y cerca del LIS – muestran mucho menos variabilidad que la registrada en años recientes. La diferencia clave entre el periodo mostrado en la Figura 50 y los años recientes es la magnitud de los flujos reportados en el LIS. Durante el periodo mostrado en la Figura 50, los flujos mensuales promediaban 11.7 MMC; durante los últimos cinco años, el promedio mensual fue de 0.5 MMC.

Estos bajos flujos recientes aparentemente no son suficientes para recargar el acuífero, provocando el descenso en el nivel freático que se observa en la parte baja del corredor límite.

En la página siguiente, tres figuras exploran la relación entre los flujos reportados en el LIS y las elevaciones del nivel freático reportadas cerca de *Hunter's Hole*, aproximadamente 3 km aguas arriba del medidor del LIS. La Figura 51 representa estos datos de 1960-2010; la Figura 52 se enfoca en los años de 1960-1979, un periodo prolongado con una cantidad limitada de eventos de alto flujo; y la Figura 53 refleja los datos de enero de 2002 hasta diciembre de 2010. Las limitaciones en la información obstaculizan esta evaluación; ninguno de los pozos de observación estuvo funcionando durante todo el periodo registrado, y existen

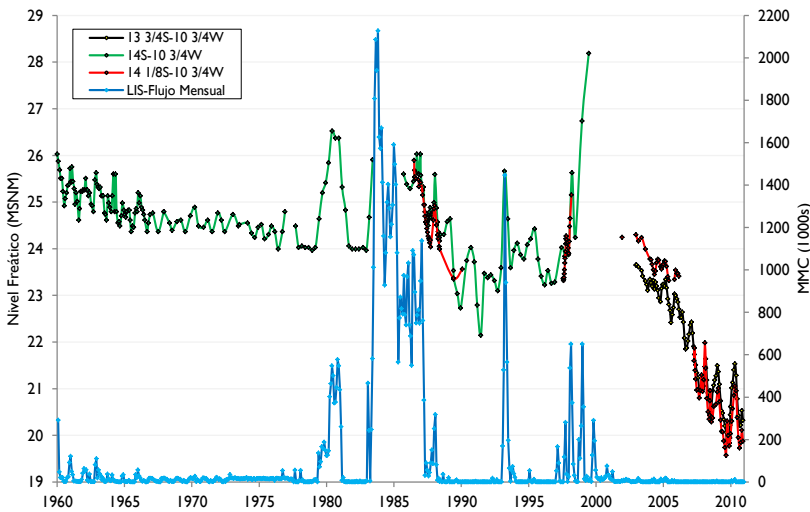
grandes lagunas en los registros de cada uno de los pozos de monitoreo. En la Figura 51, el nivel freático en el pozo 14S-10 3/4W respondió a las inundaciones de 1980 y 1993 (la adición de nueva mampostería para proteger contra la inundación de 1983 destruyó el pozo), aunque las elevaciones reportadas en diciembre de 1998 y junio de 1999 pudieran reflejar errores de transcripción. Las elevaciones del nivel freático en el pozo 14 1/8S-10 3/4W tienen una buena correlación con las del pozo 13 3/4S-10 3/4W. Nótese el declive gradual de 2.0 m en las elevaciones del nivel freático de enero de 1960 hasta marzo 1979 y el aumento de 2.4 m a lo largo de los siguientes 15 meses, en respuesta a más de 3,000 MMC de flujo del Río Colorado reportado en el LIS durante esos meses. Para mayo de 1981, el Río Colorado ya no llegaba al LIS; para septiembre, el nivel freático había bajado a la elevación que tenía antes de la inundación.

La Figura 52 muestra los flujos mensuales en el LIS y las elevaciones del nivel freático reportadas en el pozo 14S-10 3/4W, cerca del extremo sur de *Hunter's Hole*. Nótese que las elevaciones pico del nivel freático descendieron 1.3 m de 1960 a 1966 y luego entraron en un periodo de equilibrio dinámico, con fluctuaciones estacionales aparentemente originadas por los

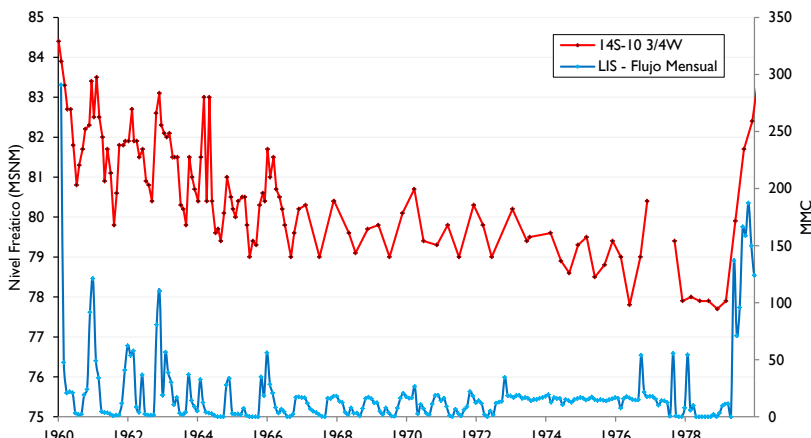


**Figura 50. Elevaciones del nivel freático vs. flujos mensuales en el LIS, 1965-1975.** Fuentes: Reclamation, IBWC.

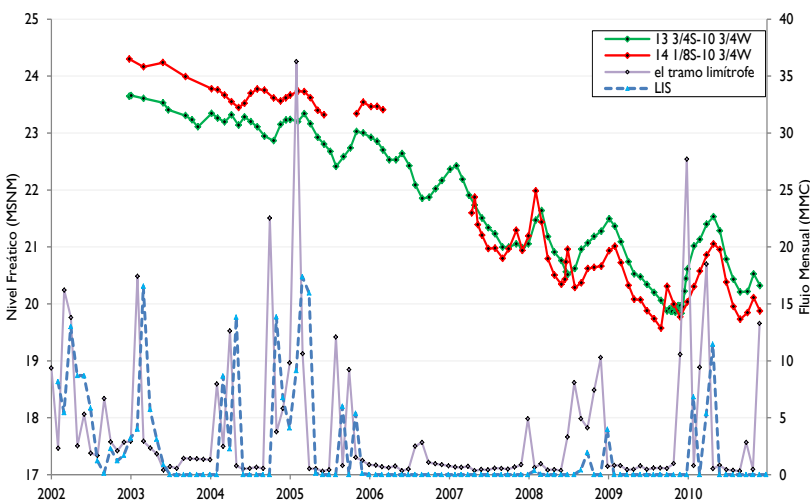
Dinámica del agua subterránea en el límite



**Figura 51. Elevaciones del nivel freático cerca de Hunter's Hole y flujos mensuales en el LIS, 1960-2010.** Fuentes: Reclamation, IBWC.



**Figura 52. Elevaciones del nivel freático cerca de Hunter's Hole y flujos mensuales en el LIS, 1960-1979.** Fuentes: Reclamation, IBWC.



**Figura 53. Elevaciones del nivel freático cerca de Hunter's Hole y flujos superficiales, enero de 2002-diciembre de 2010.** Fuentes: Reclamation, IBWC.

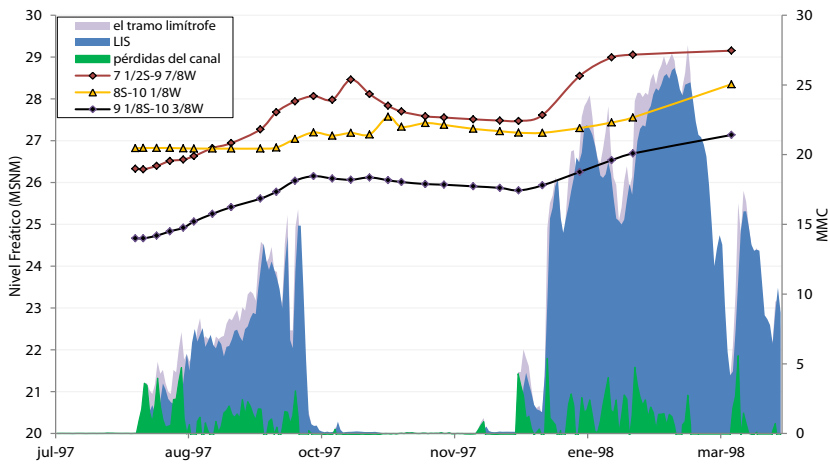
flujos del Río Colorado, durante los siguientes siete años. Es interesante que a pesar de un periodo de flujos mensuales relativamente altos en el Río Colorado (promedio mensual 1973-74: 16 MMC), el nivel freático descendió 0.73 m de su pico en 1973 hasta su punto más bajo en febrero de 1976. Es interesante señalar que el volumen mensual de agua del Río Colorado perdida entre la Presa Morelos y el LIS a inicios de la década de los setentas promediaba alrededor de 8.1 MMC, pero este volumen se elevó a 28 MMC en septiembre de 1976, lo que probablemente explica la subida de 0.8 m en el nivel freático durante ese tiempo.

La Figura 53 muestra claramente la caída en el nivel freático en la segunda mitad de la década del 2000, descendiendo 3.4 m de marzo de 2005 a octubre de 2009, en un contexto de cero flujos en el LIS y extracciones crecientes en los campos de pozos del Acta 242. Nótese que el nivel freático ascendió casi 0.6 m en las últimas dos semanas de diciembre de 2009, a pesar de que no hubo flujos registrados en el LIS, reflejando los 9.4 MMC de flujo inmediatamente aguas abajo de la Presa Morelos<sup>69</sup> y los 0.7 MMC de descarga de los canales de desagüe Milla-11 y Milla-21, del 11 al 29 de diciembre de 2009. Los registros indican que la bomba en *Hunter's Hole*, que descarga agua a los sitios de restauración de *Hunter's Hole*, estaba funcionando el 3 de diciembre, pero estaba apagada el 7 de diciembre y permaneció apagada. El volumen total de agua extraída por esta bomba, calculado en función de la capacidad medida de la bomba, hubiera sido alrededor de 0.15 MMC a lo largo de este periodo. Se desconoce el origen del incremento de 0.73 m en la elevación del nivel freático en el pozo 14S-10 3/4S, de septiembre a octubre 2009. Nótese que la elevación del nivel freático en el pozo 13 3/4S-10 3/4W se incrementó 1.7 m, de su punto más bajo, el 7 de diciembre de 2009, a su punto más alto, el 4 de mayo de 2010; durante este periodo, un total de 43 MMC de agua del Río Colorado se perdieron entre la Presa Morelos y el LIS.

El Capítulo IV compara los volúmenes reportados para la extracción de agua subterránea y las elevaciones del nivel freático. La Figura 35, por ejemplo, compara los volúmenes de extracción reportados en *West Cocopah* y las elevaciones del nivel freático reportadas en los pozos cercanos. En la pagina siguiente, la Figura 54 compara estas mismas elevaciones con los flujos diarios calculados para el tramo límite (en tono lavanda), los flujos reportados en el LIS (en azul) y la diferencia calculada, no negativa, entre estos dos valores (en verde), todo esto presentado en el eje-Y secundario. El área que aparece en verde es simplemente la diferencia no-negativa entre los otros dos valores. Nótese que esta diferencia en flujos tiene un error potencial calculado superior al 27 por ciento, y que los flujos reportados en el LIS tienen un margen de error arriba del 15 por ciento. Los valores negativos (es decir, los días en que los flujos reportados en el LIS exceden

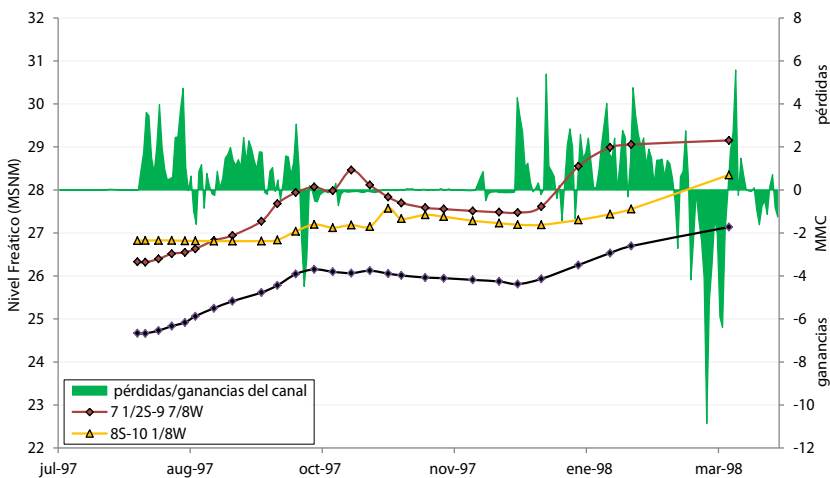
<sup>69</sup> Este volumen incluye la descarga poco común de 2.4 MMC de agua del Canal de Desagüe MODE # 3 de *Wellton-Mohawk*, inmediatamente pasando la Presa Morelos; la mayoría de los años, la descarga total anual de este canal de desagüe es igual a cero.

Dinámica del agua subterránea en el límite



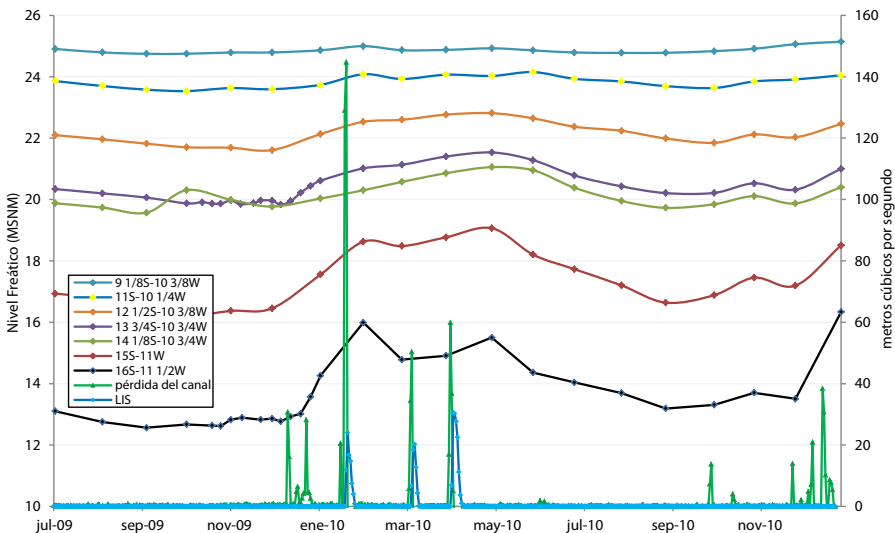
**Figura 54. Elevaciones del nivel freático cerca de West Cocopah y flujos del Río Colorado, julio de 1997-marzo de 1998.** Fuentes: Reclamation, IBWC. Compárese con la Figura 26.

los flujos calculados para el tramo límite) no aparecen representados en la Figura 54. La Figura 55 muestra las diferencias calculadas, tanto positivas como negativas, entre los flujos del tramo límite y los del LIS. Los tres pozos de monitoreo tienen extensas lagunas en la información, sin datos reportados entre el 31 de enero de 1990 y el 31 de julio de 1997; y de nuevo desde el 13 de marzo de 1998 hasta el 14 de diciembre de 2001. Nótese que las elevaciones del nivel freático reportadas en el pozo 85-10 1/8W, en julio-septiembre de 1997, no reflejan la tendencia ascendente que se observa en los otros dos pozos. De agosto hasta octubre de 1997, las elevaciones del nivel freático varían, aparentemente en respuesta a los volúmenes de extracción reportados, pero el declive en el nivel freático después de octubre, particularmente en el pozo 7 1/2S-9 7/8W, no refleja la disminución en la cantidad de agua extraída de los pozos cercanos.



**Figura 55. Elevaciones del nivel freático cerca de West Cocopah y diferencias entre los flujos calculados del Río Colorado aguas abajo de la Presa Morelos y flujos reportados en el LIS, julio de 1997-marzo de 1998.** Fuentes: Reclamation, IBWC.

La pérdida del canal de aproximadamente 20 MMC que la Figura 53 refleja a finales de enero, tiene correlación con un incremento de aproximadamente 1.7 m en la elevación del nivel freático cerca del LIS, como mostrado en la Figura 56. Desde diciembre hasta mayo, el nivel freático cerca de Hunter's Hole subió cerca de 1.7 m; durante el mismo periodo, se perdió un total de 43 MMC de agua del Río Colorado entre la Presa Morelos y el LIS. La pérdida de unos 6.6 MMC de agua entre la Presa Morelos y el LIS, como resultado de descargas del Río Colorado a través de la presa a principios de abril, incrementó el nivel freático cerca del LIS por 0.61 m, del 2 de abril al 4 de mayo, aunque para el 2 de junio el nivel freático había caído 1.2 m y para el 1° de julio, había bajado otros 0.3 m. Esto sugiere que esta descarga de abril generó una "ola" subterránea temporal, que irradiaba a partir del cauce, en lugar de incrementar el nivel freático de una manera más general. Los flujos del tramo límite en octubre y diciembre también incrementaron el nivel freático, por casi <3 m cerca del LIS, y por más de 3 m en comparación con las elevaciones de junio de 2009.



**Figura 56. Elevaciones del nivel freático y flujos diarios en el tramo límite, 1 de julio, 2009-4 de enero, 2011.** Fuentes: Reclamation, IBWC.

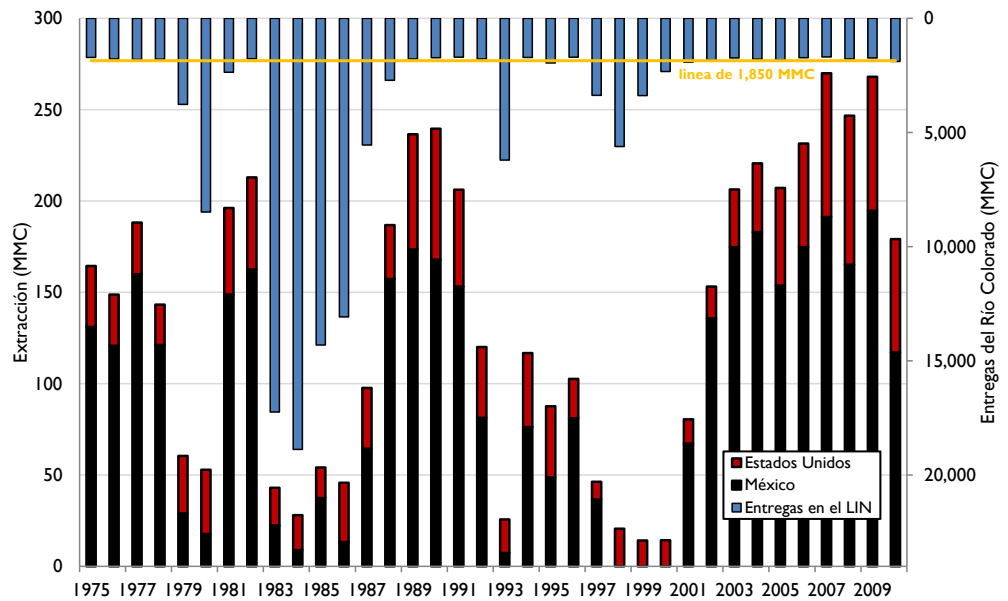
Ramírez et al. (2011) estiman que 6.7 MMC son suficientes para incrementar la elevación del nivel freático por 0.5 m. En diciembre 2010, más de 13 MMC de flujos "perdidos" entre la Presa Morelos y el LIS (donde no hubo flujos registrados<sup>70</sup>) fueron aparentemente suficientes para incrementar la elevación del nivel freático bajo el pozo de monitoreo 16S 11 1/2 W por aproximadamente 3 m, una tasa de alrededor del triple de lo estimado por Ramírez et al. (2011). No obstante, como se señaló anteriormente, es probable que el medidor del LIS subestimó los flujos reportados durante diciembre 2010, por lo que la infiltración del canal probablemente fue menor y se aproxima más a la tasa estimada por Ramírez et al. (2011).

<sup>70</sup> Nótese la discusión previa sobre reportes de flujos potencialmente subestimados por el medidor temporal en el LIS; es probable que algunos de estos flujos "perdidos" realmente alcanzaron el LIS, pero no fueron registrados.

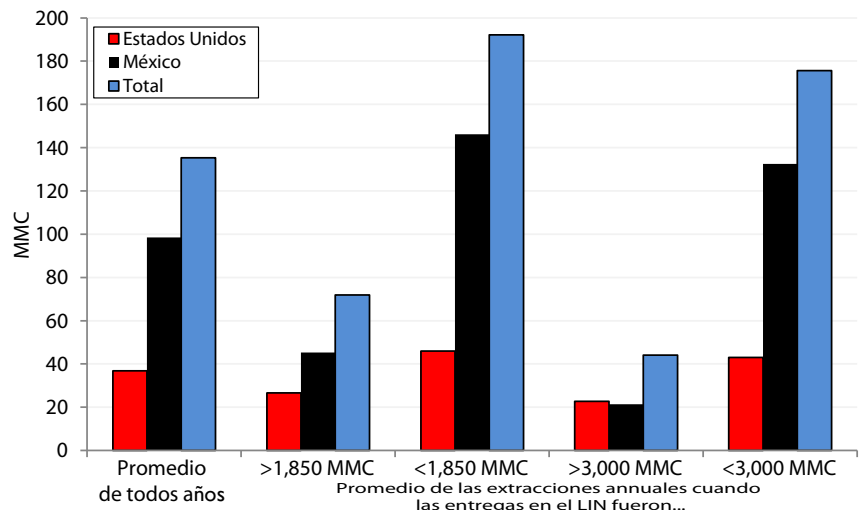
La Figura 41 sugiere una fuerte relación entre la extracción por bombeo en la zona de exclusión de 8 km y las elevaciones del agua subterránea en el corredor límite. Sin embargo, como aparece en la Figura 57, también parece haber una fuerte correlación entre las entregas de aguas superficiales en el LIN y los volúmenes de agua extraídos, así como flujos superficiales a través del tramo límite. Sin tomar en cuenta el error reportado del diez por ciento en los registros del caudal en el LIN y un error desconocido (pero potencialmente significativo) en los volúmenes de extracción reportados en las zonas de exclusión de 8 km, un análisis de regresión indica que la magnitud de los flujos en el LIN explican casi el 59 por ciento de la varianza en las tasas anuales de extracción en México, pero sólo el 36 por ciento de las tasas anuales de extracción en Estados Unidos. Es decir, la magnitud de los flujos superficiales en el LIN parece ser la causa primordial que afecta las condiciones del agua subterránea en el corredor límite, de manera directa a través de las filtraciones, e indirectamente porque ocasiona un incremento en la extracción – sobre todo en México – en la zona de exclusión, sobre todo cuando los flujos en el LIN caen por debajo de los 1,850 MMC, señalados por la línea naranja horizontal en la parte superior de la gráfica. El notable descenso en la extracción por bombeo en México durante el año 2010 es probablemente atribuible a los daños sufridos por su infraestructura hidráulica y la subsecuente disminución en la demanda. Nótese que los volúmenes de entregas del Río Colorado en el LIN aparecen en orden inverso en el eje-Y secundario, para facilitar la comparación con los volúmenes de extracción (en el eje primario).

La figura 58 sintetiza la información anual mostrada anteriormente. Nótese que la extracción mexicana de agua subterránea en la zona de exclusión de 8 km promedió 150 MMC por año cuando los flujos del Río Colorado en el LIN fueron menores a 1,850 MMC, pero sólo 22 MMC por año cuando los flujos del Río Colorado en el LIN superaron los 3,100 MMC. México extrajo menos agua que Estados Unidos cuando los flujos del Río Colorado en el LIN superaron los 3,100 MMC, pero en promedio, en la zona de exclusión, México extrae 170% más agua que Estados Unidos.

Carrillo-Guerrero (2009) señala que en 2008, 220 de los 709 pozos registrados en el Distrito de Riego 014 en México operaron por concesiones particulares y que no estaban conectados a la infraestructura de agua superficial. Como es de esperar, las tasas de extracción en estos pozos particulares no muestran correlación alguna con la disponibilidad de agua superficial: el agua subterránea era su única fuente de abastecimiento.



**Figura 57. Entregas del Río Colorado y extracción por bombeo en la zona de exclusión, 1975-2010.** Los valores en el eje-Y secundario aparecen en orden inverso. Fuentes: IBWC, USGS.



**Figura 58. Entregas en el LIN y extracción por bombeo en la zona de exclusión, 1975-2010.**

## Capítulo VI – Conclusiones y recomendaciones

Las condiciones y la dinámica del agua subterránea en el tramo límite han cambiado de manera fundamental en los últimos 70 años. Como se muestra en la Figura 15, el Río Colorado solía ser una fuente de recarga neta para el acuífero local en el corredor límite. El río estaba estrechamente conectado con el acuífero; la profundidad al agua del subsuelo se incrementaba a mayor distancia del río. Las inundaciones del río promovidas por el deshielo, anegaban las tierras circundantes, aumentando la recarga del acuífero y aportando flujos base durante los periodos de bajos flujos. La derivación de esencialmente todo el flujo del río aguas arriba del área de estudio, combinada con la pérdida de sedimentos tras las presas ubicadas aguas arriba y la subsecuente incisión del cauce del río aguas abajo de la Presa Morelos, significa que el río es ahora un sumidero en la parte alta del corredor límite y está completamente desconectado del acuífero en el último cuarto del tramo límite. Por medio del riego, el río todavía ‘inunda’ las tierras adyacentes, recargando el acuífero. En la parte alta del corredor límite, la recarga proveniente de este riego es suficiente para mantener elevados los niveles de agua subterránea y la conectividad con el río. Pero la extracción excesiva por bombeo a lo largo de la línea divisoria sur y al oeste del río ha hecho descender el nivel freático cerca del LIS, volviendo efímero al Río Colorado, unos 60 km abajo de Gadsden.

A lo largo de los últimos 70 años, el nivel freático cerca del LIS descendió unos 12 m, y aproximadamente 3 m cerca de la Presa Morelos. Sin embargo, como muestra la Figura 16, el nivel freático a través de todo el corredor límite ascendió a aproximadamente la misma elevación a finales de 1998 (en reacción a las inundaciones del Río Colorado ocurridas ese año) que como estaba en 1955, cuando los pozos de monitoreo recién fueron instalados. En los 57 años que abarca el periodo de registros de los pozos de monitoreo, el nivel freático cerca de la Presa Morelos bajó aproximadamente 1.5 m; en el punto medio del tramo límite, alrededor de 2.4 m; pero cerca del LIS, bajó aproximadamente 9 m. El nivel freático en la parte sur del corredor límite ha experimentado dramáticas fluctuaciones desde 1978, subiendo o bajando más de 3 m en ocho ocasiones durante ese periodo. De 1955 a 1977, los niveles freáticos a lo largo del corredor límite experimentaron un declive general de aproximadamente 1.5 m, aunque sólo la última cuarta parte del área de estudio experimentó alzas y caídas pronunciadas en las elevaciones de su nivel freático.

Estas tendencias continuaron en años recientes. El nivel freático en la parte más al sur del tramo límite experimentó un descenso pronunciado – de más de 8.2 m cerca del LIS – de finales de 1998 a octubre de 2009. Varios kilómetros aguas arriba, cerca de Gadsden, donde el río nuevamente se dobla hacia el Sur, el nivel freático decayó 2.7 m a lo largo de estos once años. Sin embargo, a sólo 5 km al norte de Gadsden, la elevación del nivel freático en octubre de 2009 fue esencialmente la misma que la registrada en julio de 2003.

Estas diversas tendencias subrayan las dramáticas diferencias en las condiciones del agua superficial y subterránea a lo largo de los

aproximadamente 35 km de longitud del cauce, a través del área de estudio. La cuarta parte o el tercio<sup>71</sup> superior del Río Colorado aguas abajo de la Presa Morelos parece mantenerse húmedo permanentemente, sostenido por filtraciones y por descargas periódicas de la presa y del canal de desagüe Milla-II, así como, particularmente, por flujos base generados por un nivel freático relativamente alto. En ésta, la sección más alta, el nivel freático se ha mantenido relativamente estable por más de cincuenta años, con algunos picos causados por las notables inundaciones del Río Colorado a mediados de los ochentas y finales de los noventas. La parte media del área de estudio, que aguas abajo se extiende hasta el área de la curva de Gadsden, parece tener flujos periódicos o intermitentes y un nivel freático un poco menor, aunque todavía es relativamente estable. Aunque el agua superficial pierde su conexión con el acuífero en esta parte, el nivel freático aún se mantiene al alcance de las raíces de la vegetación riparia nativa establecida. En el último tramo del área de estudio, más abajo de Gadsden, se pierde incluso esta conectividad a nivel de la zona de las raíces, a medida que el nivel freático desciende precipitadamente. Este último tramo del área de estudio experimenta fluctuaciones dramáticas en el acuífero, en reacción a pulsos de agua superficial cada vez menos frecuentes que recorren el cauce. Como se reporta en el último medidor sobre el río, desde 2005, el canal en el tramo final del área de estudio ha estado seco durante más del 90 por ciento de los días. En *Hunter's Hole*, justo al sur de Gadsden, reportes anecdóticos (F. Phillips, comunicación personal, 2010) indican que la vegetación riparia se ha mantenido gracias a riego suplementario, aún en sitios donde el nivel freático ha caído por debajo del alcance de las raíces de álamos y sauces; pero la escasa vegetación xerófila en otras áreas abajo de Gadsden indica que el nivel freático ya no sostiene la vegetación riparia que depende de un manto freático accesible.

Hay dos factores relacionados que explican el reciente declive dramático en la elevación del nivel freático pasando el último cuarto del área de estudio: la reducción significativa en los flujos de aguas superficiales (incluyendo cero flujos reportados en el LIS en cualquier punto en 2006, 2007 y 2009; y sólo 6.7 MMC reportados en 2008) y un incremento en el volumen de agua extraída por bombeo de los pozos mexicanos y estadounidenses en la franja de 8 km que amortigua la frontera al este del LIS. Como muestra la Figura 40, este volumen se incrementó de un promedio aproximado de 110 MMC anual para los años 1975-2000, a un promedio de casi 240 MMC por año en 2005-2009.

El volumen de flujos superficiales parece ser la causa fundamental responsable de las fluctuaciones del agua subterránea en el tramo límite y especialmente, en el área aguas abajo de Gadsden. Los flujos superficiales aguas abajo de la Presa Morelos contribuyen directamente a la recarga del agua subterránea a través del cauce; flujos inusualmente altos en el LIN (>1,850 MMC/año) también incrementan indirectamente la elevación del nivel freático, ocasionando que México disminuya su extracción por bombeo

<sup>71</sup> Debido a la falta de medidores de caudal entre la Presa Morelos y el LIS, así como la limitada disponibilidad de fotografías aéreas del tramo, estas caracterizaciones del flujo de caudal son necesariamente generales.

en la zona de 8 km que amortigua la frontera al este del LIS, permitiendo que agua del Valle de Yuma y de Yuma Mesa fluya hacia el tramo límite, en lugar de fluir hacia el campo de pozos. El dramático declive sin precedentes en los flujos superficiales, particularmente de 2005 a 2009, y en general a lo largo de buena parte de la década de los noventa y del 2000, tiene una correlación con el marcado descenso en la elevación del nivel freático en el último cuarto del corredor límite.

El flujo superficial a través del área de estudio recarga el acuífero subyacente, especialmente en los dos tercios más bajos del tramo límite, donde el nivel freático cae por debajo de la elevación del cauce. El volumen de esta recarga, estimada como la diferencia entre los flujos calculados directamente aguas abajo de la Presa Morelos y los flujos reportados en el LIS, tiene una correlación aún más fuerte con la elevación del nivel freático que el volumen total de flujo reportado en el LIS. Como muestra en la Figura 58, los altos flujos en diciembre de 2009 – enero de 2010, y de nuevo en diciembre de 2010, incrementaron todos ellos significativamente, las elevaciones del nivel freático en el último cuarto del tramo límite, pero tuvieron un impacto menor aguas arriba. Varios factores bien diferenciados determinan las tasas de recarga a lo largo del área de estudio, incluyendo: descargas (agua liberada de la Presa Morelos en descargas grandes y breves generan menos recarga que un volumen equivalente de agua liberada a lo largo de un periodo más extenso); las condiciones prevalentes en el cauce (un cauce seco tiende a absorber más agua que un cauce saturado); y el substrato del cauce (los suelos arenosos tienen tasas de infiltración más altas que los suelos arcillosos). Estos diversos factores muestran que el análisis de tasas de recarga requiere un marco de tiempo adecuado: las evaluaciones mensuales o anuales de las descargas de la Presa Morelos no son una base adecuada para determinar o proyectar las tasas de recarga a través del área de estudio.

Los flujos superficiales y la recarga del cauce son sólo una parte de la ecuación que determina las condiciones y la dinámica del agua subterránea en el área de estudio. Otros dos factores clave, como se muestra en la Tabla 5, son el movimiento y la extracción de agua subterránea. La información limitada que existe sobre las tasas de extracción y los flujos subterráneos de retorno de los campos agrícolas aguas abajo de la Presa Morelos, dificultan los esfuerzos para determinar la relación entre la extracción por bombeo y los flujos subterráneos de retorno, con las elevaciones del nivel freático. La información disponible de los movimientos del agua del subsuelo ingresando y atravesando el área de estudio tiene más de 40 años de antigüedad y antecede al periodo actual de bajos flujos superficiales y altas tasas de extracción por bombeo de agua del subsuelo. Como muestra la Tabla 5, el movimiento de agua subterránea es (o era) el factor principal en el balance de agua subterránea; y en años normales era equivalente a la recarga total calculada de todas las fuentes de agua superficiales. La carencia de información reciente sobre este factor clave para el balance de agua, fue una limitante significativa para esta valoración. A partir de las condiciones relativamente estables en la parte alta del tramo límite, podemos inferir que el agua subterránea – alimentada por la recarga de la agricultura de riego en la parte norte del Valle de Yuma – continúa fluyendo hacia el

área de estudio. El nivel freático descendiente en el último cuarto del área de estudio sugiere que el agua subterránea ya no fluye hacia el Oeste en esa área, o que los volúmenes que fluyen en esa dirección son insuficientes.

Los cambios reportados en la extracción por bombeo dentro de la zona de exclusión de 8 km, a lo largo de la frontera Arizona-Sonora, incluyendo el incremento del 90 por ciento en dicha extracción entre 2001 y 2009, es casi ciertamente responsable por el descenso en las elevaciones del nivel freático cerca de la frontera misma (como se muestra en la Figura 3), y está probablemente extrayendo los flujos subterráneos que de no ser así, servirían para incrementar las elevaciones del nivel freático en la parte baja del tramo límite, especialmente cerca del LIS. Esta extracción por bombeo, particularmente en México, muestra una correlación inversa con el volumen de agua entregado en el LIN.<sup>72</sup> Aunque las tasas de extracción en 2010 se disminuyeron aproximadamente en una tercera parte, esto probablemente se debió a la reducción en la demanda que se produjo por los daños ocasionados por el sismo de abril de 2010; la extracción por bombeo probablemente regresará a los niveles de 2009 una vez que la infraestructura sea reparada. Dada la baja probabilidad de recurrencia de las grandes entregas en el LIN que se registraron en los ochentas y a finales de los noventa, las cuales también ocasionaron una baja en la extracción, es probable que continúen las recientes y actuales tasas elevadas de extracción, abatiendo las elevaciones del agua subterránea a lo largo de la frontera, y limitando la recuperación a largo plazo del agua subterránea en la parte baja del corredor límite, aún a pesar de los pequeños flujos pulso que llegaron al LIS en 2010.

Menos claro es el impacto de la extracción por bombeo en el Módulo 7 de México, inmediatamente al oeste del Río Colorado, en el corredor límite. Si dicha extracción continúa con las tendencias recientes en la zona de 8 km, entonces será mayor el volumen de agua subterránea extraída del área de estudio, contribuyendo al descenso del nivel freático. Datos mensuales del Módulo 7 posteriores a 2001 mejoraría nuestra comprensión de los impactos de este factor en el mismo corredor límite.

Este estudio indica que, incluso después del periodo excepcionalmente seco de 2005-2009, cuando en el 90 por ciento de los días los flujos superficiales no alcanzaban a llegar al medidor del LIS, aproximadamente 75 por ciento del cauce a través del área de estudio se mantuvo a menos de 3 m del manto freático – dentro del margen de tolerancia de la vegetación riparia nativa. Éstas son noticias muy alentadoras, ya que indican que la mayor parte del tramo límite sigue siendo propicio para esfuerzos de revegetación que serán sustentables a largo plazo, por lo menos mientras la agricultura de riego en el Valle de Yuma siga siendo viable. La caída en picada del nivel freático en el LIS indica que los últimos 8 km del río dentro del área de estudio no reaccionarán a los esfuerzos para restaurar el hábitat ripario, por lo menos no sin

<sup>72</sup> Las tasas de extracción por bombeo en los pozos estadounidenses en la zona de exclusión de 8 km se determinan también en función del almacenamiento del sistema del Río Colorado. Cuando el nivel del Lago Mead está alto, hay una tendencia a reducir la extracción para ahorrar costos; cuando el almacenamiento está bajo, aumenta la presión para suplementar los suministros del sistema.

un compromiso a largo plazo de riego suplementario; aunque las áreas aguas arriba parecen estar a salvo del reciente abatimiento del nivel freático.

Las tendencias recientes, tales como el rápido crecimiento poblacional a lo largo de la frontera, el incremento en la extracción por bombeo en la zona de exclusión de 8 km y la ausencia en general de descargas significativas de la Presa Morelos, sugieren que en los años venideros, es probable que continúe la pronunciada caída del nivel freático que se observa abajo de Gadsden. Sin embargo, la recarga proveniente de descargas periódicas, promovidas por lluvia, de la Presa Morelos, y la continua recarga de agua subterránea que fluye de las tierras irrigadas en el Valle de Yuma hacia la parte alta del área de estudio, parecen aportar flujos base en el tramo superior del cauce, así como un nivel freático relativamente alto a través de buena parte del área de estudio, como muestra la Figura 25. Dados los retos hidrológicos impuestos en 2005-2009, éstas son noticias alentadoras.

## Recomendaciones

Este estudio representa la evaluación más exhaustiva realizada a la fecha, de las condiciones y la dinámica del agua subterránea en el tramo límite aguas abajo de la Presa Morelos. Además, los estudios sobre sitios más específicos se verían beneficiados por investigación adicional (descrita abajo). No obstante, aún sin estas nuevas investigaciones, este estudio claramente indica que los proyectos de revegetación y restauración en los dos tercios superiores del área de estudio, podrán ser exitosos a largo plazo y que vale la pena emprenderlos.

La IBWC ha planeado provisionalmente conducir un nuevo levantamiento del cauce límite en el futuro próximo, el primero desde 1999. Un nuevo levantamiento mejoraría en gran medida la comprensión de la dinámica reciente del canal, incluyendo el transporte de sedimentos, y proporcionaría un fundamento para futuros esfuerzos de restauración. Este levantamiento debe realizarse lo antes posible, y debe incluir una descripción detallada del cauce actual y los remansos actuales.

Para proporcionar una medida de los flujos reales en la parte más alta del delta del Río Colorado, a diferencia de los flujos calculados con base en los registros de medidores corriente arriba, la IBWC debe instalar un nuevo medidor de caudal inmediatamente aguas abajo de la Presa Morelos. Dicho medidor de caudal proporcionaría una verificación crítica de las entregas reales al tramo límite, lo cual podría ser un requisito en un nuevo acuerdo binacional.

Una faltante clave en la información es la profundidad real al manto freático dentro del corredor ripario en sí. Los piezómetros de PNN/UABC brindan información sobre dichas profundidades en varios sitios, pero sitios de información adicionales, sobre todo del lado estadounidense del río, mejorarían enormemente la comprensión de las condiciones actuales en relación a los esfuerzos de restauración. En el presente, dicha información debe ser interpolada a partir de los datos de los pozos de monitoreo cuyo propósito es cubrir una necesidad muy diferente. También sería esclarecedor realizar análisis SIG adicional, graficando las

profundidades al agua subterránea en otras fechas de interés y resaltando las diferencias entre fechas.

Este estudio también subraya la necesidad de un nuevo levantamiento de la vegetación en el corredor límite. Los datos históricos de los levantamientos de vegetación para el tramo límite varían significativamente, incluso con los de la misma dependencia. También existen diferencias significativas en tasas de ET reportadas para tipos de comunidades de vegetación que son claves en el tramo límite. Estos factores limitan la comprensión de las tendencias en el uso del agua por parte de la vegetación y de la dinámica del agua subterránea como un todo. Nueva información de un levantamiento, así como la clasificación y el análisis de imágenes de percepción remota satelital, permitirían establecer una correlación entre las zonas de vegetación y las elevaciones del nivel freático. Dicha información sería crítica para desarrollar un modelo robusto de agua subterránea para la región.

La relación entre los flujos calculados en la Presa Morelos, los flujos registrados en el LIS y las elevaciones del nivel freático en el tramo límite, amerita la realización de un estudio más a fondo. Dicho estudio sería crítico para determinar los requerimientos de aguas superficiales para los esfuerzos de restauración del tramo límite. La evaluación preliminar descrita en este estudio indica que, bajo las condiciones actuales, los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos que exceden 25 m<sup>3</sup>/s pueden fluir sin interrupción hasta el LIS, tardando aproximadamente un día en recorrer el tramo; aunque en otros momentos, hay flujos aguas abajo de la Presa Morelos que exceden los 30 m<sup>3</sup>/s, que no generan flujos reportados en el LIS. De nuevo, esto podría simplemente ser un reflejo de diferentes condiciones en el cauce, o podría deberse a errores en la información reportada y calculada.

## Errores en la información

Errores potencialmente significativos empañan gran parte de este análisis. Estos errores varían en magnitud a través de diferentes mediciones. La precisión reportada para las mediciones de los pozos de observación está dentro del 0.1 por ciento, lo que proporciona un panorama claro de las elevaciones del nivel freático cerca de los mismos pozos. Desgraciadamente, la elevación e incluso la ubicación exacta del cauce del río en sí es mucho menos precisa: el último levantamiento del cauce data de 1999, presentando un desafío para los esfuerzos de establecer una correlación entre las elevaciones del nivel freático bajo los pozos de observación con las profundidades reales al agua subterránea – una determinante clave de éxito de la vegetación riparia – a lo largo del mismo corredor ripario. Las tasas de extracción de agua subterránea en la zona de exclusión de 8 km son supuestamente correctas, pero no fue posible obtener tasas de extracción recientes para la zona inmediatamente al oeste del área de estudio, y las tasas de extracción reportadas para la zona al este del área de estudio son simples estimados con base en las superficies irrigadas. No parece existir información reciente disponible sobre el movimiento del agua subterránea que entra o sale del área de estudio; la información más reciente (Olmstead 1973) tiene 40 años de antigüedad y no refleja las condiciones actuales.



La precisión del caudal reportado en diversos puntos dentro del área de estudio – la variable clave para determinar las elevaciones del agua subterránea – es muy baja. En este estudio surgieron tres desafíos clave relacionados con la información de los medidores de caudal: 1) los flujos calculados aguas abajo de la Presa Morelos típicamente son menores que los flujos reportados en el LIN por tres órdenes de magnitud, por lo que caen holgadamente dentro del margen de error reportado para el medidor, disminuyendo la confianza en la precisión de estos flujos calculados; 2) la ausencia de un medidor de caudal entre el LIN y el LIS presenta un reto para determinar flujos reales aguas abajo de la presa y el volumen de agua absorbida por el cauce; y 3) las descargas reportadas en el LIS parecen subestimar los flujos reportados. El último medidor sobre el Río Colorado, en el LIS, es ahora temporal, pues se coloca únicamente cuando se anticipa la presencia de flujos. La información del medidor del LIS ciertamente adolece de una subestimación significativa en sus reportes; como se describe en el Capítulo II y en otras partes, el medidor probablemente no estaba instalado en varias ocasiones cuando el Río Colorado estaba fluyendo.

## Fuentes de Información y Bibliografía

### Fuentes de Información

#### Publicados

- Barmore, R.L. 1980. Soil Survey of Yuma-Wellton Area. U.S. Department of Agriculture (USDA), Soil Conservation Service. 104 pp.
- Bureau of Reclamation. Annual. Colorado River Accounting and Water Use Report: Arizona, California, and Nevada. (Decree Accounting Report). <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/wtracct.html>.
- Bureau of Reclamation. Annual. Lower Colorado River Accounting System Reports. <http://www.usbr.gov/lc/region/g4000/wtracct.html>.
- Environmental Protection Agency, United States (EPA). 2002. Gadsden, Arizona Wastewater Collection and Conveyance System Project: Environmental Assessment. <http://www.epa.gov/border2012/infrastructure/gadsden/ea.pdf>.
- Science Applications International Corporation (SAIC). 2007. Final Environmental Assessment for the Lower Colorado River Drop 2 Storage Reservoir Project: Imperial County, California. Preparado para Bureau of Reclamation. [http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental\\_docs/enviro\\_docs.html](http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental_docs/enviro_docs.html).
- Tratado entre el gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el gobierno de los Estados Unidos de América de la Distribución de las Aguas Internacionales de los Ríos Colorado, Tijuana y Bravo. (1944). <http://portal.sre.gob.mx/cilanorte/pdf/1944.pdf>.

#### No Publicados

- Arizona Meteorological Network. <http://ag.arizona.edu/azmet/>.
- Bureau of Reclamation. "Observation Well Readings," hojas de cálculo preparado por el Yuma Area Office para Pacific Institute. En los archivos del autor.
- Bureau of Reclamation. Sin fecha. Draft Determination of the Contributions of Recharge from Six Irrigated Areas near Yuma Arizona to Drainage Wells and Drains and to Underflow Across International Boundaries into Mexico Using Particle Tracking. (Particle tracking study). Anexo B de Hydrologic Study in Support of Permit Application to Arizona Department of Water Resources. En los archivos del autor.
- Fred Phillips Consulting, LLC. [www.fredphillipsconsulting.com](http://www.fredphillipsconsulting.com).
- Hinojosa-Huerta, O, et al. 2007. Colorado River Limitrophe Restoration Initiative: Progress Report. Preparado para The Walton Family Foundation y Environmental Defense por Pronatura Noroeste. Julio. 41 pp. En los archivos del autor..
- International Boundary and Water Commission. Información general en <http://www.ibwc.state.gov/> and stream gage data posted at [http://www.ibwc.gov/Water\\_Data/histflo2.htm](http://www.ibwc.gov/Water_Data/histflo2.htm). Información en los años después de 2005 proporcionados directamente por personal de la Comisión.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>.
- Natural Channel Design. 2006. Restoration Strategy: A Preliminary Design for Enhancement of Native Riparian Habitats, Lower Colorado River, Limitrophe Reach U.S. – Mexico. Diciembre. 131 pp.
- Ramírez Hernández, J, et al. 2010. Hydrologic Assessment of Flows in the Limitrophe Section of the Colorado River: November 2009-April 2010. Preparado para The Walton Family Foundation pr Pronatura Noroeste y Universidad Autónoma de Baja California. Octubre.

Ramírez Hernández, J, et al. 2011. Hydrologic Assessment of Flows in the Limitrophe Section of the Colorado River: REPORT - PART 2 – DRAFT. Preparado para The Walton Family Foundation por Pronatura Noroeste y Universidad Autónoma de Baja California. Febrero.

#### Comunicación Personal

- Brabec, M. Fred Phillips Consulting, LLC. Correspondencia de correo electrónico, 8 de febrero, 2010.
- Greer, W, Hydrologist, Yuma Area Office, Bureau of Reclamation. Correspondencia de correo electrónico, 25 de octubre, 2010.
- Hinojosa-Huerta, O, Director del Programa de Agua y Humedales, Pronatura Noroeste, comunicación personal, 19 de septiembre, 2011.
- Nickell, J. Deputy Manager, Yuma Area Office, Bureau of Reclamation. Correspondencia de correo electrónico, April 2010, y otras fechas.
- Scott, J. Director, Technical Support Office, Yuma Area Office, U.S. Bureau of Reclamation. Correspondencia de correo electrónico, 25 de enero, 2010.

### Bibliografía

- Amlin, NM, y SB Rood. 2002. Comparative Tolerances of Riparian Willows and Cottonwoods To Water-Table Decline. *Wetlands* 22: 338-346.
- Briggs, MK, y S Cornelius. 1998. Opportunities for ecological improvement along the lower Colorado River and delta. *Wetlands* 18: 513-529.
- Bureau of Land Management (BLM). 2008. Vegetation Treatments in Limitrophe for Safety and Law Enforcement: Final Environmental Assessment EA-AZ-320-2007-022. Yuma Field Office. 59 pp. plus appendices and Decision of Record. [http://www.blm.gov/az/st/en/info/nepa/07\\_project\\_log/limitrophe2.html](http://www.blm.gov/az/st/en/info/nepa/07_project_log/limitrophe2.html).
- Bureau of Reclamation (Reclamation). 2004. 5-Mile Zone Protective and Regulatory Pumping Unit Resource Management Plan/ Environmental Assessment: Yuma County, Arizona. [http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental\\_docs/5-mile/ea/5milezone.pdf](http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental_docs/5-mile/ea/5milezone.pdf).
- Bureau of Reclamation. 2010. Supplemental Environmental Assessment: Hunter's Hole Restoration Project. September. [http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental\\_docs/hunters-hole/FinalSupplementalEA.pdf](http://www.usbr.gov/lc/yuma/environmental_docs/hunters-hole/FinalSupplementalEA.pdf).
- Carrillo-Guerrero, YK. 2009. Water Conservation, Wetland Restoration and Agriculture in the Colorado River Delta, Mexico (Doctoral dissertation, University of Arizona). Retrieved from [http://etd.library.arizona.edu/etd/GetFileServlet?file=file:///data1/pdf/etd/azu\\_etd\\_10630\\_sip1\\_m.pdf&type=application/pdf](http://etd.library.arizona.edu/etd/GetFileServlet?file=file:///data1/pdf/etd/azu_etd_10630_sip1_m.pdf&type=application/pdf)
- Cohen, MJ, y C Henges-Jeck. 2001. Missing Water: The Uses and Flows of Water in the Colorado River Delta Region. Oakland, CA: Pacific Institute. [http://www.pacinst.org/reports/missing\\_water/missing\\_water\\_report\\_web.pdf](http://www.pacinst.org/reports/missing_water/missing_water_report_web.pdf).
- Dickinson, JE, M Land, CC Faunt, SA Leake, EG Reichard, JB Fleming, y DR Pool. 2006. Hydrogeologic framework refinement, groundwater 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, 90 p. <http://pubs.usgs.gov/sir/2006/5135/>.

- Ezcurra, E, RS Felger, AD Russell, y M Equiha. 1988. Freshwater islands in a desert sand sea: the hydrology, flora, and phytogeography of the Gran Desierto oases of northwestern Mexico. *Desert Plants* 9: 35-44, 55-63.
- Fradkin, P. 1981. *A River No More: The Colorado River and the West*. New York: Alfred A. Knopf.
- Freethy, GW, y TW Anderson. 1986. Predevelopment hydrologic conditions in the alluvial basins of Arizona and adjacent parts of California and New Mexico. U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas HA-664.
- Fuller, WA. 1987. *Measurement Error Models*. Wiley, 440 pp.
- Getches, D. 1985. Competing demands for the Colorado River. *University of Colorado Law Review* 56: 413-479.
- Gleick, PH. 1993. "About the data," en *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*, PH Gleick, (ed.), NY: Oxford University Press, pp. 117-119.
- Glenn, EP, RS Felger, A Burquez, y DS Turner. 1992. Cienega de Santa Clara: Endangered Wetland in the Colorado River Delta, Sonora, Mexico. *Natural Resources Journal* 32: 817-824 .
- Glenn, E, C Lee, R Felger, y S Zengel. 1996. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River delta, Mexico. *Conservation Biology* 10: 1175-1186.
- Glenn, E, R Tanner, S Mendez, T Kehret, D Moore, J Garcia, y C Valdes. 1998. Growth rates, salt tolerance and water use characteristics of native and invasive riparian plants from the delta of the Colorado River delta, Mexico. *Journal of Arid Environments* 40: 281-294.
- Harding, BL, TB Sangoyomi, y EA Payton. 1995. Impacts of a Severe Sustained Drought on Colorado River Water Resources. *Water Resources Bulletin* 31: 815-824
- Harner, MJ y JA Stanford. 2003. Differences in Cottonwood Growth between a Losing and a Gaining Reach of an Alluvial Floodplain. *Ecology* 84: 1453-1458. <http://www.jstor.org/stable/3107966>.
- Harshbarger and Associates. 1977. Overview Report of Hydrology and Water Development: Colorado Delta, United States and Mexico. Preliminary Report PR-235-77-2, preparado para International Boundary and Water Commission. 15 de Septiembre.
- Hill, BM. 1993. Hydrogeology, Numerical Model and Scenario Simulations of the Yuma Area Groundwater Flow Model: Arizona, California, and Mexico. Modeling Report No. 7. Phoenix: Arizona Dept. of Water Resources. October. [http://www.azwater.gov/ADWR/Hydrology/Modeling/documents/Modeling\\_Report\\_7.pdf](http://www.azwater.gov/ADWR/Hydrology/Modeling/documents/Modeling_Report_7.pdf)
- Hill, BM. 1996. Use of a Numerical Model for Management of Shallow Ground-Water Levels in the Yuma, Arizona Area. *Ground Water* 34: 397-404.
- Hoerling, M, D Lettenmaier, D Cayan, y B Udall. 2009. Reconciling projections of Colorado River streamflow. *Southwest Hydrology* 8:20-21,31.
- Holburt, MB. 1984. The 1983 High Flows on the Colorado River and Their Aftermath. *Water International* 9: 99-105.
- Leenhouts, JM, JC Stromberg, y RL Scott. 2006. Hydrologic requirements of and consumptive ground-water use by riparian vegetation along the San Pedro River, Arizona. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2005-5163, 154 p.
- Leopold, A. 1949. *A Sand County Almanac: With Other Essays on Conservation From Round River*. New York: Oxford University Press.
- Lite, SJ, y JC Stromberg. 2005. Surface water and ground-water thresholds for maintaining Populus - Salix forests, San Pedro River, Arizona. *Biological Conservation* 125: 153-167.
- Loeltz, OJ, y SA Leake. 1983. A method for estimating ground-water return flow to the lower Colorado River in the Yuma area, Arizona and California. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4220, 94 p.
- Mahoney, J, y S Rood. 1998. Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment—An integrative model. *Wetlands* 18: 634-645. DOI [10.1007/BF03161678](https://doi.org/10.1007/BF03161678).
- Medellín-Azuara, J, JR Lund, y RE Howitt. 2007. Water Supply Analysis for Restoring the Colorado River Delta, Mexico. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 133: 462-471.
- Nagler, PL, et al. 2005. Regeneration of native trees in the presence of invasive saltcedar in the Colorado River delta, Mexico. *Conservation Biology* 19: 1842-1852.
- Nagler, PL et al. 2007. Evapotranspiration in a cottonwood (*Populus fremontii*) restoration plantation estimated by sap flow and remote sensing methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 95-110. doi:[10.1016/j.agrformet.2007.02.002](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.02.002).
- Nagler, PL, EP Glenn, O Hinojosa-Huerta, F Zamora, y K Howard. 2008. Riparian vegetation dynamics and evapotranspiration for the riparian corridor in the delta of the Colorado River, Mexico: Implications for conservation and management. *Journal of Environmental Management* 88: 864-874.
- Nagler, PL, et al. 2009. Wide-area estimates of saltcedar (*Tamarix* spp.) evapotranspiration on the lower Colorado River measured by heat balance and remote sensing methods. *Ecohydrology* 2: 18-33. DOI: [10.1002/eco.35](https://doi.org/10.1002/eco.35).
- Nathanson, MN. 1980. *Updating the Hoover Dam Documents: 1978*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Denver: U.S. Government Printing Office.
- Olmsted, FH, OJ Loeltz, y B Irelan. 1973. Geohydrology of the Yuma Area, Arizona and California. U.S. Geological Survey Professional Paper 486-H. [http://pubs.er.usgs.gov/djvu/PP/pp\\_486\\_h.djvu](http://pubs.er.usgs.gov/djvu/PP/pp_486_h.djvu).
- Owen-Joyce, SL, y LH Raymond. 1996. An Accounting System for Water and Consumptive Use Along the Colorado River, Hoover Dam to Mexico. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2407.
- Pataki D, S Bush, P Gardner, D Solomon, y J Ehleringer. 2005. Ecohydrology in a Colorado River riparian forest: Implications for the decline of *Populus fremontii*. *Ecological Applications* 15: 1009-1018.
- Pitt, J, DF Luecke, MJ Cohen, EP Glenn, y C Valdés-Casillas. 2000. Two Countries, One River: Managing for Nature in the Colorado River Delta. *Natural Resources Journal*. 40: 819-864.
- Schaeffer, SM, DG Williams, y DC Goodrich. 2000. Transpiration of cottonwood/willow forest estimated from sap flux. *Agricultural and Forest Meteorology* 105: 257-270. DOI: [10.1016/S0168-1923\(00\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00186-6).
- Scott, RL, et al. 2008. Multiyear riparian evapotranspiration and groundwater use for a semiarid watershed. *Journal of Arid Environments*, doi:[10.1016/j.jaridenv.2008.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.01.001)
- Shafroth, PB, JC Stromberg y DT Patten. 2000. Woody riparian vegetation response to different alluvial water-table regimes. *Western North American Naturalist* 60: 66-76.
- Snyder, KA, y DG Williams. 2000. Water sources used by riparian trees varies among stream types on the San Pedro River, Arizona. *Agricultural and Forest Meteorology* 105: 227-240. doi:[10.1016/S0168-1923\(00\)00193-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00193-3).
- Stromberg, JC. 2001. Restoration of riparian vegetation in the southwestern United States: importance of flow regimes and fluvial dynamism. *Journal of Arid Environments* 49: 17-34.

- Sykes, Godfrey. 1937. *The Colorado Delta*. Publication no. 460. Washington, DC: Carnegie Institution.
- Tetra Tech, Inc. 2004. Lower Colorado River, Final Report, Proposed Pilot Channel Analysis. Prepared for U.S. Army Corps of Engineers, Los Angeles District.
- Tiegs, SD, y M Pohl. 2005. Planform channel dynamics of the lower Colorado River: 1976-2000. *Geomorphology* 69: 14-27.
- Waterman, J. 2010. *Running Dry: A Journey From Source to Sea Down the Colorado River*. National Geographic Society, 304 pp.
- Wiele, SM, SA Leake, SJ Owen-Joyce, y EH McGuire. 2009. Update of the accounting surface along the lower Colorado River. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5113. <http://pubs.usgs.gov/sir/2008/5113/>.
- Zamora-Arroyo, F, et al. 2001. Regeneration of native trees in response to flood releases from the United States into the delta of the Colorado River, Mexico. *Journal of Arid Environments* 49: 49-64.
- Zamora-Arroyo, F, et al. 2005. *Conservation Priorities in the Colorado River Delta, Mexico and the United States*. Preparado por el Sonoran Institute, et al. 103 pp. [http://www.sonoraninstitute.org/library/recoreading/doc\\_download/518-conservation-priorities-in-the-colorado-river-delta-mexico-a-the-united-states.html](http://www.sonoraninstitute.org/library/recoreading/doc_download/518-conservation-priorities-in-the-colorado-river-delta-mexico-a-the-united-states.html).

## Anexo A - Los Pozos de Monitoreo de los EE.UU. en el Tramo Limítrofe

Cuadrícula de Yuma	Nombre Alternativo	Período de mediciones	Cuadrícula de Yuma	Nombre Alternativo	Período de mediciones
1 9/16S-6 3/8W	BD-31	julio 1986 – actual	9S-10W	IBWC-34	abril 1955 – marzo 1991
2S-6 5/8W	IBWC-28	sept. 1954 – junio 1986	9S-10 1/2W	IBWC-35	sept. 1954 – oct. 2009
2S-6 5/8W	BD-32	julio 1986 – actual	9 1/8S-10 3/8W	BD-47	julio 1986 – actual
2 1/2S-6 7/8W	IBWC-28	julio 2003 – actual	10S-10 1/4W	IBWC-36b	nov. 1956 – oct. 2009
2 1/2S-6 3/4W	BD-33	julio 1986 – actual	10S-10 3/8W	BD-48	julio 1986 – actual
3S-7 1/16W	BD-34	julio 1986 – actual	10S-11W	IBWC-36	sept. 1954 – dic. 1966
3 1/8S-7 1/8W	IBWC-29	sept. 1954 – oct. 2009	10 1/2S-10 1/4W	BD-49	julio 1986 – dic. 2003
3 1/2S-7 1/2W	BD-35	julio 1986 – actual	11S-10 1/4W	BD-50	julio 1986 – actual
3 7/8S-7 5/8W	BD-36	julio 1986 – actual	11 1/2S-10W	BD-51	julio 1986 – actual
4 3/8S-7 3/4W	BD-37	julio 1986 – actual	12S-10 1/4W	IBWC-37	sept. 1954 – marzo 1983
4 13/16S-8W	BD-38	julio 1986 – actual	11 1/4S-10W	IBWC-37A	nov. 1984 – oct. 2009
5 1/4S-8 1/4W	BD-39	julio 1986 – actual	12S-10 1/4W	BD-52 (original)	julio 1986 – junio 1989
5 5/8S-8 5/8W	BD-40	julio 1986 – actual	12S-10 3/8W	BD-52 (nuevo)	dic. 2001 – actual
6S-8 7/8W	IBWC-30	sept. 1954 – oct. 2009	12 5/8S-10 3/8W	BD-53 (original)	julio 1986 – marzo 1998
6 3/16S-8 13/16W	BD-41	julio 1986 – actual	12 1/2S-10 3/8W	IBWC-37B (BD-53-nuevo)	dic. 2002 – actual
6 5/8S-9 1/8W	BD-42	julio 1986 – actual	14S-10 3/4W	IBWC-38 (original)	sept. 1954 – junio 1999
7S-9 3/8W	BD-43	julio 1986 – actual	13 3/4S-10 3/4W	IBWC-38 (BD-55)	dic. 2002 – actual
7S-9 1/2W	IBWC-31	sept. 1954 – marzo 2004	13 1/8S-10 1/2W	BD-54	julio 1986 – junio 1989
7 1/2S-9 7/8W	BD-44	julio 1986 – actual	14 1/8S-10 3/4W	BD-56	julio 1986 – actual
8S-10 1/8W	IBWC-32 & BD-45	sept. 1954 – actual	15S-11W	BWC-39 (BD-57)	sept. 1954 – actual
8S-10 1/2W	IBWC-33	julio 1970 – junio 1994	16S-11W	IBWC-40 (original)	sept. 1954 – julio 1964
8S-11W	IBWC-33	sept. 1954 – feb. 1967	16 1/8S-11 1/8W	IBWC-40 (nuevo)	enero 1965 – sept. 1974
8 1/2S-10 3/8W	BD-46	julio 1986 – actual	16S-11 1/2W	IBWC-40 (BD-58)	sept. 1977 – actual
8 3/4S-10 7/8W(D)	LCRP-9	oct. 2003 – actual			

Fuente: J. Nickell, *Bureau of Reclamation*, com. pers., abril 2010.

## Anexo B

Para: Michael Cohen, Pacific Institute

De: Kevin Wheeler, Water Balance Consulting LLC

Fecha: 26-Oct-11

Re: Análisis del tramo límite del Río Colorado

### Mensaje

El *Pacific Institute* contrató a *Water Balance Consulting LLC* para analizar la información existente relacionada con los flujos del Río Colorado entre el Lindero Internacional Norte (LIN) y el Lindero Internacional Sur (LIS). Este memorándum describe el análisis de estos flujos y ofrece sugerencias para estudios posteriores en esta región.

Este tramo, comúnmente denominado como Límite, tiene aproximadamente 24 millas de longitud, fluye generalmente de Norte a Sur y constituye una parte de la frontera entre Estados Unidos en el lado este y México en el oeste. El tramo se caracteriza por un lecho de cauce con meandros, con una geometría extremadamente irregular y variaciones en la sinuosidad y pendiente del cauce. El tramo límite queda directamente debajo de la Presa Morelos, que es la última estructura de control sobre el Río Colorado. Las aguas que fluyen por el cauce son típicamente irregulares y se originan a partir de ya sea:

- Flujos no almacenables (FNA's) que se liberan de la Presa Morelos, los cuales se originan por descargas de la Presa Parker, que exceden de la capacidad de desvío tanto de Estados Unidos como de México.
- Filtraciones de la Presa Morelos
- Descargas de la salida MODE#3 (Descarga del drenaje de *Wellton-Mohawk* al Río Colorado)
- Descargas del Canal de Desagüe Milla Once
- Descargas del Canal de Desagüe Milla Veintiuno

Las mediciones de los flujos se realizan en aproximadamente 7 sitios que son relevantes para el tramo límite y son publicadas por la *International Boundary and Water Commission (IBWC)*. Estos sitios son:

- El Río Colorado en el Lindero Internacional Norte
- En el Canal de Desagüe Cooper (*Valley Division, Yuma Project*)
- En la Bocatoma de la estructura de desvío de la Presa Morelos
- Agua de drenaje de *Wellton-Mohawk* descargada al Río Colorado
- En el Canal de Desagüe Milla Once (*Valley Division, Yuma Project*)
- En el Canal de Desagüe Milla Veintiuno (*Valley Division, Yuma Project*)
- El Río Colorado en el Lindero Internacional Sur

El objetivo principal de este análisis era revisar la información proporcionada por la IBWC y entender los métodos utilizados para determinar los flujos en el LIS. Esto consistió de 3 fases, incluyendo:

1. Conversaciones con el personal de la IBWC, para entender estos métodos y los retos particulares que existen para recabar información en este sitio.
2. Revisión de los métodos de curva de gastos y desplazamiento reportados por la IBWC para el LIS
3. Análisis comparativo de los flujos de entrada calculados para el tramo límite con los flujos reportados en el LIS

### Métodos de medición en el Lindero Internacional Sur

Las conversaciones con el personal de la IBWC se enfocaron en los métodos utilizados para medir el flujo en el LIS. Se conoce que en el pasado, los registros históricos de flujo se desarrollaban con el uso de un medidor de caudal tradicional; sin embargo, el personal de la IBWC indicó que el medidor del LIS está en continuo riesgo de ser objeto de vandalismo, por lo que actualmente no se encuentra ningún instrumento de registro instalado. Como alternativa, el personal de la IBWC realiza mediciones manuales del flujo y del nivel, si ocurren flujos en el sitio del medidor del LIS, cuando éstos se dan. Debido a la naturaleza manual de estas mediciones, es probable que cierta cantidad de flujos no sea capturada, debido a los aspectos prácticos de los horarios del personal y los tiempos en que ocurren los cambios en los flujos.

### Métodos de desplazamiento de curva de gastos

La segunda parte de este análisis se enfocó en entender los métodos aplicados por la IBWC para calcular los desplazamientos del medidor de caudal y los impactos potenciales sobre las medidas de flujo reportadas en el LIS. Se proporcionó una tabla de evaluación, que se designó como el año hidrológico 2005 y que relacionaba la altura del medidor con la descarga. Se proporcionó además, una hoja de computación de nivel y diagramas trazados a mano que aparentemente mostraban interpolaciones lineales de desplazamientos del medidor de caudal. El método para determinar los desplazamientos de curva de gastos se determinó analizando estas gráficas. Se observó que había puntos graficados que representaban alturas conocidas en el medidor de la superficie del agua y se calcularon los desplazamientos con base en mediciones periódicas. Específicamente, los flujos medidos, la profundidad observada en un limnómetro, y la profundidad de flujo nulo (valor de un limnómetro en el lecho de sedimento y el punto de contacto con el agua) se compararon con los valores en la tabla de evaluación del 2005. Con esta información, fue posible graficar los desplazamientos en los dos puntos extremos, así como calcular los desplazamientos en las profundidades intermedias. Aunque este método es técnicamente fiable, se observaron algunos valores mal graficados y no se pudo determinar una base lógica para diversos puntos de inflexión, particularmente cuando se utilizaban extrapolaciones más allá de desplazamientos medidos. Se necesitaría una comunicación más detallada con el personal de

la IBWC que produce estas gráficas trazadas a mano para explicar estas anomalías y podría clarificar las decisiones detalladas que se tomaron pero que no eran evidentes a partir de las gráficas en sí.

### Análisis comparativo de los caudales afluentes del tramo límite al medidor del LIS

La tercera parte de este análisis consistió en una comparación entre la cantidad calculada de agua que ingresa al tramo límite y la cantidad que se reporta en el LIS. Se supone que habría cierto volumen de pérdida hacia el subsuelo, y esta fase intentó estimar la cantidad de esas pérdidas.

La ecuación básica utilizada para determinar la cantidad de agua que ingresa al tramo límite incluía lo siguiente:

Río Colorado en el Lindero Internacional Norte

- + Canal de desagüe Cooper (*Valley Division, Yuma Project*)
- Bocatoma en la estructura de desvío de la Presa Morelos
- + Agua de drenaje de *Wellton-Mohawk* descargada al Río Colorado
- + Canal de desagüe Milla Once (*Valley Division, Yuma Project*)
- + Canal de desagüe Milla Veintiuno (*Valley Division, Yuma Project*)

Si los flujos calculados para la salida de la Presa Morelos (LIN + Desagüe Cooper – Desvío Presa Morelos) daban por resultado un flujo negativo, se suponía que esta contribución para el tramo límite era igual a cero.

Los resultados derivados de la anterior ecuación fueron graficados contra los flujos reportados en el medidor del LIS (el Río Colorado en el Lindero Internacional Sur). Un análisis año por año de esta comparación nos proporcionó una comprensión visual de las pérdidas por infiltración en el tramo límite. Sin embargo, también cabe señalar que la base con que se realiza esta comparación es potencialmente equívoca debido a la naturaleza indirecta de los valores comparados. Por ejemplo, la ecuación descrita anteriormente está dominada por la resta de dos números comparativamente grandes (Río Colorado en el Lindero Internacional Norte – Canal de entrada en la estructura de desvío de la Presa Morelos), por lo que pequeños errores en cualquiera de estas dos cifras pudiera resultar en grandes incertidumbres en la cantidad de la aportación al tramo límite por la Presa Morelos. En vista de que no se sabe que existan errores sistemáticos permanentes con la información proporcionada por la IBWC, la comparación a lo largo del periodo en el que disponemos de datos para todos estos elementos (1977-2005) arrojó información valiosa. Se puede obtener por conclusión que el promedio de los flujos diarios que ingresan al tramo límite de menos de 2 metros cúbicos por segundos ( $m^3/s$ ) o aproximadamente 70 pies cúbicos por segundo ( $ft^3/s$ ) rara vez produjeron flujos registrables en el medidor del LIS.

Se exploraron métodos numéricos para determinar tasas de pérdidas. Teniendo limitada información sobre las propiedades físicas del cauce, se exploraron tres métodos simplificados:

Ganancias/Pérdidas Constantes, Ganancias/Pérdidas Variables de Flujo, y Ganancias/Pérdidas por Filtraciones.

El método de Ganancias/Pérdidas Constantes utiliza una relación empírica para calcular las pérdidas del cauce, aplicando una reducción fija de la tasa de flujo y una proporción de flujo. Se resta una tasa de flujo fija del flujo dirigido y el residuo se multiplica por una proporción.

$$\text{Flujo de salida} = (\text{flujo entrante} - X) * (1-Y)$$

X = Valor fijo; Y = Fracción de pérdida (de 0 a 1)

El método de Ganancias/Pérdidas Variables es similar al método de Ganancias/Pérdidas Constantes, pero la fracción de pérdida es una variable y depende de la tasa del flujo promedio durante un periodo fijo anterior. Además, se puede seleccionar un valor umbral que asume un flujo igual a cero si el caudal afluente es menor a este valor.

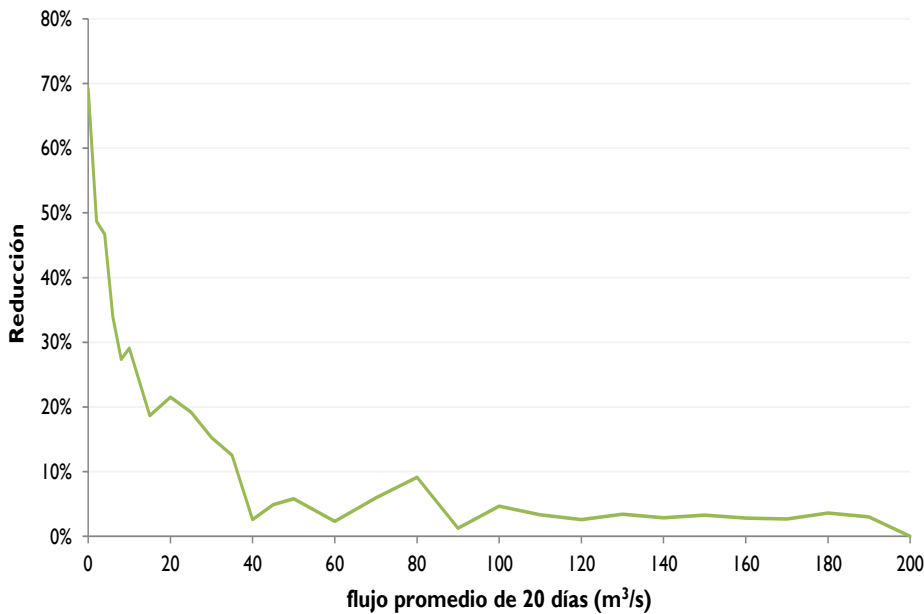
$$\text{Flujo de salida} = \text{Si (Caudal afluente} < X \text{ entonces } 0, \text{ si no, caudal afluente)} * (1-Y_z)$$

X = Valor umbral fijo;  $Y_z$  = Fracción variable de pérdida (de 0 a 1) como una función de z días previos

El método de Ganancias/Pérdidas por Filtraciones utiliza una tasa de infiltración constante en combinación con el área inundada en el tramo, para calcular las pérdidas del cauce. Esto requiere una función de elevación-descarga y una tasa de filtración.

El método de Ganancias/Pérdidas Constantes se consideró demasiado simple porque no tuvo en cuenta la gran variabilidad de pérdidas por infiltración ocasionada por los efectos de las condiciones antecedentes de humedad en el tramo límite. El método de Ganancias/Pérdidas por Filtraciones también era inviable sin adquirir información adicional sobre la hidráulica del cauce. Se aplicó el método de Ganancias/Pérdidas Variables, por medio de un modelo de hoja de cálculo y una función de optimización.

Para aplicar el método de Ganancias/Pérdidas Variables, los caudales afluentes calculados para el tramo límite se compararon con un valor umbral fijo. Si los caudales afluentes eran menores que este, se supuso que el flujo de salida sería cero. Si el caudal afluente era mayor a este umbral, los caudales afluentes se multiplicaban por un porcentaje de fracción de pérdida seleccionado de una tabla basada en el valor de flujo promedio durante un periodo seleccionado de días. A través de una inspección visual de la información, se determinó un valor umbral estimado de 2  $m^3/s$ , y se seleccionó un periodo de 20 días para representar el periodo máximo de influencia de las condiciones antecedentes. Se construyó una función objetiva que representaba la suma de los valores absolutos de las diferencias entre los caudales afluentes reducidos calculados y los flujos medidos en el LIS. Un algoritmo de optimización no lineal de Gradiente Reducido Generalizado (GRG) se utilizó para minimizar el resultado de esta función objetiva, modificando los valores de pérdidas de porcentaje para cada flujo a lo largo del periodo promediado.



**Figura 1. Modelo de flujos de reducción variable entre los caudales afluentes al tramo límite y los flujos reportados en el LIS.**

Los resultados constituyen una distribución de pérdidas de flujo que oscilan desde 70% para un flujo promedio de 20 días, a menos de 5% para flujos mayores de 50 m³/s, como se muestra en la Figura 1.

Se consideró un rezago de un día para el modelo, con base en la observación visual de los caudales afluentes pico en el tramo límite y los flujos pico que pasaban por el LIS. Podrían aplicarse varios métodos de rezago más sofisticados, pero requerirían un incremento en las suposiciones adicionales.

**Posibilidades de análisis adicionales**

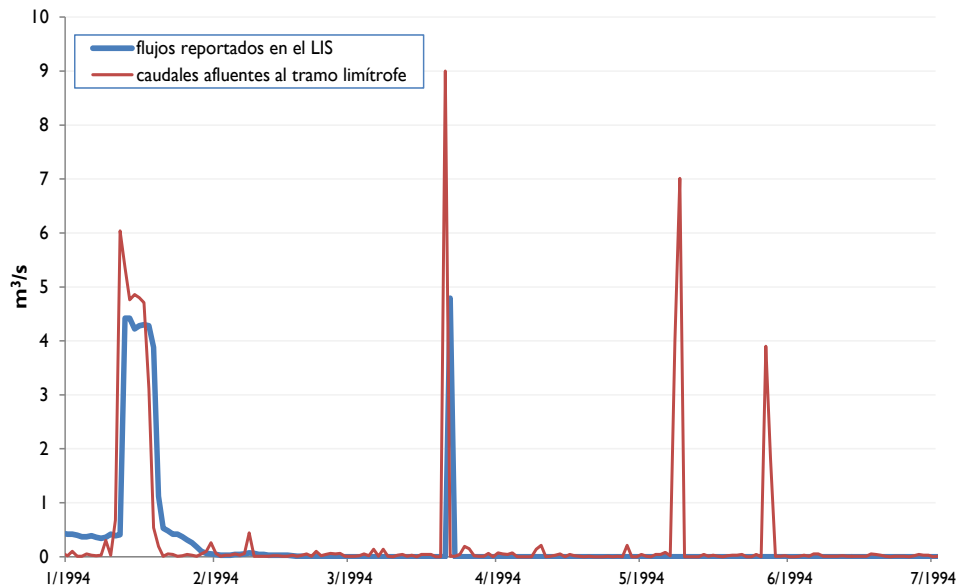
El modelo descrito anteriormente aplica un método simple de ganancias/pérdidas y de rezago, a los caudales afluentes al tramo límite, para calcular el flujo de salida del tramo límite. Hay muchas mejoras potenciales que pueden hacerse a este análisis, incluyendo lograr una comprensión más detallada de la calidad de la información en que se basó, modificar el análisis anterior para reflejar cualquier información equívoca reportada por la IBWC, y aplicar métodos alternativos para estimar mejor la cantidad y los tiempos de los flujos a través del tramo límite.

**Flujos no medidos que pasan a través del LIS**

La utilidad de este análisis está limitada por la precisión de la información misma. A lo largo de este análisis, se volvió aparente que al paso de los años se han utilizado diferentes métodos para recopilar información en el LIS. Al comparar los caudales afluentes al tramo límite con los flujos reportados en el LIS, parece ser que

algunos flujos no son captados en el medidor del LIS. La Figura 2 presenta un ejemplo de flujos potencialmente no detectados. Esto es de esperarse, dados los métodos manuales que se utilizan para recopilar información en el LIS, los cuales según la IBWC, son necesarios. El análisis anterior puede ser modificado para extraer dichos eventos y refinar los estimados de pérdidas.

Existe incertidumbre adicional en la información utilizada para calcular los caudales afluentes al tramo límite. Es probable que durante el periodo registrado, los métodos y el equipo que se usaron para medir los flujos hayan variado y, por lo tanto, pueden existir anomalías que afecten los resultados de este análisis. En este estudio no se aplicaron esfuerzos para analizar la calidad de la información sobre los caudales afluentes al tramo límite.



**Figura 2. Ejemplo de aparentes caudales afluentes al tramo límite, que no fueron captados por el medidor del LIS.**

**Posibles mejoras al ruteo**

Podrían hacerse mejoras al método de ruteo, con información y recursos adicionales. A continuación se proporciona una lista de diversos métodos de ruteo y la información requerida para aplicar estos métodos:

- Ruteo de rezago
  - Tiempo simple
- Ruteo “Straddle Stagger”
  - Rezago – Tiempo del recorrido a través del tramo



- Duración – Grado de propagación en un pico de inundación

#### Ruteo Muskingum

- Muskingum K = Tiempo de recorrido
- Muskingum X = Ponderación entre el caudal afluente y la influencia del flujo de salida (atenuación)

#### Ruteo Puls modificado (Ruteo de almacenamiento)

- Función de almacenamiento-descarga

#### Ruteo de Onda Cinemática

- Longitud del tramo
- Pendiente
- n de Manning
- Geometría del cauce

#### Ruteo Muskingum-Cunge

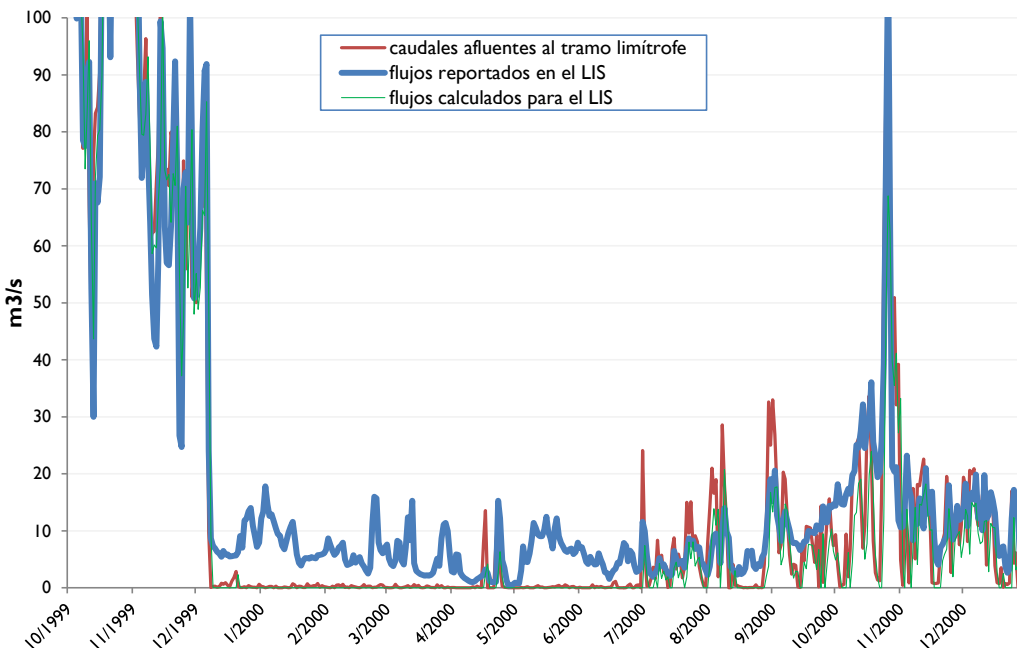
- Longitud
- Pendiente
- n de Manning
- Geometría del cauce

### Almacenamiento en las márgenes

Aunque en el análisis descrito anteriormente se consideró la modificación de tasas de pérdidas, no hay consideración para los efectos de almacenamiento en las márgenes que permite que flujos ocurran después de que las inundaciones en el cauce hayan decrecido. Observaciones como la Figura 3 en el análisis comparativo, muestran ejemplos cuando esto pudiera ocurrir o cuando puedan existir otras fuentes o sumideros de agua.

### Conclusión

El análisis presentado anteriormente intenta crear una comprensión de la información publicada por la IBWC que afecta los flujos en el tramo límite del Río Colorado. Los métodos para recopilar información en el LIS representan un reto, debido a las circunstancias que impiden la utilización de equipo más tradicional para la medición de caudal. Un análisis comparativo de los caudales afluentes al tramo límite con los flujos reportados en el LIS, muestra las similitudes entre estas dos series de datos. Las diferencias entre estas series de datos son potencialmente originadas por procesos físicos, tales como pérdidas por infiltración, atenuación, almacenamiento en las márgenes o problemas con los datos, tales como flujos no medidos o medidos erróneamente. Se utilizaron técnicas para estimar las pérdidas por infiltración y se aplicó un método simplificado de ruteo. Este memorándum presenta asimismo sugerencias para estudios posteriores. Se incluye un anexo de gráficas anuales que comparan datos del medidor del LIS, caudales afluentes al tramo límite y flujos calculados en el LIS, una vez que se toman cuenta los rezagos y las pérdidas descritas anteriormente.



\* Nota: Escalas modificadas para mostrar comparaciones pertinentes

**Figura 3. Flujos registrados en el LIS y no explicados directamente por caudales afluentes conocidos.**