



Tecnología y Ciencias del Agua

ISSN: 0187-8336

revista.tyca@gmail.com

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

México

Lascano-Kezic, Marcelo E.

Localización de embalses en cuencas de alta carga sedimentaria: el caso del río Bermejo, Argentina

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. I, núm. 3, julio-septiembre, 2010, pp. 21-38

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Morelos, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353531970002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

LOCALIZACIÓN DE EMBALSES EN CUENCAS DE ALTA CARGA SEDIMENTARIA: EL CASO DEL RÍO BERMEJO, ARGENTINA

• Marcelo E. Lascano-Kezič •
Universidad de Buenos Aires, Argentina

Resumen

La elección del emplazamiento de una presa en ambientes montañosos subtropicales y tropicales debe considerar ante todo la progresión de la colmatación esperable según la carga sólida que transporta un río. Este artículo apunta a destacar que la restricción a la vida útil de posibles embalses puede afectar el planteo de grandes proyectos sobre los afluentes principales, pero que afectaría mucho menos la operación de embalses medianos o chicos sobre afluentes menores con nacientes en cordones externos de pendientes menores. Para ilustrar el planteo se toma el ejemplo de la planificación de la cuenca del río Bermejo, en el norte de la Argentina. Para destacar la heterogeneidad en el comportamiento hidrosedimentario se realiza un análisis ambiental con énfasis en las pendientes globales y a partir de la progresión de la colmatación en un embalse existente en la misma zona se realiza un cálculo estimativo de la vida útil de dos embalses, uno sobre el afluente principal y otro sobre un afluente secundario. Mediante ambos métodos queda reflejada la fuerte heterogeneidad que puede existir al interior de una cuenca mediana o pequeña. Las vidas útiles estimadas para dos embalses en la misma unidad de análisis muestran hasta una relación de 1 a 5.

Palabras clave: Andes tropicales, carga sedimentaria, pendientes, embalses, estiaje, riego.

Introducción

En Hispanoamérica se desarrollan sistemas montañosos de gran altitud, asociados con climas áridos o semiáridos. Este tipo de ambientes orográficos son propensos a la generación de grandes cantidades de sedimentos por unidad de superficie, ante todo por la presencia de pendientes muy pronunciadas en la totalidad o parte de una cuenca. Otros factores como la estacionalidad de la precipitación y los materiales superficiales pueden intensificar la energía morfológica. En general, los planes de manejo de tal tipo de cuencas se topan con el problema de la corta vida útil a la que se vería sujeta una presa: la colmatación del vaso del embalse puede producirse en el corto y mediano plazos. En muchos casos, como los planes

fueron concebidos en torno a uno o dos grandes aprovechamientos ubicados en el afluente principal, la falta de soluciones para el problema de los sedimentos ha bloqueado el tratamiento y consideración de la cuenca en su totalidad.

Este trabajo apunta a destacar la posible existencia al interior de una cuenca de sectores con dinámicas ambientales diferentes a aquellas más extremas, características del escurrimiento en el punto de cierre o afluente principal. En caso de darse esta situación, la planificación hídrica aún será posible a pesar de la inviabilidad del/los proyecto/s madre/s sobre el afluente principal. Por supuesto que desplazar la mirada desde el curso principal hacia los tributarios implica relegar KW de potencia instalada, pero la clave está en considerar el margen de sustentabilidad ganado, construyendo una presa en un eventual

tributario de menor caudal, pero de mucho menor carga sedimentaria al mismo tiempo. En cuencas de marcada estacionalidad, las presas en tributarios pueden asegurar el mantenimiento de un caudal mínimo durante la extendida época de estiaje, típica de climas subtropicales. Si esa subcuenca abarca pendientes excepcionalmente suaves en el contexto de la cuenca mayor, entonces se podrá contar con una vida útil de extensión aceptable. Desarrollaremos esta perspectiva a partir del caso de la cuenca superior o cuenca activa del río Bermejo, en el norte de la Argentina, a la que se asocia un potencial agrícola de varios cientos de miles de hectáreas. El planteo que intentaremos delinear puede ser de utilidad para el análisis de los recursos hídricos en varias partes del continente, particularmente a lo largo de la vertiente oriental de los Andes en el Perú, Bolivia y norte de la Argentina.

Los cordones montañosos jóvenes, desde el punto de vista geológico, suelen estar acompañados por una planicie de acumulación a lo largo de uno de sus flancos. Gran parte del territorio de la India corresponde a la llanura derivada de la denudación del bloque orográfico Himalayo. En la América del Sur, los llanos del Orinoco, la gigantesca planicie amazónica y la planicie central de la Argentina, constituyen el gran glacis pedemontano que acompaña a los Andes por su flanco este. En estos dos ejemplos, donde el contacto entre la montaña y la llanura constituye una línea neta, la velocidad de los procesos tectónicos supera la capacidad de desagregación y transporte relacionada principalmente con el clima. Esta descripción a gran escala de los elementos centrales del tipo de ambiente objeto de este análisis destaca la magnitud de las fuerzas naturales intervinientes.

La asociación entre montaña y planicie plantea algunas singularidades geográficas. El desarrollo altitudinal del relieve magnifica los procesos de lluvia, de manera que el rol hidrológico de la montaña es siempre desproporcionado con respecto a su extensión. El régimen de lluvia de la montaña se proyecta

muchas veces hacia la planicie, donde los acumulados anuales pueden ser mucho menores. Como consecuencia de este cuadro, las presas localizadas en la alta cuenca tendrán un impacto territorial de igual extensión. La regulación del régimen se sentirá en toda la faja de influencia del río.

La necesidad de regulación hidrológica es mayor donde el régimen estacional es muy marcado, con grandes caudales sólo algunos meses. La mayor parte del año el caudal es notablemente menor. Este es básicamente el cuadro ambiental y territorial a lo largo del flanco este de los Andes, desde el norte del Perú, a los 6° S, hasta el norte de la Argentina, aproximadamente a los 27° 30' S (OMM, 1975; Minetti *et al.*, 2002). En la figura 1, la extensión del área con concentración estival de la precipitación superior al 50% marca la extensión de este régimen hidrológico a lo largo de los Andes.

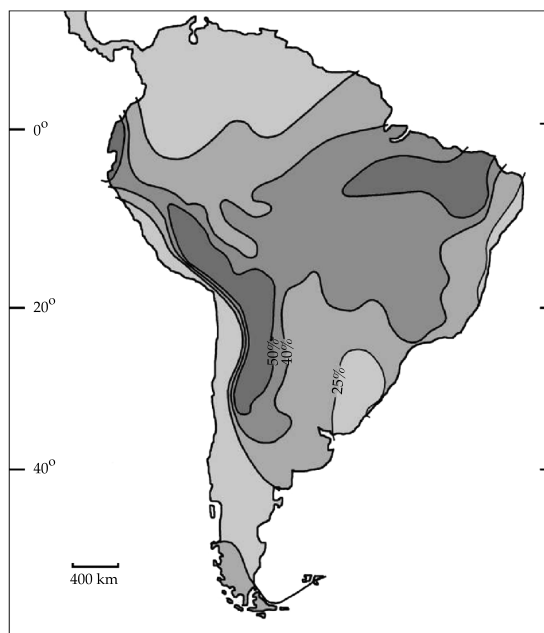


Figura 1. Concentración de la precipitación durante el trimestre enero-marzo. Con base en el mapa de Minetti *et al.* (2002).

Algunos conceptos relacionados con la regulación hidrológica mediante presas

Para facilitar la comprensión de la tesis expuesta en estas páginas será necesario distinguir las escalas temporales de las modificaciones hidrológicas vinculadas con la operación de una presa. Yendo de mayor a menor, en primer lugar debe mencionarse la regulación interanual, consistente en la restitución de un volumen de agua al escurrimiento en un plazo mayor al año. En segundo término, durante la estación de receso hidrológico, una presa puede restituir agua retenida durante los meses de mayor caudal, lo cual puede denominarse regulación interestacional. Y finalmente una presa, generalmente de poco volumen útil, puede suavizar una crecida, restituyendo el volumen retenido apenas finalizado el pulso de caudal. La producción de energía, fundamental para el desarrollo económico, requiere la mayor suavización posible del ciclo anual en el caso de los ríos de marcada estacionalidad, como aquellos del área pedemontana a la que dirigimos nuestra atención. El uso agrícola requiere la garantía de disponer con un mínimo de agua durante el estiaje. En el oeste de la Argentina existen varios aprovechamientos, cuyo principal objetivo es mitigar el estiaje, es el caso del río Mendoza. La regulación hidrológica de este tipo no tiende al valor del módulo, sino al requerimiento consuntivo de la superficie agrícola, existente o potencial. El grado de suavización de la curva anual es, por lo tanto, menor, y estará sujeto a una variable externa al recurso hídrico.

En este trabajo nos referiremos solamente y en específico a esta última función reguladora. El objetivo de este estudio es tomar en cuenta la regulación de una subcuenca menor, evaluando su efecto sobre el caudal del curso principal en su punto de salida hacia fuera de la montaña. En la subcuenca se estudia la relación entre carga sedimentaria y regulación estacional tendiente al módulo, pero la evaluación del régimen anual resultante se evalúa sobre todo en el curso principal, en términos de mitigación

del estiaje. No se aborda el tema de la regulación de crecidas en el punto de salida.

Materiales y métodos

A grandes rasgos, el pedemonte este de los Andes, entre los 6 y 27° S, es una faja homogénea desde el punto de vista de la dinámica hidrogeomorfológica. Las variaciones en la composición de la cubierta vegetal (Bruniard, 1996), pero no en su grado de cobertura, continuo y exhaustivo, probablemente no introduzcan diferencias. Por lo tanto, la evaluación de la cuenca del Alto Bermejo puede aportar criterios para iniciar el planeamiento en los diferentes casos del área. Es esta constatación la que da al análisis presentado un nivel de generalidad, más allá del caso particular. En la figura 2a se ilustran las principales características del área estudiada. Si bien esta zona ha sido objeto de estudios técnicos (OEA, 1974; Argentina, 1982, 1999, 2000a, 2000b; Rafaelli *et al.*, 1998; Brea, 2002), específicamente en cuanto a la generación eléctrica, la vegetación y el inventariado geológico, menos atención ha recibido el cálculo de la vida útil de embalses en diferentes puntos de la cuenca. Si bien en algunos documentos oficiales se hace referencia a proyecciones de colmatación (Argentina, 1999, 2000a), el comportamiento reciente de embalses situados en ambientes hidrosedimentarios equivalentes arroja una gran incertidumbre sobre estos resultados que, por otra parte, se consignan sin referencias metodológicas. En este estudio intentamos vincular el análisis ambiental, como primera instancia, con la selección de emplazamientos para la evaluación de la vida útil de un embalse.

Análisis ambiental

La presentación de las características de la zona de estudio se realiza mediante una revisión de los trabajos de relevamiento disponibles, incluyendo OEA (1974), Argentina

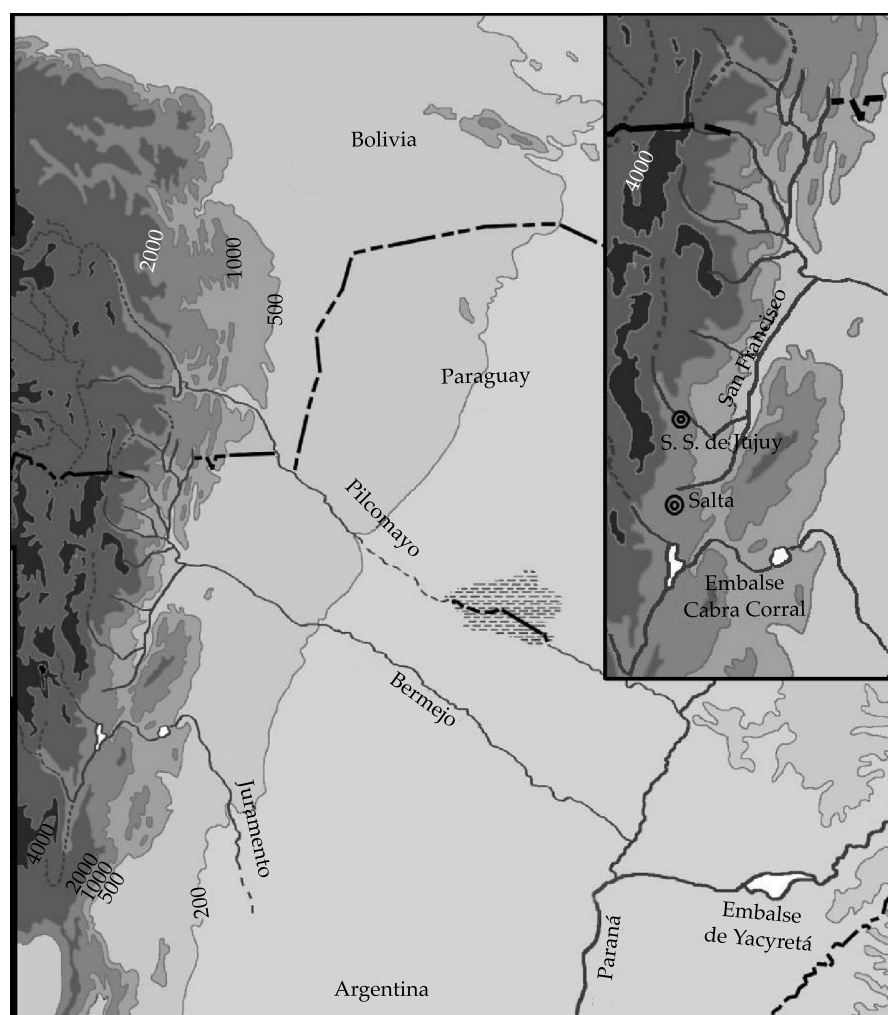


Figura 2a. El río Bermejo en la Cuenca del Plata. Obsérvese cómo los bloques de las sierras de Santa Victoria y Zenta (ver también figura 4) son los más externos, entre los que superan los cuatro mil metros de altura.

(1999, 2000a, 2000b) y resultados reportados en Brea (2002). También se ilustra el despliegue de los factores geográficos mediante una serie de mapas elaborados específicamente, donde se desagregan cartográficamente los factores ambientales y las localizaciones que inciden en el tratamiento del problema formulado en la introducción. Se incluye aquí un análisis de la geometría de los patrones de escurrimiento. Finalmente, el análisis morfométrico permite constatar cuantitativamente, y en forma preliminar, las diferencias reconocidas en la revisión de los relevamientos realizados y en la cartografía hecha.

Para la elaboración de cartografía se utilizaron distintos niveles de información geográfica, ensamblados mediante un *software* de procesamiento de imágenes. Se incluyeron curvas de nivel, cursos principales de escurrimiento, embalses existentes y proyectados, localidades, infraestructura caminera y puntos de medición de variables. Los grises utilizados para realzar la volumetría del relieve guardan proporción con la diferencia entre las cotas medias de los intervalos altimétricos mapeados.

Para el análisis morfométrico de las subcuencas se utilizó la cobertura cartográfica

digital de curvas de nivel, con una equidistancia de cien metros, provista por el Instituto Geográfico Militar (Argentina, 2004a). Con esta información se midió la distribución altimétrica de las subcuencas analizadas y se obtuvieron las alturas medias como *proxy* de la pendiente general. Las delimitaciones de las subcuencas se hicieron a partir del punto donde las curvas de nivel marcan el quiebre de pendiente entre la planicie y el bloque deformado, por lo que se tomaron niveles de distinta cota. Para permitir la comparación entre las subcuencas se redujeron las distribuciones altimétricas a cero, restando la cota del nivel de base a todos los rangos altimétricos, de forma que a igual nivel de base y similar extensión, las diferencias en altura media son indicativas de las diferencias en pendiente.

Cálculo preliminar de progresión de colmatación y la vida útil de un embalse

En el presente trabajo se utilizan los caudales líquidos y los caudales sólidos en suspensión medios anuales medidos en la alta cuenca del

Bermejo, provistos por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (Argentina, 1991; Argentina, 2004a). Por un lado, se usan los caudales del río principal, el Alto Bermejo, registrados en Zanja del Tigre, lugar al que consideraremos punto de salida de la cuenca en su totalidad; por otro lado se utilizan los datos para varias subcuencas: las del río Pescado, Santa Victoria, Iruya y Lipeo. La delimitación de la cuenca total y las subcuencas, así como la ubicación de los puntos de medición de caudal pueden verse en la figura 2b. Los datos de carga sedimentaria, expresados en toneladas totales, se refieren al periodo 1971-1972/1988-1989, durante el cual el caudal de los ríos analizados estuvo sobre la media 56-02 (Argentina, 2004a), por lo que las estimaciones de vida útil obtenidas son conservadoras. Estos son los últimos datos sistematizados y publicados. Para el cálculo de las medias anuales utilizadas (ver cuadro 2) se consideraron series homogéneas.

Para calcular la progresión de la colmatación esperable sobre los afluentes del Alto Bermejo, se obtuvo una densidad media del caudal sólido de referencia (en adelante,

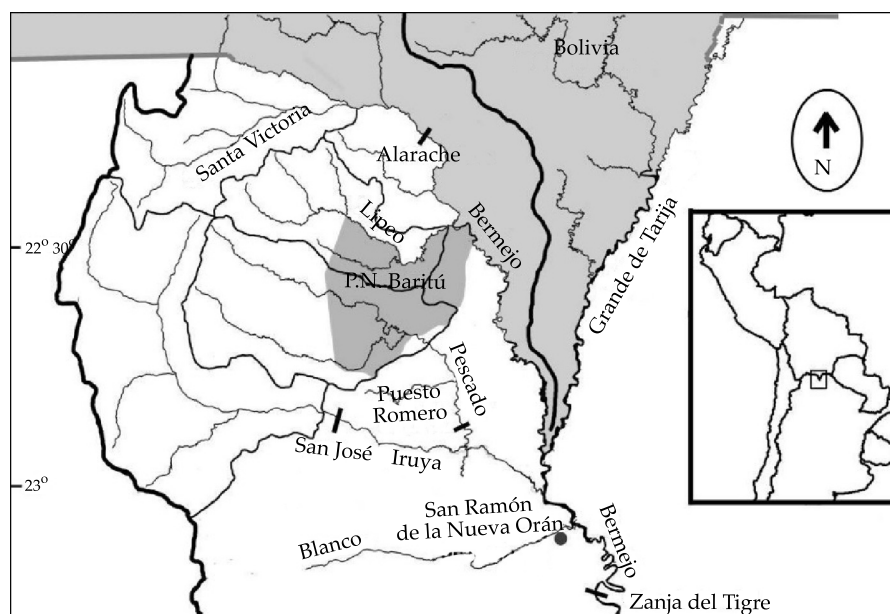


Figura 2b. Las subcuencas del Alto Bermejo analizadas en este artículo y sus respectivos ríos. Se incluyen también otros topónimos mencionados.

DR), para traducir el peso del caudal sólido a volúmenes de colmatación. DR se obtuvo a partir del caso del embalse Cabra Corral sobre el río Juramento (ver plano 2a), según la relación entre tres indicadores:

1. Los registros de caudales sólidos anuales totales del río Juramento (media para el periodo 1958-1967) en el lugar donde hoy se encuentra el cierre de Cabra Corral.
2. La progresión de la colmatación del embalse de Cabra Corral (ver ubicación la figura 2a) entre 1973 y 1982 (reportada en Argentina, 1991).
3. El derrame o caudal medio anual aguas debajo de Cabra Corral, medido entre 1958 y 1982.

Al llenarse el embalse Cabra Corral quedó discontinuada la sección donde se realizaron las mediciones de carga sólida en suspensión, 1958 y comienzos de 1968, por lo que debe estimarse el caudal sólido anual medio para el periodo 1973-1982, durante el cual operó el

embalse, que puede obtenerse a partir de la correlación entre caudal sólido y líquido, según la proporción:

$$S \propto f(Q) \quad (1)$$

Donde S es el caudal sólido medio anual, medido en toneladas por año, y Q es el derrame (volumen escurrido por año, en hm^3) o el caudal medio anual, medido en m^3/s . Siguiendo la relación lineal existente entre S y Q anuales ($r^2 = 0.8$ o superior para los afluentes en la región; ver también Argentina, 1991), S para el periodo de operación del embalse puede obtenerse a partir de:

$$S_{73-82} = [(Q_{73-82} - Q_{58-67}) / Q_{58-67}] S_{58-67} \quad (2)$$

De esta forma, y con el fin de realizar una evaluación preliminar que permite comparar alternativas de emplazamiento, DR puede obtenerse a partir de la relación:

$$DR = S_{73-82} / VOL_{73-82} \quad (3)$$

Cuadro 1. Caudales medios mensuales del río Alto Bermejo.

m^3/s	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A
Zanja del Tigre	49	62	149	351	733	1 027	965	484	197	113	80	61

Fuente: Subsecretaría de Recursos Hídricos. Se considera el año hidrológico (desde septiembre hasta agosto).

Cuadro 2. Indicadores relacionados con el régimen de carga sedimentaria para algunas subcuencas del Alto Bermejo.

	Santa Victoria Ampliado	Iruya	Pescado	Lipeo
Superficie de aporte (km^2)	2 260.0	2 120.0	1 700.0	s/d
Altura media reducida (metros)	1 895.0	2 372.3	1 378.5	1 320.0
Caudal líquido (módulo) 71-72/88-89 (m^3/s)	24.1	66.8	53.9	27*
Caudal sólido en suspensión 71-72/88-89 (aporte anual, en miles de toneladas)	5 023.4	35 541.2	6 557.3	s/d
Caudal sólido específico ($\text{ton}/\text{km}^2/\text{año}$)	2 222.7	16 764.7	3 857.3	s/d
Ubicación de aforo	Alarache	San José	P. Romero	?

Los caudales líquidos y sólidos se homogeneizaron al periodo 1971-1972/1988-1989, por lo que pueden diferir de cifras oficiales. El módulo del río Lipéo corresponde a lo mencionado en diferentes documentos del estudio de la OEA.

Donde DR es la densidad de referencia, expresada en toneladas por hm^3 , y VOL es el volumen perdido por el embalse Cabra Corral desde el inicio de sus operaciones, expresado en hm^3 , hasta mediados de 1982. La morfología (ver figura 2a) y el clima de esta cuenca (Bruniard, 1981; Bianchi y Yáñez, 1992) son similares a los del Alto Bermejo, por lo que puede considerarse que el módulo granulométrico de la carga de ambos ríos es similar. En consecuencia, puede interpretarse que los materiales que componen los sedimentos son similares en cuanto a densidad y, por lo tanto, en cuanto al volumen de colmatación por unidad de peso. A partir de este razonamiento, DR puede aplicarse a los caudales sólidos anuales medidos en el Alto Bermejo, permitiendo traducir los datos de S en volúmenes medios anuales de colmatación para distintas subcuencas:

$$\text{VMAC} = S_{sc\ 1,2,\dots,72-88} / \text{DR} \quad (4)$$

Donde VMAC es el volumen medio anual de colmatación, expresado en $\text{hm}^3/\text{año}$, y $S_{sc\ 1,2,\dots,72-88}$ es el caudal sólido medio anual, para el periodo 1972-1988, en los afluentes de las subcuencas donde se evalúa un embalse. Es importante reiterar que no se extrapola el comportamiento de una cuenca, sino que se traslada la relación peso/volumen y se inserta en el propio comportamiento del Alto Bermejo. Por otro lado, al relacionar el caudal sólido en suspensión con la progresión de la colmatación de un embalse, se incluye indirectamente el aporte de la carga de fondo. Obtenido así VMAC, puede calcularse la vida útil, VU, de un embalse en una subcuenca, a partir de:

$$\text{VU} = (\text{VOL PROY} * 0.5) / \text{VMAC} \quad (5)$$

Donde VU es la cantidad de años durante los cuales el embalse cuenta con un volumen mínimo para retener y restituir agua según los objetivos del proyecto, y VOL PROY es el volumen del vaso de un embalse proyectado. Se considera convencionalmente que la vida

útil de un embalse finaliza cuando queda colmatado el 50% de su volumen total (Kruse y Casanova, 1993). Se trata de un criterio general, pero puede servir de referencia para hacer comparaciones.

Así como el cálculo de las alturas medias reducidas es el primer indicador utilizado, el procedimiento desarrollado de (1) a (5) permite arribar a una segunda parametrización de la comparación ambiental. Su nivel de precisión en cuanto al análisis individual de un embalse no sobrepasa un carácter global.

Debe destacarse la ventaja de que la ausencia de ambientes glaciarios o periglaciarios en la cuenca del Alto Bermejo permite descartar la posibilidad de que los aumentos de temperatura a largo plazo (IPCC, 2007) produzcan cambios en la generación de sedimentos (Brenning, 2003), lo cual permite descartar las variaciones a largo plazo de temperatura como fuente de incertidumbre. Por el lado de las variaciones a largo plazo de la precipitación, la utilización de valores medios de S correspondientes a un periodo durante el cual Q estuvo sobre la media (1972-1988), si bien no permite descartar la incertidumbre, la reduce al conducir a resultados conservadores.

Resultados

Análisis ambiental de la generación de carga sedimentaria en la cuenca del Alto Bermejo

En el cuadro 1 se muestran los caudales medios mensuales del Alto Bermejo registrados en Zanja del Tigre. En el caso del Alto Bermejo, el estiaje prolongado es el factor que marca los límites actuales a un mayor aprovechamiento efectivo del derrame del Alto Bermejo. La distribución anual del derrame del Alto Bermejo es consecuencia del ciclo anual de las lluvias en las sierras del frente andino, por lo que se harán algunas consideraciones sobre el régimen de precipitaciones. La humedad ingresa hacia el sector a partir de las circulaciones secundarias de la atmósfera vinculadas con el denominado Jet de Capas Bajas/Baja del Chaco, sistema que

si bien registra episodios a lo largo de todo el año, tiene su mayor actividad durante el verano (Marengo *et al.*, 2001). Las lluvias se disparan por mecanismos de convección térmica y orográfica. Los diferentes tipos de componente orográfica en la convección vinculados con la morfología de este sector han sido descritos por Bianchi y Yáñez (1992). Por otro lado, durante el invierno (mayo a septiembre) existe un factor inhibitorio de las precipitaciones, que establece un receso marcado de las lluvias de gran regularidad interanual, más allá de la variación del monto anual (ver inversión del gradiente térmico vertical a sotavento de los Andes en Bruniard, 1981). La génesis a escala sinóptica de las lluvias explica la persistencia del fuerte carácter estacional del Bermejo.

Un segundo rasgo definitorio de las precipitaciones es su gradiente altitudinal. Respondiendo a un perfil vertical típico de

algunas zonas tropicales, las mediciones consignadas en Bianchi y Yáñez (1992), y Bruniard (1992) muestran un rápido aumento hasta los dos mil metros aproximadamente, donde se producen máximos en torno a los 2 000-3 000 mm. Hacia alturas mayores, el gradiente se invierte y los acumulados anuales se reducen rápidamente. El estudio de Morales *et al.* (2004) ha destacado el carácter dominante de la precipitación como factor de control en el alcance altitudinal de la vegetación arbórea en la zona. En la figura 4 se resalta la curva de 2 200 metros como indicativa del límite entre ambas zonas pluviales.

En cuanto al régimen hidrológico resultante, la variabilidad interanual puede analizarse a partir de dos épocas: el semestre de estiaje, entre mayo y octubre, y la época de altas aguas, de diciembre a abril. Para los fines de este trabajo es destacable que la variabilidad

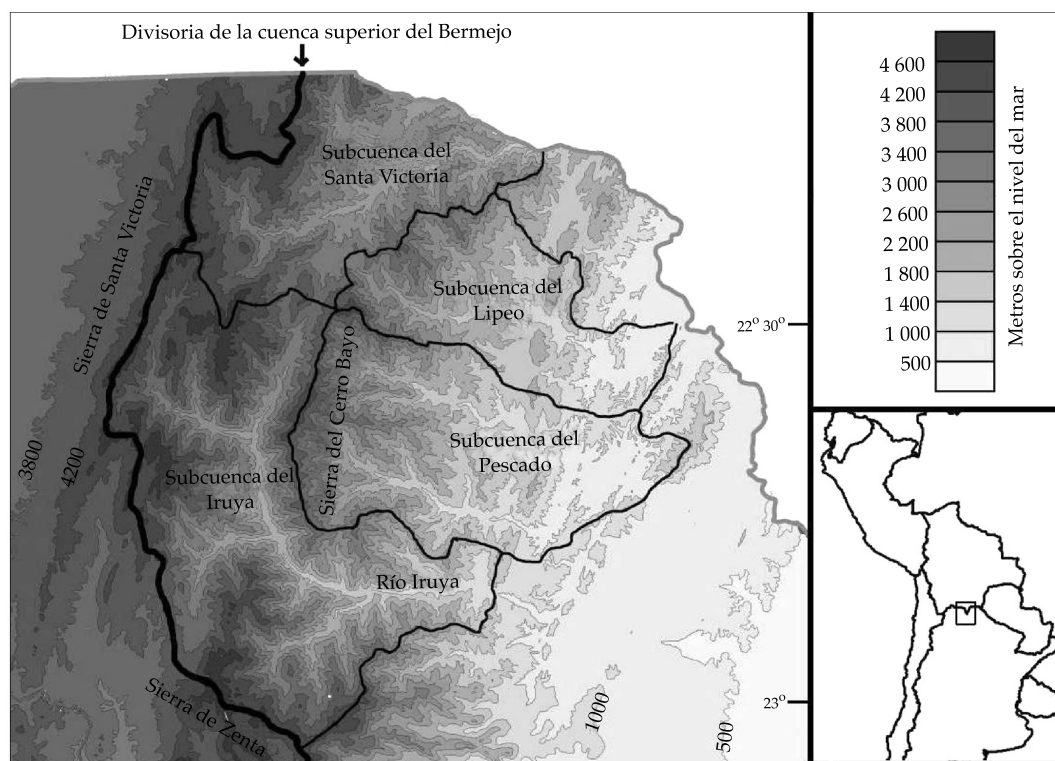


Figura 3. Altimetría de las subcuencas del Alto Bermejo analizadas en este estudio.

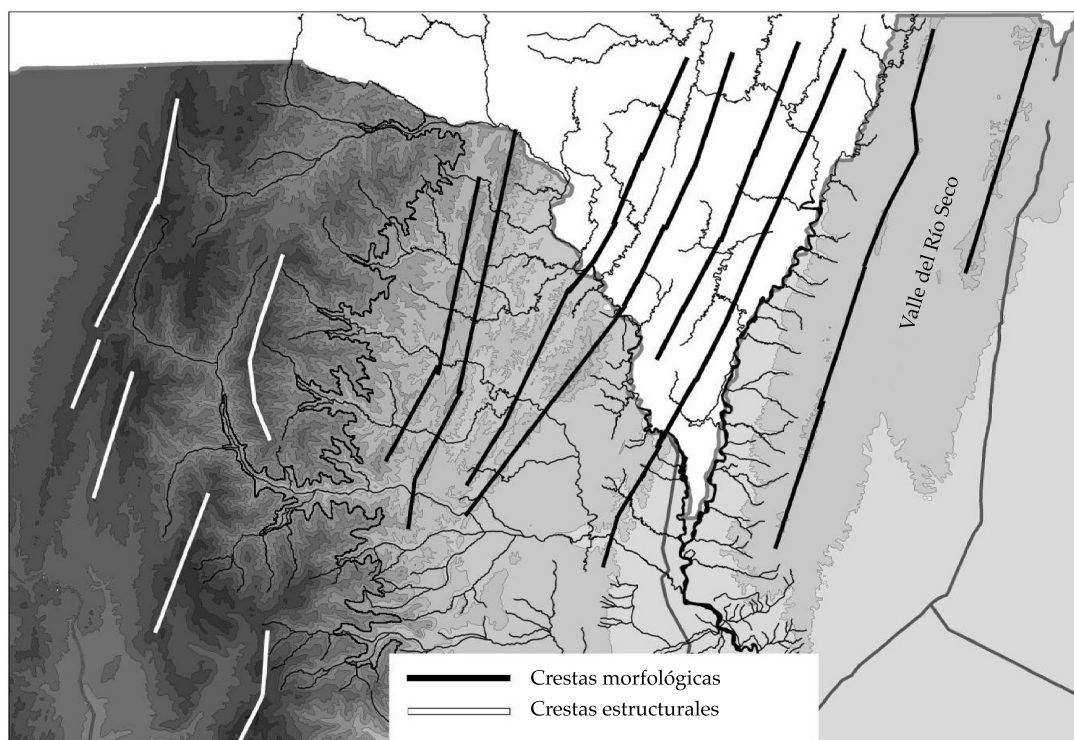


Figura 4. Morfología y patrones de escurrimiento.

interanual del derrame sólo explica el 35% ($r = 0.5962$) de la variabilidad del semestre de estiaje; es decir, el comportamiento del caudal durante esta época tiene una relación secundaria con las fluctuaciones del clima, quedando determinada por caracteres morfométricos y morfológicos de la cuenca (escurrimiento subsuperficial y subterráneo de receso). Al contrario, la época del altas aguas responde directamente a la variabilidad interanual de aportes atmosféricos ($r = 0.9952$, 99% de la varianza).

Ya caracterizado el régimen anual, puede afirmarse que todo uso del agua asociado con el Alto Bermejo depende no ya de la disponibilidad anual sino de la regulación de la fuerte y persistente estacionalidad del caudal en el afluente principal. Y más que a la concentración estival, la atención debe dirigirse al prolongado estiaje que se registra entre mayo y septiembre. Los distintos estudios

sobre el Bermejo han propuesto una serie de represas en la alta cuenca que aporta el 80% del caudal líquido registrable en Juntas de San Francisco (confluencia con el río San Francisco). Por esta razón, entonces sólo es relevante el tratamiento de las características ambientales del Alto Bermejo. En este apartado se analizan distintos factores que hacen la principal restricción que debe enfrentar el diseño de un sistema de regulación en esta cuenca: el régimen hidrosedimentario o de carga sólida del río Alto Bermejo

Litología y régimen de tormentas

Se explican algunos aspectos que permiten comprender el particular régimen de carga sólida de los afluentes del Alto Bermejo, de forma que su tratamiento y consideración queden insertados con una dimensión adecuada en la evaluación de las diferencias

de la vida útil de embalses en distintas localizaciones.

Determinados sectores de la cuenca activa del Bermejo tienen uno de los mayores índices de generación de carga clástica por unidad de área en el mundo (Argentina, 2000a). Varios elementos se conjugan de forma que todo represamiento contará con una vida útil menor a la cantidad de años estimables en otros ambientes fluviales. Primero pueden analizarse algunos factores al nivel global de toda la cuenca.

En primer lugar, el carácter sedimentario de las rocas que componen las laderas en la cuenca activa. Este sector se corresponde a la provincia geológica de las Sierras Subandinas, siendo, según Ramos (2000), los rasgos distintivos de delimitación la reciente deformación (desde hace aproximadamente 13.5 millones de años hasta el presente), y la composición litológica predominantemente sedimentaria (conglomerados, areniscas fangolitas, rocas con matriz clástica de calibre grueso, típicamente torrenciales), incluyendo depósitos fluviales generados por el levantamiento de la Puna hasta de edad cuaternaria (esto es, de hasta dos millones de años, de muy reciente depositación en la escala del tiempo geológico, que ya están siendo deformados). Esta historia geológica no habla de materiales cohesionados de gran resistencia a los agentes atmosféricos y a otros procesos de desagregación de rocas. Este es el cuadro que corresponde a la casi totalidad de la cuenca superior del Bermejo.

Teniendo presente este primer elemento, toma significado pleno la interpretación del régimen de tormentas. Los pulsos de precipitación explosivos, esto es, con importantes acumulados en poco tiempo (Bianchi y Yáñez, 1992), caen sobre un sustrato de baja cementación.

Morfología y pendientes

Como se ha señalado, algunos rasgos presentes en toda la cuenca favorecen la generación

de sedimentos, pero al analizar algunas subcuencas se reconocen diferencias muy importantes. Para una mejor comprensión de este apartado se recomienda seguir la redacción en la figuras 2b, 3 y 4. Para una mayor amplitud puede contarse con la carta aeronáutica mundial.

La subcuenca del río Iruya genera el 51% de los sedimentos en suspensión que se registran en Zanja del Tigre, según su peso. El tonelaje aportado podría ser mayor, ya que en el tramo entre Juntas de San Antonio y algunos kilómetros aguas abajo de Zanja existe tendencia a la depositación (Cfr. COREBE 2000 b).

Además de la pendiente, la litología y las lluvias en la generación de la carga sólida también han tenido incidencia de una modificación introducida por los pobladores a principios de 1860. Según lo indicado en COREBE (2000 b), ya desde fines del siglo XVIII, los habitantes de Orán consideraban desviar el río Iruya desde su desembocadura de entonces, en el río Blanco (figura 5), hacia el río Pescado. El objetivo era reducir el riesgo que implicaban las fuertes avenidas para la localidad. Para la primer crecida de 1865, las aguas ya circularon desembocando en el río Pescado y no ya en el Blanco. Como resultado, se produjeron dos cambios de nivel de base: el primero, del río Iruya, que pasa a desembocar en el Pescado a una cota menor, provocando una incisión en el paisaje, pero sin afectar sustancialmente aún el avance de la erosión en la alta cuenca. Por lo tanto, el cambio de nivel de base en una primera etapa está acelerando la degradación de la cuenca, pero no en el rango altitudinal, al que aparentemente corresponde la mayor parte de la carga sólida (Argentina, 2000a). La nueva traza del caudal del Iruya determina el relleno progresivo del valle inferior del río Pescado. Según inferencias básicas, se estima en algunos sectores que el espesor de este relleno alcanzaría los treinta metros.

Es así como se produce el segundo cambio de nivel de base: ascendió el nivel de base del

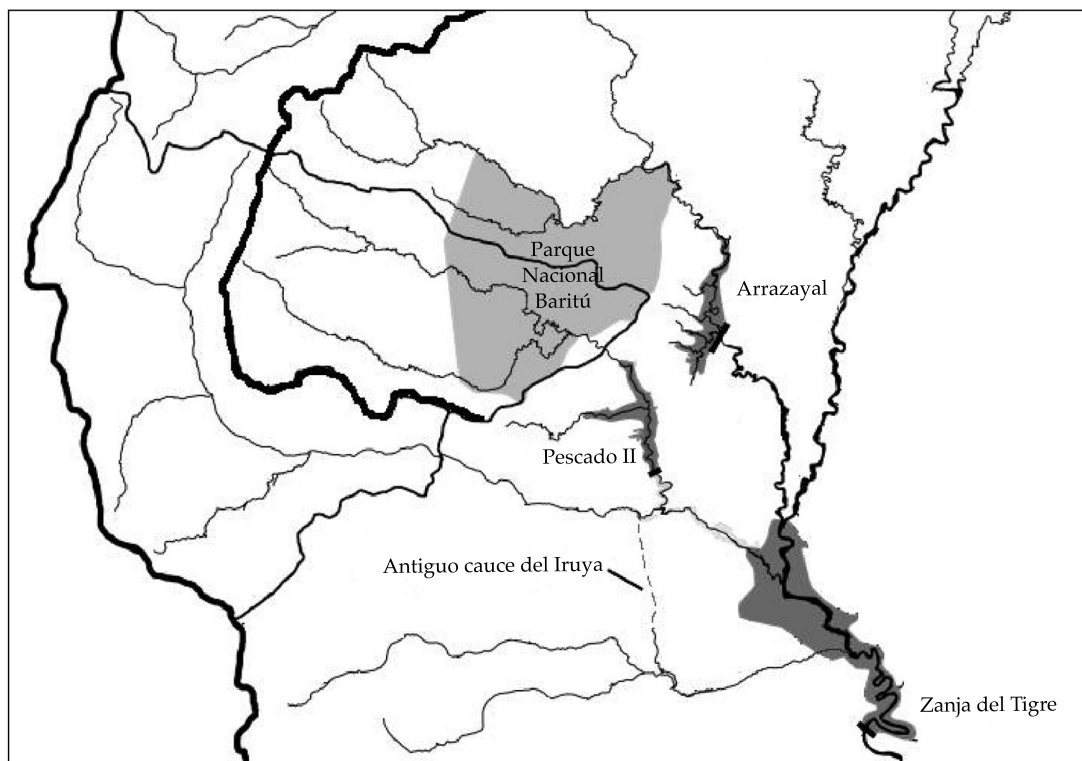


Figura 5. Proyectos de presas en la cuenca del Alto Bermejo que se toman de referencia. En los documentos oficiales revisados no figura la superficie del proyecto “Las Pavas”.

Pescado superior aguas arriba de la confluencia Iruya-Pescado (Cfr. COREBE: 2000 b). El Iruya alcanza al río Pescado y éste al Bermejo, por lo que muchas veces se hace referencia a las características de Iruya-Pescado (por ejemplo, se habla de la carga que aporta el “Iruya-Pescado”), lo cual es confuso, tratándose de cursos que fueron afectados en forma exactamente opuesta por la modificación antrópica del paisaje.

El desvío del río Iruya se hizo aprovechando un abra, denominada Portezuelo, ubicada sobre la cresta que antes lo orientaba hacia el sur. Esta intervención adelantó la ocurrencia de un captura en progreso, según queda relatado en COREBE (2000 a). Este dato es importante, ya que indica la relación entre la pendiente regional y los materiales superficiales, donde estos corresponden a espesores sedimentarios menos antiguos. Puede profundizarse un poco

más el análisis de este factor mediante una revisión de la geometría de las redes de los principales cursos de escurrimiento.

A través de la génesis morfológica, la red de drenaje tiende a un patrón este-oeste, desde un molde norte-sur, consecuencia de un control morfológico. El plegamiento general del bloque Andino, consecuencia del esfuerzo diastrófico desde el oeste, ejercido por la placa de Nazca, inicialmente dispone una serie de serranías angostas de gran desarrollo longitudinal (escamas que representan la disposición del basamento estructural, según Feruglio, 1947). El caso paradigmático es el valle de la cuenca del río Seco (figura 4), sobre el borde este del gran bloque deformado (ver figura 2a). En este caso es muy llamativa la gran desproporción entre ancho (este-oeste) y largo (norte-sur). Hacia el oeste, pero todavía sobre la faja de materiales

sedimentarios jóvenes, la breve diagenización y, por lo tanto, baja cohesión de los materiales superficiales, permite el rápido progreso de incisiones fluviales sobre crestas morfológicas que reorganizan la disposición de las redes según se ha indicado (ver figuras 3 y 4). Este cuadro ya fue insinuado por Feruglio (1947). A grandes rasgos, las etapas de este proceso pueden reconocerse, observándose los cambios en los patrones de escurrimiento desde el este hacia el oeste, hasta las nacientes del Iruya, donde el esquema pierde vigencia. Allí las crestas expresan controles estructurales en superficie, que corresponden a las Sierras de Santa Victoria y Zenta, y los cursos fluviales retoman la orientación norte-sur.

Dentro de este panorama, la subcuenca del Pescado, emplazada en el centro de la faja de acumulación pedemontana, y la subcuenca del Iruya, emplazada sobre la divisoria de cuenca oeste, constituyen dos ejemplos diferenciados: la primera desarrolla una pendiente intermedia y la segunda pendientes pronunciadas. La diferencia entre las alturas reducidas obtenidas en ambos casos, indicadas en el cuadro 2, refleja este panorama.

La subcuenca del Iruya posee características muy particulares. Desarrolla un desnivel de cuatro mil metros en algo más de 100 km, desde las crestas estructurales hasta su confluencia. En primer lugar, este dato habla de pendientes muy pronunciadas hacia las nacientes y de la cuenca en general, considerando un nivel de base a menos de 500 msnm. La energía erosiva se debe a esta característica principalmente. La baja cohesión de las rocas deformadas y el régimen de tormentas, en ese orden, sólo retocan el cuadro. La presencia del agua actúa como el desencadenante de la remoción en masa latente por la intensidad de las pendientes. Las cuencas áridas situadas sobre el flanco oeste del encadenamiento Sierras de Santa Victoria-Zenta muestran la misma dependencia entre pendientes pronunciadas y generación de caudal sólido (Universidad de Buenos Aires, 2003). Estas son las condiciones particularmente favorables a la producción

de sedimentos de la cuenca del río Iruya. Las posibilidades de contrarrestarlas son muy bajas o nulas (COREBE, 2000a).

Por otro lado, el río Pescado tiene sus nacientes sobre una cresta más baja (sierra del cerro Bayo). La comparación de las distintas condiciones morfométricas y morfológicas de cada subcuenca permiten comprender mejor el rol de la del Iruya, y la compatibilidad de otras, con el montaje de embalses.

El valor obtenido para la subcuenca del Pescado es mil metros menor a la del Iruya, y 500 metros menor a la del Santa Victoria. Es destacable el valor obtenido para el río Lipeo. Esta subcuenca y la del Pescado tienen alturas máximas menores y por lo tanto el terreno se constituye con pendientes menos pronunciadas. El aporte sedimentario por unidad de caudal específico corrobora este dato (cuadro 2). Las alturas medias absolutas obtenidas (no se muestran) se acercan a los de las cuencas nivo-glaciarias del oeste de la Argentina (Autor y Villalba, 2005). Pero debe mencionarse que en el caso del Alto Bermejo, el pie de monte está mil metros más abajo. Adicionalmente, en las cuencas frías, el permafrost actúa como moderador de los fenómenos de remoción en masa (Brenning, 2003). A raíz de estas dos diferencias es que la cuenca del Alto Bermejo es un ambiente sedimentario más intensificado que los Andes Centrales, de mayor altura media. Para los fines de este trabajo, lo más importante son las alturas medias reducidas.

Cálculo estimativo de la vida útil para embalses en la cuenca del Alto Bermejo

Los proyectos considerados en este apartado corresponden, por un lado, a lo dispuesto en el plan para el canal lateral de la Comisión Nacional del Río Bermejo (CNRB), también desarrollados posteriormente por la empresa gubernamental Agua y Energía Eléctrica SE (AyE) (Boscovich, 1999). Los proyectos "Arrayazal" y "Las Pavas" tienen su origen en el estudio realizado por la OEA a principios

de la década de 1970 (OEA, 1974), luego adoptados por la Comisión Regional del Bermejo (COREBE). La COREBE está integrada por las provincias de Salta, Jujuy, Chaco, Formosa (parte de cuyos territorios componen la cuenca), pero también por la de Santiago del Estero y Santa Fe. La participación de estas dos jurisdicciones se explica con base en el alcance espacial que puede tener un mayor aprovechamiento del caudal del Bermejo, sobre todo en relación con la implementación de un sistema de riego de verdadera escala interregional.

Considerando entonces que la cuenca del Alto Bermejo es heterogénea desde el punto de vista hidrogeomorfológico, puede considerarse que una instancia de planificación es la elección adecuada de alternativas de emplazamiento. En este punto es preciso retomar las dos funciones básicas del vaso de un embalse: una la regulación o "laminación" de crecidas, que no trataremos aquí; la otra, la regulación del estiaje prolongado a partir del desfase de un volumen de agua desde la breve estación húmeda hacia el resto del año.

Se calcula la vida útil de los proyectos de Zanja del Tigre con un embalse de 4 053 hm³, sobre el río Alto Bermejo, a pocos kilómetros de la confluencia con el San Francisco, y el denominado Pescado II, con un vaso de 1 890 hm³, sobre el río Pescado, aguas arriba de la confluencia con el Iruya (ver emplazamiento de ambos proyectos en la figura 5). Aplicando los cálculos definidos en (4) y (5), VU, para estos dos proyectos resulta:

$$VMAC_{AB} = S_{AB\ 72-88} / DR$$

$$VU_{ZJGR} = (4\ 053\ \text{hm}^3 \cdot 0.5) / VMAC_{AB}$$

Donde $VMAC_{AB}$ es el volumen medio anual de colmatación estimado para el río Alto Bermejo en Zanja del Tigre, $S_{AB\ 72-88}$ es el acumulado anual medio de sedimentos en suspensión para el río Alto Bermejo en Zanja del Tigre, y VU_{ZJGR} es la vida útil para

el embalse del proyecto Zanja del Tigre. Y luego:

$$VMAC_{PSCD} = S_{PSCD\ 72-88} / DR$$

$$VU_{PSCD\ II} = (1\ 890\ \text{hm}^3 \cdot 0.5) / VMAC_{PSCD}$$

Donde $VMAC_{PSCD}$ es el volumen medio anual de colmatación estimado para el río Pescado en Puesto Romero, $S_{PSCD\ 72-88}$ es el acumulado anual medio de sedimentos en suspensión para el río Pescado en Puesto Romero y VU_{PSCD} es la vida útil para el embalse del proyecto Pescado II. En la figura 6 se muestran los resultados. La vida útil de un eventual embalse en Zanja del Tigre sobre el afluente principal tiende a quedar seriamente restringida por los rasgos ambientales de su cuenca tributaria y su dinámica hidrosedimentaria. Suponiendo una reducción del 70% en la generación de carga, lo cual es una hipótesis de dudosa factibilidad, este embalse sólo alcanzaría una vida útil de 75 años. En verdad conviene remitirse a la conclusión de la propia COREBE sobre las posibilidades de regular la generación y no sólo el transporte: "Una conclusión general de los estudios efectuados es que no se identifican medidas de acción y control en la alta cuenca del río Bermejo que afecten sustantivamente el monto de los sedimentos generados" (Argentina, 2000b).

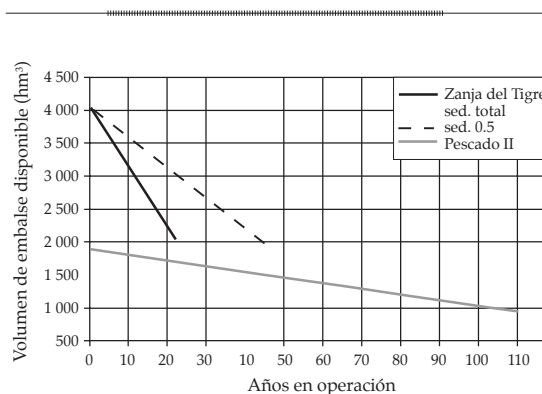


Figura 6. Progresión de la colmatación de los embalses proyectados en Zanja del Tigre y Pescado II.

Es decir, que la evaluación de distintas localizaciones debe realizarse extrapolando las cifras de carga sólida hasta ahora registradas. La COREBE también concluye que: “El análisis de cartografía temática y en particular el mapa de usos del suelo permite señalar que actualmente las zonas más productoras no son afectadas por actividades antrópicas” (Argentina, 2000b).

En el afluente principal entonces se verifica un comportamiento hidrosedimentario que responde a una particular combinación de tres factores: pendiente, litología y régimen de tormentas. La degradación del relieve en este caso afecta un ambiente de muy alta energía, la cual sería en definitiva aquello a contrarrestar, eventualmente.

Sobre el río Pescado, aplicando DR, se obtiene $VU = 110$ años para el embalse de Pescado II. La marcada diferencia en los VU obtenidos estriba en que el volumen del vaso equivale al 50% del de Zanja del Tigre ($4\,053\text{ hm}^3$), mientras el río Pescado llevaría una carga sólida media que representa sólo el 7.5% de la media para Zanja del Tigre. El río Pescado registró un caudal líquido medio de $50.51\text{ m}^3/\text{s}$ y un derrame promedio de $1\,530\text{ hm}^3$; es decir, sólo un séptimo del valor de Zanja del Tigre. A pesar de tratarse de una porción reducida del módulo total del Alto Bermejo ($352.6\text{ m}^3/\text{s}$) y del Bermejo ($456.4\text{ m}^3/\text{s}$), la posibilidad de emplazar un embalse de $1\,890\text{ hm}^3$ de capacidad asegura la regulación completa del caudal de este río. En la figura 7 se ve la reducción de la estacionalidad del Alto Bermejo que se lograría con la sola construcción de la presa Pescado II. La atenuación de la estacionalidad estival sería leve; por lo demás, cabe destacar que

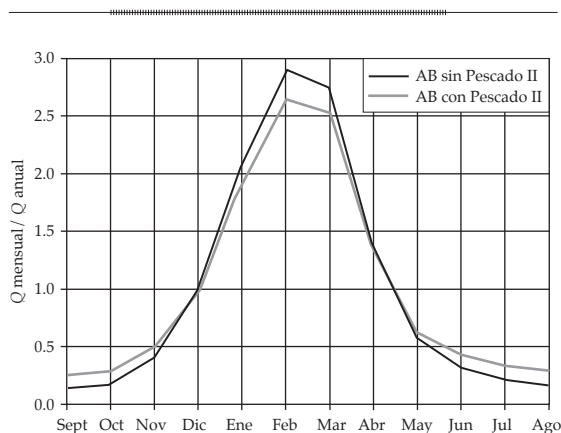


Figura 7. Incidencia de la operación de Pescado II a módulo sobre la estacionalidad del caudal medido en Zanja del Tigre.

no podría hablarse de un rol en la laminación de crecidas con impacto en la cuenca media y baja. Pero el resultado central en cuanto hace al planteo de este estudio es que un aporte constante de $50\text{ m}^3/\text{s}$ del río Pescado provocaría un cambio muy significativo en los valores absolutos durante los meses de estiaje (cuadro 3). Los caudales medios mensuales en el afluente principal (medidos en est. Zanja del Tigre) registrarían aumentos de más del 50% para los meses de estiaje más pronunciado (julio a octubre). Los valores se mantendrían sobre los $100\text{ m}^3/\text{s}$ todo el año, con excepción de septiembre. Este sería el escenario más conservador, y a partir de otros esquemas de restitución de volúmenes embalsados serían posibles mayores caudales de estiaje.

La misma metodología fue aplicada a los proyectos de “Las Pavas” y “Arrazayal” (ver figura 5), que últimamente han sido presentados como estrategia definitiva para

Cuadro 3. Régimen estacional del río Alto Bermejo en estación de aforo Zanja del Tigre, natural y regulado con Pescado II. Caudales medios mensuales (m^3/s).

	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A
AB	49	62	149	351	733	1 027	965	484	197	113	80	61
AB con P II	92	102	179	347	679	934	893	467	220	149	120	103
Cambio %	87	65	20	-1	-7	-9	-7	-4	12	32	50	69

sistematizar el Bermejo. Los resultados del cálculo de VU para estos proyectos (no se muestran) difieren notablemente de los más de 150 años de vida que consignan algunos informes de la COREBE (Argentina, 2000b) a ambos embalses (Las Pavas, 70% del volumen útil inicial y colmatación cero en Arrazayal en el año 150 de operación). También respecto a estos dos proyectos, no sólo habría que manejar la carga sedimentaria, sino además enfrentar un costo de relocalizaciones ausente en el caso de Pescado II. El análisis de distintas combinaciones de los embalses proyectados, según sus distintos caudales sólidos y líquidos, es una alternativa para refinar la identificación de posibilidades de regulación del régimen del Alto Bermejo, y por tanto, de distintos caudales mínimos garantizados.

El ordenamiento de los factores en el análisis de viabilidad ambiental y técnica

Con el fin de plantear la prioridad de algunos elementos técnicos en el análisis de proyectos hídricos dedicaremos algunas líneas a ciertas dificultades que, como todo proyecto, presenta Pescado II. En primer término, no es un factor menor que el embalse quedaría emplazado en el bosque subtropical llamado de las Yungas, que goza de un estatus de relictos selvático y muchas veces referido como víctima de obras de infraestructura durante las últimas décadas (gasoductos y líneas de alta tensión). Desde este punto de vista, cobra importancia la estrategia de comunicación sobre el proyecto, a ser llevada por las agencias públicas de planeamiento. La presentación de la presa deberá mantener en todo momento la visibilidad del motivo de su construcción: la consolidación y expansión de las áreas de riego asociadas. El uso consuntivo agrícola se asocia, salvo excepciones, con las comarcas por las que pasa el río a sistematizar. Esta característica es importante, ya que quienes se oponen a la construcción de presas suelen mencionar que este tipo de proyectos son el resultado del planeamiento a cargo de agencias

gubernamentales con sede en las capitales nacionales o grandes ciudades. El argumento, a veces cierto, se refuerza notablemente en el caso de presas orientadas a la producción de electricidad: una línea de alta tensión puede llevar lejos el producto de la presa, y lejos de quienes pagaron un costo local (emocional, paisajístico) por su construcción. En cambio, la orientación de la operación de una presa hacia el riego necesariamente tendrá que ver con la población local. De manera que al clarificar el objetivo de este tipo de presas medianas se logra alejar la idea de que constituyen un proyecto concebido por burócratas. Los proyectos dirigidos a los usos del agua locales gozan de esta ventaja.

En segundo término, debe prestarse atención al hecho de que la asimetría del cauce en el lugar de construcción del cierre podría afectar la estabilidad de la falla del valle del Pescado, según mencionan los documentos de la OEA. Al llenarse el embalse, el peso del agua repartido desigualmente podría afectar el cierre y producir el derrame del volumen de agua. Ahora bien, considerando el alcance social del proyecto y la experiencia acumulada en materia de presas (Rimoldi, 1996) difícilmente éste sería un obstáculo insalvable. Dicho factor sería insuficiente para descartar el proyecto en términos de vida útil en el contexto de la totalidad de la cuenca. Por otro lado, la propagación de la eventual onda artificial de crecida, probable, pero no inminente, no diferiría sustancialmente del régimen natural hoy existente, de pulsos explosivos: la geometría de la sucesión de cauces (Pescado-Iruya-Alto Bermejo) y el paisaje resultante lo reflejan sobradamente. Va de suyo que la organización del poblamiento se ensambla con esta dinámica ambiental.

En tercer lugar, considerando que incluso a partir de condiciones óptimas para la vida útil, el embalse se colmataría en algo más de cien años, debe incluirse en la evaluación económica el costo de dragado. La carga sedimentaria excepcional impone el planteo de un modelo de manejo excepcional. La

incorporación del dragado a la gestión de presas, aunque desconocida en la Argentina para presas medianas y grandes, es usual en países pequeños de clima tropical (Brandt y Swenning, 1999). No puede esperarse del Bermejo las facilidades encontradas en otras cuencas, donde las pendientes son menores, la presencia de materiales superficiales de baja cohesión es sólo puntual, y la estacionalidad de las lluvias es menos marcada, con ausencia de convección térmica.

Conclusión

La cuenca del Bermejo y el esquema analizado para el proyecto Pescado II permiten plantear los elementos que pueden ser transferidos total o parcialmente a las cuencas del Pilcomayo, Parapeti, Grande, Beni, Madre de Dios y Ucayali. En el marco de una cordillera de los Andes de múltiples cordones paralelos deberán seleccionarse cuidadosamente lugares donde podría evaluarse la operación sustentable de un embalse.

El caso de Pescado II destaca, por un lado, las posibilidades latentes sobre los afluentes menores para embalses medianos; por otro lado, permite verificar que para cuencas torrenciales, los datos de caudal líquido por sí solos no bastan. El problema insoluble de la generación de sedimentos plantea serias restricciones a eventuales grandes proyectos sobre afluentes "principales", por lo menos hasta que se incorpore el costo de dragado a la economía de la gestión.

Agradecimiento

El autor agradece al doctor Octavio E. Sequeiros sus sugerencias.

Recibido: 03/03/09
Aprobado: 25/03/10

Referencias

- ARGENTINA. MOSP, Agua y Energía Eléctrica S.E. *Estadística hidrológica hasta 1990, tomo II Sedimentología-Nivología*. Buenos Aires, 1991, 125 pp.
- ARGENTINA. Mapas informe geológico, geomorfológico y de vegetación de las subcuencas de los ríos Nazareno, Iruya e Izcuya. Ministerio del Interior. Comisión Regional del Río Bermejo (COREBE), elaborado por el exComité de Cuenca Hídrica del Río Bermejo, 1982.
- ARGENTINA. COREBE. *Plan Estratégico de Acción para el Río Bermejo*. Cinco tomos. Buenos Aires: Comisión Regional del Río Bermejo, 1999.
- ARGENTINA. COREBE. *La problemática de los sedimentos en la cuenca del río Bermejo*. Buenos Aires, 2000^a, citado el 10 de mayo de 2003, www.corebe.org.ar/OTROS%20PROYECTOS/problematika_sedimentos_2000_web.pdf
- ARGENTINA. COREBE. *Presentación del Programa de Manejo Integrado de la Cuenca del Río Iruya. Parte IV: datos disponibles y estudios básicos*. Buenos Aires, 2000b, citado el 5 de abril de 2007, www.corebe.org.ar/OTROS%20PROYECTOS/PARTEIV%20sec.pdf
- ARGENTINA. *Estadística Hidrológica de la República Argentina*. Dos tomos. Buenos Aires: Subsecretaría de Recursos Hídricos, 2004.
- ARGENTINA. *Cobertura cartográfica digital de curvas de nivel de la Argentina*. Ministerio de Defensa, Instituto Geográfico Militar, citado el 10 de septiembre de 2004, www.sig.gov.ar.
- LASCANO, M. y VILLALBA, R. Análisis interanual de la estacionalidad de los ríos andinos. *Contribuciones Científicas GEA*. Vol. 17, 2005, pp.185-199.
- BIANCHI, A. y YÁÑEZ, C. *Las precipitaciones en el noroeste argentino*. Salta, Argentina: INTA EEA Cerrillos, 1992, 452 pp.
- BOSCOVICH, N. *Geoestrategia de integración regional*. Buenos Aires: Ed. Ciudad Argentina, 1999, 280 pp.
- BRANDT, S. and SWENNING, J. Sedimentological and Geomorphological Effects of Reservoir Flushing: The Cachí Reservoir, Costa Rica, 1996. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, Vol. 81, no. 3, 1999. Tesis doctoral completa, citado el 10 de abril de 2007, http://www.hig.se/~sab/publications/geogr_hafn/sab_geogr_hafn_download.html.
- BREA, J. Influencia de la cuenca del río Bermejo en los sedimentos del río de la Plata. *El Río de la Plata como territorio*. Buenos Aires: Ed. Infinito, 2002.
- BRENNING, A. La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la cordillera de Santiago. *Revista de Geografía Norte Grande*. Vol. 30, 2003, pp. 7-22.
- BRUNIARD, E. *El clima de las planicies del norte argentino*. Dos tomos. Resistencia, Argentina: Dirección de Impresiones de la Facultad de Humanidades, UNNE, 1981, 890 pp.
- BRUNIARD, E. *Hidrografía. Procesos y tipos de escurrimiento superficial*. Buenos Aires: Ed Ceyne. 1992, 110 pp.
- BRUNIARD, E. *Geografía de los climas y las formaciones vegetales*. Resistencia, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, 1996, 360 pp.

- FERUGLIO, E. Los sistemas orográficos de la República Argentina. *Geografía de la República Argentina*. Tomo IV. Buenos Aires: GÆA Sociedad Argentina de Estudios Geográficos, 1947, 420 pp.
- IPCC. Working Group I The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007, 996 pp.
- KRUSE, E. y CASANOVA, R. Consecuencias de la acumulación de sedimentos en lagos artificiales de la Argentina. *Conferencias de limnología*. La Plata: Instituto de Limnología "Dr. R.A. Ringuelet", Universidad Nacional de La Plata, 1993.
- MARENGO, J., DOUGLAS, M., NICOLINI, M. y DIAS, P. Identificación de casos de jets en niveles bajos, del norte (sallj) y del sur (sj) al este de los Andes durante el verano y otoño 1999. *Actas del VIII Congreso Argentino de Meteorología*. CD-ROM. Buenos Aires: Centro Argentino de Meteorólogos, 2001.
- MINETTI, J., VARGAS, W., HERNÁNDEZ, C. y LÓPEZ, E. La circulación estacional en Sudamérica. *Breves contribuciones*. Núm.14. San Miguel de Tucumán: Instituto de Estudios Geográficos, Universidad Nacional de Tucumán, 2002, pp. 41-90.
- MORALES, M., VILLALBA, R., GRAU, H. and PAOLINI, L. Rainfall-controlled tree growth in high elevation subtropical tree lines. *Ecology*. Vol. 85, 2004, pp. 3080-3089.
- OEA. *Cuenca del Río de la Plata. Estudio para su Planificación y Desarrollo, República Argentina-República de Bolivia-Cuenca del Río Bermejo I-Alta Cuenca*. Organización de Estados Americanos, 1974, citado el 15 de mayo de 2007, <http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea23s/begin.htm#Contents>
- OMM. *Atlas Climático de América del Sur*. París: UNESCO, Organización Meteorológica Mundial, 1975, 60 pp.
- RAFAELLI, S., PEVIANI, M. y PÉREZ-AYALA, F. *Estudio de producción de sedimentos en la cuenca montañosa del río Iruya*. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Oaxaca, México: Instituto Nacional de Hidráulica, 1998.
- RAMOS, V. Provincias geológicas del territorio argentino. *Geología de la Argentina*. Buenos Aires: Servicio Geológico Minero Argentino, SEGEMAR, 2000, 656 pp.
- RIMOLDI, H. Riesgo sísmico generado por grandes presas. *Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería*. Vol X, 1996, pp. 30-42.
- UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES. *Relevamientos de campo para el manejo de la cuenca del río Huasamayo*. Universidad de Buenos Aires, Instituto de Geografía "Romualdo Ardisson", Grupo de Análisis Espacial de Cuencas Hídricas. Inédito. 2003.

Abstract

LASCANO-KEZIČ, M.E. Reservoirs located in sediment-rich watersheds: the case of the Bermejo River, Argentina. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. I, no. 3, July-September, 2010, pp. 21-38.

Location analysis for reservoir implementation in subtropical and tropical environments must thoroughly consider the probable progression of the silt-in processes according to a river's sediment load. This article intends to point out that restrictions on the length of the operating life of reservoirs may affect dam planning on main tributaries, but that its effect would be rather less significant for projects on secondary tributaries with headwaters at lower external crests with less pronounced slopes. Dam and reservoir planning at the headwaters of the Bermejo River in northern Argentina is taken as an example of the proposed analytical strategy. To point out the heterogeneity of hydrosedimentary behaviors two analyses are conducted: an overview of environmental conditions, with emphasis on global slopes, and an estimation of the operating life length for two projects, according to the silt-in progression of a reservoir in the area. Both analyses reflect the existing strong heterogeneity within the upper Bermejo River watershed. The estimated operating life lengths within the same unit of analysis show a 1 to 5 difference.

Keywords: tropical Andes, sediment load, slopes, reservoirs, low flows, irrigation.

Dirección institucional del autor

Marcelo E. Lascano-Kezič

Universidad de Buenos Aires
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos
Pabellón II, segundo piso
Ciudad Universitaria
Ciudad de Buenos Aires, Argentina
Teléfono: +54 (911) 4937 9017
marcelo.lascano@fulbrightmail.org