

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	El río Verde, Oaxaca: estudio de sus cambios de morfología.
<i>Autor / Adscripción</i>	Joselina Espinoza Ayala José Alfredo González Hélène Rocchicoli Xiangyue Li Miguel Ángel Mejía Luis González-Hita Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Tecnología y Ciencias del Agua, 2(4): 131-147
<i>Fecha de publicación</i>	2011
<i>Resumen</i>	Se presenta un análisis del comportamiento morfológico del Río Verde, Oaxaca, México, en un tramo de 55 km, desde el sitio Paso de la Reina hasta la desembocadura, considerando su condición original, sin obras, y su cambio en la morfología después de la construcción de la presa derivadora Ricardo Flores Magón y los bordos de protección en ambas márgenes. El estudio se basa en la topografía e imágenes de satélite. Se evaluaron los cambios que han ocurrido desde 1964 hasta 2008, considerando los cambios en el perfil del thalweg, en su patrón de escurrimiento, en la sinuosidad del río y en los anchos del río.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1307

EL RÍO VERDE, OAXACA: ESTUDIO DE SUS CAMBIOS DE MORFOLOGÍA

• Joselina Espinoza-Ayala • José Alfredo González • Hélene Rocchicoli •
Xiangyue Li • Miguel Ángel Mejía • Luis González-Hita •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Se presenta un análisis del comportamiento morfológico del Río Verde, Oaxaca, México, en un tramo de 55 km, desde el sitio Paso de la Reina hasta la desembocadura, considerando su condición original, sin obras, y su cambio en la morfología después de la construcción de la presa derivadora Ricardo Flores Magón y los bordos de protección en ambas márgenes. El estudio se basa en la topografía e imágenes de satélite. Se evaluaron los cambios que han ocurrido desde 1964 hasta 2008, considerando los cambios en el perfil del *thalweg*, en su patrón de escurrimiento, en la sinuosidad del río y en los anchos del río. Las tasas de sedimentación obtenidas en cinco puntos muestran una variación notable, lo que indica la dinámica de los procesos de sedimentación en el río.

Palabras clave: cambios de morfología, ríos, presas.

Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de su Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos (CPH), ha identificado en la cuenca del Río Verde, ubicada en el estado de Oaxaca, México, el proyecto “Aprovechamiento Hidráulico Paso de la Reina, Oaxaca”, como una alternativa sustentable para contribuir a satisfacer la demanda de energía eléctrica en la porción central del país.

Dada la importancia que implica para México un proyecto de estas características, la CPH, a través del Centro de Anteproyectos del Pacífico Sur, programó el desarrollo de los estudios que permitan integrar la evaluación de impacto ambiental en el marco de los requerimientos de la legislación ambiental vigente. Para ello, la CFE encomendó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) realizar estudios específicos para determinar el impacto del sistema hidroeléctrico Paso de la Reina en la morfología del Río Verde desde la ubicación del sitio del proyecto hasta su desembocadura en el océano Pacífico.

Por sus características, la zona de estudio requiere de un análisis oportuno y detallado del impacto del proyecto hidroeléctrico en los recursos naturales debido a que en ella se ubica el Parque Nacional Lagunas de Chacahua, integrado por una compleja variedad de ecosistemas formados por bosques, estuarios y lagunas, tierras agrícolas de riego y temporal, pastizales, zonas de pesquerías, turismo, etcétera. Como primera etapa de los estudios, se analizan los cambios que ha experimentado el Río Verde debido a las obras hidráulicas que se han construido sobre el mismo.

Los ríos, en condiciones naturales, muestran cambios continuos debido a los procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos, los cuales modifican y crean los paisajes. Los cambios de forma en los ríos se originan por el ciclo natural del agua, el movimiento de los sedimentos en las avenidas, lo que está relacionado con las características de la cuenca. Los ríos ajustan su forma y dimensiones buscando un balance entre la aportación de sedimento y su capacidad de transporte. Los ríos tienden a alcanzar un equilibrio dinámico

en todos sus tramos; en dicho equilibrio intervienen las propiedades de los materiales del fondo y orillas, incluyendo la vegetación, los controles geológicos, la topografía del valle, el hidrograma anual y el gasto de sedimentos transportado. Para mantener el equilibrio, los ríos efectúan ajustes estacionales de su sección transversal, así como corrimientos laterales en las curvas y sedimentación en el lado interior de las mismas. Los cambios en la morfología y ajustes tienen lugar en respuesta a variaciones en cualquiera de los parámetros a través del tiempo o por las actividades humanas. Por ejemplo, cuando se incrementa el sedimento que llega al tramo debido a deforestación de la cuenca o cuando se modifica la capacidad de transporte por los remansos producidos al construir obras hidráulicas en los cauces (Maza-Espinosa, 1984).

Los estudios morfológicos juegan un papel importante en la planeación, diseño y mantenimiento de estructuras de ingeniería fluvial. La morfología de ríos ha sido una asignatura de gran desafío para científicos e ingenieros, quienes reconocen que cualquier esfuerzo en materia de ingeniería fluvial debe basarse en una comprensión adecuada de las características morfológicas del río en su estado inicial y las respuestas a los cambios impuestos por las actividades humanas (Chang, 2008).

La regulación del flujo en un río, y su consecuente ajuste en el patrón de transferencia de sedimento aguas abajo modifica el régimen del río aluvial (Petts, 1984). En la mayoría de los casos, el sedimento es interceptado en el embalse donde ocurre la regulación. Debido a la reducción en el transporte de sedimentos, el patrón del cauce cerca del punto de regulación puede cambiar de trezado a un río con dos cauces o con un solo cauce, con un incremento en la sinuosidad (ver ejemplos en Galay, 1983, y Williams y Wolman, 1984).

Para un análisis cualitativo de la respuesta de un río sin describir el comportamiento transitorio se usan los principios geomorfológicos. Este enfoque se emplea a menudo en la fase de concepción y planificación de un proyecto.

La famosa relación de Lane (1955), que representa el concepto de equilibrio, es $Q_s d \propto QS$, donde Q_s es la descarga de sedimento, d es el diámetro medio del sedimento, Q es el gasto descargado y S es la pendiente. Esta es una relación de balance. Si se altera una o más variables, es necesario ajustar una o más de las otras variables para restaurar el equilibrio. La relación de Lane sugiere que la pendiente del cauce es controlada por la descarga, la carga de sedimento y su diámetro. Si el nivel del cauce sube por la construcción de una presa, la pendiente aguas arriba se reduce. Aguas arriba ocurrirá agradación, con el fin de restablecer la pendiente original. Por otro lado, aguas abajo del cauce, en respuesta a la falta de alimentación de sedimento, comúnmente ocurre degradación, desarrollo de un curso más sinuoso y un aumento en el diámetro de sedimento del material de fondo. La agradación y degradación del fondo son acompañadas de cambios significativos en el ancho del cauce.

En este trabajo se presenta un estudio de la morfología del Río Verde en el tramo comprendido entre Paso de la Reina y la desembocadura. Se hace un análisis del comportamiento morfológico del Río Verde, considerando su condición original, sin obras, y su cambio en la morfología después de la construcción de la presa derivadora Ricardo Flores Magón y los bordos de protección en ambas márgenes, buscando evaluar los cambios que han ocurrido desde 1964 hasta 2008. El estudio se realizó considerando que la comprensión de las condiciones presentes del río con base en la información histórica disponible será de gran valor para la predicción de los cambios futuros (Schumm y Harvey, 2007).

Área de estudio

El Río Verde se localiza en la costa del estado de Oaxaca, México. Forma parte de la cuenca del Río Verde, que pertenece a la Región Hidrológica 20, (SARH). El tramo analizado tiene una longitud aproximada de 56 kilómetros desde el sitio Paso

de la Reina, propuesto para la construcción de la cortina del aprovechamiento hidráulico Paso de la Reina, hasta la desembocadura al océano Pacífico en el poblado El Azufre. Su configuración es irregular. Sus límites naturales son los siguientes: al norte, con la Sierra Madre del Sur; al este, con estribaciones de la misma sierra y con la llanura fluvial del río San Francisco; al sur, con el océano Pacífico, y con las llanuras de inundación de los sistemas lagunares Chacahua-Pastoría y del Monrroyo; al oeste, con estribaciones de la Sierra Madre del Sur y con pequeños valles fluviales de corrientes intermitentes (figura 1).

La llanura fluvial se sitúa en un rango de altitud que varía entre 0 y 35 msnm, desde su desembocadura hasta el sitio Calera; también existen cambios altitudinales importantes a lo ancho del plano fluvial. Estos son evidentes en el tramo del Río Verde entre Río Viejo y 4 km antes de la desembocadura, donde las márgenes del cauce principal o lecho menor se sitúan cinco o más metros por encima de áreas de depresión topográfica en las márgenes de la llanura, como el Zarzal, río San Francisco y la llanura de inundación lagunar de los sistemas

Chacahua-Pastoría y La Miniyua. De la llanura de inundación emergen macizos cristalinos con altitud variable, sin sobrepasar los 200 msnm. En cuanto a la topografía circundante a la llanura fluvial, por lo general es montañosa, sobrepasando los 400 msnm en algunos puntos, sobre todo al norte, este y oeste.

La mayor parte de las corrientes fluviales de la zona son estacionales, únicamente el Río Verde es permanente. Este río nace de la unión de los ríos Atoyac y Yolotepec, en los valles centrales de Oaxaca, y limita al norte con las cuencas de los ríos Papaloapan y Balsas; al sur, con el océano Pacífico y con las cuencas costeras de la región hidrológica 21; al oriente, con la cuenca del río Tehuantepec y con las cuencas de los ríos Ometepec y de La Arena. El volumen de escurrimiento medio anual —de conformidad con la información del periodo 1961-1985 de la estación hidrométrica Paso de la Reina— es de 5 252 millones de m³, con un máximo registrado en 1974 de 8 326 millones de m³ y un mínimo en 1982 de 2 754 millones de m³.

En esta región del país, la incidencia de ciclones es muy importante, por lo que la

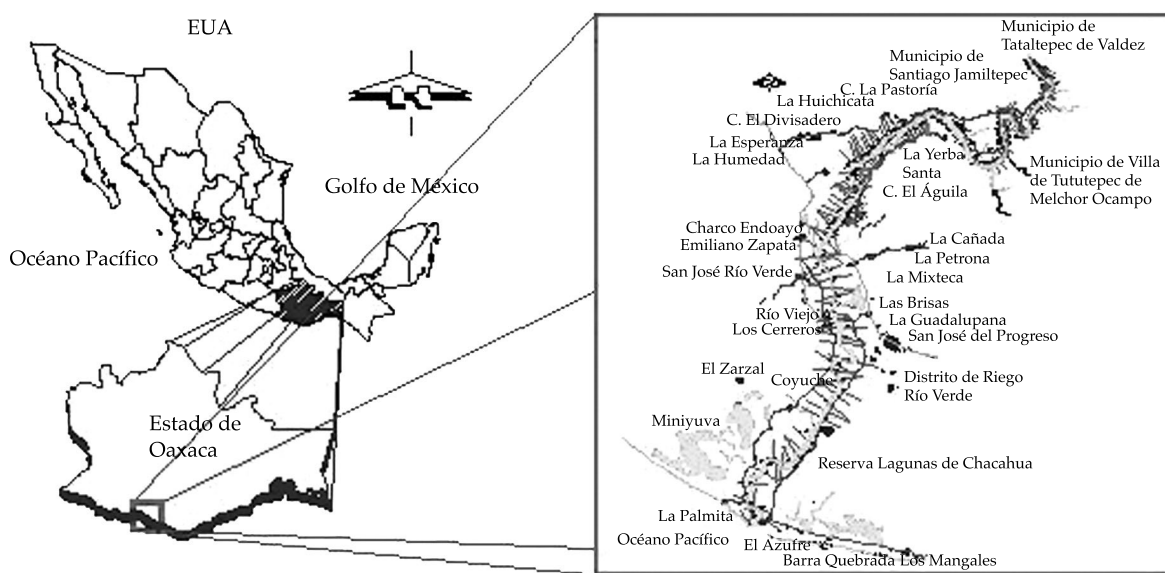


Figura 1. Localización de la zona en estudio (CFE, 2008).

cuenca del Río Verde es muy susceptible a la presencia de eventos meteorológicos extremos. De acuerdo con el régimen de los escurrimientos en el río y con base en los registros de dos estaciones ubicadas muy cerca del tramo de estudio, el periodo de lluvias es de junio-octubre, siendo el mes de septiembre cuando se han registrado los mayores escurrimientos, para tener un volumen medio anual cercano a los 5 000.00 Mm³; el estiaje es de noviembre a mayo. La precipitación media anual es de 1 228 mm. La temperatura media anual es de 23.2 °C. Los gastos medios diarios señalan que el río alcanza gastos cercanos a los 450 m³/s (figura 2), mientras que los gastos máximos presentados oscilan entre 500 m³/s hasta los 4 000 m³/s, teniéndose una mayor frecuencia en el rango de 1 000 a 1 500 m³/s. Los gastos mayores están asociados con la presencia de una tormenta tropical que incidió directamente en la cuenca del Río Verde (Gómez, 2008-2009).

En el estudio de morfología realizado por Zavala (1985) se describe al Río Verde de la

siguiente manera: en la Sierra Madre del Sur, el control estructural se hace patente a través de profundas cañadas y en su mayor pendiente características que le confieren a la corriente una mayor capacidad de evacuación del caudal y de transporte de sedimentos, persistiendo un proceso continuo de profundización del lecho; de esta manera se tiene un valle fluvial eminentemente erosivo con lecho menor estrecho, con depósitos de gravas y arenas gruesas, sin llanura fluvial, y con un tirante mayor que en el de su curso bajo. Al abandonar la sierra y penetrar en la llanura fluvial, el Río Verde experimenta un cambio brusco en su pendiente, hecho que se traduce en modificaciones profundas en la morfología de su cauce, motivadas por la pérdida de capacidad de transporte, sucediéndose el aluvionamiento del lecho menor; de esta manera, la disminución del gradiente del río origina una pérdida de profundidad del lecho por el abandono de los materiales gruesos, disminuyendo así su tirante, por lo que en

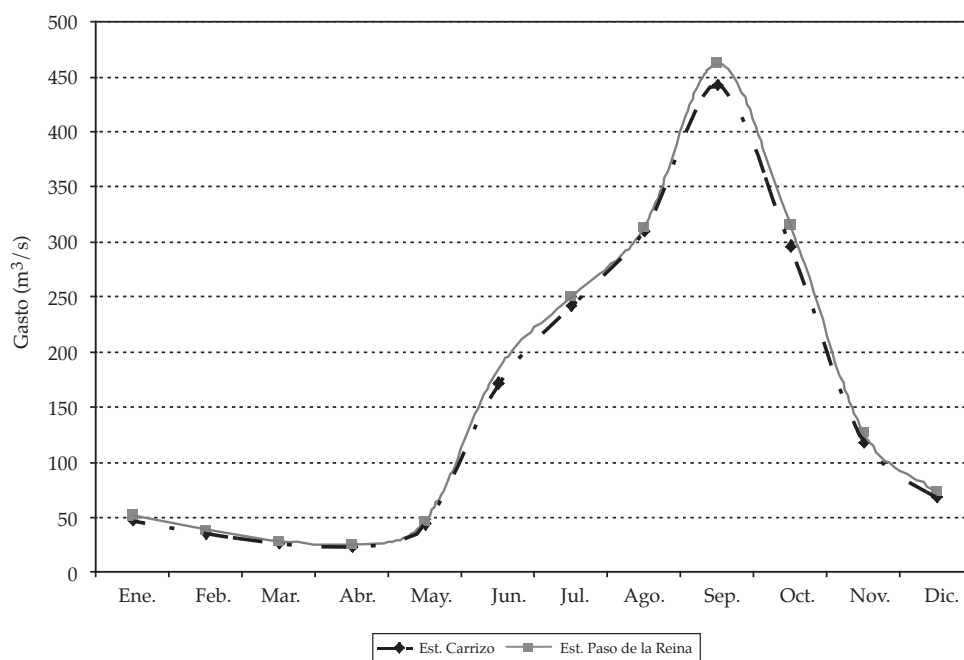


Figura 2. Gastos medios diarios en la zona de estudio del Río Verde.

compensación se sucede una ampliación sustancial del lecho, garantizándose con ello el paso de los flujos.

En la zona de estudio se localiza el Distrito de Riego 110 Río Verde Progreso, cuyas componentes principales son las siguientes: a) *presa derivadora* de tipo flotante sobre el cauce del Río Verde, con obras de toma en ambas márgenes, diseñadas para derivar un gasto de 11.56 m³/seg hacia la margen izquierda y 4.93 m³/seg hacia la margen derecha; b) *red de distribución*, constituida por canales laterales, sublaterales, ramales y subramales de tipo trapecial, revestidos de concreto limpio, con una longitud total de 222 km; c) *red de drenaje a cielo abierto*, drenes de sección trapecial, con un desarrollo total de 262 km, con 85 uniones de drenes y 176 entradas pluviales; d) *bordos de protección*, que consiste de 21.96 km de bordos de protección contra inundaciones a las zonas de riego en ambas márgenes del Río Verde (Alfaro y Sánchez, 2002).

Metodología

En este trabajo se realizó un análisis de la morfología del río en su condición actual, donde se consideraron las cartografías presentadas en Zavala (1985), así como tres imágenes de satélite antes de la construcción de la presa derivadora Ricardo Flores Magón, que fue inaugurada en 1992; cinco imágenes de satélite; una ortofoto, y una imagen Quick-Bird 2006 después de la construcción de la presa, así como información de campo y topobatimetría del río para los años 1964 y 2007-2008, esta última levantada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Se tomaron muestras de sedimento a lo largo del río para su caracterización. Las cartografías e imágenes de satélite se ubicaron de acuerdo con las coordenadas y se superpusieron para hacer una comparación entre las diversas imágenes, y así poder describir y cuantificar los cambios ocurridos a través del tiempo. Se requirió información de las estaciones hidrométricas Paso de la Reina y El Carrizo

para conocer los gastos correspondientes a la fecha de las imágenes.

Resultados

Caracterización del sedimento

Para el tramo de estudio del Río Verde, la granulometría varía desde gravas (25 mm de diámetro en promedio) hasta arena limosa (2 mm de diámetro). Para efectos de análisis, el tramo del río se puede caracterizar en tres zonas: alta, media y baja. La primera zona corresponde al tramo del río que se encuentra confinado entre las formaciones rocosas en la zona de montañas y sin posibilidad de movimiento; esta zona está comprendida entre el kilómetro 0+000 al 20+400, a partir del sitio Paso de la Reina. La segunda zona, denominada media o de transición, se ubica entre los cadenamientos 23+700 y 37+600, y en este tramo el río tiene la libertad de moverse lateralmente y formar meandros, y está limitada por la frontera física que representa la presa derivadora; esta frontera altera el tránsito libre de los sedimentos. La tercera zona comienza inmediatamente aguas abajo de la presa derivadora (km 39+300) y se prolonga hasta la desembocadura al océano Pacífico (km 56+100); esta zona es la de menor pendiente y por tanto menor velocidad, en donde se observa mayor movilidad y meandro del cauce.

Para caracterizar los sedimentos se tomaron 310 muestras distribuidas en 92 secciones a lo largo del cauce. En la figura 3 se presenta en forma gráfica la distribución del D_{50} a través del cauce. De acuerdo con esta gráfica, la zona alta es la que contiene los sedimentos de mayor tamaño, mientras que en las zonas media y baja el tamaño más fino de las partículas puede ser resultado de la erosión de la corriente en el tramo aguas arriba (Williams y Wolman, 1984). Se observa de manera consistente que el sedimento más grueso se localiza en el centro del cauce y el más fino en la margen derecha.

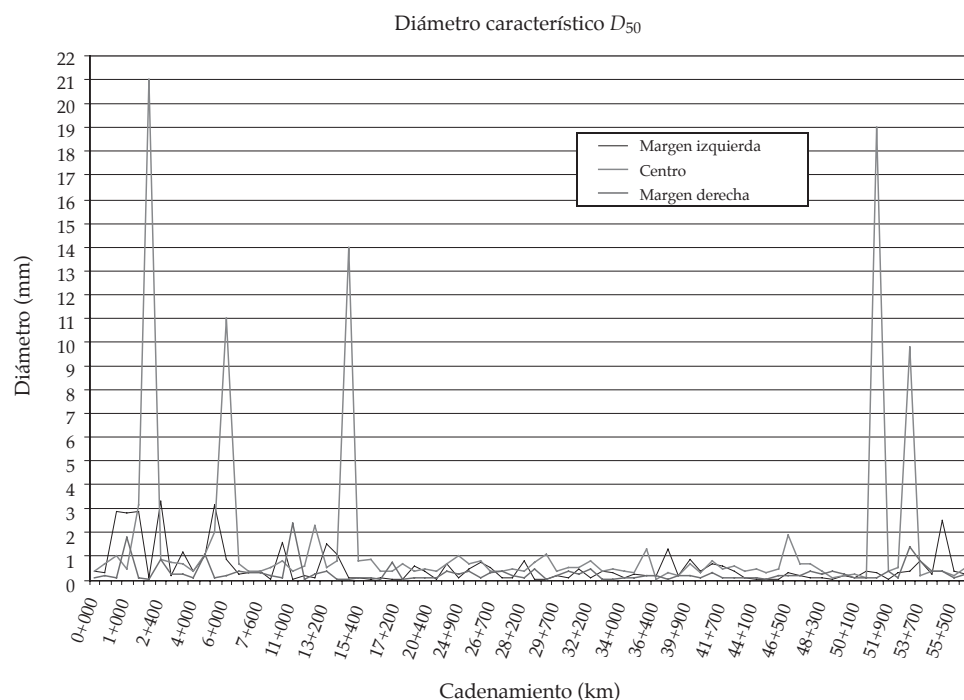


Figura 3. Distribución del diámetro característico D_{50} en el cauce principal (medidos en 2008).

Cambios morfológicos en el periodo 1964-2008

Cambios en el perfil longitudinal

Para conocer cómo se ha modificado la elevación de la superficie del fondo del río se definió el *thalweg* o línea que siguen los puntos más profundos a lo largo del fondo del río, para las secciones transversales del río en 1979, esto con el objetivo de contrastarlo con el *thalweg* de la topografía más reciente, 2007-2008 (figura 4). Para definir los cambios en la morfología se consideraron los sitios tomados como referencia en el trabajo de Zavala (1985) (ver figura 5).

En la figura 6 se presenta la comparación del *thalweg* de 1979 con el de 2007-2008. En ésta se observa que el tramo del kilómetro 20 al 25, el río se encuentra en proceso de erosión; en este tramo, el río es recto y trenzado. Del

kilómetro 25 al 32 se observa sedimentación de aproximadamente un metro; del kilómetro 32 al 41 se observa sedimentación de aproximadamente dos metros; el aumento de la sedimentación se debe a los efectos del remanso que causa la presa derivadora, lo cual hace que disminuyan las velocidades en el río y favorece la sedimentación. Del kilómetro 41 al 49 se observa erosión por efecto de la presa derivadora aguas abajo y al efecto de los bordos de protección que confinan el ancho del cauce. Del kilómetro 49 hasta la desembocadura se observa un incremento de la erosión de hasta cuatro metros en el sitio Espiga Verde; el aumento de la erosión puede ser por efecto de las avenidas en época de huracanes, que arrastran el sedimento del río por el mar. La pendiente longitudinal, aguas arriba de la derivadora $S = 0.069\%$ es menor que hacia aguas abajo de la misma $S = 0.104\%$, lo que indica sedimentación aguas arriba. El efecto de

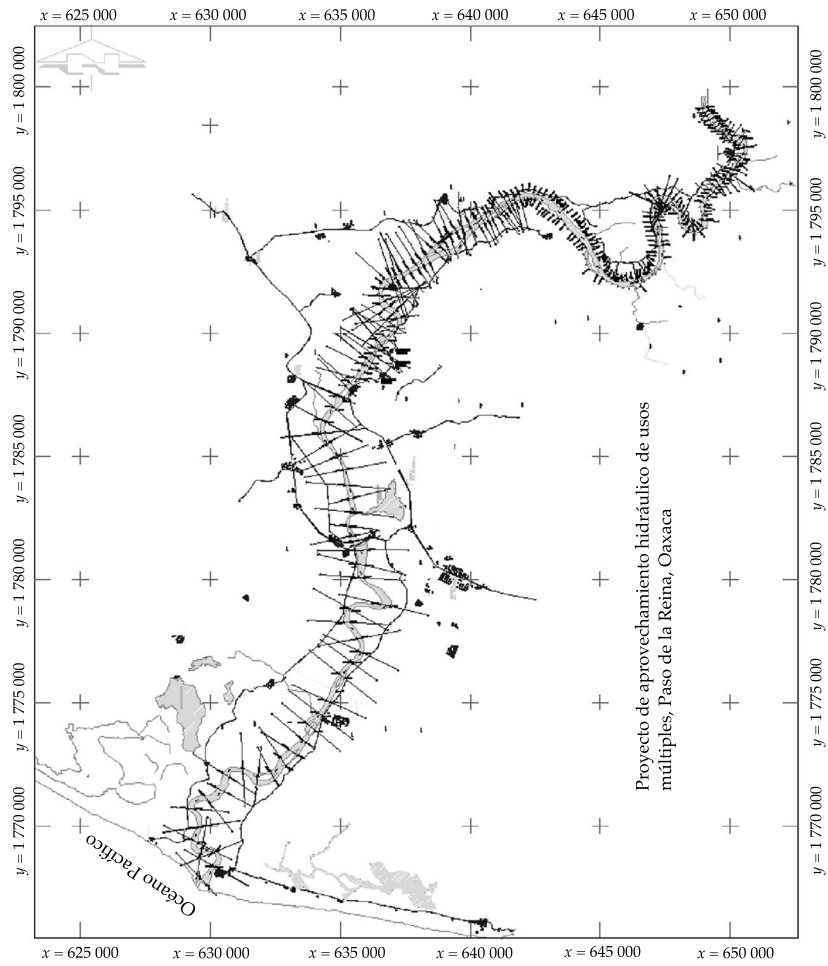


Figura 4. Topografía del Río Verde, Oaxaca, 2007-2008 (CFE, 2008).

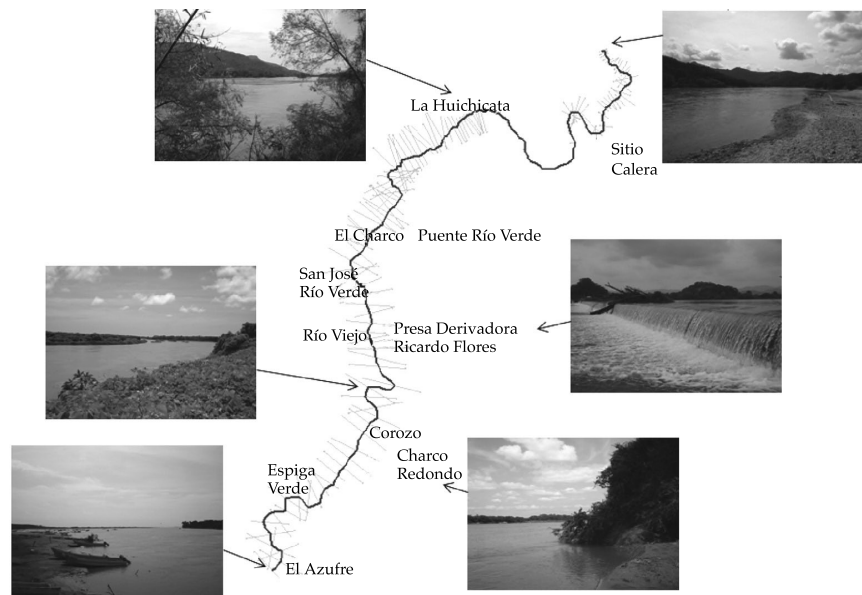


Figura 5. Ubicación de sitios a lo largo del río.

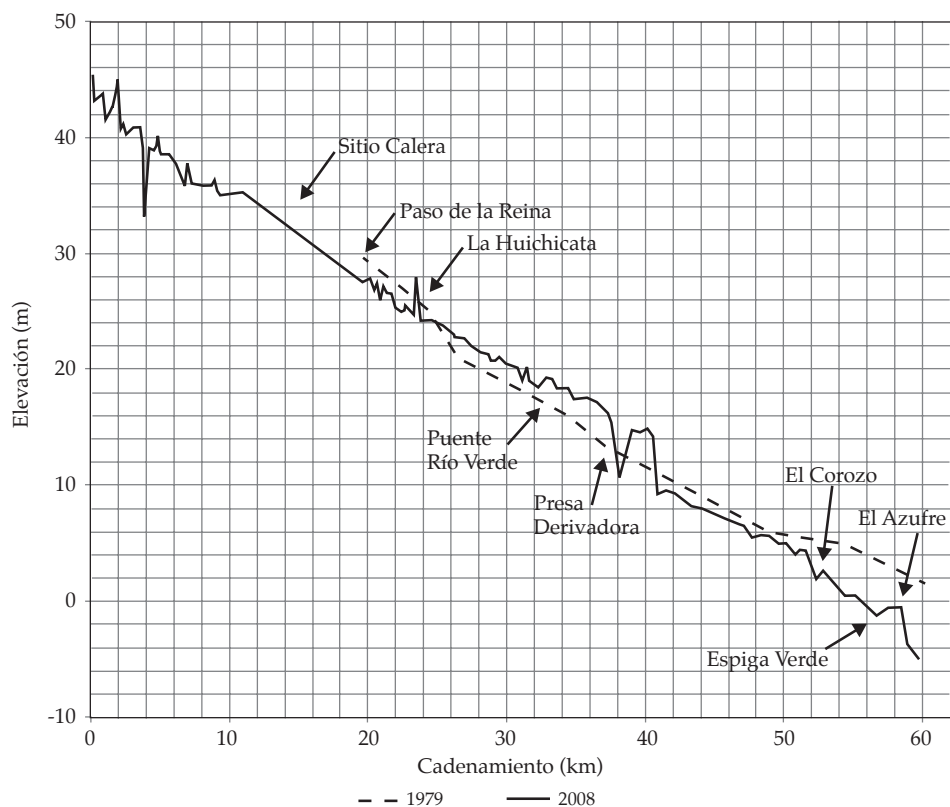


Figura 6. Perfil longitudinal en el fondo del río en el thalweg 1979-2008.

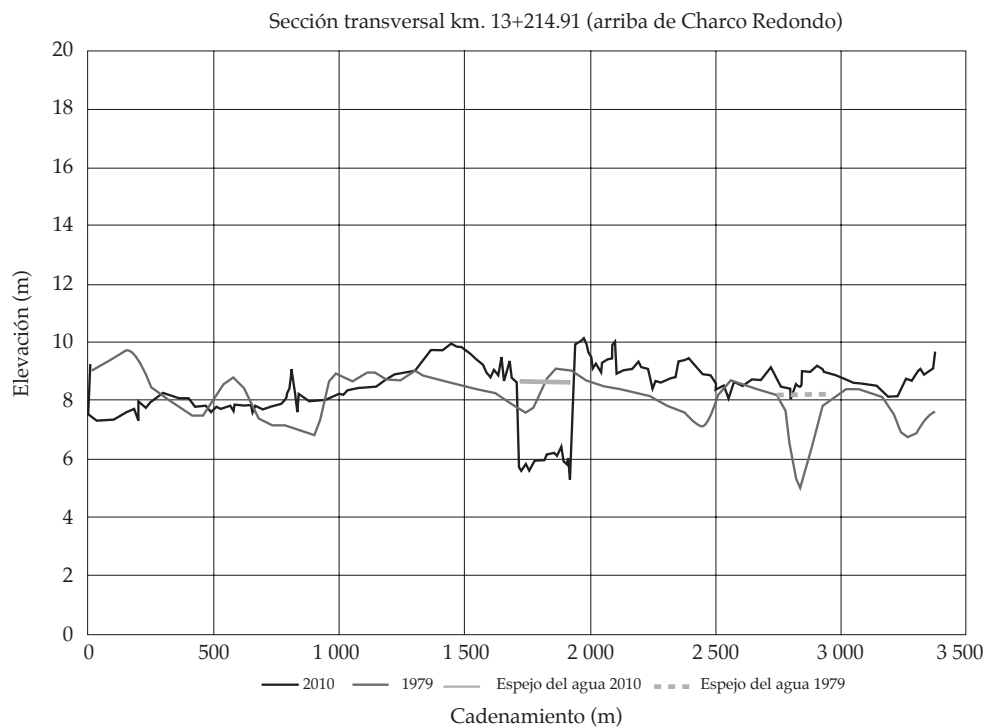


Figura 7. Cambios en la sección transversal del Río Verde a una distancia de 13 kilómetros aguas abajo de la presa derivadora.

la erosión en aguas abajo de la presa derivadora se muestra en la figura 7, donde observan los cambios en una sección transversal ubicada 13 kilómetros aguas abajo de la presa, cerca de Charco Redondo, y que son consistentes con lo observado en el perfil longitudinal.

Patrones del Río Verde en planta, 1964-2008

Para el análisis morfológico se consideraron las cartografías presentadas en Zavala (1985) para los años de 1964, 1967 y 1978-80, así como las imágenes de satélite LandSat y una ortofoto B/N, material proporcionado por la CFE y por el área de geomática del IMTA, así como la topobatimetría del río 2007-2008, facilitada por la Comisión Federal de Electricidad.

La imagen de satélite de 1979 se superpuso al plano del mismo año; en ella se observa que el tramo que sigue a la Huichicata es recto, pero de San José Río Verde hacia la desembocadura se presenta un meandreo suave, que queda confinado en la línea que se traza en el plano del río para 1979, y que define la zona o lecho de inundación. En estas imágenes se observa el comportamiento del río con un tramo de meandreo muy marcado entre la Calera y la Huichicata; estos meandros no se mueven, permanecen confinados por barreras naturales; después se observan tramos rectos con patrón anastomosado formando islas y brazos con zonas de depósito de sedimentos. A partir de 1992 entró en funcionamiento la presa derivadora y también se construyeron los bordos de protección para las áreas de cultivo tanto en la margen derecha como izquierda del río, prolongándose hacia aguas abajo de la presa.

Efectos de la presa derivadora Ricardo Flores Magón en la morfología del Río Verde

Efectos aguas arriba de la presa Flores Magón

El comportamiento del río ha cambiado con la presencia de la derivadora. Hacia aguas arriba

ha provocado remanso de la corriente y por lo tanto un incremento de la sedimentación, al igual que un menor ancho del río. En 1998 se tenía un río con barras laterales e islas de patrón trenzado. En 2006, las barras laterales se consolidaron y están cubiertas de vegetación, y el río muestra un solo cauce más estrecho; esto se puede observar en la figura 8, donde se presenta una fotografía del vuelo en helicóptero realizado por personal de la CFE en marzo de 2009, donde se aprecia un gran porcentaje del ancho del río ocupado por la sedimentación debido a la presencia de la presa derivadora. Aguas arriba de la derivadora, la sedimentación es notable hasta la población de San José Río Verde.

El remanso incrementa los niveles del agua y esto ha disminuido la capacidad de conducción del río. Derivado de ello, en el tramo del río que se localiza a la altura del puente carretero, en la actualidad con un gasto de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, se desborda el río de acuerdo con la simulación numérica tanto con *HEC-RAS* como con *FLO-2D* (González et al., 2008-2009), contra un gasto de desborde de $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ antes de la construcción de la derivadora (Maza y García, 1976).



Figura 8. Efecto de sedimentación aguas arriba de la presa derivadora.

Zona Baja. Presa derivadora-desembocadura

La zona baja del río, considerada de la presa derivadora a la desembocadura, se analiza dividiéndola en dos subtramos: a) de la presa derivadora hasta el Parque Nacional Chacahua y b) del parque a la desembocadura.

Presa derivadora al Parque Nacional Chacahua

Los cambios que se observan son de un patrón de río trenzado con islas centrales y más ancho a un patrón con meandros con un solo cauce, cuyo ancho se ha reducido por la falta de aporte de sedimentos. Las barras laterales se han consolidado con el paso del tiempo y actualmente se encuentran cubiertas de vegetación e incorporadas al paisaje.

Hacia aguas abajo de la presa, hasta el sitio El Corozo, se observa la evolución de los meandros, que incrementan su tamaño

gradualmente en los años siguientes a la construcción de la presa. Asimismo, como todas las imágenes son para la época de estiaje, es posible observar islas muy grandes tanto aguas arriba como aguas abajo de la presa. En la figura 9 se presenta la evolución de los meandros en la zona cercana a la presa derivadora.

Tramo de río del Parque Nacional Chacahua a la desembocadura

En este tramo se observa en forma más clara el cambio del río de un patrón anastomosado o trenzado a un patrón con meandros. El río forma un solo cauce con curvatura más pronunciada; las barras laterales que se observan en la ortofoto de 1998 (figura 10) se consolidan y pasan a ser parte del terreno con vegetación en la imagen de diciembre de 2006 (figura 11). En esta misma figura se muestra un cauce más definido con barras alternadas en

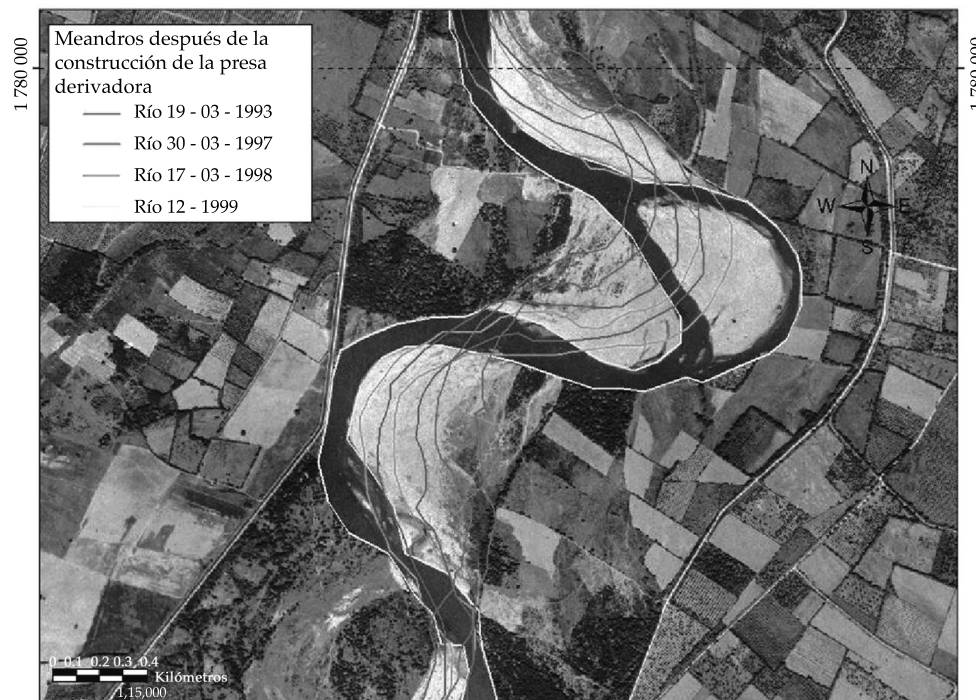


Figura 9. Evolución de los meandros después de la construcción de la presa derivadora aguas abajo de la misma, en los años 1993, 1997, 1998 y 1999.



Figura 10. Zona baja del Parque Nacional Chacahua a la desembocadura (ortofoto, 1998).

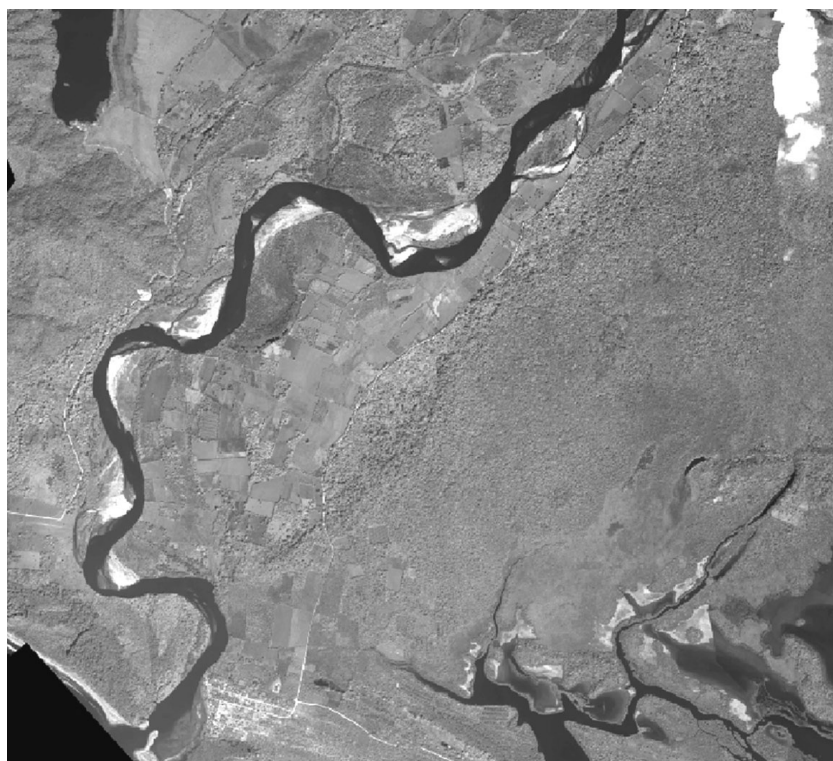


Figura 11. Zona baja del Parque Nacional a la desembocadura (imagen QuickBird, diciembre de 2006).

las curvas, lo cual es típico de ríos con meandros. Este comportamiento se observa en proceso de evolución; el cambio se continuará presentando en este tramo de río, por lo que se incrementará la sinuosidad.

Evolución del ancho de las secciones a lo largo del Río Verde en el periodo 1979-2008

Uno de los indicadores de los cambios que se han efectuado en el río es conocer cómo se ha modificado su ancho, observando la influencia de la presa derivadora. En la figura 12 se presentan los anchos del río tomados de la topobatemetría de 2008, antes de la construcción de la presa derivadora, en ésta se observa que los anchos del río varían entre 200 y 600 metros.

En la figura 13 se presentan los anchos después de la construcción de la presa derivadora; los anchos más grandes se tienen en una isla que se forma en una curva cerca de la Huichicata y en la presa derivadora. Para el

año 1993 se observa que los anchos del río son pequeños y esto se debe a que corresponden al mes de marzo; el gasto fue de 25 m³/s; a la altura de la Huichicata, el río pasa por un solo brazo. Los anchos del río para el año 1999 en el tramo comprendido entre el kilómetro 44 y el 50 muestran un incremento, el cual se puede explicar observando que corresponde a los meandros que se forman aguas abajo de la presa derivadora.

Gasto formativo

De acuerdo con Leopold *et al.* (1964), el gasto formativo, que es el responsable del mantenimiento de la forma de un río, es aquel que puede pasar por la sección transversal de un río sin llegar a desbordar. Leopold (1994) concluyó que en la mayoría de los casos el periodo de recurrencia para el gasto de desborde es de 1 a 2.5 años. En este estudio se obtuvieron diferentes gastos formativos a partir de métodos estadísticos para un cierto periodo de retorno, tomados de la estación hidrométrica Paso de la Reina (cuadro 1).

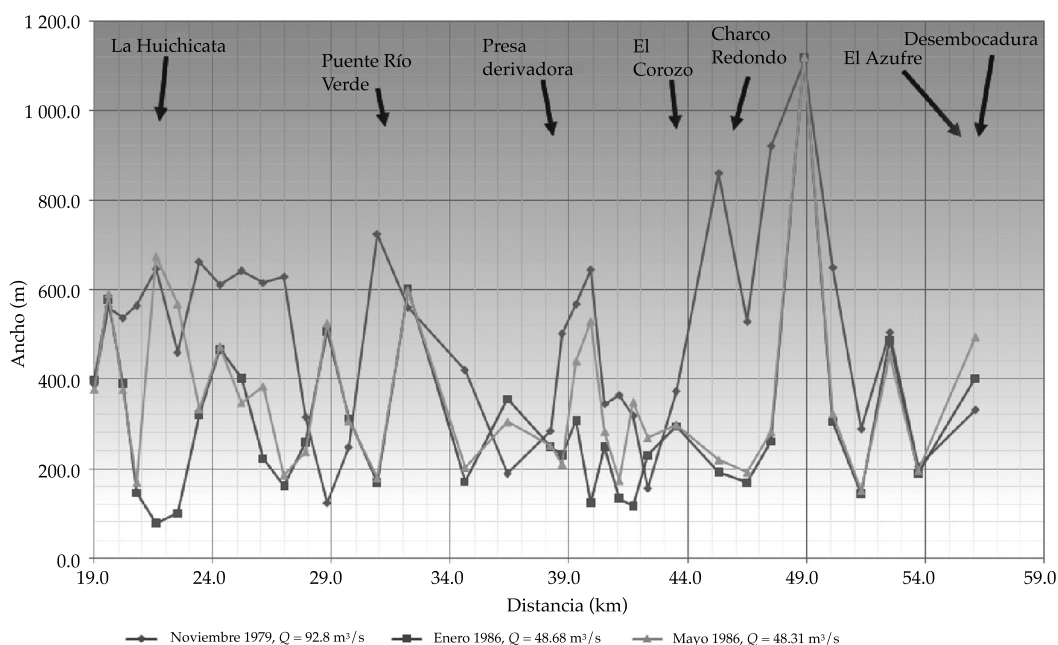


Figura 12. Anchos a lo largo del Río Verde de 1979-1986, antes de la construcción de la presa derivadora.

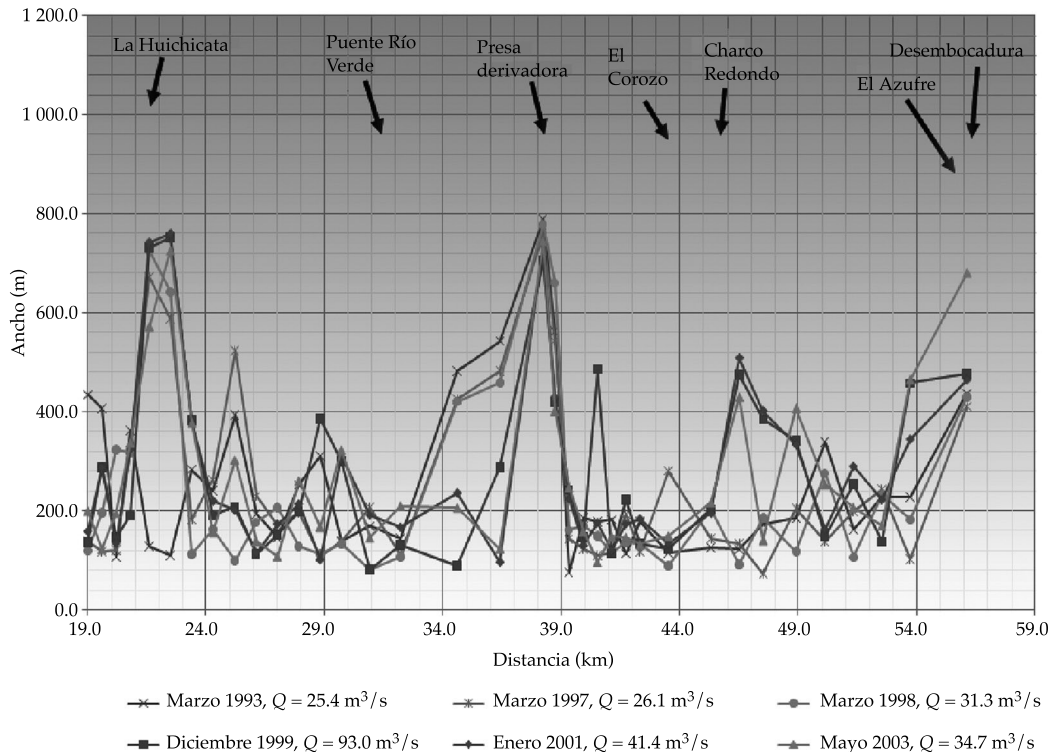


Figura 13. Cambios en el ancho a lo largo del Río Verde de 1993-2003, después de la construcción de la presa derivadora.

Cambios en la sinuosidad

Los cambios en la sinuosidad del río de 1979 a 2008 se determinaron dividiendo el río en cinco tramos (figura 14). En esta figura se observa que en el tramo presa derivadora-El Corozo se incrementó la sinuosidad y pasó de ser recto en 1979 a ser meándrico después de la construcción de la presa derivadora. Los demás tramos conservan el mismo patrón de acuerdo con el criterio de Leopold *et al.* (1964).

Un hecho evidente en todas las imágenes mostradas es que la configuración o patrón del trazo del río está cambiando continuamente, lo que indica que esta zona del Río Verde es muy susceptible a los procesos de transporte de sedimentos. Ello se confirma desde el punto de vista de sedimentación, para la zona del río aguas arriba de la presa derivadora; se ha encontrado que en los últimos sesenta años

Cuadro 1. Gasto formativo.

Periodo de retorno (años)	Q (m³/s)
1.4*	1 006.85
2**	1 406.11
5 años**	2 112.87

* Método de Nash aplicado. Fuente: Maza y Flores (1976).

** Gastos obtenidos considerando un ajuste de una función Gumbel doble para los años 1968-1985 (28 años), considerando una $P = 0.80$ y los parámetros Alfa 1 = 407.97, Beta 1 = 1 138.68, Alfa 2 = 1 515.62, Beta 2 = 2 911.78 y un error 423.21, Fuente: Gómez (2008-2009).

se ha tenido una tasa de sedimentación de 0.69 cm/año aguas abajo del puente San Antonio Río Verde y de 0.89 cm/año en la Huichicata. Las máximas tasas de sedimentación se encontraron en el puente San Antonio Río Verde con 1.72 cm/año y en Charco Redondo con 2.07 cm/año. En El Azufre, la tasa de sedimentación fue de 1.15 cm/año. Las tasas

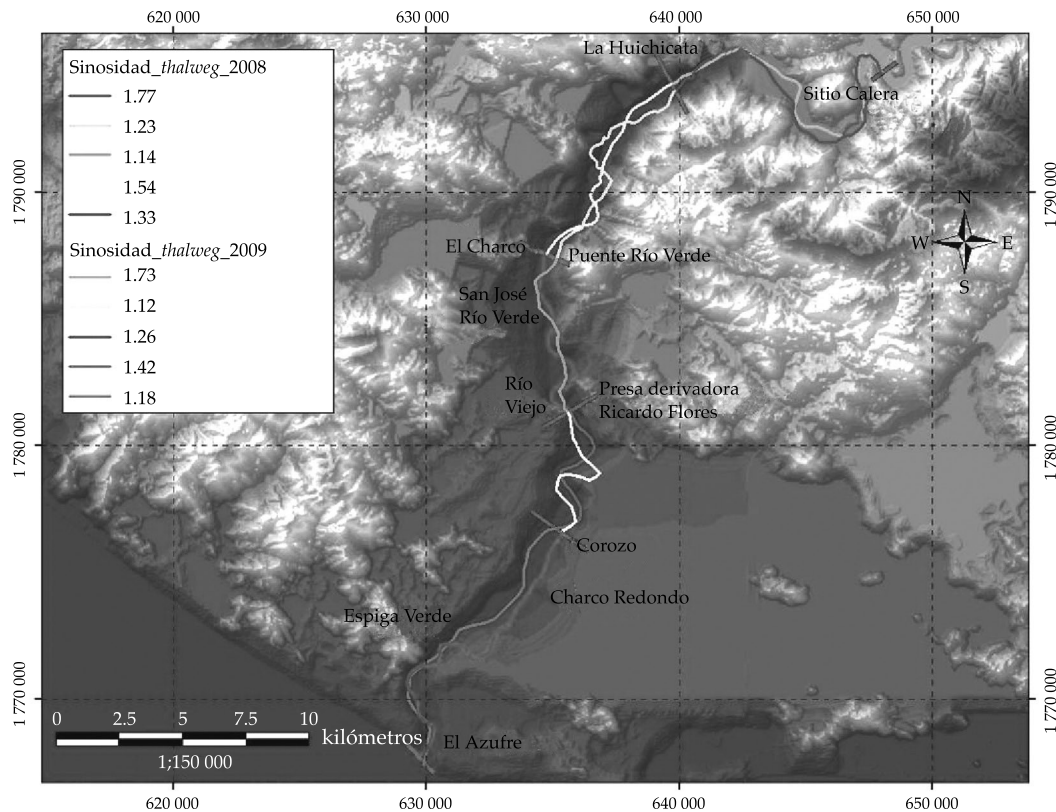


Figura 14. Cambios en la sinuosidad en el *thalweg* de los tramos en que se dividió el río en 1979 y 2008.

de sedimentación se determinaron a través del fechado de núcleos inalterados de sedimento mediante isótopos radiactivos P_b -210 y C_s -137 (González *et al.*, 2008-2009). Los resultados indican que en los sitios muestreados en el Río Verde, la dinámica del río ha permitido que ocurran depósitos continuos de material en los últimos setenta años.

El río en la zona de estudio se encuentra en un proceso dinámico de erosión y sedimentación, cuya respuesta está ligada directamente con la magnitud de los escurrimientos en épocas de avenidas y a las características del material que conforman al cauce, de tal manera que de un año a otro puede tenerse una modificación sustancial de la geometría del cauce, motivado principalmente por la presencia de eventos meteorológicos extremos.

Conclusiones

El análisis de las imágenes de satélite permitió observar una serie de cambios en el comportamiento del Río Verde. Antes de la construcción de la presa derivadora, el río se caracterizaba por un patrón del río anastomosado con dos o más canales trenzados, indicando que la carga de sedimentos es mayor de lo que puede transportar el río durante los flujos normales.

La influencia de la presa derivadora en la morfología del río es evidente. Se observa un impacto en el área cercana a la presa tanto aguas arriba como aguas abajo. Aguas arriba, el remanso del agua llega más allá de la laguna Lávalo, esto ha favorecido la sedimentación, la cual se ha incrementado. Por la operación de la presa en estiaje se genera una gran isla en

la parte central aguas arriba y aguas abajo de la presa; sin embargo, en época de avenidas, el agua cubre completamente la isla y llena todo el ancho del lecho de inundación hasta los bordos de protección.

Aguas abajo se modifica el patrón del río. Por el cambio en el hidrograma y después de la presa derivadora, se inicia un tramo con meandro, el cual se hace más pronunciado al transcurrir el tiempo y se desplaza aguas abajo, cambiando la configuración del tramo presa derivadora-El Corozo de un tramo recto a un tramo con meandro.

En la morfología general del río después de la construcción de la presa se identificaron cinco tramos con las siguientes características:

Tramo	Sinuosidad	Morfología
La Calera-Huichicata	1.77	Meandro
Huichicata-puente Río Verde	1.23	Recto
Puente Río Verde-presa derivadora	1.14	Recto
Presa derivadora-El Corozo	1.54	Meandro
El Corozo-desembocadura	1.33	Recto

Se efectuó un análisis de los anchos en el río en el tramo comprendido entre el sitio La Huichicata y la desembocadura. Debido a la construcción de la presa derivadora, el ancho del río disminuyó, aumentado solamente en la sección donde se ubica la presa derivadora, en la curva de la Huichicata y aguas abajo donde se terminan los bordos de protección, donde el río aumenta su ancho moviendo una gran cantidad de sedimento.

Asimismo, con la presencia de la presa derivadora se observan cambios en la dinámica de la sedimentación en el tipo de barras e islas aguas abajo de la presa. Inicialmente, "sin presa" se observaba un patrón de barras centrales con un río trenzado; después de la construcción de la presa el patrón ha cambiado, observándose barras en la parte interior de las curvas y en otros tramos. Ejemplo de ello es el tramo entre El Corozo y la desembocadura, que presentan barras alternadas, mostrando un

cambio de patrón de trenzado a un solo cauce con inicio de meandro.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado bajo colaboración entre el IMTA y la CFE, y gracias al financiamiento del Centro de Anteproyectos Pacífico Sur (CAPS) de la Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos de la CFE. Los autores agradecen a los revisores del artículo, sus comentarios y sugerencias mejoraron la presentación del trabajo.

Recibido: 21/07/10

Aceptado: 13/01/11

Referencias

- ALFARO, M. y SÁNCHEZ, G. *Chachagua: reflejos de un parque*. México, D.F.: Plaza y Valdés Editores, 2002.
- CFE. *Control Terrestre y Topobatimetría para el Aprovechamiento Hidráulico de Usos Múltiples Paso de la Reina, Oaxaca*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 2008, 50 pp.
- CHANG, H.H. River Morphology and River Channel Changes. *Trans. Tianjin Univ.* Vol. 14. Tianjin: Tianjin University and Springer-Verlag, 2008, pp. 254-262.
- GALAY, V.J. Causes of River Bed Degradation. *Water Resources Research*. Vol. 19, No. 5, 1983, pp. 1057-1090.
- GÓMEZ, J.F. *Estudios hidrológicos, hidrogeoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar-costera manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chachagua del sistema ambiental regional del proyecto aprovechamiento hidráulico de usos múltiples paso de la Reina, Oaxaca*. Componente de Hidrología. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008-2009.
- GONZÁLEZ, V.J.A., ESPINOZA, A.J., BONOLA, A.I., CONTRERAS, G.V. y ROCCHICOLI, H. *Estudios hidrológicos, hidrogeoquímicos, fluviales, hidrodinámica lagunar-costera manejo de cuenca y distrito de riego, caudal ecológico, calidad del agua superficial y contaminación difusa de las lagunas de Chachagua del sistema ambiental regional del proyecto aprovechamiento hidráulico de usos múltiples paso de la Reina, Oaxaca*. Componente de Hidráulica Fluvial. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2008-2009.
- LANE, E.W. The importance of fluvial geomorphology in hydraulic engineering. *Proc. ASCE* 81. Paper 745, 1955, pp. 1-17.
- LEOPOLD, L.B. *A view of the river*. Cambridge: Harvard University Press, 1994.

- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., and MILLER, J.P. *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York, San Francisco: Freeman, 1964.
- MAZA, J.A. y ESPINOSA, C.J. *Modificaciones a la sección estable de un río y erosiones aguas abajo de grandes embalses*. XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Buenos Aires, Argentina, 1984, pp. 477-488.
- MAZA, J.A. y GARCÍA, M. *Puente carretero sobre el Río Verde, Oaxaca. Obras de protección y encauzamiento*. México, D.F.: SOP, 1976, 133 pp.
- PETTS, G.E. *Impounded Rivers: Perspectives for Ecological Management*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 1984, 326 pp.
- SCHUMM, S.A. and HARVEY, M.D. *Engineering geomorphology*. Chap 18. ASCE. *Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. García, M. (editor). Reston, USA: ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice. No. 110, 2007.
- WILLIAMS, G.P. and WOLMAN, M.G. *Downstream effects of dams on alluvial rivers*. US Geological Survey Professional Paper 1286. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 1984.
- ZAVALA, C. *Geomorfología Fluvial del Curso Bajo del Río Verde, Oaxaca*. Tesis UNAM. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, 1985, 169 pp.

Abstract

ESPINOZA-AYALA, J., GONZÁLEZ, J.A., ROCCHICOLI, H., LI, X., MEJÍA, M.A. & GONZÁLEZ-HITA, L. *Study of morphological changes in the Río Verde, Oaxaca*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 131-147.

An analysis is presented of the morphological behavior of the Río Verde, Oaxaca, Mexico on a 55 km stretch from the Paso de la Reina site to the ocean. This study considered the river's original condition, without infrastructure, and its change in morphology after construction of the Ricardo Flores Magón dam and protective levees on both sides. The study is based on topographical surveys and satellite images. Changes that occurred from 1964-2008 were evaluated, considering the changes in the profile of the thalweg, runoff pattern, the river's sinuosity and width. Sedimentation rates obtained from 5 points show notable variation, which indicates the dynamic nature of the sedimentation processes in the river.

Keywords: morphological changes, river, dams.

Dirección institucional de los autores

Dra. Josefina Espinoza Ayala
M.I. José Alfredo González
M.C. Hélene Rocchicoli
Dr. Xiangyue Li
Dr. Miguel Ángel Mejía
Fís. Luis González Hita

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 895
Fax: +52 (777) 3293 679
jespinoz@tlaloc.imta.mx
jagonzal@tlaloc.imta.mx
xli@tlaloc.imta.mx
mamejia@tlaloc.imta.mx
lghita@tlaloc.imta.mx