



# La Represa de Inambari – Escenario de Productividad Natural

Documento de Trabajo # 14  
Bruce Forsberg  
Fecha: Junio 2013

En términos generales los niveles de productividad primaria y secundaria de los reservorios se incrementan significativamente luego de su formación, si los comparamos con los niveles de productividad originales en el canal del río. Esto es particularmente cierto en sistemas fluviales de aguas blancas como el Inambari. Por lo general, los ríos de aguas blancas son ricos en nutrientes como fósforo (P) y nitrógeno (N), elementos fundamentales para el crecimiento de plantas acuáticas. No obstante, los niveles de productividad primaria y secundaria del canal principal son generalmente muy bajos (Wissmar et al. 1981) debido a la gran turbidez causada por los sedimentos en suspensión que llevan estos grandes ríos. Cuando estos ríos se embalsan, las condiciones físicas cambian completamente. La corriente superficial y la turbulencia se reducen enormemente, por lo que los sedimentos tienden a asentarse, creando un ambiente léntico rico en luz y nutrientes, ideal para el desarrollo del fitoplancton y otras plantas acuáticas. Este incremento en la productividad primaria crea una sólida base de energía para los productores secundarios y a menudo conduce a un incremento significativo en la producción de peces. El incremento previsto de la productividad primaria y secundaria generalmente depende de la concentración total de nutrientes limitantes del crecimiento (comúnmente P o N). Estos nutrientes proceden de los ríos y arroyos que ingresan al reservorio y también de la descomposición de las plantas terrestres sumergidas, así como de los suelos inundados por el reservorio durante su creación. A partir de datos registrados durante este proyecto sobre la química e hidrología de los ríos, así como de datos sobre la existencia de nutrientes en bosques tropicales y suelos, y de modelos clásicos de descarga de nutrientes, presentamos estimaciones de la concentración prevista de nutrientes limitantes en el reservorio del Inambari. Luego, este resultado es utilizado junto con las relaciones empíricas existentes para predecir los niveles y la dinámica de la productividad primaria y de la comunidad de peces prevista para este sistema acuático.

## DINÁMICA DE LOS NUTRIENTES

Los estudios sobre la dinámica de nutrientes en los lagos de las tierras inundables de la Amazonía Central (Brasil) explican la dinámica de los nutrientes limitantes, en base a lo cual creemos que se puede entender y prever los efectos de estas dinámicas en el nuevo reservorio Inambari. El proceso de decantación de sedimentos, que ocurre en estos lagos a medida que el agua del río Amazonas, rica en sedimentos, fluye hacia la tierra inundable, es similar a aquel previsto en el reservorio, especialmente durante la época de lluvias, cuando los lagos tienen mayor profundidad. Durante esta época, la mayor parte de los sedimentos del río ya no están en la columna de agua, las tasas de extinción de luz son bajas (promedio  $E_t = 1.98$ ) y las tasas de producción de fitoplancton alcanzan sus valores máximos (Forsberg et al 1988, Melack y Forsberg 2001). Los sedimentos

suspendidos presentes en el río Amazonas proceden principalmente de la Cordillera de los Andes (Gibbs 1967) y son ricos en fósforo (Schmidt 1972, Forsberg et al 1988). Por tanto, la decantación de estos sedimentos en los lagos de la zona inundable causa una disminución significativa en las concentraciones totales de fósforo (PT) con respecto al río (Forsberg et al 1988) y en general una limitación de fósforo para las comunidades de fitoplancton durante el periodo de aguas altas (Setarro y Melack 1984 y Forsberg 2001).

Asimismo, se prevé que luego del represamiento, la decantación de sedimentos andinos ricos en fósforo que inicialmente estaban en la columna de agua del reservorio Inambari tenga como consecuencia concentraciones reducidas de PT con respecto al río y un patrón de limitación de fósforo durante todo el primer año. El siguiente análisis se centrará exclusivamente en la dinámica del fósforo. La concentración de PT estimada para el reservorio Inambari es a partir del modelo empírico de Brett y Benjamin (2008), el cual se obtuvo de datos del balance de masa de fósforo para 305 lagos y reservorios en todo el mundo. La regresión que explicó la mayor parte de la variación ( $R^2 = 0.84$ ) en las concentraciones de PT promedio entre los sistemas evaluados fue:

$$P_T = 0.71 (L/q_s)^{0.88} (Q/V)^{-0.19} \quad (1)$$

donde,

$P_T$  = promedio de concentración total de fósforo prevista en el reservorio,  $\text{mg m}^{-3}$

$L$  = tasa total de carga de fósforo por unidad de área,  $\text{mg PT m}^{-2} \text{y}^{-1}$

$q_s$  = tasa de carga hidráulica por unidad de área,  $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{y}^{-1}$

$Q$  = tasa de carga hidráulica total,  $\text{m}^3 \text{y}^{-1}$

$V$  = promedio de volumen del lago,  $\text{m}^3$

En el reservorio Inambari, la tasa total de carga de P incluirá tanto los aportes de fósforo de ríos y arroyos ubicados aguas arriba como el fósforo liberado por la vegetación terrestre y los suelos sumergidos. El aporte anual de P procedente de cada río o arroyo aguas arriba del reservorio se estimó a partir de una relación general entre el flujo de PT y la descarga estimada para los tributarios de la cuenca del río Inambari (Fig. 1), y la descarga diaria en la desembocadura de cada tributario estimada a partir de la relación nivel del río-escorrentía para el río Inambari (Fig. 2).

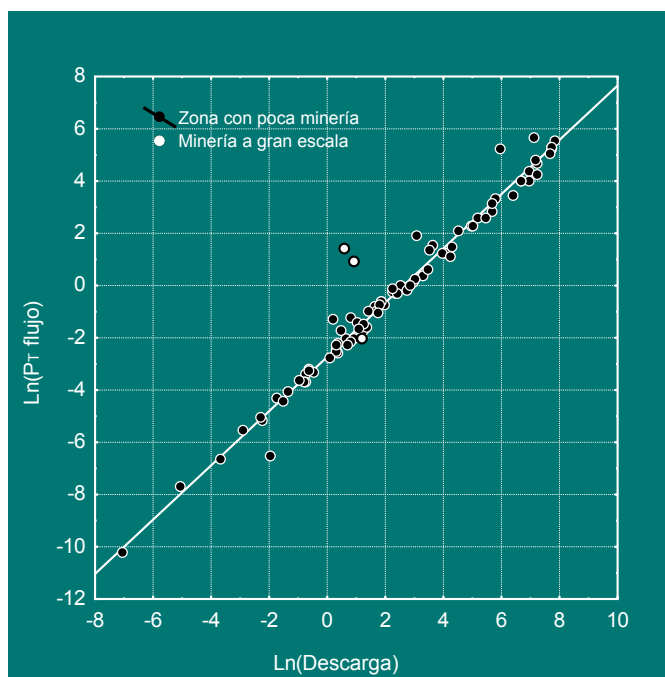


Figura 1. Relación entre el flujo total de fósforo (gTP/s) y descarga de agua (m³ s⁻¹) para tributarios de la Cuenca del Inambari.

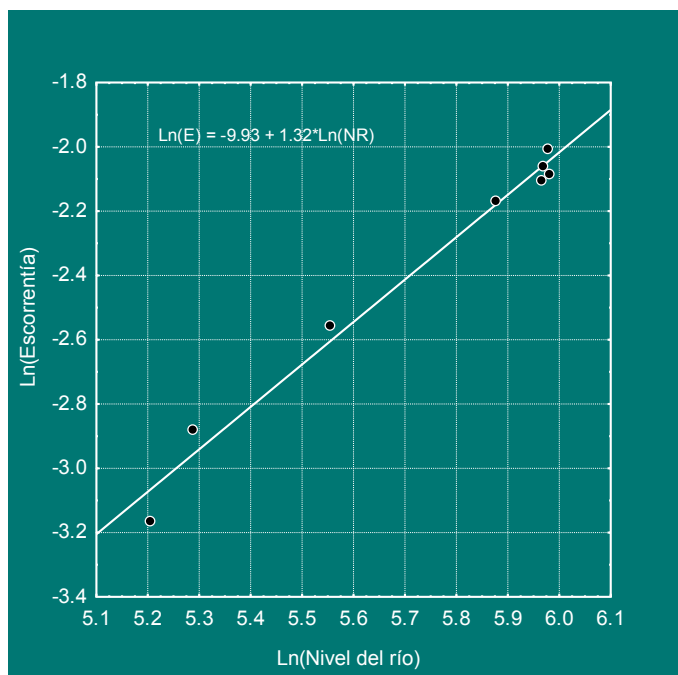


Figura 2. Relación nivel del río-escorrentía para el río Inambari.

Se calculó que la entrada de Pt anual desde todos los tributarios aguas arriba fue de  $3.268 \times 10^{12}$  mg. Dividiendo este valor por el promedio del área estimada para el reservorio ( $3.19 \times 10^8$  m<sup>2</sup>) obtuvimos como resultado un promedio de tasa de carga por área aguas arriba de  $10,240$  mgP m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Si la cuenca aguas arriba se mantiene en su estado actual esta tasa de carga debería permanecer relativamente constante en el tiempo. Si las actividades mineras y la deforestación aumentan, es probable que el aporte de fósforo aumente, conforme lo indican los elevados flujos de Pt que produce la minería a gran escala y se observan en la Figura 1. En cambio, el aporte de P derivado de la vegetación terrestre y los suelos inundados tenderá a disminuir con el tiempo conforme los componentes solubles en estas fuentes se agoten. Vega et al (2012) calcularon el stock de carbono inicial en el reservorio en  $9,665,107$  tC, el cual estaba asociado a la vegetación, raíces, y suelos que quedaron sumergidos.

Si asumimos que estos componentes tienen un contenido promedio de P de 0.015% (Vitousek y Sanford 1986), el stock inicial de P sería de 1,450 tP. Si consideramos una velocidad exponencial de desintegración de -0.069, este stock se reduciría a 725 tP en 10 años y a 362 tP en 20 años. Las tasas correspondientes de descarga interna por unidad de área al reservorio serían de 305, 152 y 76 mgP m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Incluso inmediatamente después de formado el embalse, esta tasa de carga interna sería relativamente baja y representaría menos del 3% de la carga que ocurre aguas arriba. Por consiguiente, se prevé que la influencia de la tasa de descarga en fósforos totales sea muy pequeña y que disminuirá con el tiempo. La tasa de carga total L en cada año después de formado el embalse fue calculado a partir de la suma de las tasas de carga aguas arriba. Los valores promedio para qs, Q y V calculados a partir de nuestros propios datos batimétricos hidrológicos fueron 153.6 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>, 4.870 x 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup> y<sup>-1</sup> y 1.582 x 10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, respectivamente. Se emplearon estos valores conjuntamente con la ecuación 1 para predecir el promedio de la concentración de PT en el reservorio durante los primeros 30 años posteriores a la formación del embalse (Fig. 3). Así, se observa que la concentración proyectada de PT para los primeros 30 años disminuye gradualmente a partir de la formación del embalse, desde un valor inicial de 39.4 hasta un valor de 38.5 mg m<sup>-3</sup> durante los primeros 30 años. Para este momento, la mayor parte de la fuente de fósforo interno se ha consumido.

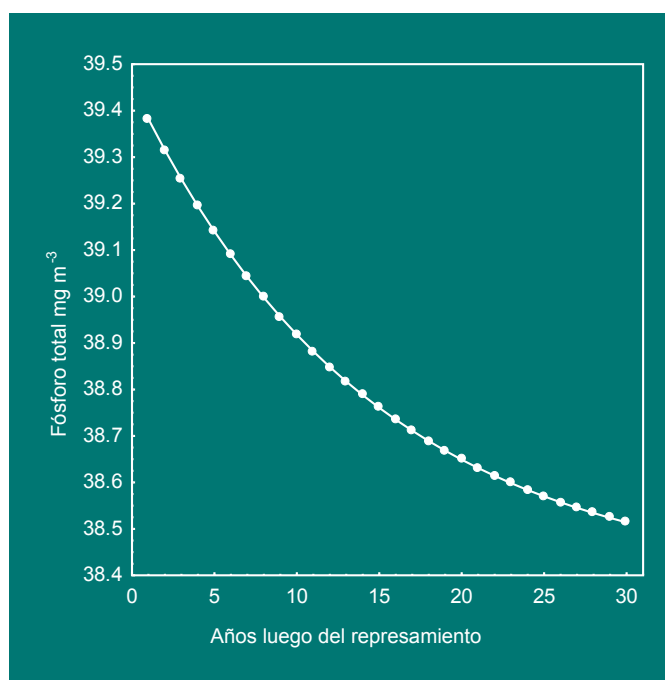


Figura 3. Variación pronosticada en la concentración total de fósforo en el Reservorio del Inambari durante los primeros 30 años posteriores al embalse.

Con el tiempo se calcula que el valor de PT alcance un valor constante de aproximadamente 38.4 mg m<sup>-3</sup>, lo cual refleja la influencia exclusiva de los aportes externos provenientes de los tributarios aguas arriba.

## PRODUCCIÓN PRIMARIA

Debido a la escarpada topografía de la zona que quedará sumergida se estima que las macrófitas herbáceas y algas perifíticas contribuyan muy poco con la producción del reservorio. Los ambientes profundos de agua abierta (ambientes pelágicos) serán el tipo de hábitat acuático dominante y se prevé que el fitoplancton sea el principal productor primario. Se puede calcular la influencia de los cambios de PT en la producción de

fitoplancton en el reservorio a partir de las relaciones empíricas que fueron obtenidas a partir de las mediciones de producción en 79 lagos de zonas inundables en la Amazonía central (Brasil) durante el período de crecida (Forsberg, datos no publicados). Se sabe que la tasa máxima de fotosíntesis ( $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\text{mgO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) de las comunidades de algas en condiciones máximas de luz aumenta de manera directa y lineal con la concentración de PT en los lagos (Smith 1979). Una relación similar se encontró en los lagos en la tierra inundable de la Amazonía central durante los períodos de crecida (Fig. 4a, Forsberg, datos no publicados). Se empleó esta relación, conjuntamente con nuestros niveles previstos de  $P_T$  para calcular el cambio previsto en  $P_{m\acute{a}x}$  con el tiempo en el Reservorio Inambari (Figura 4b).

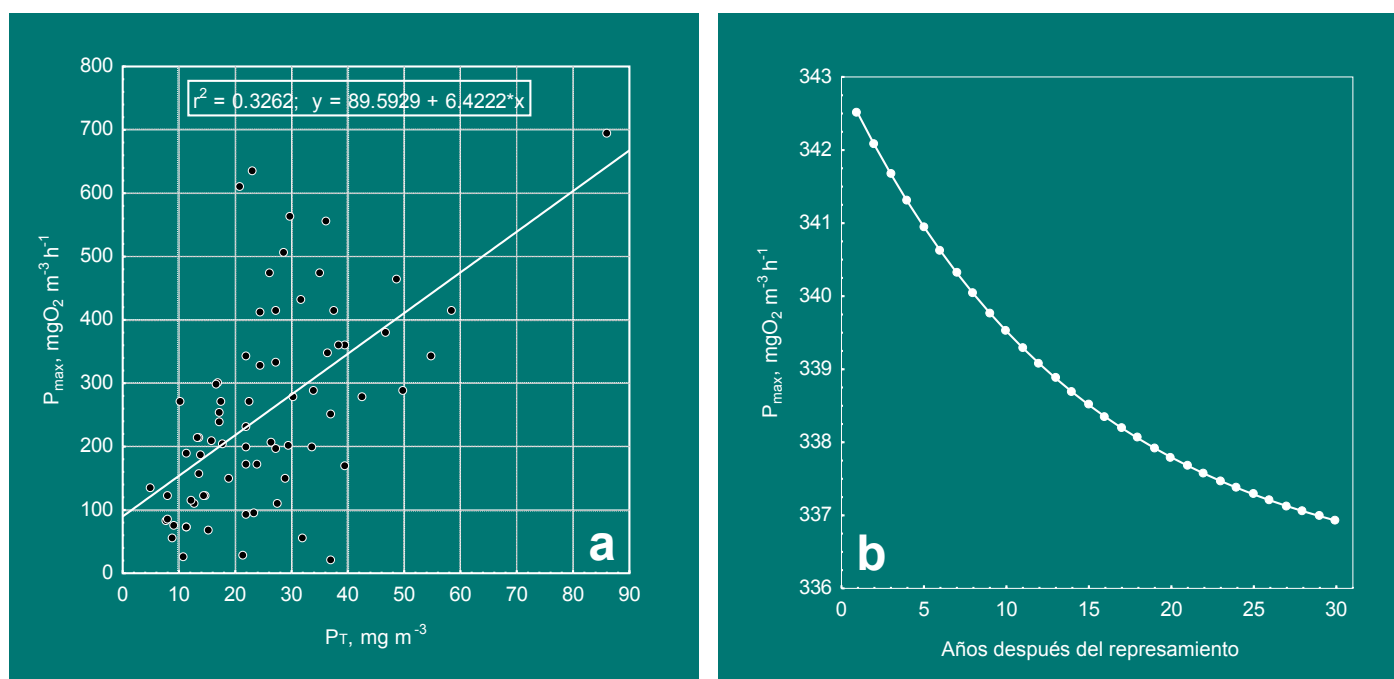


Figura 4. a). Relación entre fotosíntesis durante luz máxima,  $P_{m\acute{a}x}$  y  $P_T$  para fitoplancton en los lagos de las tierras inundables de la Amazonía central (Forsberg, no publicado); b). Niveles de  $P_{m\acute{a}x}$  estimados para fitoplancton en el Reservorio Inambari durante los primeros 30 años posteriores al embalse.

Los niveles  $P_{m\acute{a}x}$  pronosticados fueron algo más elevados que el nivel promedio encontrado en los lagos a lo largo de las tierras inundables de la Amazonía central (media =  $251 \text{ mgO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) y declinaron levemente con el tiempo. Estas estimaciones fueron considerando los niveles de  $P_T$  más elevados previstos en este sistema y su disminución prevista posterior al embalse.

Se determinó que los índices de producción integral diaria de fitoplancton ( $\text{gO}_2 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ ) en los lagos de las tierras inundables de la Amazonía central variaban de manera predecible entre los lagos en función de  $P_{m\acute{a}x}$  y el coeficiente vertical de extinción,  $E_t \text{ (m}^{-1}\text{)}$ , de acuerdo con la ecuación de regresión (Figura 5, Forsberg no publicado):

$$\text{Producción Integral} = 2.2926 [n f P_{m\acute{a}x} E_t^{-1}] - 0.0301 \quad (2)$$

donde

$n$  = constante que relaciona  $P_{m\acute{a}x}$  con la fotosíntesis diaria óptima = 0.8333

$f$  = número promedio de horas de luz del día = 12

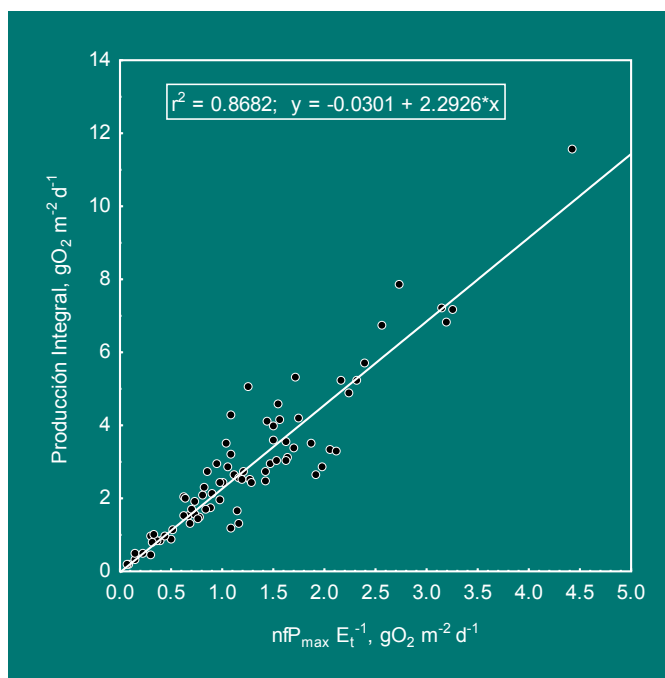


Figura 5. Relación entre producción integral diaria y  $n f P_{m\acute{a}x} E_t^{-1}$  para fitoplancton en los lagos de las tierras inundables de la Amazonía central. (Forsberg, datos no publicados).

Para calcular los índices de producción anual integral en el Reservorio Inambari luego de creado el embalse, se empleó esta ecuación conjuntamente con los valores previstos de  $P_{m\acute{a}x}$  y el coeficiente promedio de extinción de la época de inundación de los lagos de la Amazonía central ( $1.98 m^{-1}$ ) (Fig. 6).

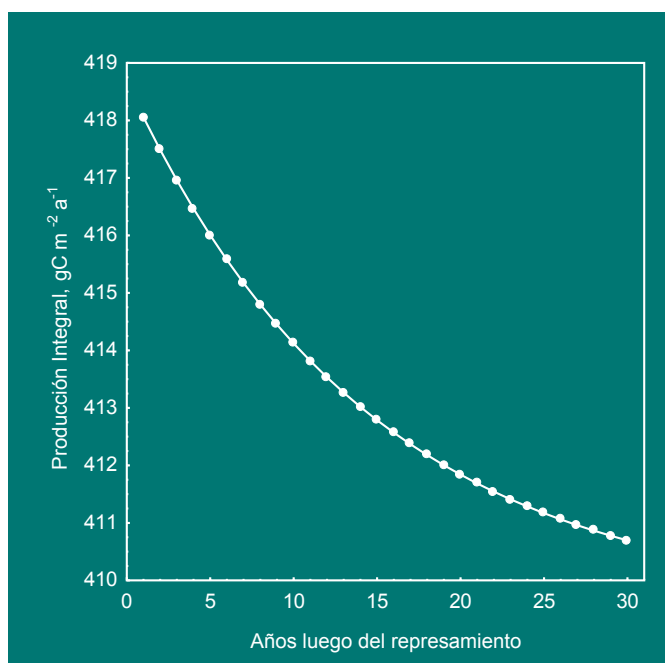


Figura 6. Variación pronosticada en la producción integral anual para fitoplancton en el Reservorio del Inambari después del embalse.

Se ha encontrado que la producción pesquera ( $kg ha^{-1} y^{-1}$ ) en reservorios y lagos tropicales varía en función de la presión de extracción, el índice morfoedáfico (conductividad/profundidad media), fósforo total y producción integral de fitoplancton (Melack 1976, Oglesby 1977, Marten y Polovina 1982). En general, las relaciones no son muy buenas debido a la selectividad de la pesca comercial y a la interacción compleja entre

factores naturales y antrópicos. Se han encontrado mejores relaciones si se considera como producción total las comunidades. Downing, Plante y Lalone (1990) investigaron los factores que influyen en la producción de comunidades de peces en 19 lagos y reservorios de amplia distribución geográfica. No encontraron ningún efecto significativo del índice morfoedáfico, más bien una relación positiva significativa con  $P_T$ . La mejor relación que encontraron fue la regresión entre el logaritmo de la producción de peces por comunidades y la producción integral de fitoplancton, esta regresión explicó el 79% de la varianza observada (Figura 7).

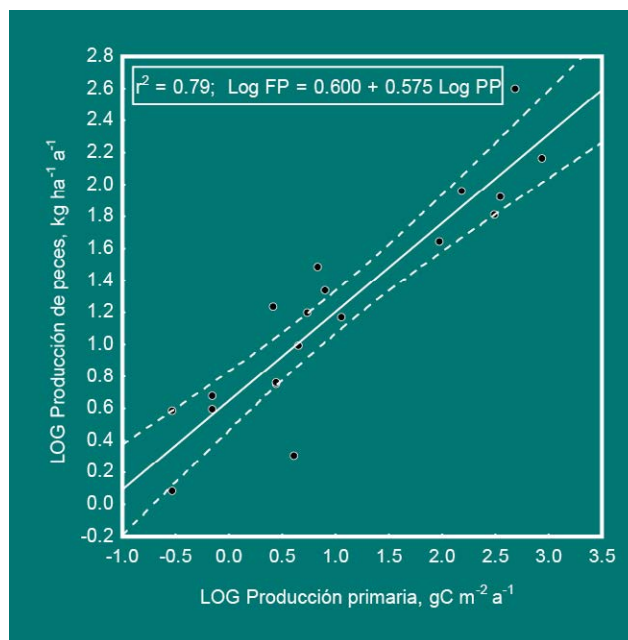


Figura 7. Relación entre producción total de comunidades de peces y producción integral de fitoplancton en lagos y reservorios. Tomado de Downing, Plante y Lalone (1990), versión regraficada.

Para calcular la variación prevista en la producción total de peces por comunidades del Reservorio Inambari luego de cerrado el embalse, se utilizó esta relación conjuntamente con los datos de producción integral estimados de la figura (Fig. 8). Se prevé que inicialmente la producción de peces será bastante elevada, e irá disminuyendo ligeramente después de los 30 años.

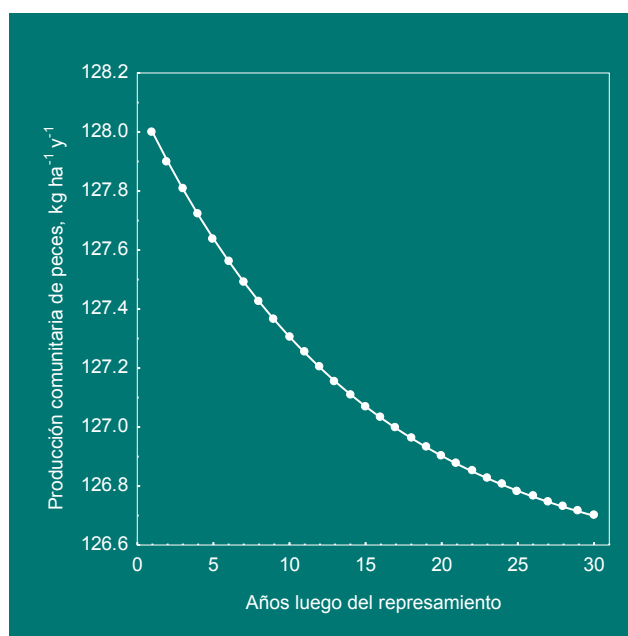


Figura 8. Variación prevista en la producción total de comunidades de peces en el Reservorio del Inambari posterior al embalse.

Se ha encontrado que la producción de peces en algunos reservorios amazónicos como Balbina y Tucurui aumentó rápidamente y luego disminuyó después de un ciclo aproximado de 20 años (Petriere 1996, Santos y Oliveira 1999). Este fenómeno de “auge y caída” fue atribuido al bajo aporte de nutrientes limitantes del crecimiento derivados de la descomposición gradual de la vegetación terrestre inundada. Los aportes externos de nutrientes son al parecer menores en comparación a la vasta fuente interna. Se estima que la dinámica de producción en el Reservorio Inambari sea bastante diferente. Debido al predominio de importantes aportes externos y relativamente constantes de nutrientes, se prevé que las concentraciones de nutrientes sean mucho más elevadas y más estables con el tiempo. Puesto que la producción de peces y fitoplancton está vinculada a las concentraciones totales de nutrientes, también se prevé que sus niveles sean relativamente elevados y estables para el futuro evaluado. Esto crea el potencial para el desarrollo de una industria pesquera estable en el reservorio, y que podría constituir una alternativa económica viable para la población local. Sin embargo, los elevados índices de producción de fitoplancton también pueden tener algunas consecuencias negativas. El aumento de la producción de materia orgánica puede elevar la demanda de oxígeno biológico, promoviendo la anoxia hipolimnética e índices más elevados de metilación de mercurio y emisión de gases de efecto invernadero.



## LITERATURA CITADA

- Brett, M.T. and Benjamin, M.M. 2008. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. *Freshwater Biology* 53: 194-211.
- Downing, J.A., Plante, C. & Lalonde, S. 1990. Fish production correlated with primary productivity, not the morphoedaphic index. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 47(10): 1929–1936.
- Forsberg, B.R., A. H. Devol, J. E. Richey, L. A. Martinelli and H. dos Santos. 1988. Factors controlling nutrient concentrations in Amazon floodplain lakes. *Limnol. Oceanogr.* 33: 41-56.
- Gibbs, R. J. 1967. The Geochemistry of the Amazon River System: Part I. The Factors that Control the Salinity and the Composition and Concentration of the Suspended Solids. *Geological Society of America Bulletin*, 78: 1203-1232
- Marten, G.G. and J.J. Polovina. 1982. A comparative study of fish yields from various tropical ecosystems, p. 255-289. In Pauly, D. and G.I. Murphy (eds.) *Theory and management of tropical fisheries*. ICLARM Conference Proceedings 9, 360 p. International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines and Division of Fisheries Research, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Cronulla, Australia.
- Melack, J.M. 1976. Primary productivity and fish yields in tropical lakes. *Trans. Amer. Fish. Soc.* 105: 575-585.
- Melack, J.M. and B.R. Forsberg. 2001. Biogeochemistry of Amazon floodplain lakes and associated wetlands, pp. 235-276. In McClain, M.E., Victoria R.L. and Richey, J.E. [eds.], *The Biogeochemistry of the Amazon Basin*. Oxford University Press.
- Oglesby, R.T. 1977. Phytoplankton summer standing crop and annual productivity as functions of phosphorus loading and various physical factors. *J. Fish. Res. Board Can.* 34: 2255-2270.
- Petere Jr. M. 1996 Fisheries in large tropical reservoirs in South America. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 2: 111-133.
- Santos G.M and Oliveira, A.B.. 1999. A pesca no reservatório da hidrelétrica de Balbina (Amazonas, Brasil) *Acta amazônica* 29: 145-163.
- Setaro, F. V. And J. M. Melack. 1984. Responses of phytoplankton to experimental nutrient enrichment in an Amazon floodplain lake. *Limnol. Oceanogr.* 29: 972-984

- Schmidt, G. W. 1972. Amounts of suspended solids and dissolved substances in the middle reaches of the Amazon over the course of one year, (August 1969 - July, 1970), *Amazoniana*, 3: 208-223
- Smith, V. H. 1979. Nutrient dependence of primary productivity in lakes. *Limnol. Oceanogr.* 24: 1,051-1,064
- Vega, J.S., Malky, A. and Reid, J. 2012. Costos y beneficios del proyecto hidroeléctrico del río Inambari. Documento de Discusión No 2. Conservación Estratégica. 67p
- Vitousek, P.M and R.L. Sanford Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17:137-167.
- Wissmar, R. C. , J. E. Richey, R. F. Stallard and J. M. Edmond. 1981. Plankton metabolism and carbon processes in the Amazon River, its tributaries and floodplain waters. Peru-Brazil, May-June 1977. *Ecology* 62: 1,622-1,633

Se sugiere citar:

Forsberg, B. 2013. “La Represa de Inambari – Escenario de Productividad Natural”. Documento de Trabajo # 14. Wildlife Conservation Society, Lima. Perú.