



# Sedimentos y el complejo de represas en la cuenca Inambari represas en la cuenca Inambari

Documento de Trabajo # 10

Autor: Bruce Forsberg

Fecha: Junio 2013

---

Se ha propuesto la construcción de 16 represas hidroeléctricas dentro del sistema del río Inambari, de las cuales la Hidroeléctrica San Gabán II es la única que en estos momentos se encuentra operativa (Figura 1). El río Inambari es el mayor tributario andino de la cuenca amazónica Madre de Dios, y una de las principales preocupaciones que existe cuando se represa un río que traslada un alto contenido de sedimentos como el Inambari (río de aguas blancas) es conocer cuál va a ser el efecto regional de este represamiento en el ciclo de sedimentos. Luego del represamiento, la velocidad de la corriente se reducirá considerablemente y la mayor parte de los sedimentos, que inicialmente eran transportados por el río ya sea en suspensión o arrastrados en el fondo del canal, quedarán depositados en el fondo del embalse. Si la tasa de sedimentación dentro del embalse es muy elevada, uno de los primeros efectos será la obstrucción del ducto de salida de agua donde se encuentran las turbinas para generar la energía, reduciendo así el tiempo de vida útil de la hidroeléctrica y amenazando la viabilidad económica del proyecto. Aguas abajo, el aporte de sedimentos también se reducirá considerablemente y esto tendrá un impacto significativo en la estabilidad de los hábitats del canal y de la llanura inundable del río Inambari. Cuando se construyen múltiples represas dentro de una misma cuenca se debe incluir los efectos secuenciales que van a existir entre una y otra represa, lo cual permitirá desarrollar una evaluación integral de los impactos regionales en el ciclo de sedimentos. En este reporte hemos utilizado estimaciones de la concentración total de sedimentos en suspensión (TSS, mg/L) y descarga de agua (D, m<sup>3</sup>/s), ambos obtenidos de nuestros registros de campo en el canal principal del río Inambari y sus tributarios, lo cual nos ha permitido predecir la descarga de sedimentos en los 16 reservorios propuestos para la cuenca Inambari. Asimismo se han considerado los efectos potenciales de las futuras actividades mineras en la descarga de sedimentos, el efecto acumulativo de todas las represas en el flujo de sedimentos aguas abajo, y las consecuencias de estos cambios en los hábitats del canal y del bosque inundable adyacente.



Figura 1. La Cuenca Inambari y los sitios propuestos para represas (en rojo). El área parcial de drenaje (delimitadas en negro) representan el área de influencia de cada represa sin considerar ninguna otra aguas arriba.

## DESCARGA DE SEDIMENTOS

Se ha estimado la concentración de sedimentos, descarga de agua y descarga total de sedimentos en suspensión (TSSflux, g/s) para 134 ríos y quebradas en la cuenca Inambari para el periodo Agosto 2002 – Marzo 2012 (Figura 2). En la mayoría de ríos y quebradas el TSSflux varió principalmente en función de la descarga (D) (Figura 3) encontrándose valores excepcionalmente extremos en los tributarios Dos de Mayo y Caychihue (círculos blancos), los cuales se ubican aguas abajo de los sitios propuestos para las represas y en donde actualmente ocurre extracción minera a gran escala. Sin incluir estas dos localidades, el 91% de la variación total de TSSflux fue explicada por la siguiente regresión:

$$\ln[\text{TSSflux}] = 1.401 (\ln[\text{Descarga}]) + 2.057 \quad (1)$$

Esta relación fue utilizada para estimar la descarga total de sedimentos que se espera generar desde cada uno de los tributarios que fluyen dentro de cada reservorio, y sin considerar el efecto de otro reservorio aguas arriba. La efectividad con que los reservorios capturen los sedimentos va a depender de una serie de parámetros como volumen, descarga, profundidad media del reservorio y la distribución de tamaños de los sedimentos descargados. Considerando que esta información no está disponible para la mayoría de los reservorios propuestos y siendo bastante conservadores, asumimos que todos los sedimentos que fluyen dentro de los reservorios van a ser todos retenidos.



Figura 2. Puntos de muestreo de Descarga y Sedimentos Totales en Suspensión a lo largo de los tributarios en la cuenca Inambari

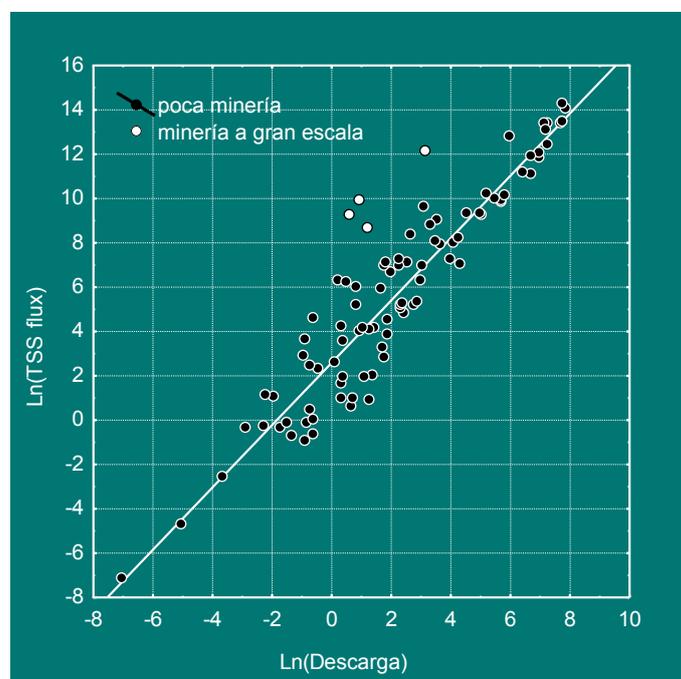


Figura 3. Relación entre Descarga de agua y Descarga de Sedimentos para los tributarios de la cuenca Inambari. Las localidades con actividad minera a gran escala aparecen como "outliers" (círculos blancos) en esta relación de regresión.

El área parcial de drenaje que contribuye directamente con sedimentos a cada reservorio está comprendida por el área total arriba del reservorio sin considerar (menos) el/las área(s) de drenaje de otros reservorios ubicados aguas arriba. Ya que se desconoce el área de los reservorios de cada una de las 16 represas, se utilizó el área parcial de drenaje para estimar el flujo de sedimentos en cada una de las represas. Bajo estas consideraciones se espera que exista una sobre-estimación en las áreas de drenaje y TSSflux de 2 a 10%, dependiendo de la represa. En la figura 1 se muestran los límites geográficos de las áreas parciales de drenaje para las 16 represas propuestas, determinados a partir de un modelo digital de elevación (DEM –Digital Elevation Model) de la región, generado por la misión topográfica de radar de la NASA (SRTM –Shuttle Radar Topography Mission). La descarga total ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) derivada de cada área parcial drenaje fue obtenida luego de multiplicar dicha área ( $\text{km}^2$ ) por la tasa media de escorrentía ( $R$ ,  $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{s}$ ) estimada para toda la cuenca Inambari, y calibrada según la elevación. La escorrentía promedio para la cuenca Inambari fue estimada a partir de la relación entre la escorrentía y el nivel de agua del río Inambari, datos obtenidos luego de un registro diario en el puente Inambari (Figura 4A). Estos valores fueron luego corregidos según la elevación con una relación entre  $R$  y elevación, estimada para todos los puntos de muestreo hidrológicos (Figura 4B). La elevación promedio en cada “cuenca parcial” fue estimada utilizando SRTM-DEM. Los valores de descarga diaria así obtenidos fueron usados en la ecuación 1 para estimar los flujos totales diarios de sedimentos en suspensión.

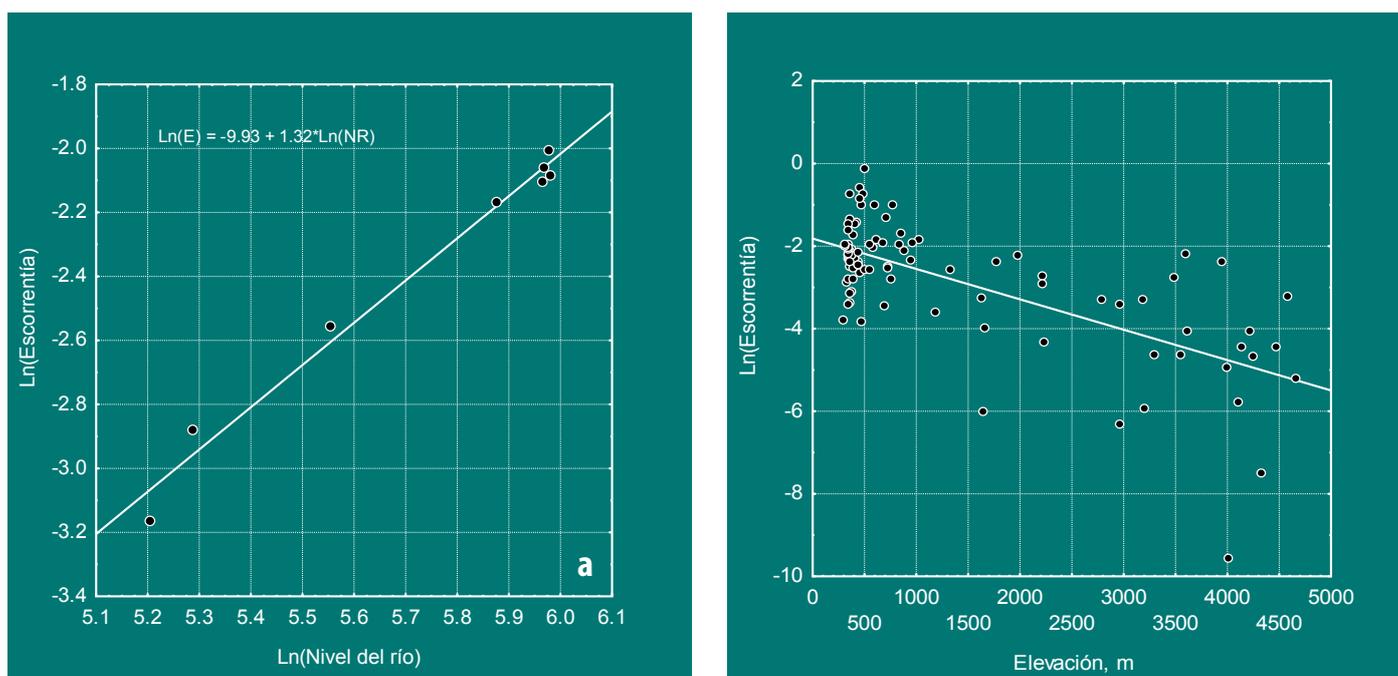


Figura 4. A) Relación entre escorrentía promedio ( $\text{m}^3/\text{km}^2$ ) y el nivel del río Inambari (en el puente); B) Relación entre la escorrentía local y la elevación para diferentes tributarios de la cuenca Inambari.

Todos estos valores fueron integrados a los registros de nivel de río (1 enero 2009 a 31 diciembre 2011) con la finalidad de estimar la descarga media anual de sedimentos en suspensión (toneladas/año) para cada reservorio propuesto. Asimismo, estos valores obtenidos a partir de las concentraciones superficiales de sedimentos se multiplicaron por 2 para estimar flujos de sedimentos en suspensión integrados, según la profundidad y el ancho del canal (Meade 1985).

El transporte de material en el fondo del canal es más complicado de estimar debido a la relación compleja que existe entre la velocidad de la corriente, las dimensiones del canal, y el tamaño y flujo de la partícula. Las pocas estimaciones disponibles para tributarios andinos de las cabeceras sugieren que el material de fondo representa aproximadamente entre 10% a 13% del transporte total anual de sedimentos (ENDE 1980; Palenque 1981; Asociación ICLA 1982; Vollmers & Palenque 1983; Martin 1977). Bajo el supuesto que el flujo de material de fondo representa el 10% del total de sedimentos transportados por los tributarios del río Inambari, se estimó el flujo total de sedimentos a los reservorios (descarga total de sedimentos + material de fondo) multiplicando el flujo total de sedimentos obtenido por 1.11. La descarga total de sedimentos resultante, estimada para los 16 reservorios, se indican en la figura 5 (0% minería).

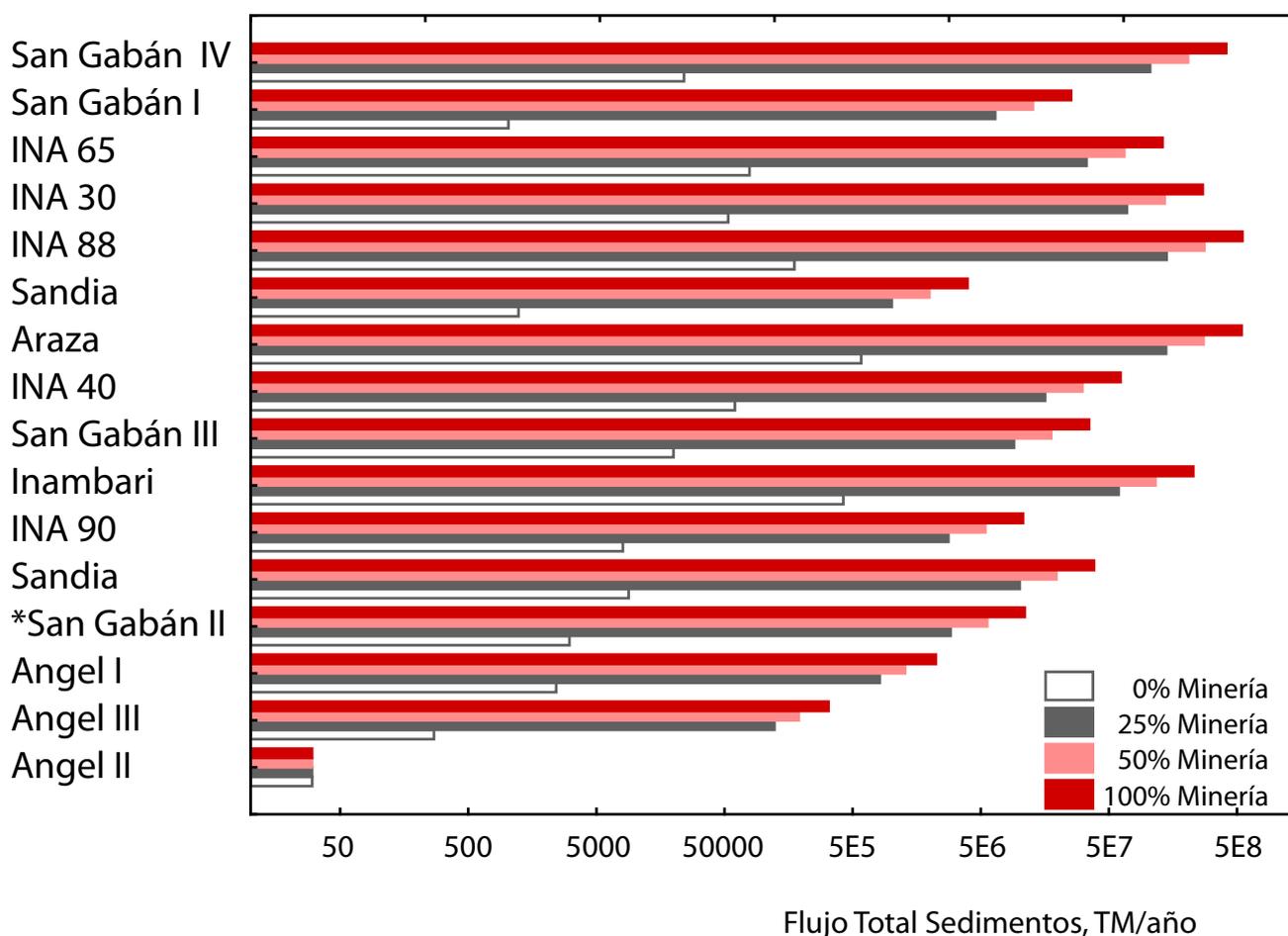


Figura 5. Descarga total de sedimentos (sedimentos en suspensión + material de fondo) estimada para los 16 reservorios propuestos para la cuenca Inambari, asumiendo tres diferentes niveles de explotación. 0% de minería sugiere los actuales niveles esperados de descarga de sedimento. San Gabán II es el único reservorio actualmente operativo.

A pesar que estos valores de descarga de sedimentos son elevados, es poco probable que tales descargas tengan un efecto significativo en las operaciones de las represas propuestas. Para que esto ocurra, el reservorio debe presentar niveles de sedimento que alcancen la ubicación de las turbinas y bloqueen la salida del agua. El tiempo requerido para que esto suceda depende de la descarga de sedimentos, el volumen del reservorio y la altura de la salida de agua de la turbina (con respecto al fondo). Esta información no está disponible para la mayoría de los reservorios, sin embargo para el reservorio Inambari, cuya información se conoce, se estimó que el tiempo crítico de llenado sería de 845 años, mucho mayor al tiempo de operaciones de la represa. Dada

la topografía de la región, se estima que el tiempo crítico de llenado de los otros reservorios sea similar a la de Inambari. Sin embargo este escenario puede cambiar significativamente si las actividades humanas se incrementan en la región.

## **IMPACTOS POTENCIALES DE LAS ACTIVIDADES MINERAS**

Las actividades de extracción de oro en la cuenca Inambari se han incrementado drásticamente en las dos últimas décadas (Brack et al. 2011). Hasta el momento estas actividades habían estado restringidas a los tributarios Caychihue y Dos de Mayo, los cuales están ubicados aguas abajo de la propuesta represa Inambari. No obstante se han otorgado concesiones mineras en muchas otras zonas de la cuenca Inambari, y el principal impacto de estas actividades será un incremento significativo en la descarga de sedimentos a los reservorios propuestos (Figura 6). La deforestación y el uso de maquinaria hidráulica como parte de las operaciones mineras producen grandes incrementos en las tasas de erosión y transporte de sedimentos en los ríos de esta cuenca. Se ha encontrado que el flujo de sedimentos en suspensión (TSS) en los tributarios que drenan zonas actualmente con extracción minera es de 2 a 3 órdenes de magnitud mayores a los valores base estimados (Figura 3). Los resultados registrados desde estas localidades pueden ser utilizados como referencia para predecir los potenciales incrementos en descarga de sedimentos que podrían ocurrir en los reservorios propuestos, en caso las concesiones mineras inicien sus operaciones. Si relacionamos los flujos TSS con el área de la cuenca es posible estimar la exportación de sedimentos (TSS-export, g/km<sup>2</sup>/s) lo cual nos permitirá comparar los rangos de erosión neta entre los tributarios. Los valores de TSS-export se incrementaron de manera consistente con relación al porcentaje de actividad minera que ocurre en cada tributario (Figura 7). La relación de regresión lineal obtenida:  $TSS\text{-export} = 44.12 [\% \text{ actividad minera}] + 16.65$  fue utilizada con relación a la extensión de concesiones mineras (Figura 6) para estimar el incremento esperado de descarga de sedimento en cada reservorio, bajo el supuesto que las concesiones mineras se encuentran operativas en 0% (nivel actual), 25%, 75%, y 100%. Los resultados mostrados en la figura 5 indican que la descarga de sedimentos en la mayoría de reservorios podría incrementarse en una magnitud de 3-4 veces, si las concesiones mineras llegan a operar en su totalidad dentro de cada área parcial de drenaje. Bajo esta nueva condición, el tiempo crítico de llenado y el tiempo de vida útil de los reservorios de las hidroeléctricas propuestas podrían reducirse significativamente.

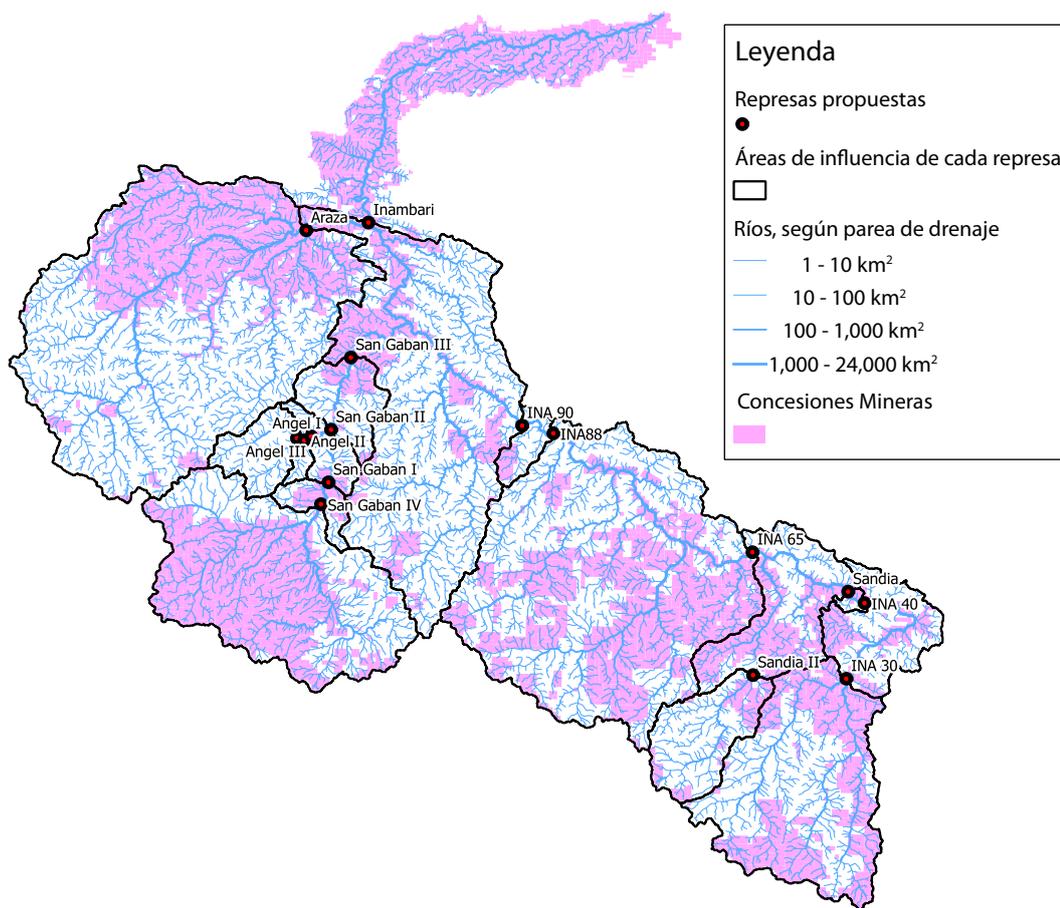


Figura 6. Distribución de las concesiones mineras en cada área parcial de drenaje de los 16 reservorios propuestos para la cuenca Inambari.

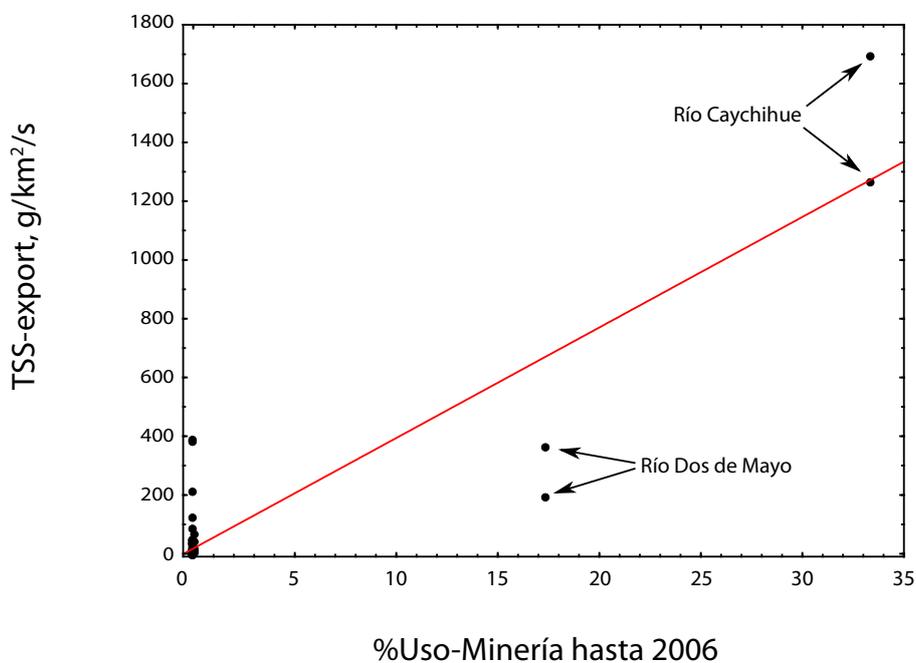


Figura 7. Relación entre la exportación de sedimentos en suspensión (TSS-export) y el porcentaje de la cuenca con actividad minera (%Uso-minería) según tributarios en la cuenca Inambari.

La descarga de sedimento calculado considera que los impactos de la minería en las áreas de influencia de cada una de los reservorios van a ser muy similares a las descargas encontradas en las cuencas Caychihue y Dos

de Mayo. Sin embargo, la vulnerabilidad de las áreas deforestadas a la erosión y la sedimentación resultante puede ser considerablemente diferente dadas las diferencias en topografía, proximidad a un tributario mayor y otros factores (Crepani et al. 2001). Con la finalidad de incluir estas diferencias, decidimos clasificar las concesiones mineras existentes en el área parcial de drenaje de cada represa según su vulnerabilidad a la erosión.

## VULNERABILIDAD A LA EROSIÓN

Se ha conseguido modelar la vulnerabilidad a la erosión y sedimentación en la cuenca Inambari en función de la declividad y la proximidad a un río mayor con la ayuda de datos espaciales contenidos en modelos de elevación DEM-SRTM de 100m de resolución (NASA/USGS) y con el soporte de la red de drenaje elaborada por HYDROSHEDS para América del Sur (USGS/WWF). A cada pixel incluido dentro de la cuenca Inambari (100m x 100m) se le asignaron valores de declividad y proximidad al río más cercano y luego se asignaron puntuaciones de 1 a 10 por cuartiles con la finalidad de asegurar una distribución equitativa de estas puntuaciones (Tabla 1). La vulnerabilidad a la erosión en cada pixel fue calculado como la suma de las puntuaciones según su proximidad y declividad. Para calcular la vulnerabilidad a la erosión en cada concesión minera primero se calculó el valor medio de vulnerabilidad para el área de concesión usando estadísticas por áreas. Se crearon cuatro clases de vulnerabilidad con la finalidad de clasificar la vulnerabilidad a la erosión entre las concesiones: Baja (0-6), Moderada (7-8), Alta (9-13) y Muy Alta (16-20). La asociación entre las clases de vulnerabilidad a la erosión y los valores de declividad y proximidad se indica en la figura 8 usando código de colores según las clases de vulnerabilidad.

**Tabla 1.** Puntuaciones asignadas a los pixeles que forman parte de la cuenca Inambari, en base a la proximidad a un río mayor (Proximidad, m) y Declividad (grados)

Puntuación	Proximidad, m	# de pixeles	Puntuación	Declividad, grados	# de pixeles
10	0-600	247757	10	0-2	271462
9	600-1200	242173	9	3-8	294018
8	1200-1900	228577	8	9-13	297168
7	1900-2600	242197	7	14-17	252581
6	2600-3300	273947	6	18-21	262287
5	3300-4200	226211	5	22-25	265199
4	4200-5100	248200	4	26-29	255472
3	5100-6100	255916	3	30-33	255104
2	6100-7600	237327	2	34-37	172593
1	7600-21600	241144	1	38-67	157575

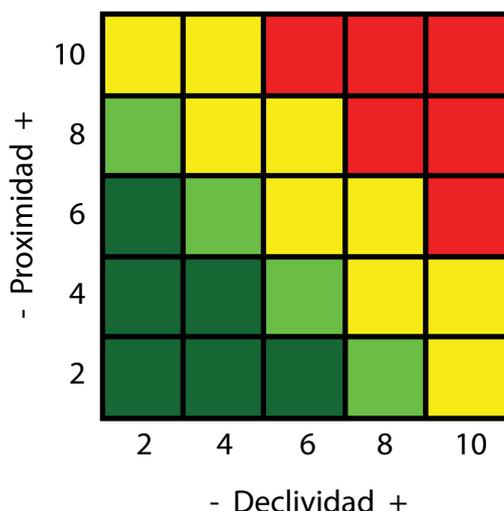


Figura 8. Variación en las clases de vulnerabilidad a la erosión en función a la declividad y proximidad a un río. Las clases de vulnerabilidad a la erosión: Baja (0-6)-verde oscuro, Moderada (7-8)-verde claro, Alta (9-13)-amarillo, y Muy Alta (16-20)-rojo

Los datos espaciales y la metodología utilizada para calcular la vulnerabilidad a la erosión y las clases de vulnerabilidad identificadas para las concesiones mineras se muestran en la figura 9. La clasificación de las concesiones (Figura 9e) fue utilizada para evaluar la vulnerabilidad a la erosión causada por la minería en cada área parcial de drenaje de cada reservorio (Figura 10), obteniéndose la distribución de clases de vulnerabilidad (10c) y la densidad de concesiones mineras (10d). Las concentraciones más altas de concesiones mineras fueron encontradas para los reservorios San Gabán IV, INA 88, INA 65, e INA 30, mientras que los mayores valores de vulnerabilidad a la erosión fueron identificadas en las cuencas parciales de los reservorios INA 88, INA 65 e INA 30. La combinación de una densidad alta de concesiones y una vulnerabilidad alta a la erosión hicieron que se consideren los reservorios INA 88, INA 65, e INA 30 excepcionalmente susceptibles a los impactos de la erosión.



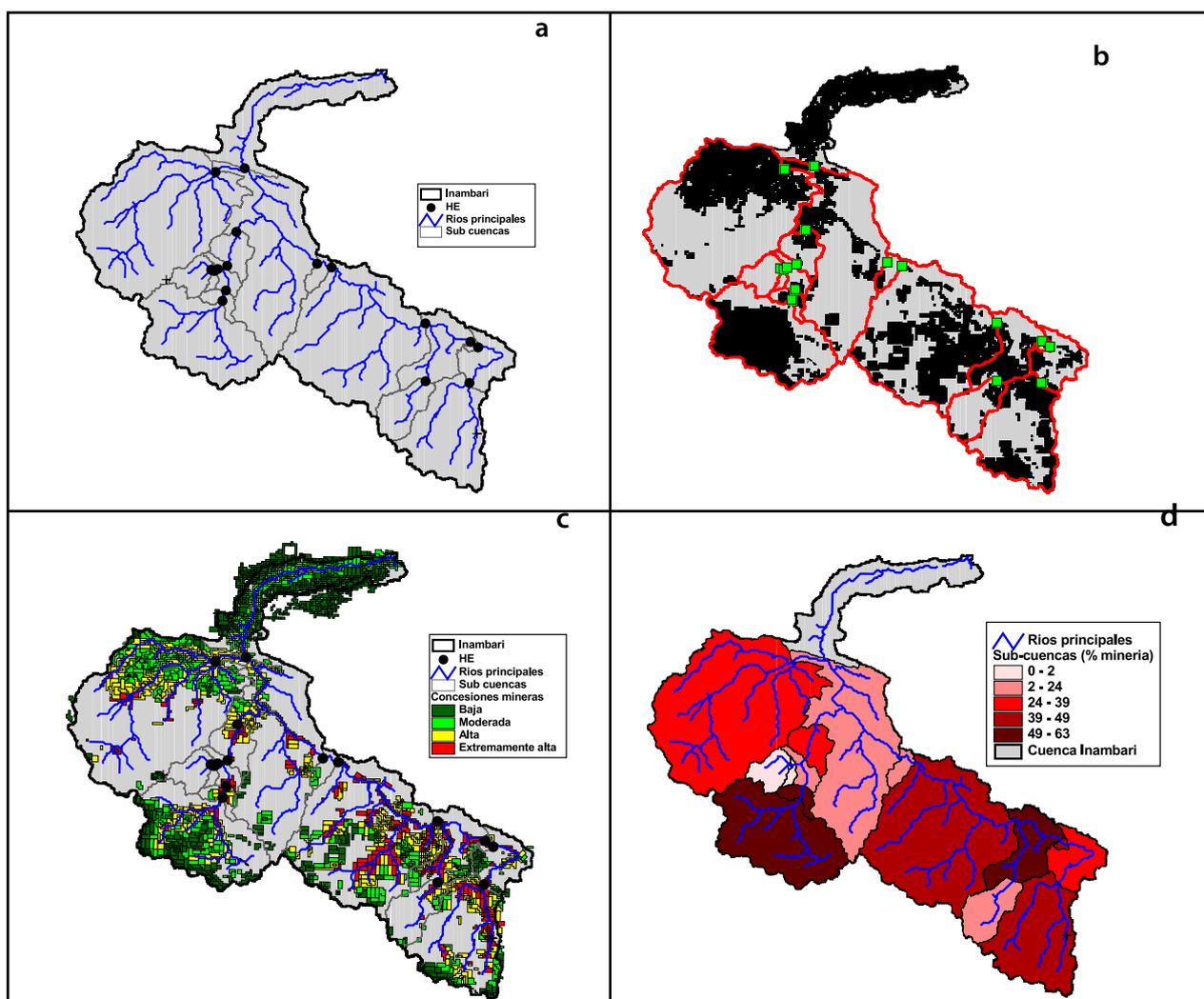


Figura 10. Evaluación de la vulnerabilidad potencial a la erosión causada por la minería en la cuenca Inambari. a) Sitios propuestos para las represas (círculos negros) y áreas parciales de drenaje (polígonos en gris) de cada reservorio, b) Distribución de las concesiones según áreas parciales de drenaje, c) Vulnerabilidad a la erosión de las concesiones mineras por áreas parciales de drenaje, y d) Densidad de las concesiones mineras según áreas parciales de drenaje.

## EFFECTOS AGUAS ABAJO

Los reservorios actuarán como trampas efectivas de sedimentos en suspensión y de material de fondo, reduciéndose significativamente el aporte de sedimentos en las partes bajas de la cuenca Inambari, sin embargo el agua continuará fluyendo a través de los reservorios. Esta combinación, un aporte reducido de sedimentos + una descarga de agua de continua, podría resultar en una pérdida de hábitats muy importantes, ocasionada principalmente por la erosión aguas abajo de las represas. Bajo el supuesto que todos los sedimentos han sido retenidos en los reservorios, la influencia y naturaleza de los impactos van a depender de la magnitud y la variabilidad de la descarga de agua que ocurre luego de las represas. En la mayoría de los lugares de las represas la descarga es actualmente muy variable, y aunque existe una estacionalidad anual, es común la presencia de picos de descarga relacionados a la ocurrencia de tormentas y precipitación localizada (Figura 11).

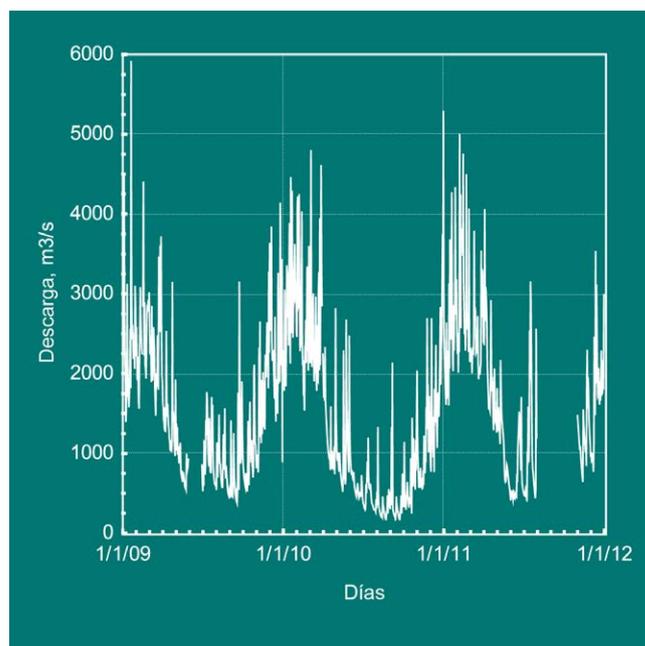


Figura 11. Variación en la descarga del río Inambari en el Puente Inambari.

Una de las principales consecuencias de la variabilidad en las descargas del río Inambari es en su propia geomorfología. Aguas abajo de los sitios propuestos para las represas el río presenta un canal trezado (varios canales) con un rango amplio en el tamaño de los sedimentos transportados en el fondo del canal. Una vez que los ríos son represados y el aporte de material de fondo eliminado (retenido en cada represa), la ocurrencia de material de fondo aguas abajo va a depender del régimen de descarga. En la mayoría de ríos represados, la magnitud y frecuencia de las inundaciones disminuye significativamente aguas abajo de la represa debido a un “efecto de amortiguamiento” ejercido por el reservorio sobre los patrones de escorrentía regional (Batalla et al. 2004). Bajo estas consideraciones de una descarga moderada, la erosión removerá de manera selectiva únicamente las partículas pequeñas (arena y canto rodado) y el material más grande no podrá ser transportado (piedras, rocas) lo cual generará un lecho del canal “duro”. El efecto final generalmente es un ensanchamiento e incremento en profundidad del canal inmediatamente después de la represa acompañado por un incremento en el tamaño de las partículas de material de fondo (Williams y Wolman 1984; Kondolf y Matthews 1993; Kondolf 1997; Ibañez et al. 1996). Es muy probable que estos cambios generen un impacto negativo y selectivo en la distribución de la vegetación ribereña y fauna bentónica pues las comunidades de plantas y animales están adaptados a fondos con arena y canto rodado.

Se espera que las represas produzcan una reducción en la frecuencia y magnitud de las inundaciones, lo cual también ocasionará un fuerte impacto en la estructura y dinámica de los bosques inundables aguas abajo de las represas, muy comunes en las partes bajas de la cuenca Inambari. Estos bosques inundables, cuya inundación depende directamente del régimen de flujo natural, probablemente quedarán completamente aislados luego del represamiento. Considerando que esta vegetación depende directamente de los pulsos de inundación para mantener sus patrones de crecimiento y reproducción, probablemente desaparecerá y será sustituida por una vegetación de bosque de tierra firme. Asimismo, se tiene conocimiento que estas áreas próximas a los ríos contienen suelos muy ricos, con este nuevo patrón de poca inundación podrían ser transformadas en tierras agrícolas. Sin embargo, es muy probable que la fertilidad del suelo, que también es mantenida por los nutrientes provenientes de las inundaciones anuales, disminuya a lo largo del tiempo luego del represamiento.

## LITERATURA CITADA

- Asociación ICLA. 1982. Proyecto ICLA: Hidrología y sedimentología, Informe final. Sucre. 149 p
- Batalla R.J., Gómez, C.M. Kondolf, G.M. 2004. Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain) *Journal of Hydrology* 290 (2004) 117–136
- Brack A, Ipenza C, Brack J, Sotero V. 2011. Minería Aurífera en Madre de Dios y Contaminación con Mercurio - Una Bomba de Tiempo, Ministerio del Ambiente, Lima
- Crepani, E., Medeiros. J.S., Hernandes Filho, P., Florenzo, T.G., Duarte, V., Barbosa, C.C.F., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. INPE-8454-RPQ722. 124p.
- ENDE, Empresa Nacional de Eletricidad S.A. 1980. Proyecto Hidroeléctrico Sakhahuaya. Hidrología y sedimentología. Publ. Ende, Cochabamba, 121 p.
- Ibañez, C., Prat, N., Canicio, A., 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the Lower Ebro River and its estuary. *Regulat. Rivers: Res. Mgmt* 12, 51–62.
- Kondolf, G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environ. Mgmt* 21 (4), 533–551.
- Kondolf, G.M., Matthews, W.V.G., 1993. Management of Coarse Sediment in Regulated Rivers of California, Report No. 80, University of California Water Resources Center, Riverside.
- Meade, R.H. 1985. Suspended sediment in the Amazon River and its tributaries in Brazil during 1982-1984. U.S. Geological Survey Open File Report 85-492. Denver. 39 p.
- Martin, J. 1977. Plan de desarrollo urbano de la ciudad de La Paz. Informe geológico N° 9: Conciones 0.7366 cm hidrológicas de la cuenca de La Paz. 71 p.
- Palenque Espada, G. 1981. Análisis de las ecuaciones para el transporte de la carga de fondo. Tesis UMSA, La Paz.
- Veja, J.S., Malky, A. and Reid, J. 2012. Costos y beneficios del proyecto hidroeléctrico del río Inambari. Documento de Discusión N° 2. Conservación Estratégica. 67p
- Vollmers, H.J. & Palenque Espada, G. 1983. Sediment measurements in the Pilcomayo River in Bolivia, p 1050-1070. In *River Sedimentation*. Nanjing, October 1983.

Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams in alluvial rivers. US Geological Survey, Professional Paper, 1286.

Se sugiere citar:

Forsberg, B. 2013. Apéndice 3 Sedimentos y el complejo de represas en la cuenca Inambarirepresas en la cuenca Inambari. Documento de Trabajo #10 . Wildlife Conservation Society, Lima, Perú.