

ANEXO

1.1

DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

**Delimitación del cauce y zonas de inundación desde el Río Tinajas
hasta la desembocadura en la presa Abelardo L. Rodríguez
“El Molinito”, Estado de Sonora y análisis de los
sedimentos de la presa por la técnica de luminiscencia ópticamente
estimulada y 137Cs**

**Miguel Castillo¹
Esperanza Muñoz-Salinas¹
Alejandro Pérez-García¹**

**¹ Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología. Universidad Nacional
Autónoma de México.
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Cd. Mx., México.**

Delimitación del cauce y zonas de inundación desde el Río Tinajas hasta la desembocadura en la presa Abelardo L. Rodríguez “El Molinito”, Estado de Sonora y análisis de los sedimentos de la presa por la técnica de luminiscencia ópticamente estimulada y ¹³⁷Cs

Miguel Castillo¹

Esperanza Muñoz-Salinas¹

Alejandro Pérez-García¹

¹ *Departamento de Geología Regional, Instituto de Geología. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Cd. Mx., México.*

1 Relevancia del estudio y su justificación

Debido a que una gran parte de las actividades humanas tienen repercusiones en el sistema fluvial, ambiental y paisajístico, es necesario contar con una información cartográfica de base, misma con la que es posible evaluar espacialmente los cambios o efectos generados por una acción directa de las actividades o por causas secundarias. La actividad minera, en sus distintas formas de explotación, genera cambios drásticos en el sistema fluvial, geohidrológico y ambiental. La explotación de minas a cielo abierto no sólo ocasiona una rápida transformación de la superficie aprovechada, sino que también repercute en las tasas de transporte de sedimentos por la acción fluvial y eólica, así como en los cambios en la concentración de química de los elementos que los componen.

El derrame en la tina de lixiviados del represo “Tinajas” de aproximadamente 40,000 m³ de CuSO₄, ocurrido el 6 de agosto de 2014 que vertieron al río Bacanuchi y Sonora generaron una respuesta por parte de la empresa responsable (Grupo México), el gobierno mexicano, instituciones académicas y la sociedad civil. Si bien la respuesta ante la contingencia fue pronta, también se ha hecho patente la falta de información cartográfica de base del sistema fluvial del río Sonora.

Para subsanar la falta de un documento base para el análisis espacial se elaboró una cartografía sobre las principales unidades fluviales que conforman el río Sonora escala 1:20,000. Debido a

que la dinámica fluvial también queda registrada en el sistema de presas, también se hizo el análisis de los sedimentos por medio de la técnica de la luminiscencia ópticamente estimulada (LOE) y detección de ^{137}Cs de núcleos extraídos en la presa Abelardo L. Rodríguez, la cual se conoce con el nombre de “El Molinito”. Las técnicas de la LOE y ^{137}Cs se usaron para aportar de información complementaria a los estudios centrados en la detección de los cambios ambientales en la cuenca del río Sonora. Dichas técnicas permiten tener un registro detallado de cambios en las tasas de erosión/sedimentación en el tiempo geológico (LOE) como en el histórico (LOE y ^{137}Cs).

En la primera parte del reporte se proporciona la información general de los métodos, materiales y resultados obtenidos. En los apartados temáticos se detallan los aspectos técnicos y resultados de cartografía, así como del análisis de los sedimentos. En la parte final del documento se hacen las observaciones y recomendaciones de los estudios realizados.

2 Objetivos

- Elaborar la cartografía a detalle (escala 1:20,000) de las principales unidades fluviales que componen el trayecto desde el río Tinajas hasta la presa “El Molinito”.
- Detectar los cambios en las tasas de erosión/sedimentación del sistema fluvial del río Sonora a través del análisis de los sedimentos de la presa “El Molinito”.

3 Materiales y métodos

3.1 Levantamiento cartográfico

Con el objetivo de contar con una cartografía de detalle en una primera fase se optó hacer levantamientos del terreno a través de la adquisición de datos LIDAR (*Light Detection and Ranging*) en distintos tramos del río Tinajas y Sonora. En esta etapa se utilizó un Escaner Láser Terrestre (ETL) de largo alcance (~2000 m) de la marca Maptex[®], modelo I-Site 8820 XR. Los datos obtenidos en campo fueron procesados en el Laboratorio de Dinámica Superficial del Instituto de Geología de la UNAM. Debido a que el post-proceso de los datos obtenidos en campo

conlleven tiempos largos y la adquisición de datos en campo costos elevados, se consideró la opción de elaborar la cartografía por medio de la interpretación de imágenes o fotografía aéreas.

Para la elaboración de la cartografía la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR-SEMARNAT) proporcionó un modelo digital de elevación de alta resolución (0.5 m) así como un mosaico de orto-fotos con una resolución de 0.1 m. Además de dicha información se solicitó al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP-SAGARPA) las imágenes disponibles del satélite SPOT 5 y 7 de las fechas cercanas y previas al evento, así como las escenas posteriores a los efectos de los huracanes Odile y Norberto. Debido a que el procesamiento de las imágenes de satélite requiere de equipos de cómputo de alto rendimiento y que la información generada tenía que ser compartida con otros grupos de trabajo, fue necesaria la adquisición de un servidor, así como de una unidad de sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) para contar de forma permanente con la información.

La cartografía se levantó con base en el mapeo sistemático de unidades geomorfológicas (Verstappen y van Zuidam, 1991). La ventaja de este sistema es de que las unidades están compuestas por elementos homogéneos donde se hace hincapié en la génesis más que en una forma en específico. Dicho tipo de levantamientos son útiles para fines de ordenamiento territorial y para la delimitación de unidades bio-físicas (López-Blanco y Villers, 1995; Castillo *et al.*, 2010).

3.2 *Análisis de los sedimentos por las técnicas de LOE y ¹³⁷Cs*

Los núcleos extraídos de la presa “El Molinito” fueron proporcionados por el Dr. Alexander Correa (Investigador del Instituto de Geología de la UNAM). La LOE es una de las técnicas más modernas para la geocronología del Cuaternario, sin embargo, en este proyecto la LOE no se utilizó para el fechamiento de sedimentos, se aplicó para evaluar los cambios en los patrones de sedimentación a consecuencia de la dinámica fluvial ya que dicho enfoque ha permitido detectar cambios en los procesos fluviales por distintas causas (Muñoz-Salinas y Castillo, 2014). Las muestras de LOE fueron procesadas en una unidad PPSL (*Pulsed Photon Stimulated Luminescence*), equipo fabricado y comercializado por el Centro de Investigaciones Ambientales de Universidades Escocesas (SUERC por sus siglas en inglés).

La técnica del ^{137}Cs permite evaluar procesos de erosión/sedimentación a partir de los ensayos nucleares de 1950 (Brown, 1981; Zapata et al., 2002). Asimismo, por la presencia de este radionúclido es posible fechar los sedimentos del Antropoceno. Para análisis de las muestras de “El Molinito” se utilizó un detector de radiación gamma compuesto por NaI dopado con Tl de la marca ATOMTEX[®] modelo AT1315. Los análisis de LOE y ^{137}Cs se llevaron a cabo en el Laboratorio Geocron-Q el cual se encuentra en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía de la UNAM.

4 Resultados generales

La cartografía de las unidades fluviales cubrió el tramo desde el río Tinajas hasta la presa “El Molinito”. El producto final está disponible en información vectorial (archivo *shapefile*) para su visualización en un sistema de información geográfica y también se encuentra disponible para su consulta en GoogleEarth[®] (archivo *.KMZ). Los detalles de la cartografía están disponibles en la sección V del presente informe.

Con la técnica de la LOE se analizaron cuatro núcleos compuestos con profundidades de entre 140 a 240 cm. Las muestras fueron estimuladas en el espectro del infrarrojo (IRSL, *Infra-red stimulated luminescence*) y del azul (BLSL, *Blue stimulated luminescence*). Dos núcleos con profundidades de 120 y 180 cm fueron analizados con la técnica del ^{137}Cs . Los resultados de los análisis realizados a los núcleos se presentan en la sección VI de este documento.

5 Cartografía de las unidades fluviales del río Sonora

5.1 Antecedentes

La geomorfología fluvial se ocupa del estudio de los mecanismos de erosión, transporte y construcción de geofomas que resultan de la escorrentía del agua en la superficie terrestre (Selby, 1985). La dinámica fluvial está controlada principalmente por el tamaño de la cuenca, el tipo de litología, el arreglo estructural, así como por las condiciones climáticas, de las cuales, la

precipitación es un control de primer orden (Leopold *et al.*, 1964). La topografía y la litología son también factores que condicionan la intensidad con la que ocurren parte de los procesos fluviales los cuales pueden evaluarse a partir de la estimación de la potencia fluvial (*stream power*) (Bagnold, 1960). La determinación de la potencia fluvial es de gran ayuda en el estudio de los procesos fluviales ya que ésta puede utilizarse para detectar las zonas donde: (1) existe un incremento de la incisión fluvial, (2) hay un cambio en la capacidad de transporte de sedimentos y (3) ocurre la acumulación y degradación de los materiales fluviales (Bagnold, 1977). Otro control importante dentro del sistema fluvial está dado por el nivel de base (Schumm, 2005), mismo que puede elevarse o descender ante forzamientos tectónicos y/o climáticos (*e.g.*, Castillo y Lugo-Hubp, 2011). En el caso del descenso brusco del nivel de base se produce un incremento de la erosión que resulta en la degradación de los materiales fluviales e incisión sobre el sustrato (Leopold *et al.*, 1964; Shepherd y Schumm, 1974; Whipple, 2004).

Desde mediados del siglo pasado, algunos estudios de geomorfología fluvial consideran que la dinámica de los canales puede evaluarse a partir de un modelo de continuidad, el cual utiliza a la geometría hidráulica de los canales (Leopold y Maddock, 1953) como un sistema en el cual existe un incremento proporcional de la anchura de los canales, transporte de sedimentos, profundidad de los flujos con la descarga fluvial, y una relación inversa con la pendiente de los lechos y la rugosidad de los mismos. Un modelo alternativo para el estudio del sistema fluvial es el que considera que existen distintos dominios en los cuales los mecanismos de erosión y transporte varían de forma significativa a lo largo del curso de los ríos. Los dominios fluviales están relacionados con la pendiente que tienen los lechos y los dominios pueden clasificarse a partir de la relación del gradiente de los canales con el área de drenaje (*e.g.*, Sklar y Dietrich, 1998; Montgomery, 2001). Un ejemplo de clasificación de los dominios fluviales es la que proponen Sklar y Dietrich (1998) quienes identifican cuatro zonas o dominios fluviales (Fig. 1). La primera zona corresponde a los dominios de montaña, donde los procesos de ladera y de formación de flujos de derrubios son los mecanismos que producen una mayor remoción de sedimentos con grandes calibres y donde se da el aporte principal de sedimentos al sistema fluvial. La segunda zona aún está en la zona de montaña sin embargo la acción fluvial está dada por una incisión en el sustrato, es aquí donde gran parte del relieve montañoso es modificado por los procesos fluviales (*e.g.*, Kirby y Whipple, 2012). La tercera zona es una transición entre el relieve montañoso y la

zona de estribaciones del sistema montañoso donde los ríos son aún de alta energía y donde ocurre un transporte importante del sedimento en el tamaño de gravas (Church, 2006). Finalmente, la cuarta zona está caracterizada por el transporte, acumulación e incisión de materiales finos como son los arenas, limos y arcillas los cuales se encuentran sobre relieves poco accidentados y que en algunos casos llegan a formar extensas llanuras de inundación.

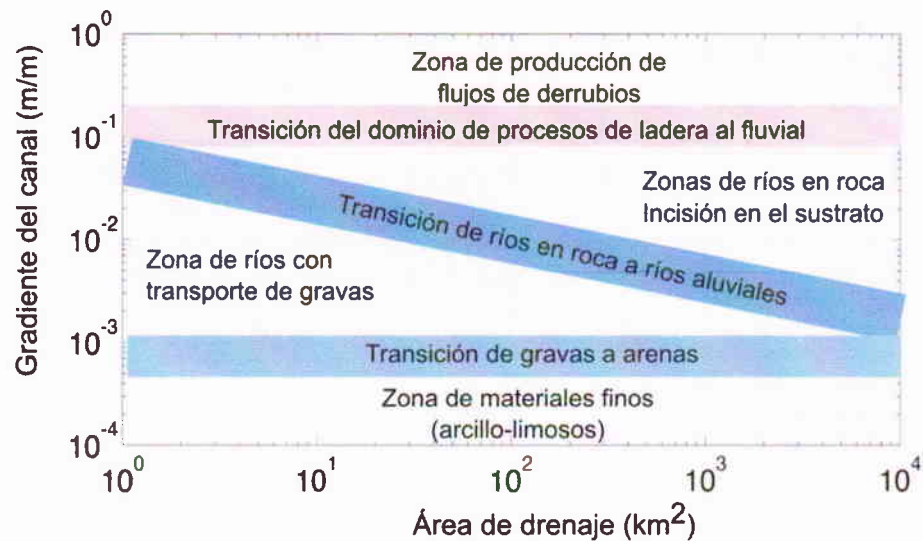


Figura 1 Gráfico de la relación entre el área de drenaje y las pendientes de los lechos y los dominios del sistema fluvial. Modificado de Sklar y Dietrich (1998).

Si bien el modelo presentado en la Figura 1 explica de manera general la presencia de distintas zonas o dominios dentro del sistema fluvial y es alternativo al modelo de continuidad (Montgomery, 1999), la discontinuidad debido a controles tectónicos, litológicos estructurales, geomorfológicos y bióticos, produce cambios temporales a lo largo del curso de los ríos (Burchsted *et al.*, 2014). La discontinuidad entonces resulta en cambios drásticos en la dinámica fluvial con lo cual la erosión y acumulación de sedimentos puede alternar en los distintos dominios del sistema fluvial y no necesariamente ser mayor en las partes más bajas del curso fluvial. Además, es de esperar que en grandes cuencas donde existen distintos controles tectónicos y contrastes litológicos, la dinámica fluvial no se ajuste al modelo de continuidad fluvial.

Aunado a lo anterior, y si se toma en cuenta que la cantidad de precipitación y su distribución espacial controlan una parte importante de la descarga de los ríos, es de esperar que en los sistemas fluviales a nivel terrestre varíe la dinámica fluvial en función de los dominios climáticos en los que se encuentren, y consecuentemente la geometría hidráulica de los canales (Leopold y Maddock, 1953; Leopold *et al.*, 1964) así como la intensidad y magnitud de los eventos de picos de descarga (Leopold *et al.*, 1964; Molnar *et al.*, 2006). En los ríos localizados en zonas áridas, como es el caso del Río Sonora, son frecuentes la formación de flujos hortoniano y picos de descarga instantáneos (Leopold *et al.*, 1964; Selby, 1985).

La cuenca del Río Sonora tiene una superficie de aproximadamente 26,827 km² (INEGI, 2015), la cual abarca un área geográfica con cambios topográficos drásticos (Fig. 2), donde las condiciones climáticas que van desde semiáridas (BS) hasta muy áridas (BW) de acuerdo con el sistema climático de Köppen (García, 1965) y donde las fronteras litológicas, arreglos estructurales y controles tectónicos producen en el sistema fluvial una variabilidad como lo indican los contrastes en la anchura de los canales y la potencia fluvial específica (Fig. 3).

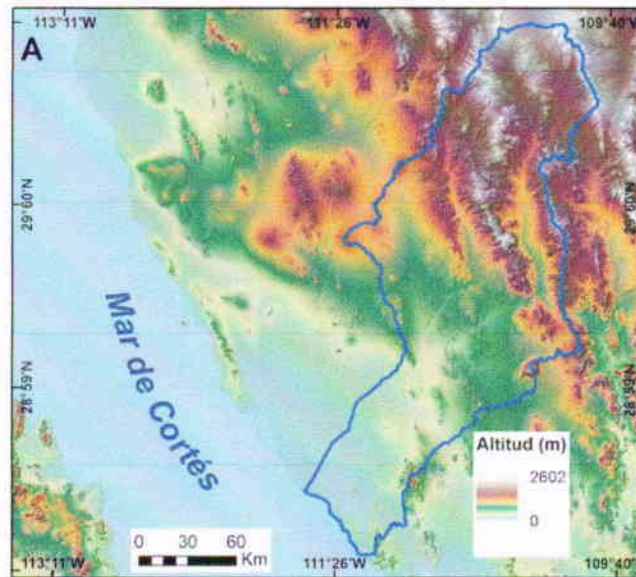


Figura 2 Mapa hipsométrico de la cuenca del Río Sonora (contorno azul) y zonas aledañas.

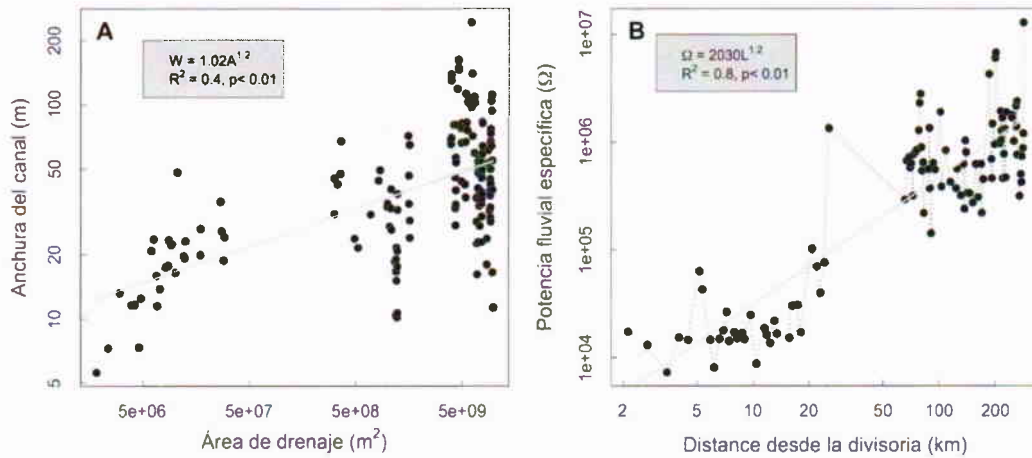


Figura 3 Variabilidad del sistema fluvial en la geometría hidráulica expresada por la relación entre el área de drenaje y la anchura del canal (A) y la potencia fluvial específica (B). Ambos datos de A y B se obtuvieron desde el río Tinajas hasta la presa "El Molinito".

La variabilidad que se observa a lo largo del Río Sonora hace que en dicho sistema fluvial se presenten zonas a lo largo del cauce controladas por la resistencia que presenta el sustrato geológico ante la erosión y otras donde la erosión fluvial ha dado producido amplios valles donde se ubican áreas agrícolas y urbanas (Fig. 4). Por tal motivo, el modelo de continuidad o uno basado en la clasificación de dominios no es aplicable para caso del sistema fluvial del Río Sonora y por ello se hace necesaria una clasificación de las principales formas y depósitos fluviales a lo largo del curso del río Tinajas hasta la presa de "El Molinito". El mapeo de los elementos fluviales se propone que sirva de base para subsecuentes análisis de las características físico-químicas de la zona de influencia fluvial, así como de las condiciones ambientales en la zona de influencia ribereña. Con la clasificación propuesta y el mapa correspondiente es posible detectar las zonas susceptibles a inundaciones o a procesos erosivos, mismas que pueden ser altamente activas si las condiciones meteorológicas lo favorecen como ocurrió en la cuenca del Río Sonora para el año de 2014 con las precipitaciones generadas por los huracanes Odile y Norberto.

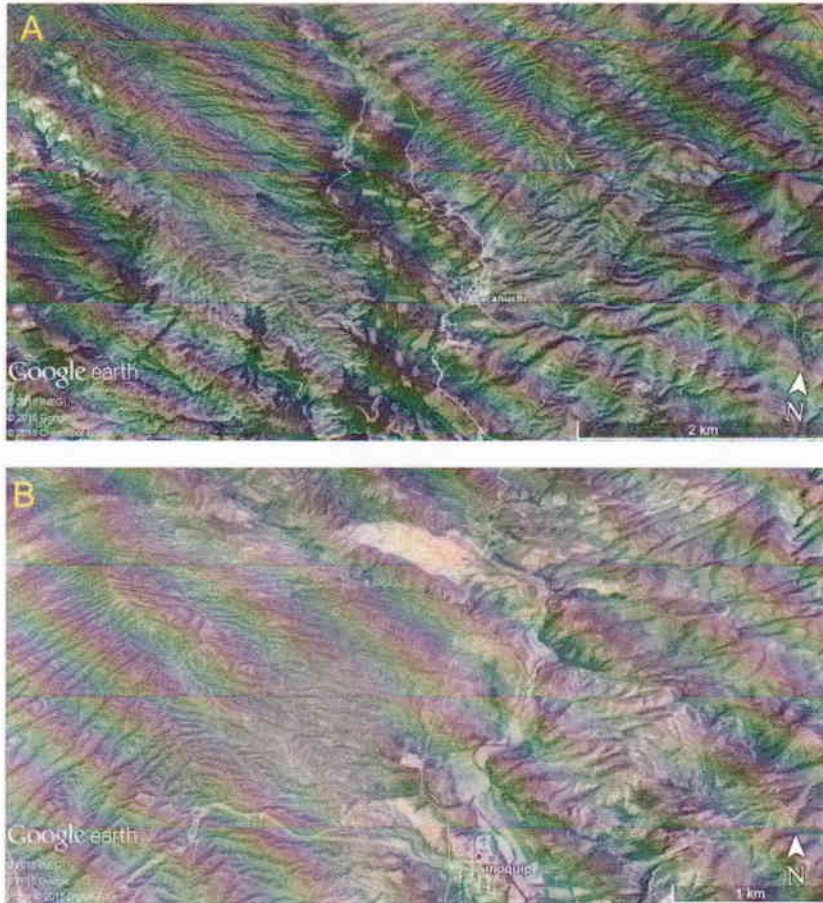


Figura 4 Imágenes de GoogleEarth® donde se observan distintas anchuras de los canales. El valle en A está aguas arriba de B, sin embargo, el valle se ensancha más en A a pesar de que, según el modelo de continuidad, los ríos disminuyen en anchura conforme disminuye el área de drenaje.

La propuesta de clasificación que aquí se presenta busca, por otro lado, contar con un criterio organizado y sistemático del cauce y formas fluviales del Río Sonora con los cuales se minimice una interpretación subjetiva de las zonas potenciales a inundación. Cabe mencionar que los resultados contenidos en este documento son de carácter preliminar ya que la delimitación de zonas de inundación requiere de datos de descarga (aforo) en distintos tramos a lo largo del curso del Río Sonora así como el fechamiento de los principales depósitos fluviales. Asimismo, la interpretación requiere aún de la verificación de algunas unidades en trabajo de campo.

5.2 Definición de los elementos fluviales

La clasificación de los elementos fluviales se hizo con base en la interpretación de orto-fotos con una resolución de 0.10 m y la ayuda de un modelo digital del terreno (MDT) derivado de datos LIDAR con un tamaño de celda de 0.5 m. Del MDT se derivó un mapa de pendientes del terreno el cual permitió precisar los límites de las formas delineadas y definir las superficies que por su poco gradiente son susceptibles a inundarse (Fig. 5). En esta clasificación se omitió la clasificación de los ríos con base en sus características morfológicas y depósitos asociados (e.g., Church, 2006), se consideró que la delimitación basada en la morfogénesis permite tener un mapa de unidades en las cuales se puede integrar la información bio-física (Castillo et al., 2010). Los elementos identificados se definen a continuación:

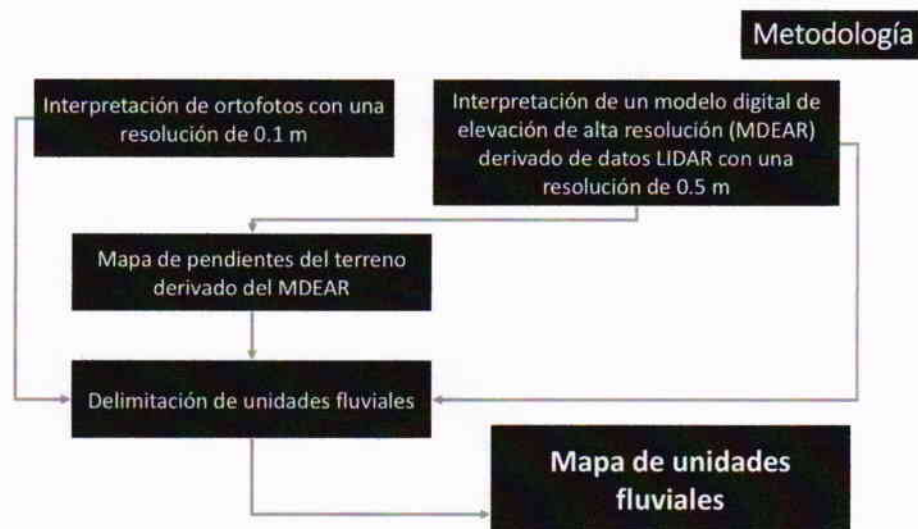


Figura 5 Diagrama de flujo simplificado de la metodología seguida para identificar las principales unidades fluviales.

1.1 Cauce activo

Corresponde a la parte activa del cauce que normalmente lleva agua hasta la desembocadura. Si se toma en cuenta un límite físico, el cauce se encuentra delimitado en sus márgenes por riberas donde se localiza, por lo general, la vegetación riparia. El lecho menor, también denominado aparente o normal, es aquel por el cual discurre agua incluso durante el estiaje, de ahí que en algunos casos

se le denomine lecho permanente. El lecho mayor, el cual contiene al menor, sólo es invadido durante las crecidas y, en general, durante la estación anual en que el caudal aumenta y cuyo periodo depende, por su duración y por la época del año en que se sitúa, del régimen propio de cada río.

No obstante que el comportamiento hidráulico en un río tiene un componente menor y uno mayor, lo cual resulta del incremento del caudal, las características de transporte de sedimentos, erosión y límites de un cauce fluvial varían en función de la dinámica del flujo, así como de los materiales geológicos por los cuales discurre un río. El Río Sonora presenta algunos meandros de cauce sinuoso y de corriente rápida. Por migración lateral de la corriente, los depósitos formados se extienden lateralmente y corriente abajo. Como cauce activo se definió aquí al lecho mayor y menor. La superficie aproximada del cauce activo es de aproximadamente 13.5 km².



Figura 6 Vista del cauce activo (azul oscuro) en el curso alto del Río Sonora.

1.2 Sistema de canales abandonados

Corresponde a un sistema de canales abandonados en depósitos masivos localizados en los márgenes cercanos al cauce activo. Debido a que los canales conservan aún su morfología pueden

ser reactivados por un incremento en la descarga. Los canales se encuentran sobre depósitos masivos arenosos con una morfología en planta de abanico. Los canales forman un drenaje de patrón paralelo y son resultado del acarreo y subsecuentes depósitos de los materiales que transportó el cauce principal en un evento determinado. En esta forma se delimitaron los canales con base en la delimitación del abanico en el que se encuentran. Los sistemas de canales abandonados y las superficies sobre la que se encuentran tienen una superficie de aproximadamente 28.8 km².

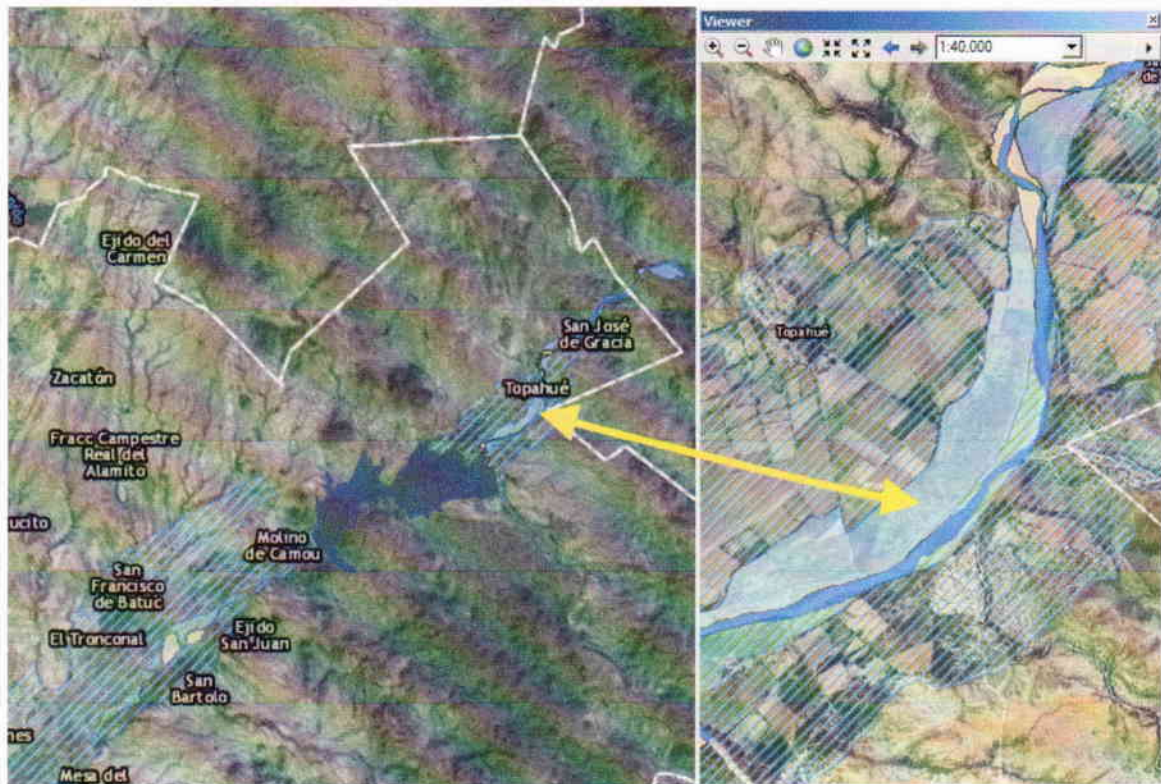


Figura 7 Ejemplo de canal abandonado, susceptible a reactivarse en crecidas extraordinarias.

1.3 Bajadas

Son características de zonas desérticas, áridas y semiáridas. En el área de estudio se encuentran en la zona de desembocadura de ríos tributarios en la zona de montañas y al pie de los lomeríos. Un rasgo característico es su forma en forma de pedimento donde, presumiblemente, hay ausencia de restos orgánicos, tienen una clasificación granulométrica, estratificación variable, predominio de

conglomerados y arenas. En planta presentan el aspecto de un abanico y se originan a partir de la sedimentación de la carga sólida transportada por una corriente fluvial allí donde ésta pierde súbitamente fuerza debido a un cambio brusco del gradiente topográfico o disminución de la potencia fluvial.

El perfil longitudinal del abanico aluvial es cóncavo, mientras que perfil transversal es convexo. Generalmente los sedimentos más gruesos se hallan localizados en las zonas proximales, mientras que los más finos se hallan hacia las zonas distales del abanico. En la descripción de abanicos aluviales, no diferenciados en las unidades aquí delimitadas, se utiliza la siguiente subdivisión: zona de cabecera, correspondiente a la parte más cercana al ápice asociada normalmente a conglomerados y clastos de tamaño grueso, zona de cuerpo, presentando normalmente alternancia de conglomerados con areniscas y la zona de pie del abanico correspondiente a zonas distales que puede intercalados con otros ambientes sedimentarios, que puede ser caracterizada a la alternancia de areniscas con estratificación cruzada. La pendiente general varía entre 5° y 10° en la zona de la cabecera y de 1° a 2° en el pie, existiendo una correlación positiva entre pendiente del abanico y calibre del sedimento.

Las zonas de bajadas en el área de estudio se localizan en el curso alto del Río Tinajas y, por lo general, no aportan sedimento al cauce activo de manera continua, sin embargo, en crecidas extraordinarias pueden alimentar de sedimentos al río principal. Las bajadas ocupan un área de aproximadamente 0.6 km^2 .

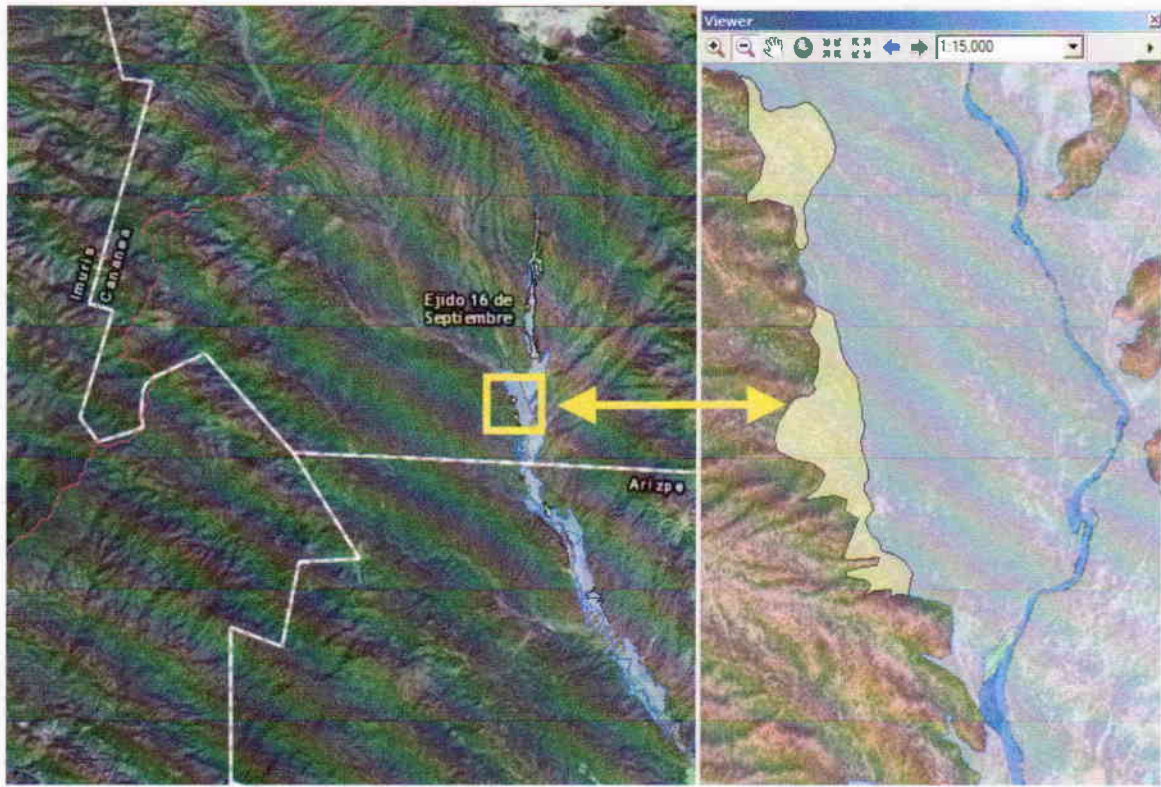


Figura 8 Ejemplo de bajadas (depósitos) en el sector alto de la cuenca del Río Sonora.

1.4 Depósitos fluviales y canales tributarios

Corresponde al aporte de tributarios al canal principal, debido a las diferencias que existen entre la potencia fluvial del cauce principal con respecto los tributarios, estos llegan a formar depósitos en forma de abanico que en algunos casos son coalescentes con los depósitos que transporta el canal principal. Estos depósitos se encuentran en el curso alto del río y ocupan un área de aproximadamente 0.7 km².

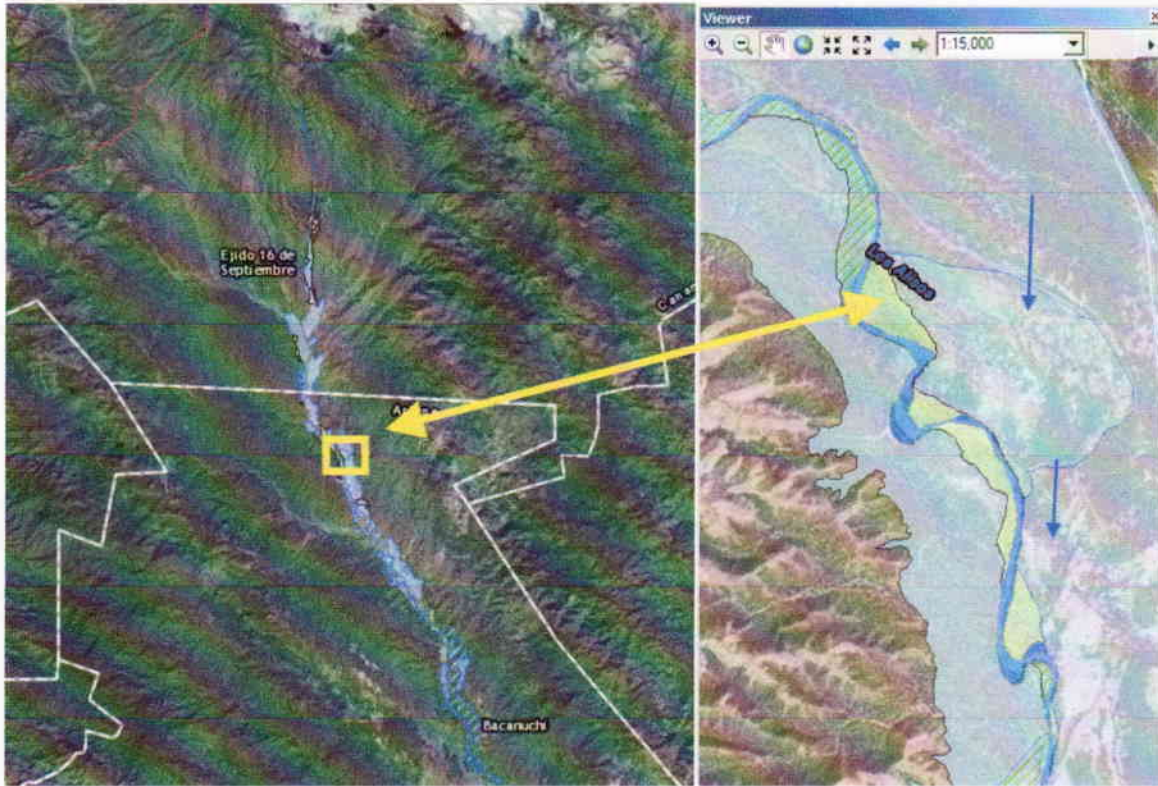


Figura 9 En la figura se muestran los depósitos (amarillo) asociados a los canales principales. Las flechas en azul indican dos zonas que aportan sedimentos al canal principal.

1.5 Depósitos masivos de arrollada

Corresponde con depósitos con una forma de abanico que han sido transportados y acumulados por picos de descarga extraordinarios. A lo largo del cauce principal del Rio Sonora se presentan varios depósitos de este tipo y es probable que su abandono esté relacionado con procesos de avulsión. Los depósitos son similares a los descritos en el punto 1.2, sin embargo, en este caso no hay existe sobre ellos una red de canales del todo definida. La formación de los depósitos de arrollada son indicativos de tramos donde la potencia fluvial disminuye de importante y por ello se da la acumulación masiva de sedimentos. Los depósitos ocupan un área de aproximadamente 7.8 km².

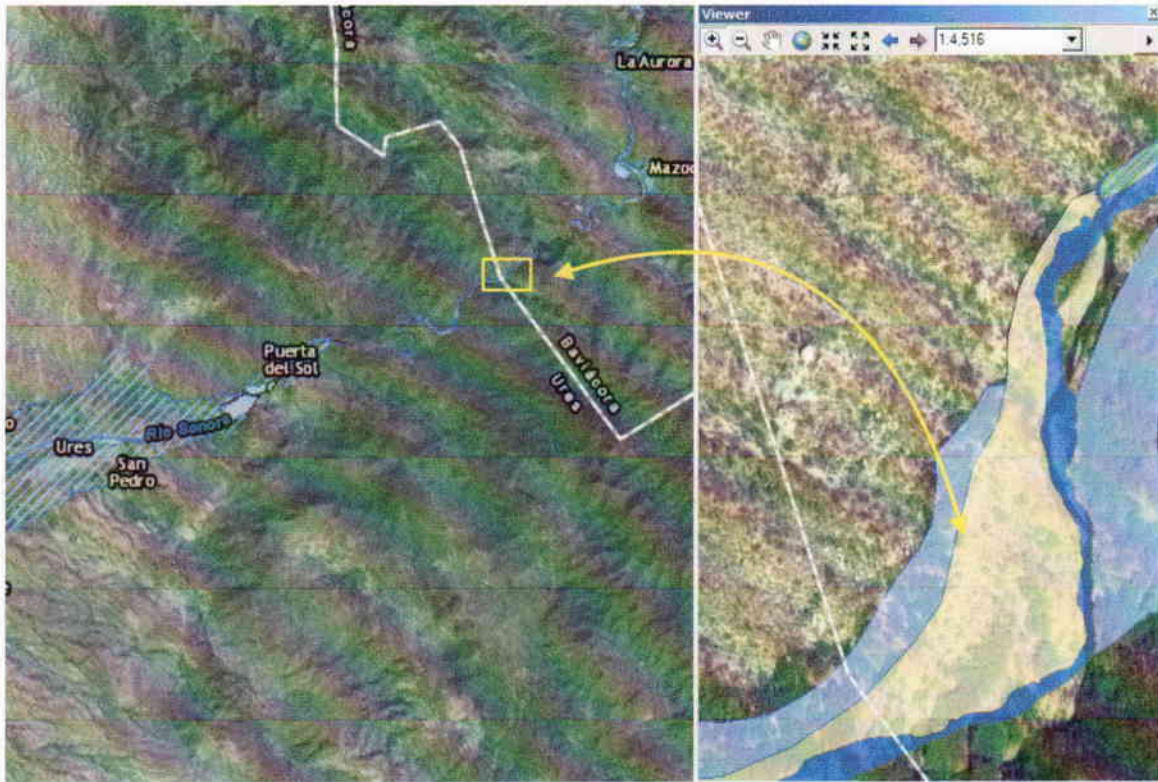


Figura 10 Depósitos masivos de arroyada asociados (café claro) asociados al canal principal. Obsérvese la forma lobulada de los depósitos los cuales están cortados por el cauce actual.

1.6 Llanuras de inundación excepcional

Corresponden a porciones del fondo de un valle que puede llegar a ser cubierta por las aguas durante avenidas extraordinarias. Las llanuras están compuestas por dos miembros, uno en la base donde se encuentra el aluvión de cauce la cual subyace a la llanura de inundación excepcional la cual resulta de una acumulación constante. Las llanuras de inundación contienen capas de material fino que el río transporta en estado de suspensión.

Las llanuras de inundación suelen ser activas cuando se vencen umbrales por precipitaciones intensas sobre toda la cuenca o en una parte de esta. Los fenómenos meteorológicos como son los huracanes y depresiones tropicales producen una alta intensidad de la precipitación pluvial, lo que desencadena un pico de descarga instantáneo que produce un transporte masivo de materiales. Este tipo de avenidas no suelen ser frecuentes, sin embargo, los impactos que generan una vez que

tienen lugar suelen modificar de forma drástica la topografía pre-existente del valle por donde fluye el río. A pesar de que las llanuras de inundación suelen estar en el curso bajo de los ríos, en el área de estudios éstas se encuentran desde las partes altas hasta las porciones bajas y abarcan un área de aproximadamente 18.7 km².

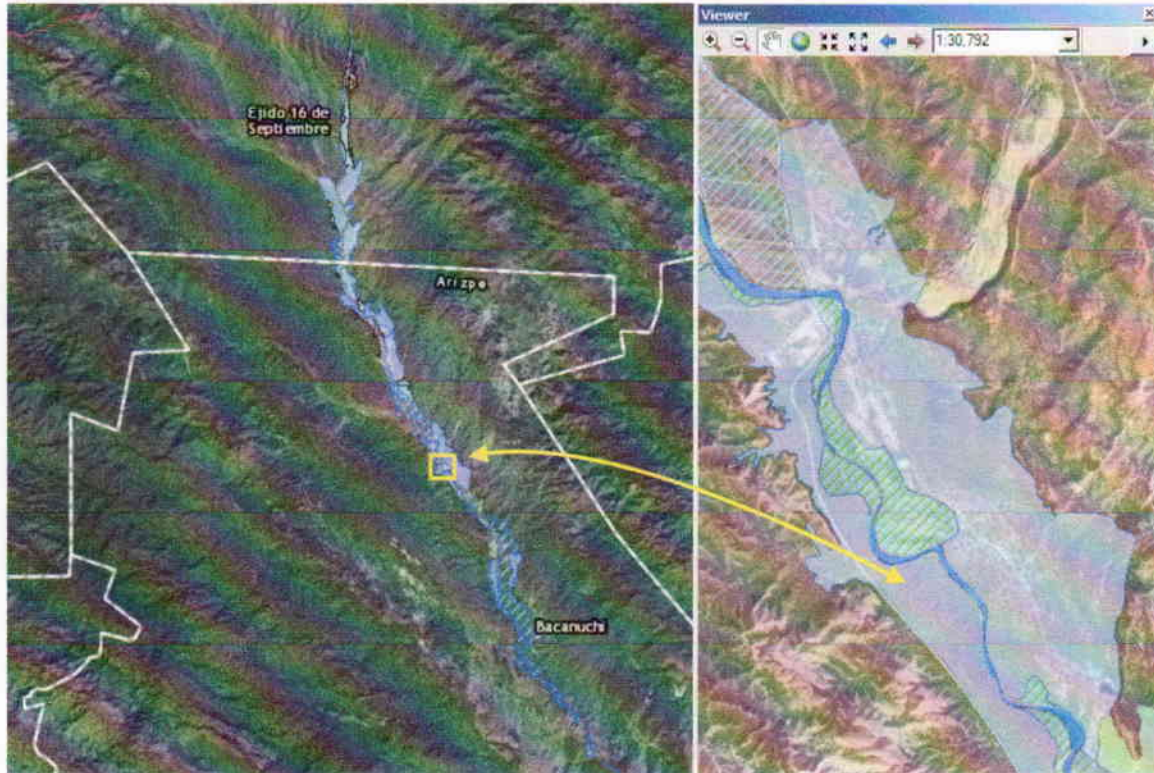


Figura 11 Ejemplo de llanura de inundación cercana al poblado de Bacanuchi. Estas zonas son susceptibles a inundación por la crecida del Río Sonora así como por el aporte de flujos provenientes de los numerosos canales tributarios.

1.7 Lomerío

Corresponde a formas positivas del relieve con poco desnivel que no son inundables, sin embargo, estos en el área de estudio se encuentran en la zona activa del cauce y en la superficie de inundación. Estas formas se encuentran en el curso alto de río y ocupan un área de aproximadamente 0.17 km².

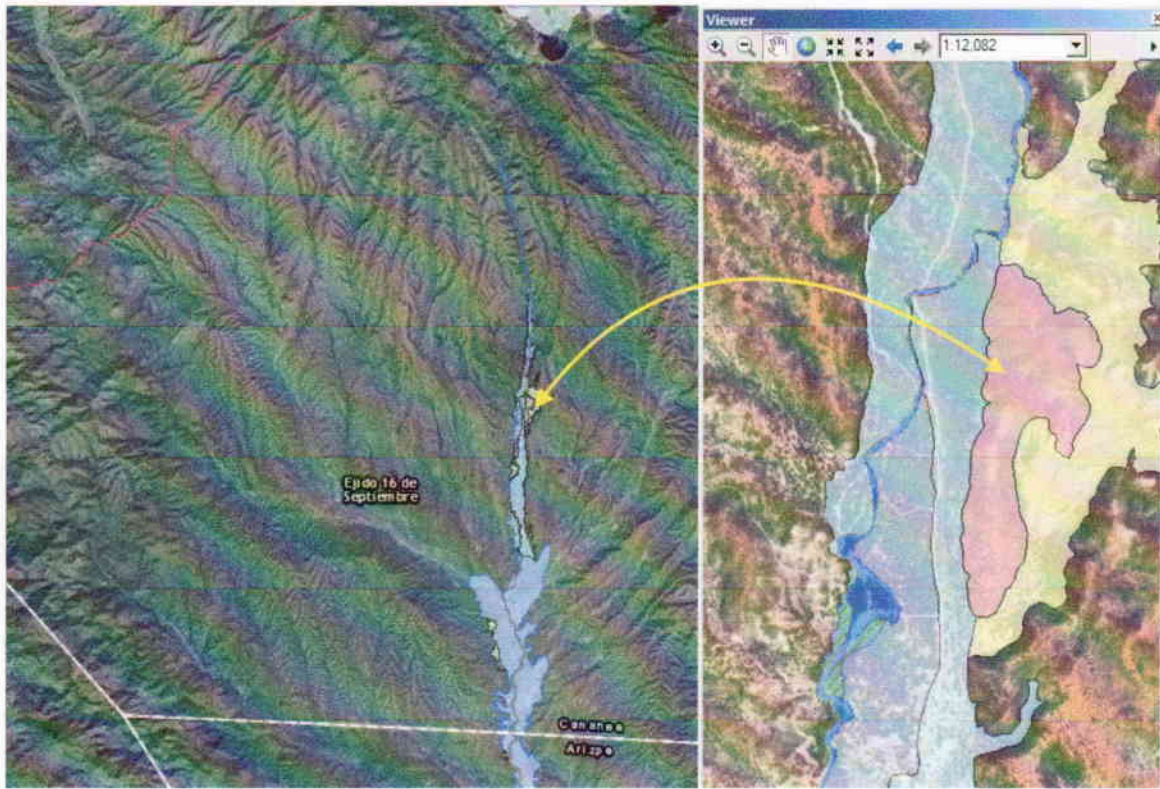


Figura 12 Ejemplo de lomeríos bordeados por los depósitos fluviales del Río Sonora y ríos tributarios.

1.8 Superficie de inundación

Estas formas se encuentran a lo largo de todo el curso del río y tienen una topografía llana cercana al cauce principal. Son zonas inundables por crecidas en los valores de descarga y tras picos instantáneos. La actividad en estas superficies depende de los periodos de recurrencia que tengan las inundaciones para la zona de estudio.

En algunos casos, donde la topografía es abierta y el río discurre sobre una superficie con poca pendiente, los ríos suelen acumular gran cantidad de sedimento y suelen incluso formar numerosos brazos durante las crecidas e incluso cambiar el curso (avulsión). En estos sitios es frecuente que los ríos inunden amplias superficies que en algunos casos pueden dejar cuerpos de aguas hasta por un par de años, aunque en el caso del Río Sonora estas condiciones no se cumplen. En este tipo de zonas llanas se suelen hacer parcelas para el riego, debido a la topografía favorece el manejo del río para extraer agua. En el área de estudio las superficies inundables tienen un área de 14.5 km².

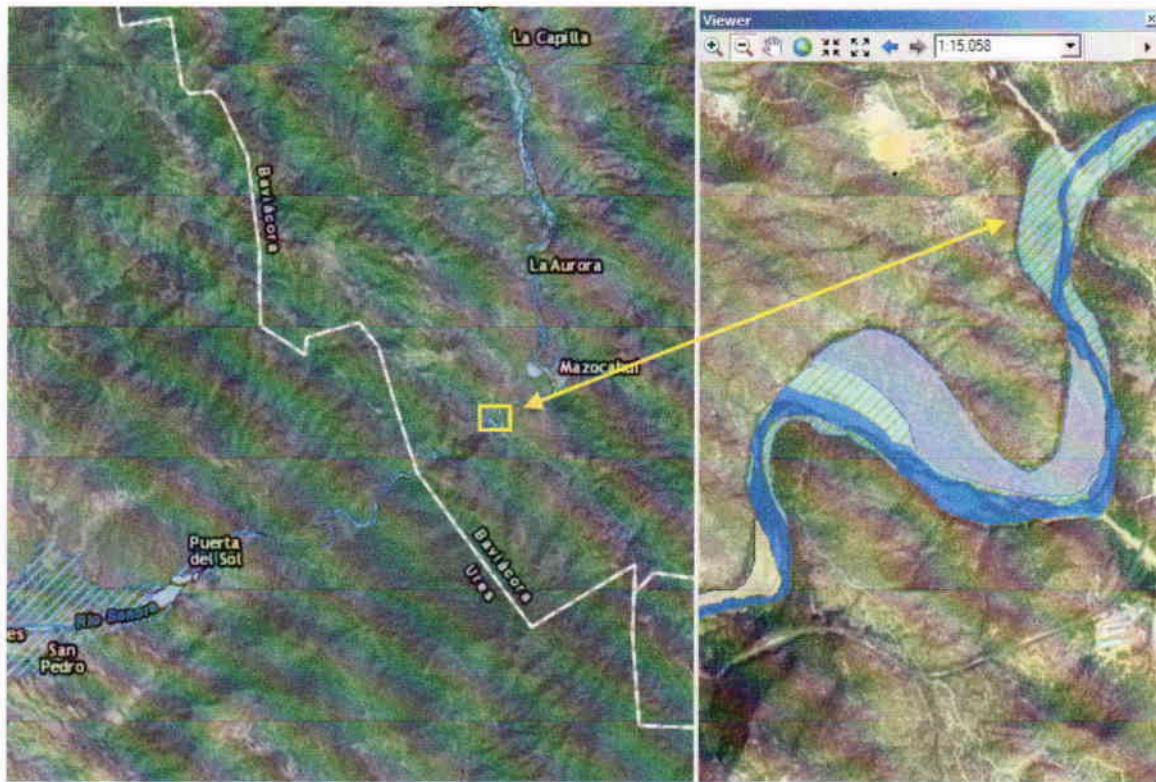


Figura 13 Ejemplo de las superficies de inundación (azul con rallas verde) contiguas al cauce principal del Río Sonora.

1.9 Superficie de inundación antropizadas

Son similares a las descritas en los apartados 1.6 y 1.8 pero son diferenciadas ya que en éstas las actividades humanas, principalmente agrícolas, tienen una amplia presencia. Estas superficies se encuentran a lo largo del curso del río principal y ocupan la mayor extensión en la zona de estudio con un área de aproximada de 233 km².

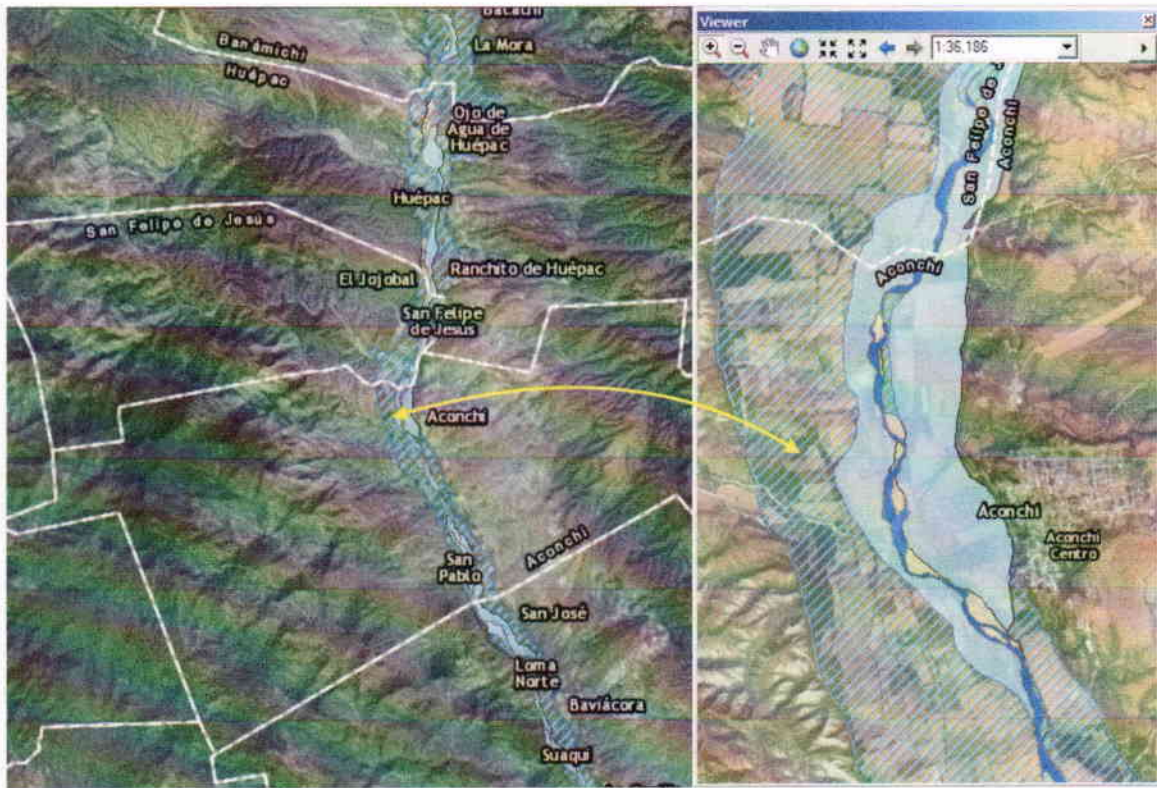


Figura 14 Las superficies de inundación antropizadas (líneas oblicuas en azul claro) son aprovechadas para la actividad agrícola (ver el acercamiento de la imágen a la derecha), sin embargo, estas pueden verse inundadas en eventos de crecidas extraordinarias.

1.10 Terrazas

Estas evidencian la presencia de un paleo-nivel. Tienen una topografía plana y tener varios niveles los cuales aumentan en edad conforme están en una posición topográfica más alta. La formación de las terrazas puede deberse a factores tectónicos como climáticos y resultan de un incremento de la incisión. De forma general existen dos tipos principales de terrazas, unas que contienen materiales fluviales constituidas con los materiales del fondo del valle y otras que corresponde a la superficie abandonada de basamento rocoso, llamadas terrazas de sustrato (*strath terrace*). A pesar de que las terrazas son indicativas del antiguo nivel del río, en eventos de crecidas extraordinarias, aquellas más cercanas al cauce activo podrían ser inundadas. En el área de estudio las terrazas se encuentran a lo largo del curso del río y abarcan un área de alrededor de 0.3 km².

Las unidades fluviales definidas ocupan un área de aproximadamente 315 km² y corresponden alrededor del 1.2% de la superficie de la cuenca. Cabe mencionar que aún quedan área por completar ya que la información proporcionada de base no está completa. De todas las unidades identificadas, las superficies antropizadas son las que ocupan una mayor extensión (Figura 6, Tabla 1).

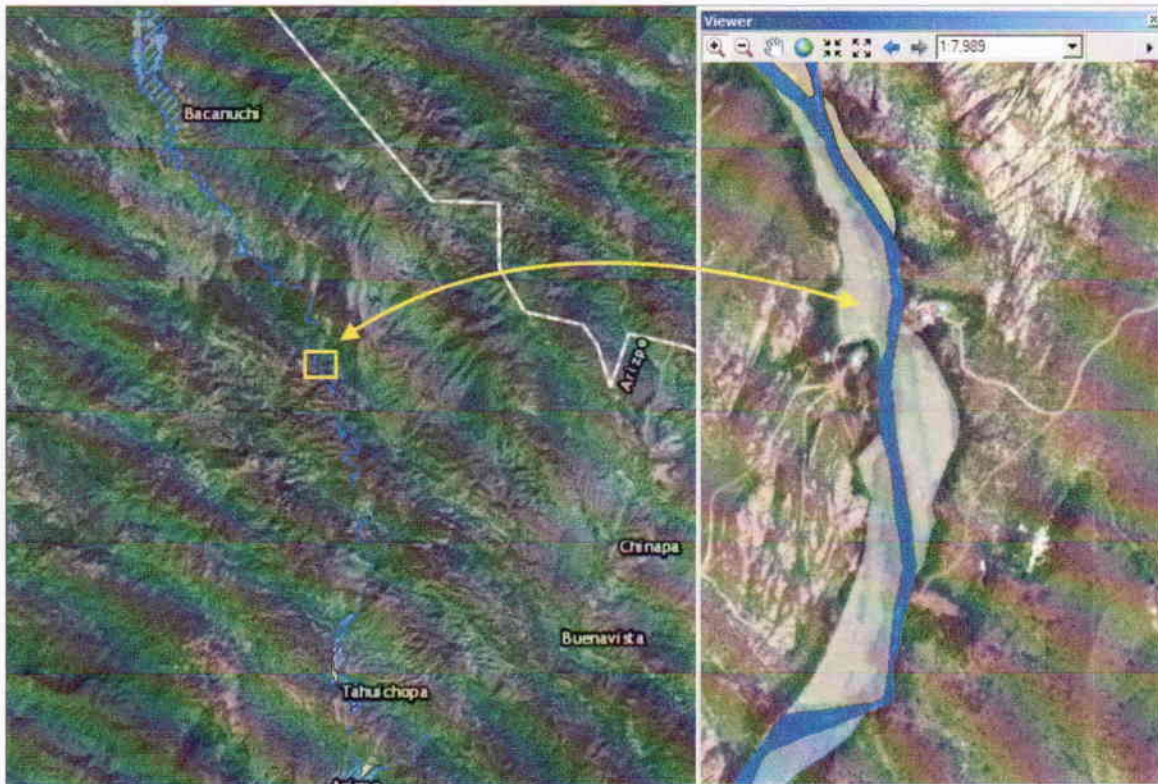


Figura 15 Ejemplo de terrazas de sustrato (color café claro). El estrechamiento del canal y los cambios de dirección del río Sonora en esta zona se deben al control litológico-estructural cuando el río corta el sustrato.

Porcentaje del área cartografiada

- Sistema de canales abandonados
- Bajadas
- Cauce activo
- Depósitos fluviales y canales tributarios
- Depósitos masivos de arrollada
- Llanuras de inundación excepcional
- Lomerío
- Superficie de inundación
- Superficie de inundación antropizada

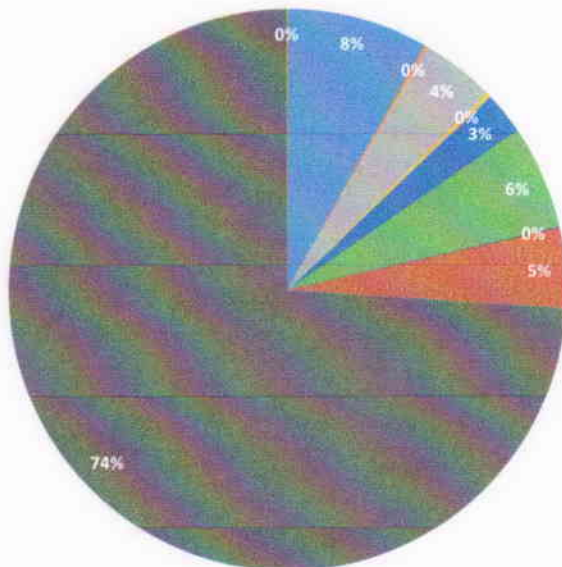


Figura 16 Gráfico con los valores porcentuales de cada unidad con respecto al área total cartografiada.

Tabla 1 Superficie de las unidades mapeadas.

Forma fluvial	Area (km ²)
Sistema de canales abandonados	25.8
Bajadas	0.6
Cauce activo	13.5
Depósitos fluviales y canales tributarios	0.8
Depósitos masivos de arrollada	7.9
Llanuras de inundación excepcional	18.8
Lomerío	0.2
Superficie de inundación	14.5
Superficie de inundación antropizada	232.9
Terrazas	0.3
Total	315.3

6 Análisis de los sedimentos de la presa “El Molinito”

6.1 Protocolo y análisis de muestras de LOE

Los núcleos recibidos para el análisis se abrieron bajo una iluminación de luz segura (rojo). El muestreo se hizo de forma sistemática cada 2 cm y la extracción se realizó con tubos de ~5 cm de diámetro por ~10 cm de largo. Las muestras fueron secadas en un horno por una noche a una temperatura de ~60 °C. Posteriormente las muestras fueron colocadas en discos Petri de aluminio y fueron estimuladas en el equipo PPSL por 60 segundos para IRSL y 60 segundos para BLSL. Una vez finalizadas las lecturas se procedió al graficado de los datos. Los núcleos analizados fueron los etiquetados con número IV, IX, XV y XVIII.

6.2 Protocolo y análisis de muestras de ¹³⁷Cs

Las muestras de los núcleos se analizaron cada 2 cm. Se extrajo ~6 gramos de material y fue previamente secado por una noche en un horno a una temperatura de ~60 °C. El espectrómetro gamma fue calibrado con agua destilada y para la medición de recipientes de 100 ml. El tiempo de medición de cada una de las muestras fue de 1 hora. Para la obtención de la concentración del ¹³⁷Cs en Bq kg⁻¹ se normalizaron las muestras a 100 gr. Además del radionúclido mencionado también se obtuvieron los datos para ⁴⁰K y ⁹⁰Sr. El ¹³⁷Cs se calculó para los núcleos IV y IX.

6.3 Resultados de la LOE en los núcleos “El Molinito”

Núcleo IV

El patrón de luminiscencia con la profundidad no cumple la condición esperada de un ambiente acumulativo. Parece existir un cambio a los 80 cm donde las señales de IRSL y BLSL tienen un incremento significativo. El indicador IRSL/BLSL sugiere que por encima de los 80 cm hasta la superficie hay un cambio en los aportes de los materiales, los cuales pueden asociarse a un cambio en los materiales fuente.

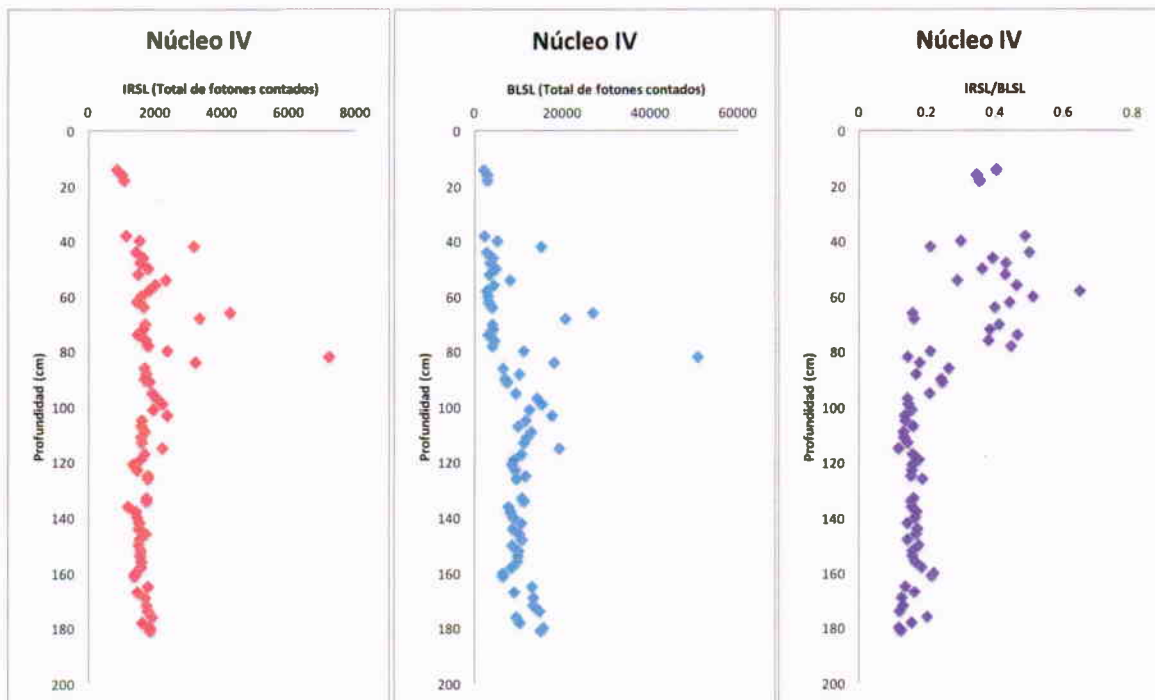


Figura 17 Cambios de luminescencia con la profundidad del núcleo 4.

Núcleo IX

Los valores IRSL y BLSL presentan una marcada tendencia de incrementar con la profundidad (Fig. 9). Existe un cambio en los patrones de sedimentación a una profundidad de 125 cm. Los valores IRSL/BLSL cambian a lo largo del núcleo, tal condición se interpreta como cambios en la procedencia de los sedimentos. El cambio más notorio en los valores IRSL/BLSL es a partir de los 80 cm hacia la superficie.

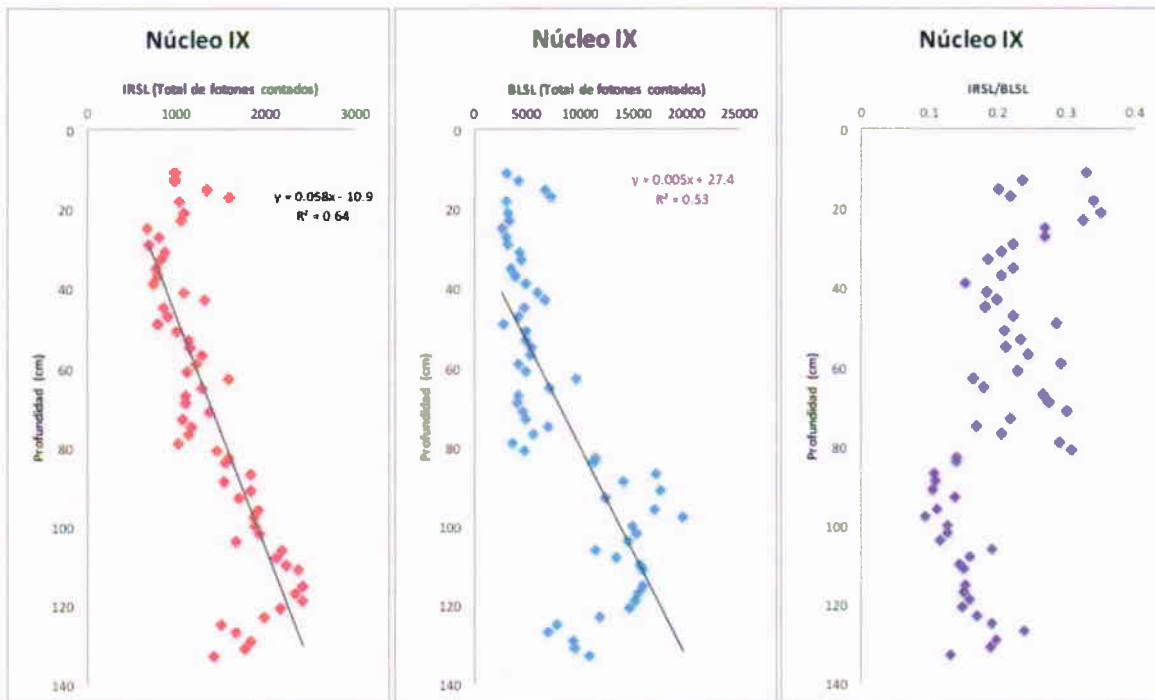


Figura 18 Cambios de luminescencia con la profundidad del núcleo 9.

Núcleo XV

Los valores IRSL y BLSL con la profundidad indican que las tasas de sedimentación no son de forma continua. Es probable que en este caso la extracción del núcleo se encuentre en un sector donde existe el aporte de sedimentos de distintos tributarios. La similitud de valores IRSL/BLSL a lo largo del perfil sugiere que en esta parte no hay un cambio en la procedencia de los materiales (Fig. 10).

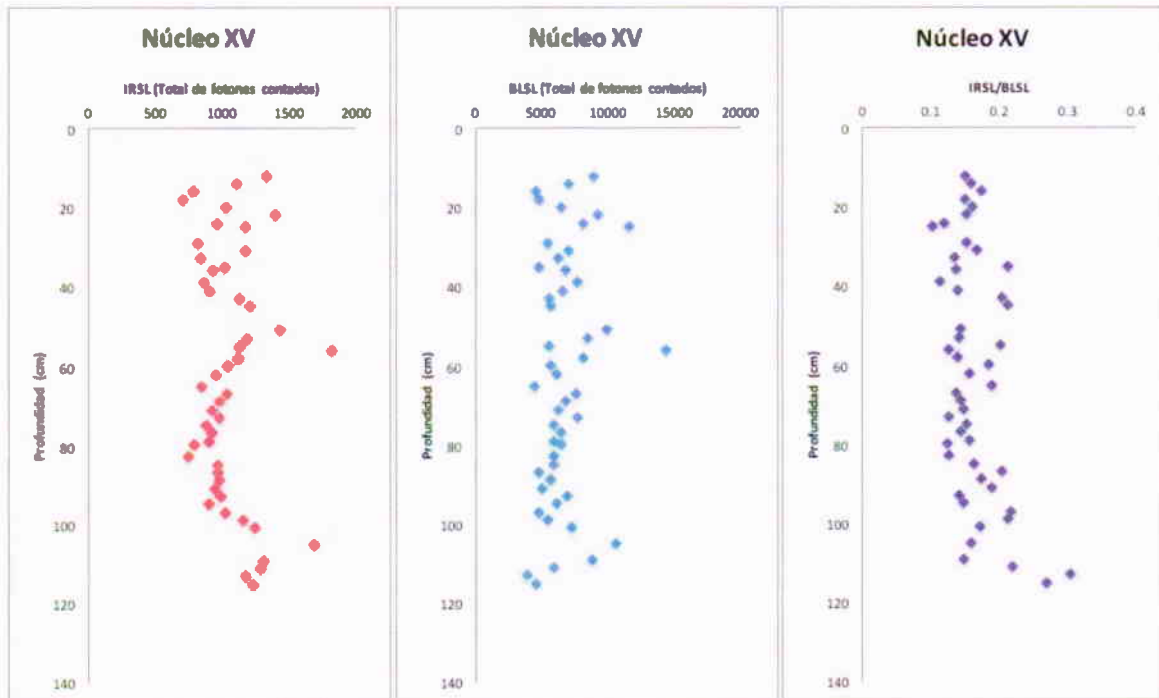


Figura 19 Cambios de luminescencia con la profundidad del núcleo 15.

Núcleo XVIII

En este núcleo existe una marcada tendencia del incremento de los valores IRSL y BLSL con la profundidad. Este tipo de patrón es el esperado en los ambientes acumulativos con es el caso de los lagos. Existe un incremento notorio de la luminiscencia a los 150 cm de profundidad, sin embargo, dicho cambio no genera cambios sustanciales en la tendencia general. En la superficie existe un cambio en los valores de la luminiscencia los cuales parecen asociarse a cambios en la procedencia de los sedimentos (Fig. 11). Cabe mencionar que desde los 50 cm hasta los 200 cm no hay cambios sustanciales en los valores IRSL/BLSL, por lo tanto, se infiere que no hay un aporte nuevo en la procedencia de los sedimentos.

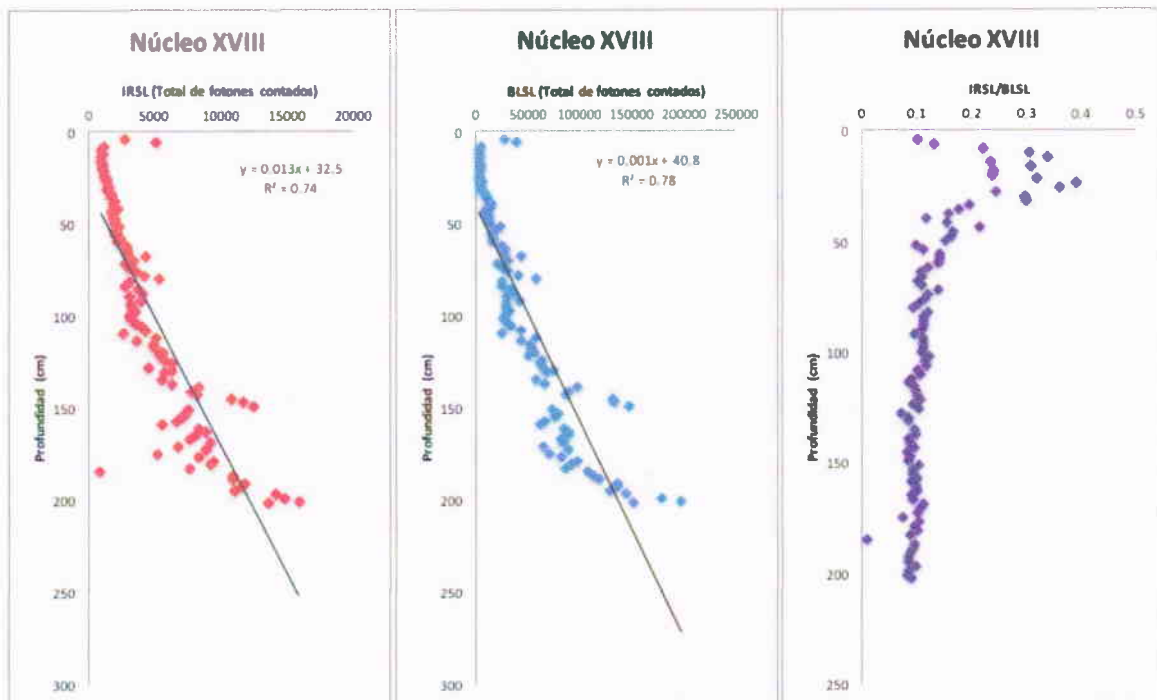


Figura 20 Cambios de luminescencia con la profundidad del núcleo 18.

6.4 Resultados del ^{137}Cs en los núcleos "El Molinito"

Núcleo IV

En el núcleo se detectó la presencia del ^{137}Cs a lo largo de todo el perfil (Fig. 12). Tal comportamiento es esperado ya que la presa fue construida mucho después de los años 50's del siglo pasado. La variabilidad del ^{137}Cs es denotativa de los episodios de erosión/sedimentación en el sistema fluvial y los altibajos que presenta sugieren que corresponden a periodos estacionales, también podrían estar asociados a eventos relacionados con el fenómeno del Niño o a la presencia de huracanes que producen una rápida movilización de materiales.

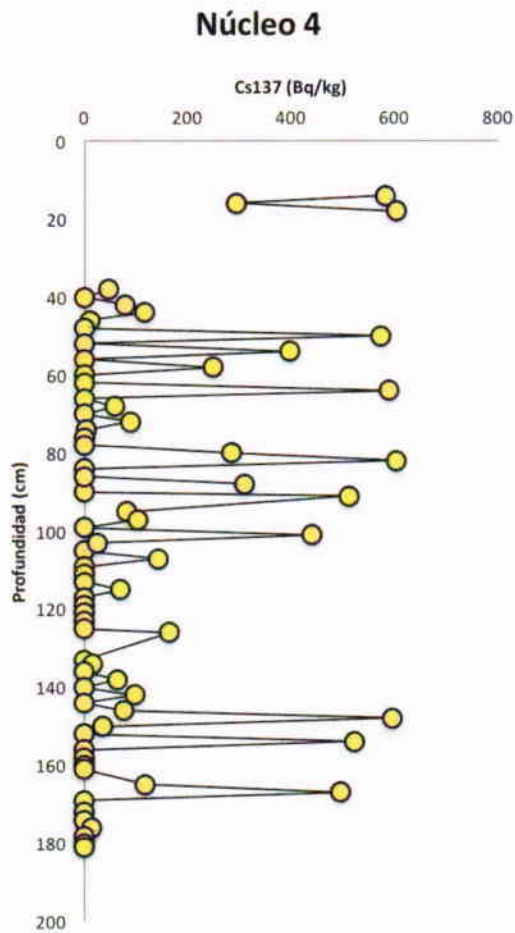


Figura 21 Concentración de ^{137}Cs a lo largo del núcleo 4.

Núcleo IX

Al igual que el núcleo 4 se detectó la presencia del ^{137}Cs a lo largo del perfil (Fig. 13). En este caso existen dos concentraciones importantes del radionúclido, una a los 20 cm y otra a los 104 cm de profundidad. Los picos de ^{137}Cs denotan en este caso episodios erosivos en la cuenca. A pesar de la presencia de los picos en el ^{137}Cs la variabilidad observada en el perfil sugiere que existe un control climático en la cuenca.

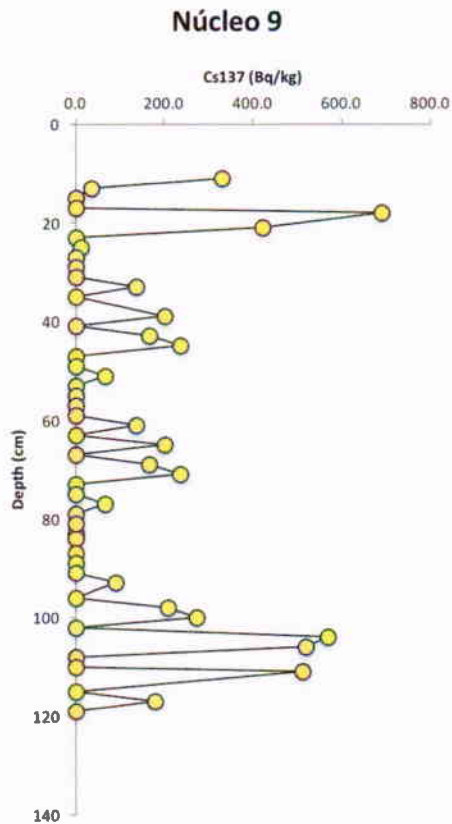


Figura 22 Concentración de ¹³⁷Cs a lo largo del núcleo 9.

7 Observaciones y consideraciones finales

El Río Sonora, analizado desde el Río Tinajas hasta la presa “El Molinito”, presenta una variabilidad en términos del comportamiento hidráulico, así como de la potencia fluvial, lo cual indica que un enfoque de continuidad para el estudio del río resultaría en una generalización de los procesos fluviales donde la descarga, la anchura y capacidad de carga de sedimentos aumenta en función del área de drenaje. Debido a que gran parte de las condiciones climáticas del sistema fluvial del Río Sonora son de tipo árido a semiárido, los procesos fluviales tienen un comportamiento distinto a otros ambientes fluviales (Fig. 14). Para el caso concreto de las zonas áridas y semiáridas la movilización de sedimentos y las descargas ocurren de forma más o menos instantáneas debido a intensas precipitaciones en lapsos cortos.

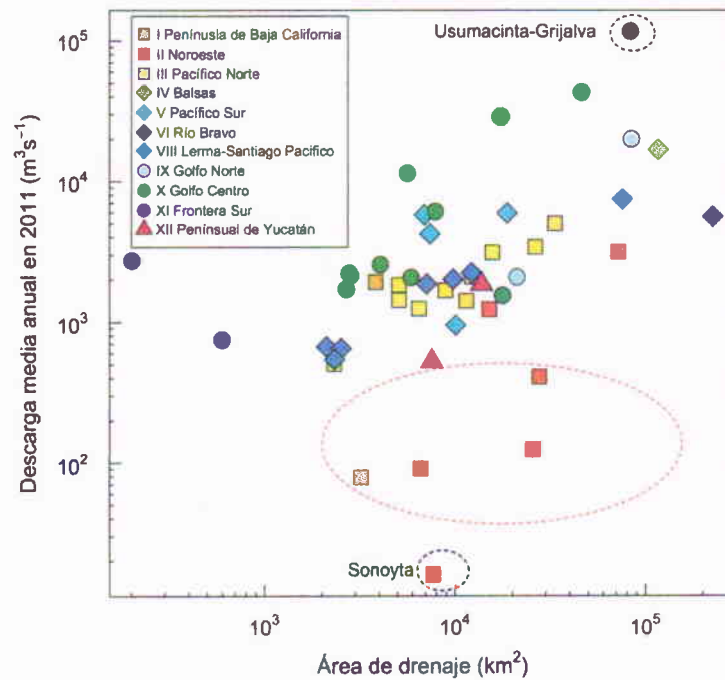


Figura 23. Gráfico de la relación entre la descarga de los ríos y el área de drenaje. Nótese la agrupación para el caso de los ríos del Noroeste de México y su variabilidad con respecto al área de drenaje (elipse punteada en rojo).

En la zona de estudio se aprecia que en distintos tramos existe una importante acumulación de sedimentos, mismos que son resultado del transporte del propio río o del aporte de los tributarios. Es muy probable que el aporte masivo de sedimentos o su degradación sólo se presente cuando existen intensas precipitaciones con periodos largos de retorno. Por lo tanto, la delimitación de las áreas de inundación debe considerar la presencia de los depósitos masivos y las llanuras de inundación excepcionales.

La delimitación de la zona de estudio con base en criterios geomorfológicos integra todas aquellas formas de origen fluvial que pueden reactivarse ante fuertes precipitaciones. La propuesta de clasificación que aquí se presenta es aún de carácter preliminar ya que es necesario incluir en ésta criterios hidráulicos, probabilísticos y cronológicos para delimitar las geoformas que son más vulnerables ante una inundación y detectar aquellas que puedan considerarse estables. A pesar de ello, las unidades identificadas permiten hacer una valoración rápida de la zona de influencia fluvial en las cuales puede integrarse información físico-química y ambiental.

Los datos de LOE y ^{137}Cs confirman, al igual que el mapeo geomorfológico, que el Río Sonora presenta una alta variabilidad en su comportamiento hidráulico. Los datos de luminiscencia hacen patente que la cuenca recibe aportes importantes de sedimentos en ciertos periodos, mismos que pueden estar relacionados eventos máximos que producen la movilización masiva de sedimentos en los ríos tributarios. Es necesario tener un núcleo que contenga un registro único de la porción central de la presa “El Molinito” para tener una secuencia ininterrumpida de la sedimentación.

La variabilidad observada en las concentraciones de ^{137}Cs , indican que en el Río Sonora hay periodos erosivos/acumulativos pronunciados. La técnica del ^{137}Cs es prometedora para determinar las tasas de sedimentación históricas, no obstante, se requiere de un futuro análisis de los sitios donde no haya erosión y donde ésta sea intensa para determinar las tasas de erosión y los valores de referencia para la cuenca. Los episodios erosivos inferidos a partir del ^{137}Cs sugieren que existe en la zona un control climático. Debido a su posición geográfica, la cuenca del Río Sonora es afectada por el Monzón Norteamericano y la presencia de huracanes en el Pacífico y posiblemente esté influenciada por las fases de El Niño y La Niña, sin embargo, esto no ha sido abordado de en detalle. Es necesaria una futura investigación centrada en esclarecer cómo afectan el clima y los fenómenos de El Niño y La Niña en la respuesta erosiva y acumulativa del Río Sonora.

Referencias

Verstappen, H., van Zuidam, R., 1991. The ITC System of Geomorphologic Survey: A basis for the evaluation of natural resources and hazards. ITC Publication, núm. 10, Enschede, The Netherlands.

López-Blanco, Villers, L., 1998. Delineating boundaries of environmental units for land management using a geomorphological approach and GIS: A study in Baja California, Mexico. *Remote Sensing of Environment* 52: 109–117.

Castillo, M., López-Blanco J., Muñoz-Salinas, E., 2010. A geomorphologic GIS-multivariate analysis approach to delineate environmental units, a case study of La Malinche volcano (central México). *Applied Geography* 30: 629–638.

Muñoz-Salinas, E., Castillo, R., 2014. Luminiscencia Ópticamente Estimulada aplicada a sedimentos uviales: Un enfoque basado en la interpretación de las señales luminosas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66: 225–233.

Brown, R.B., Cutshall, N.H., Kling, F., 1981. Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs Redistribution: I. Levels and distributions of ^{137}Cs activity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 45: 1184–1190.

Zapata, F., Garcia-Agudo, E., Ritchie, J.C., P.G. Appleby, 2002. *Introduction*. En: Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides, Zapata, F.(Ed). Kluwer Academic Publisher, EUA.

Selby, M., 1985. Earth's changing surface: An introduction to Geomorphology. Clarendon Press, Oxford.

Leopold, L., Wolman, G., Miller, J., 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. Dover Publications, EUA.

Bagnold, R., 1960. Sediment discharge and stream power. *Geological Survey Circular* 412.

Schumm, S.A., 2005. Base-level. En: River variability and complexity, Schumm, S.A. (Ed). Cambridge University Press, Reino Unido.

Bagnold, R., 1977. Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research* 13: 303–312.

Castillo, M., Lugo-Hubp, J., 2011. Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63: 353–364.

Shepherd, R.G., Schumm, S.A., 1974. Experimental study of river incision. *Geological Society of America Bulletin* 85: 257–268.

Leopold, L., Maddock, T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey Professional Paper* 252.

Sklar, L., Dietrich, W., 1998. River longitudinal profiles and bedrock incision models: stream power and the influence of sediment supply. En: Rivers Over Rock: Fluvial Processes in Bedrock Channels, Tinkler, K. y Wohl, E., (Eds). Geophysical Monograph, 107, American Geophysical Union, EUA.

Montgomery, D.R., 2001. Slope distributions, thresholds hillslopes and steady-state topography. *American Journal of Science* 301: 432–454.

Kirby, E., Whipple, K.X., 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *Journal of Structural Geology* 44: 54–75.

Church, M., 2006. Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annual Review Earth Planetary Science* 34: 325–354.

Montgomery, D.R., 1999. Process domains and the continuum. *Journal of the American Water Resources Association* 35: 397–410.

Burchsted, D., Daniels, M., Wohl, E., 2014. Introduction to the special issue on discontinuity of fluvial systems. *Geomorphology* 205: 1–4.

Molnar, P., Anderson, R.S., Kier, G., Rose, J., 2006. Relationships among probability distributions of stream discharges in floods, climate, bed load transport, and river incision. *Journal of Geophysical Research* 111, F02001.

García, E., 1965. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Publicaciones del Instituto de Geografía, UNAM* 1: 171–191.