



# Limnología de la Cuenca Inambari

Documento de Trabajo # 18  
Bruce Forsberg  
Fecha: Junio 2013

La cuenca Inambari incluye una amplia gama de cuerpos de agua que son muy vulnerables a los impactos generados por la construcción de represas. La variabilidad física y química de estos sistemas está directamente relacionada con factores como la elevación, temperatura del aire, presión atmosférica y topografía de la región, así como también con las características del área de drenaje de las partes más altas tales como geología, tipo de suelo, inclinación, escorrentía y cambios de uso de la tierra. Con la finalidad de evaluar estas relaciones y los potenciales impactos del represamiento del río en estos ecosistemas acuáticos se desarrollaron una serie de estudios entre agosto 2002 y marzo 2012. Se muestrearon en total 14 cuerpos de agua entre ríos, quebradas, lagos, afloramientos de agua y nevados, todos distribuidos a lo largo de los ríos Araza e Inambari (Figura 1). Los parámetros analizados fueron temperatura del agua (°C), pH, turbidez (ntu), oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>, mg/L), sedimentos totales en suspensión (STS, mg/L), conductividad (μS/cm), transparencia con el disco Sechhi (DS, cm) y en algunos casos valores totales de fósforo (TP, mg/L), total de nitrógeno (TN, mg/L), alcalinidad de carbonatos (ALK, meq/L), principales cationes (Na, K, Ca, Mg, mg/L) y aniones (Cl, SO<sub>4</sub>, mg/L). También se evaluaron las características morfológicas e hidrológicas del canal de los ríos y quebradas, y características de las localidades de muestreo tales como elevación, temperatura del aire, latitud y longitud y tipo de vegetación. Se presenta a continuación una síntesis de los datos limnológicos recogidos en estos estudios haciendo énfasis en los hallazgos encontrados con respecto a las principales relaciones geomorfológicas, hidrológicas y de calidad de agua.

## GEOMORFOLOGÍA E HIDROLOGÍA

En un estudio de los ríos en Estados Unidos, Leopold (1942) encontró una alta correlación entre las principales medidas de la morfología del canal (profundidad media, ancho, área de la sección transversal) y la descarga del río. Su argumento se basó en un concepto de equilibrio con respecto a la geometría del canal, el cual resulta de la interacción de fuerzas opuestas que se dan entre el río y el fondo del canal, ambos controlados por la erosión que el mismo canal permanentemente produce. Leopold sugiere que este mismo patrón puede ocurrir en otros ríos con una zona inundable más fácil de erosionar, sin embargo no está claro si este mismo patrón puede ocurrir también en regiones de montaña en donde el lecho de los ríos está compuesto por rocas, piedras y sedimentos más gruesos. Los resultados obtenidos en la cuenca Inambari proporcionan una excelente oportunidad para evaluar esta hipótesis.

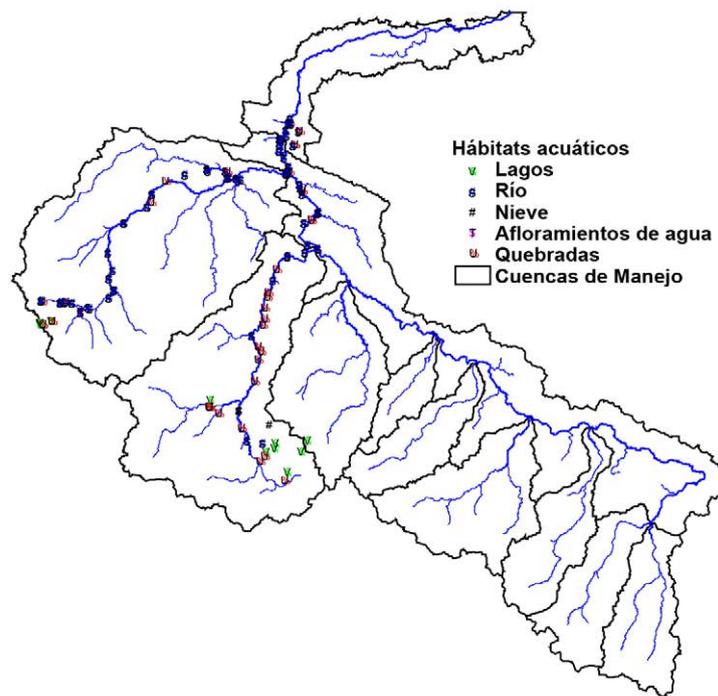


Figura 1. Distribución de los puntos de muestreo limnológico en la cuenca Inambari.

Los valores de descarga en todos los puntos muestreados estuvieron fuertemente correlacionados con la profundidad media del canal, ancho del canal y la sección transversal (Figuras 2 a, b, c, respectivamente), los cuales siguieron un patrón similar al descrito por Leopold (1942).

Sin embargo, entre estas tres variables que describen la geometría del canal los datos demostraron que la descarga tiene una relación mucho más cercana con la variación de la sección transversal que con la variación del ancho y profundidad del canal, lo cual indica que la erosión no es uniforme a lo largo del lecho del río. Cuando el ancho del canal está limitado por paredes de roca dura, como ocurre en el Puente Inambari cerca del sitio propuesto para la represa, el río aparentemente erosiona un canal más profundo de lo esperado. Inmediatamente aguas abajo de este lugar, en donde estas paredes de piedra son sustituidas por un cauce más fácil de erosionar, el canal se ensancha a una nueva configuración de “equilibrio”. Por tanto, aunque sigue siendo válido el concepto de equilibrio de Leopold, se debe incluir el efecto que genera la variación de la resistencia del cauce del río, el cual produce una relación “variable del equilibrio” entre la descarga y la geometría del canal. Este modelo de equilibrio modificado va a facilitar aportes clave para entender el patrón de erosión del fondo del canal que se producirá aguas abajo de la represa Inambari. La variable “resistencia del material del lecho del río” determinará los patrones de erosión y distribución del material de fondo una vez que se inicie la liberación de agua (libre de sedimentos) desde el reservorio. Si estos valores de resistencia pueden ser mapeados antes de construirse la represa, podrá ser posible predecir los patrones de erosión.

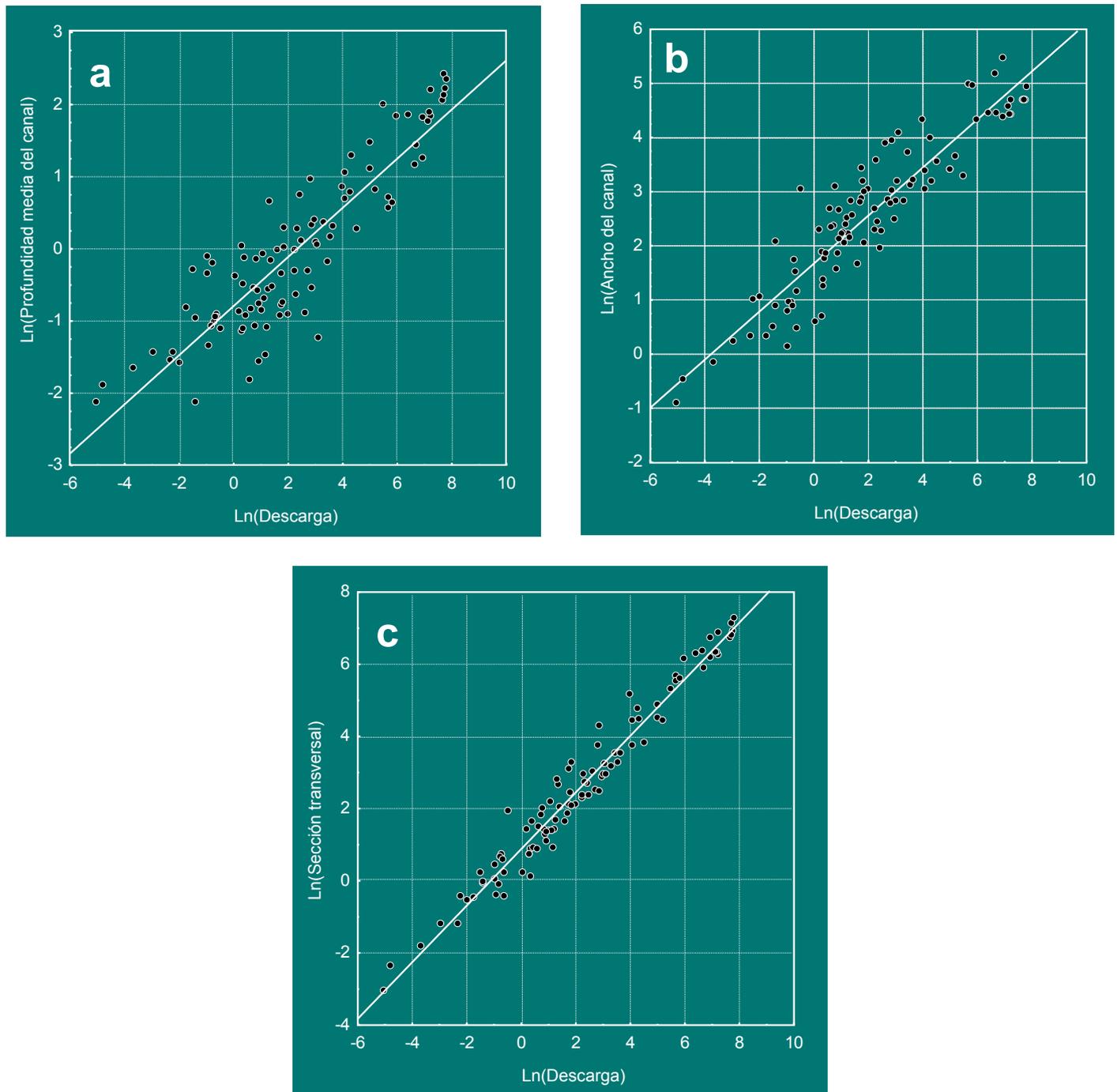


Figura 2. Variación de a) profundidad media del canal, b) ancho promedio del canal y c) sección transversal media del canal, con respecto a la descarga de los ríos y quebradas de la cuenca Inambari.

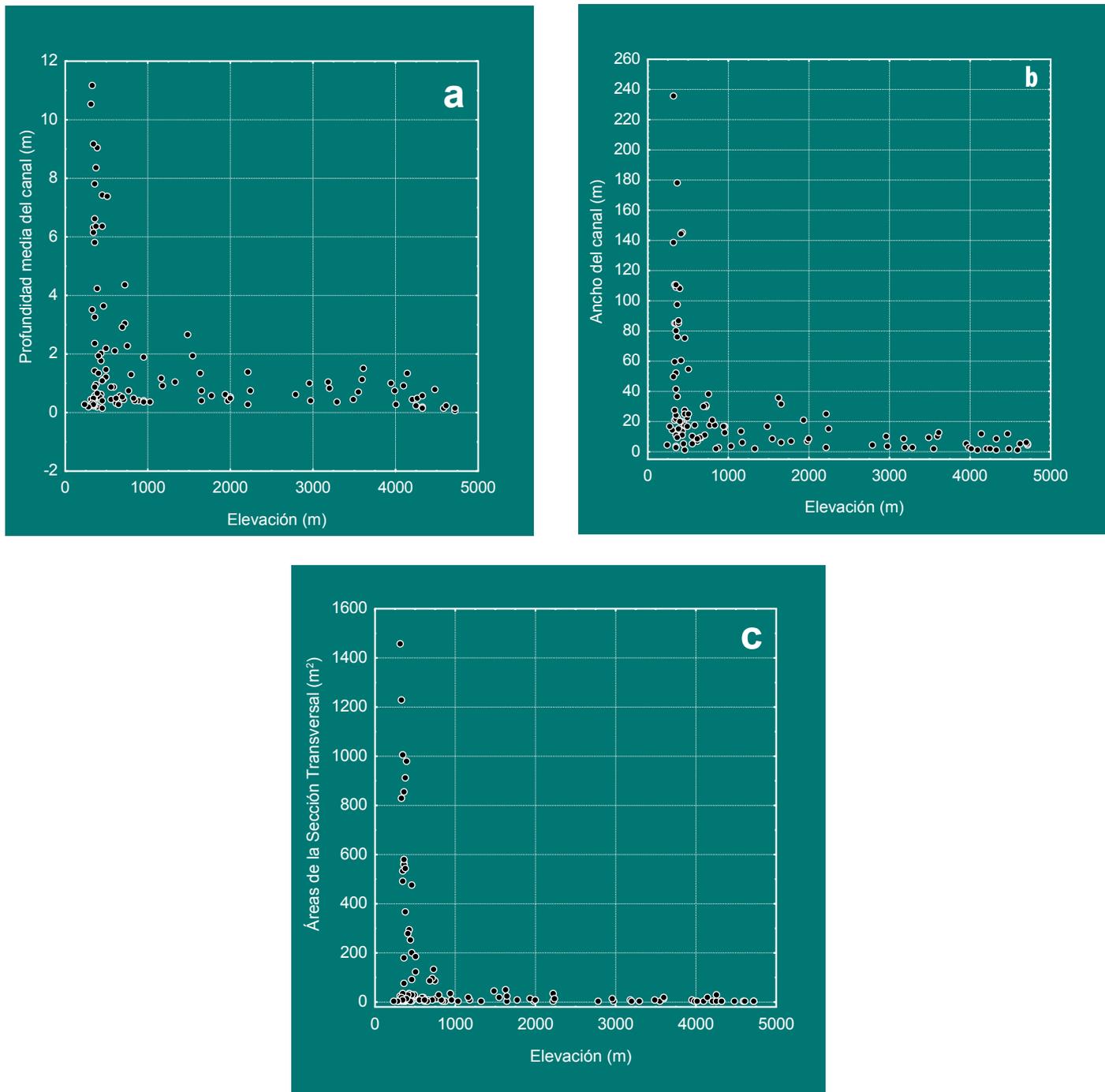


Figura 3. Variación de a) profundidad media del canal, b) ancho del canal, y c) sección transversal del canal, con respecto a la elevación en ríos y quebradas de la cuenca Inambari.

La morfología del canal también cambió sistemáticamente con la elevación. Tanto los rangos como los valores promedio del ancho del canal, la profundidad y sección transversal disminuyeron con la elevación (Figura 3 a, b, c, respectivamente). Como se muestra a continuación esto tiene implicancias en algunos de los parámetros hidrológicos, podría asimismo influir en los hábitats y la fauna acuática, en particular peces de

mayor tamaño cuya distribución está fuertemente relacionada al canal principal. La mayor variabilidad en el rango de tamaños de canales a bajas elevaciones estuvo relacionada a una mayor diversidad de fauna y hábitats acuáticos. Esta variada fauna será particularmente vulnerable a los impactos del represamiento ya que se espera que el reservorio Inambari inunde muchos de estos ambientes acuáticos ubicados a bajas elevaciones.

Si bien es cierto la geometría del canal varía en función de la descarga (Figuras 2 a- c), ésta también está fuertemente influenciada por la velocidad de la corriente. Cuanto menor es la sección transversal del canal, mayor es la resistencia de rozamiento en el canal río, por tanto menor la velocidad de la corriente. Esto fue evidente a partir de la relación positiva encontrada entre la velocidad media y el área de la sección transversal de los tributarios del río Inambari (Figura 4a).

Sin embargo, la velocidad de la corriente también aumentó aguas arriba con respecto al relieve del terreno (Figura 4b) y la escurriencia ( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{s}$ ). Un modelo de regresión múltiple que incluye los tres factores (relieve, sección transversal y escurriencia) demostró que 60% de la varianza total de la velocidad registrada estuvo en función de estas tres variables.

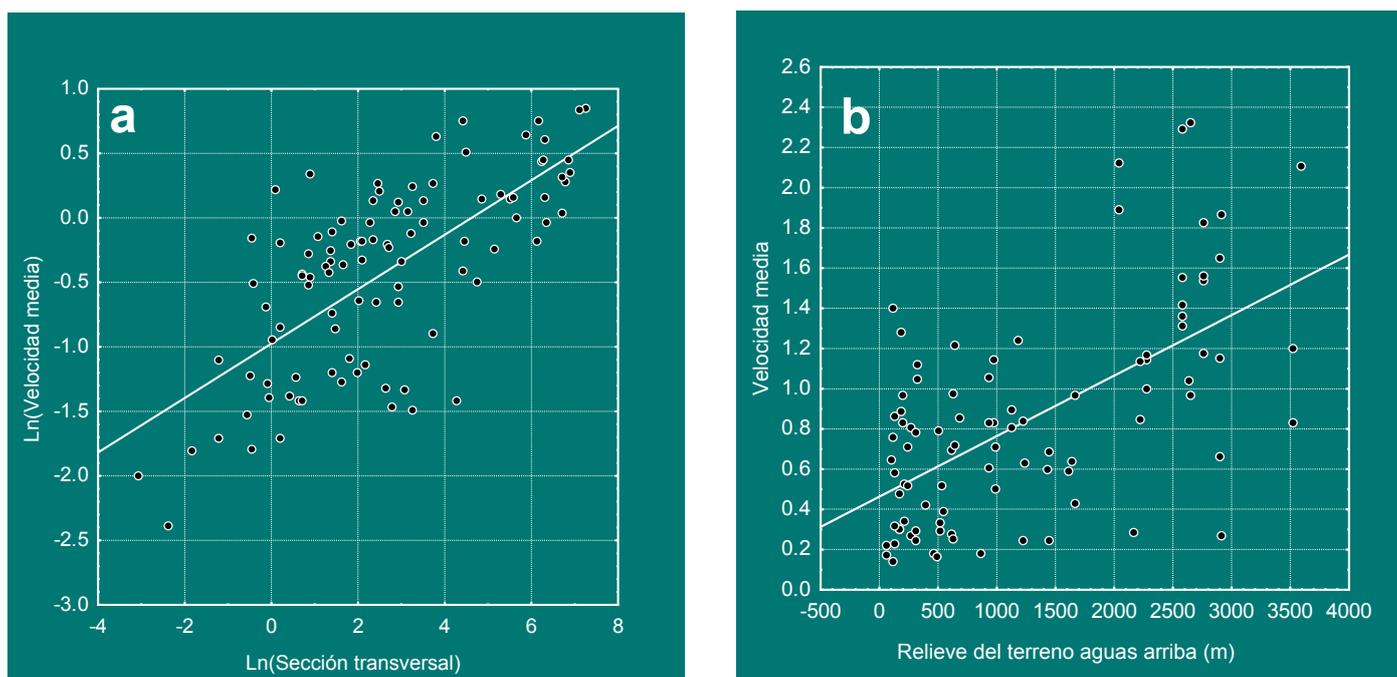


Figura 4. Relación entre la velocidad media de la corriente y a) área de la sección transversal, y b) relieve del terreno de las partes altas de la cuenca, en tributarios de la cuenca Inambari.

Se encontró además una relación inversa entre la escurriencia y la elevación (Figura 5), lo cual fue consecuencia de una disminución en la precipitación en las zonas más altas, a donde el aire cargado de humedad proveniente del lado oriental no alcanza a llegar.

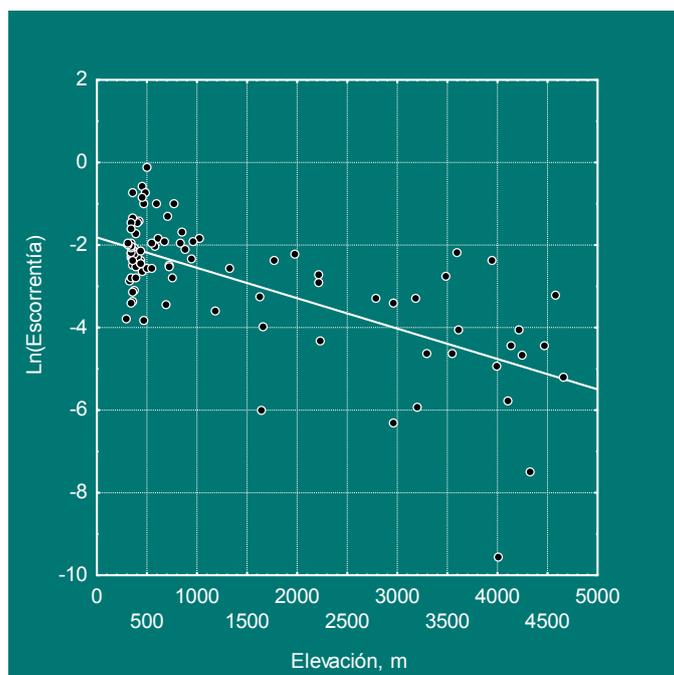


Figura 5. Relación entre la escorrentía ( $m^3/km^2/s$ ) y la elevación para los tributarios de la cuenca Inambari.

La combinación de la disminución tanto de la escorrentía y de los valores de sección transversal a medida que se incrementa la elevación generó una relación inversa entre la velocidad media y la elevación (Figura 6). Este patrón puede tener efectos de gran importancia en la distribución y calidad de los hábitats bentónicos (del fondo del canal) y la fauna asociada. También puede influir en los patrones de dispersión y migración de los peces y otra fauna acuática. Una vez más es importante mencionar que se espera que a menores elevaciones existan los mayores rangos de velocidad y la mayor diversidad faunística y de hábitats acuáticos, los cuales serán muy vulnerables al represamiento del río.

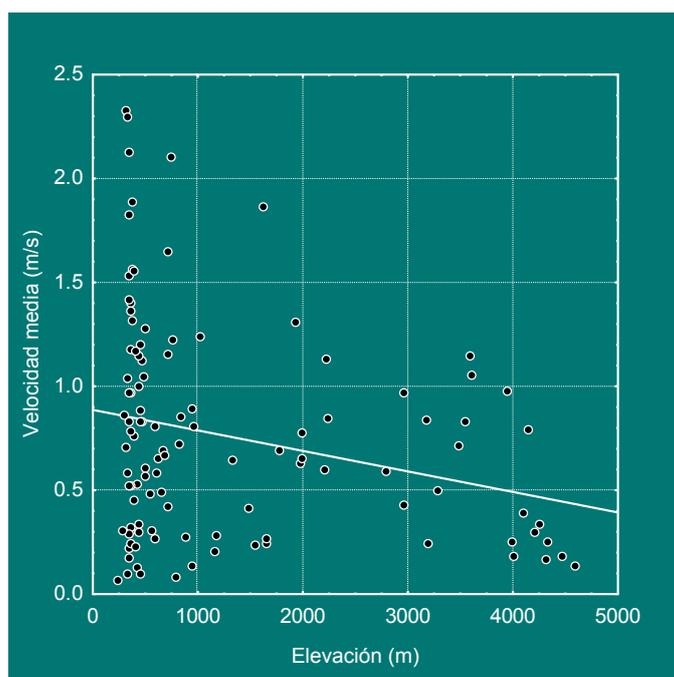


Figura 5. Relación entre la escorrentía ( $m^3/km^2/s$ ) y la elevación para los tributarios de la cuenca Inambari.

## CALIDAD DE AGUA

La calidad de agua varió de manera considerable entre todos los cuerpos de agua evaluados. En términos generales, la temperatura del agua disminuyó con la elevación (Figura 7a), debido principalmente a una correlación positiva y directa con la temperatura del aire (Figura 7b), la cual también disminuyó con la elevación.

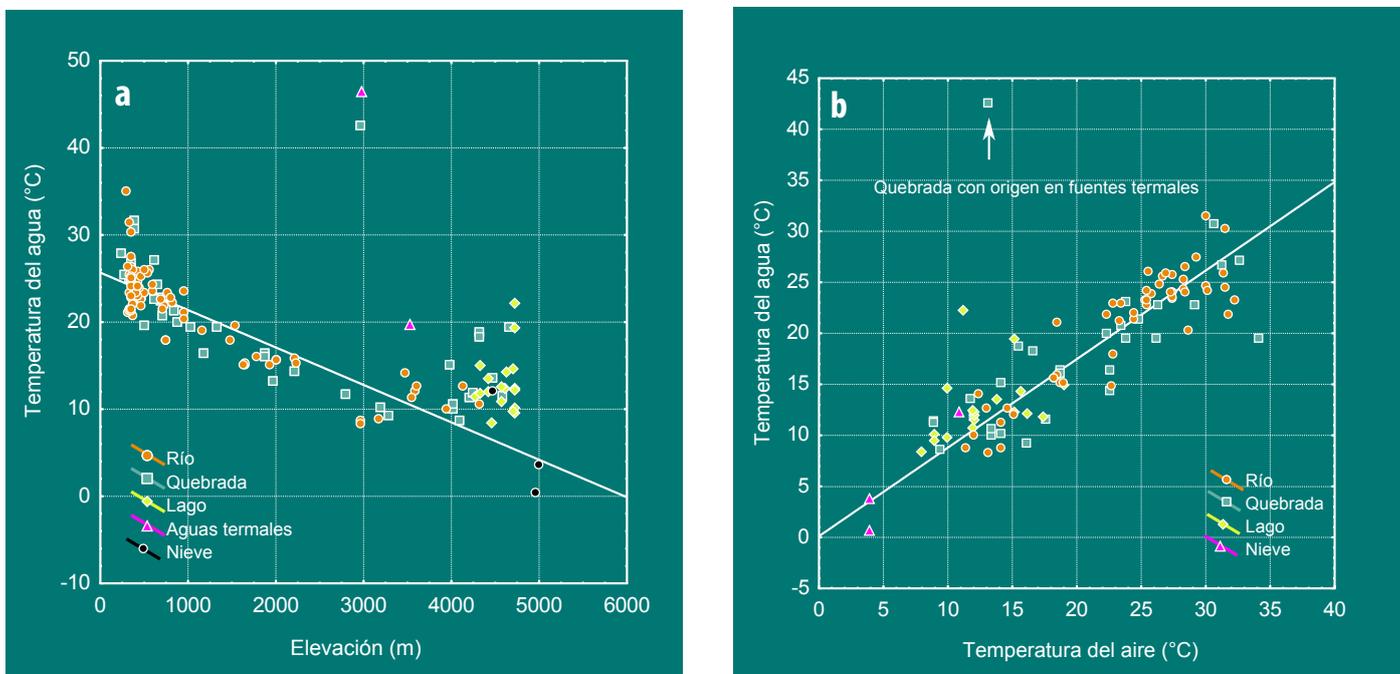


Figura 7. Variación de la temperatura del aire con a) elevación, y b) temperatura del aire en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari.

Por lo general los valores de temperatura del agua fueron varios grados menores a los de la temperatura del aire, lo cual refleja un efecto combinado de la disminución de la elevación de los ríos (por tanto, una mayor temperatura del aire) y el alto calor específico y la inercia térmica del agua. Las únicas excepciones fueron los afloramientos de aguas termales y las pequeñas quebradas que éstas formaban, en las cuales la temperatura del agua fue excepcionalmente alta. Solamente un lago alto-andino con estratificación térmica de la columna de agua presentó la temperatura superficial del agua relativamente alta.

Las concentraciones de oxígeno disuelto también tendieron a disminuir con el aumento de la elevación (Figura 8a), sin embargo en este caso la explicación es más compleja y va a variar según el tipo de hábitat acuático. Las concentraciones de oxígeno en los ríos y quebradas estaban siempre cerca del 100% de saturación, el cual representa el valor esperado en equilibrio con la atmósfera. Este valor de equilibrio varía de manera inversa con la temperatura del agua y de manera positiva con la presión atmosférica, la cual a su vez disminuye con la elevación. Usando la elevación como un indicador de la presión atmosférica, 62% de la varianza de los valores de oxígeno disuelto estuvieron relacionados directamente a la relación entre la elevación y la temperatura del agua en casi la totalidad de ríos y quebradas evaluados (Figura 8b). Considerando que tanto la temperatura como la presión atmosférica disminuyen con la elevación, ambas variables tuvieron efectos opuestos con respecto al contenido de oxígeno disuelto. No obstante, el efecto de la presión atmosférica fue predominante y esto explica la tendencia negativa observada

con la elevación (Figura 8a).

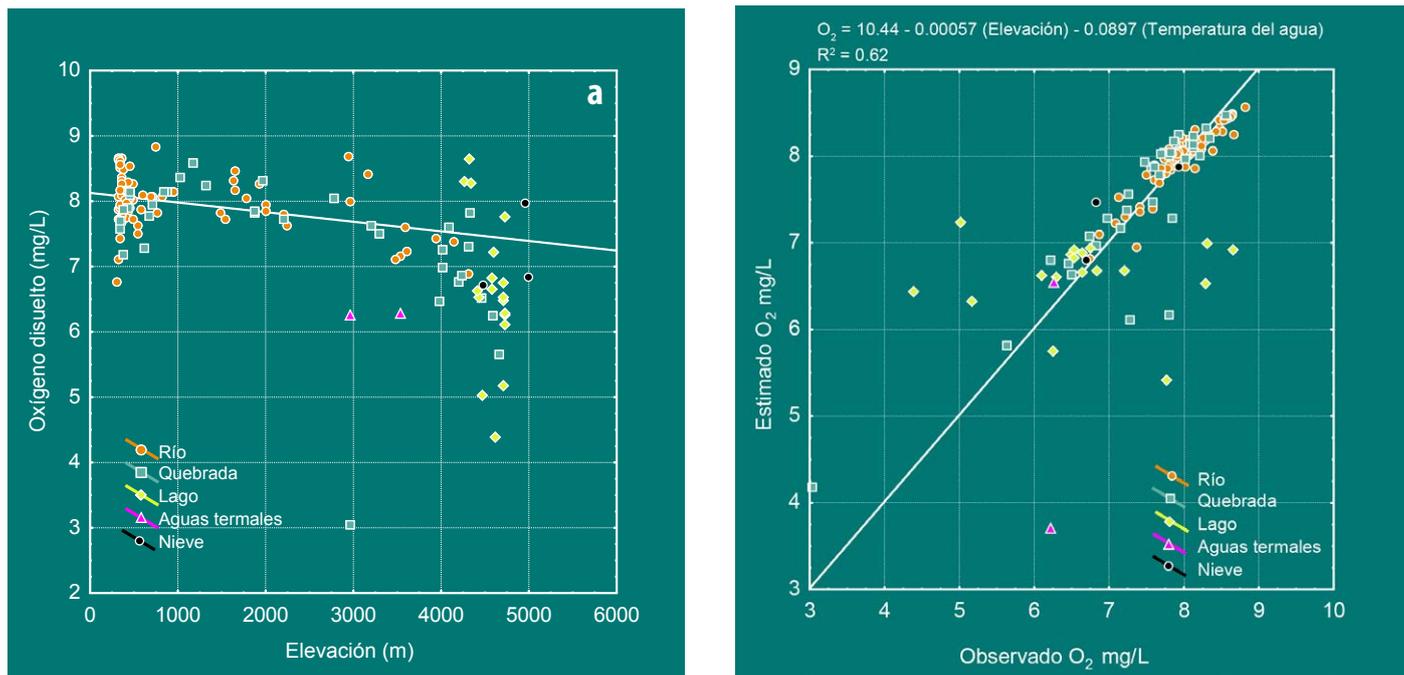


Figura 8. Relaciones del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari. a) Variación de la concentración de oxígeno disuelto con la elevación, b) Concentraciones de oxígeno Observadas y Estimadas, obtenidas a partir de la ecuación de regresión múltiple.

Las desviaciones encontradas en la concentración de oxígeno estimado a partir de la regresión (Figura 8b) indican el efecto de los procesos biológicos en las concentraciones de oxígeno disuelto observados. Estos efectos fueron evidentes en lagos donde se observaron con frecuencia desviaciones significativas. Las desviaciones por encima de la línea de regresión reflejaron el predominio de la actividad fotosintética sobre la actividad heterotrófica en estos sistemas, mientras que las desviaciones por debajo de la línea de regresión indicaron el predominio de la actividad heterotrófica. Algunas de las quebradas más pequeñas y una fuente de aguas termales también presentaron valores de desviación por encima de la línea de regresión indicando la presencia de una significativa actividad fotosintética en estos sistemas. Esta única fuente de aguas termales en particular presentó una densa comunidad de algas epilíticas creciendo sobre el substrato rocoso de donde se originaba el afloramiento subterráneo (Foto 1).



Foto1. Algas epilíticas creciendo a la salida de la fuente de aguas termales en la cuenca Inambari.

El pH en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari varió principalmente en función de la alcalinidad de carbonatos, el principal agente tampón en la mayoría de aguas naturales (Figura 9), con los máximos valores asociados a los niveles más altos de alcalinidad. Tanto la alcalinidad como el pH tendieron a aumentar con la elevación (Figura 9a, b). El aumento de los niveles de alcalinidad a mayores elevaciones refleja la presencia de suelos más alcalinos y una menor escorrentía en el área de drenaje de estos cuerpos de agua.

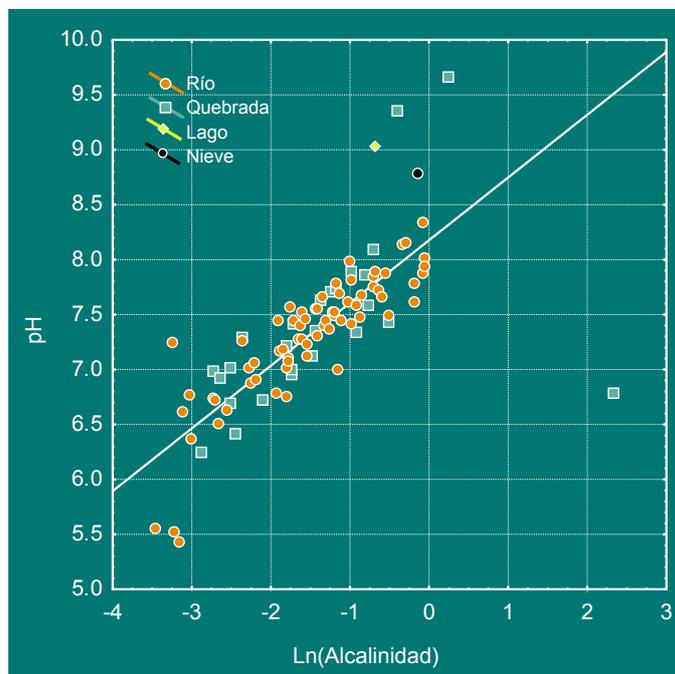


Figura 9. Influencia de la alcalinidad de los carbonatos en el pH de los cuerpos de agua de la cuenca Inambari.

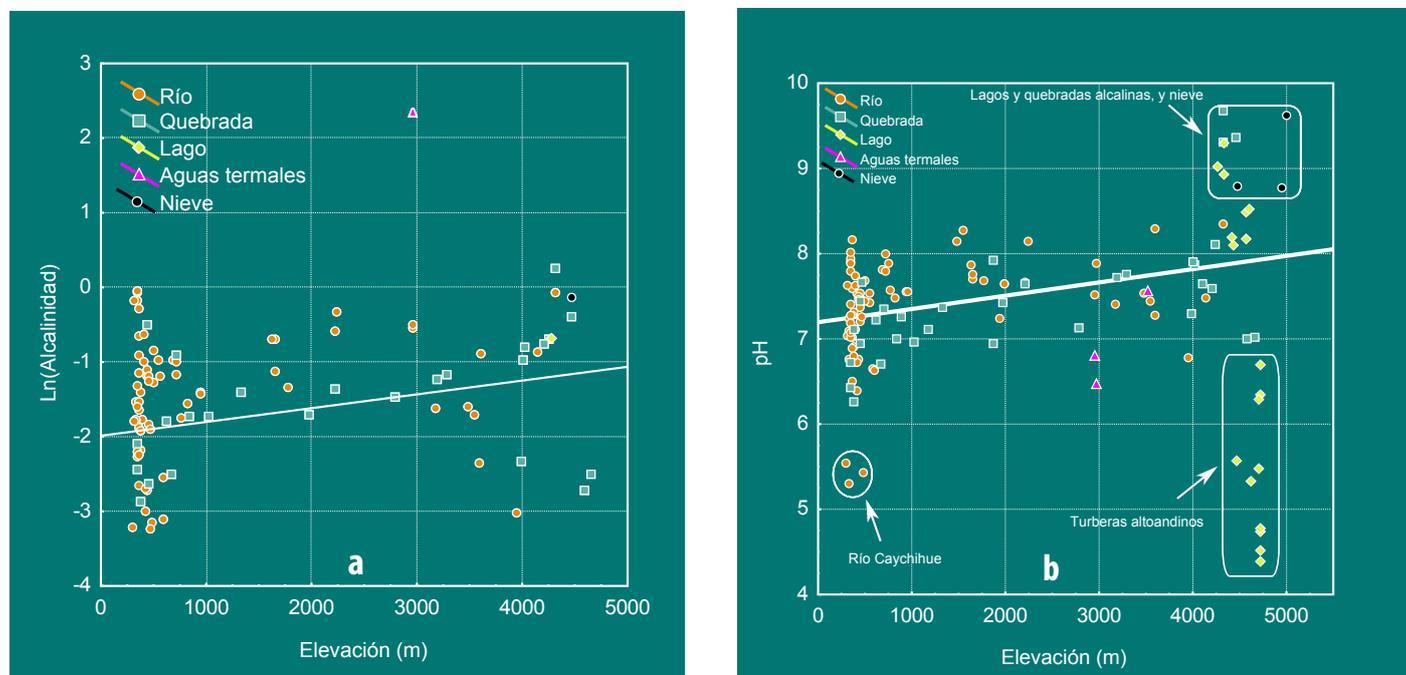


Figura 10. Variación en a) alcalinidad de carbonatos (meq/L) y b) pH en cuerpos de agua en la cuenca Inambari.

Esta tendencia fue más evidente en las quebradas pequeñas, cuyas áreas de drenaje reflejaron mejor las características locales, tanto edáficas como hidrológicas. Las pequeñas quebradas que recorren las terrazas no inundables (terra firme) de las tierras bajas presentaron por lo general valores bajos de alcalinidad

y bajos niveles de pH, lo cual refleja la alta erosión de los suelos y una mayor escorrentía, es decir, en estas regiones existe una mayor capacidad de dilución. Se encontraron niveles excepcionalmente bajos de pH en el río Caychihue, probablemente debido a las actividades de extracción de oro que ocurren en casi toda la cuenca de este tributario. También se encontraron niveles excepcionalmente bajos de pH en algunos lagos y charcas alto andinas. Estos cuerpos de agua de las zonas altas se caracterizan por tener un drenaje muy pobre y por estar rodeados por suelos de turberas, similares a los lagos de turberas de aguas negras comunes en las regiones templadas del hemisferio norte. Estos cuerpos de agua alto andinos parecen recibir el mayor aporte de agua y nutrientes a partir de las precipitaciones locales, y tienen niveles de alcalinidad excepcionalmente bajos y altas concentraciones de ácidos orgánicos, lo cual explica los bajos niveles de pH. Otros lagos andinos presentaron niveles altos de pH similares a las quebradas locales. Estos lagos generalmente se encontraron en lugares de buen drenaje y recibiendo descargas directamente de la escorrentía local. Los niveles de pH excepcionalmente altos en algunos de estos lagos pueden indicar la presencia de afluentes que drenan suelos ricos en carbonato o también pueden reflejar una elevada actividad fotosintética.

La conductividad en los hábitats acuáticos de la cuenca Inambari varió en función de la suma de los principales cationes disueltos (Na, K, Mg, Ca; Figura 11). La conductividad del agua tendió a aumentar con la elevación (Figura 12), lo cual refleja la presencia de suelos más ricos y de menores niveles de escorrentía a mayores elevaciones.

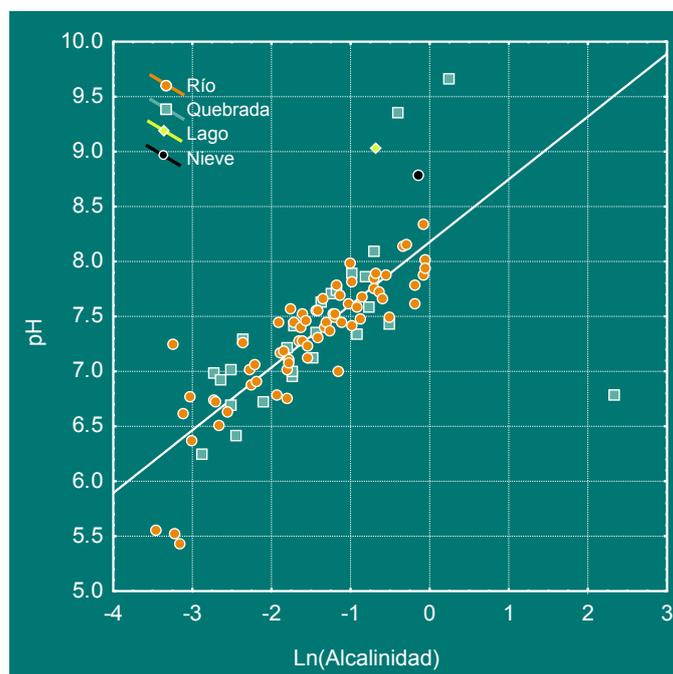


Figura 11. Relación entre la conductividad y la suma de los principales cationes (Na, K, Mg, Ca) en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari.

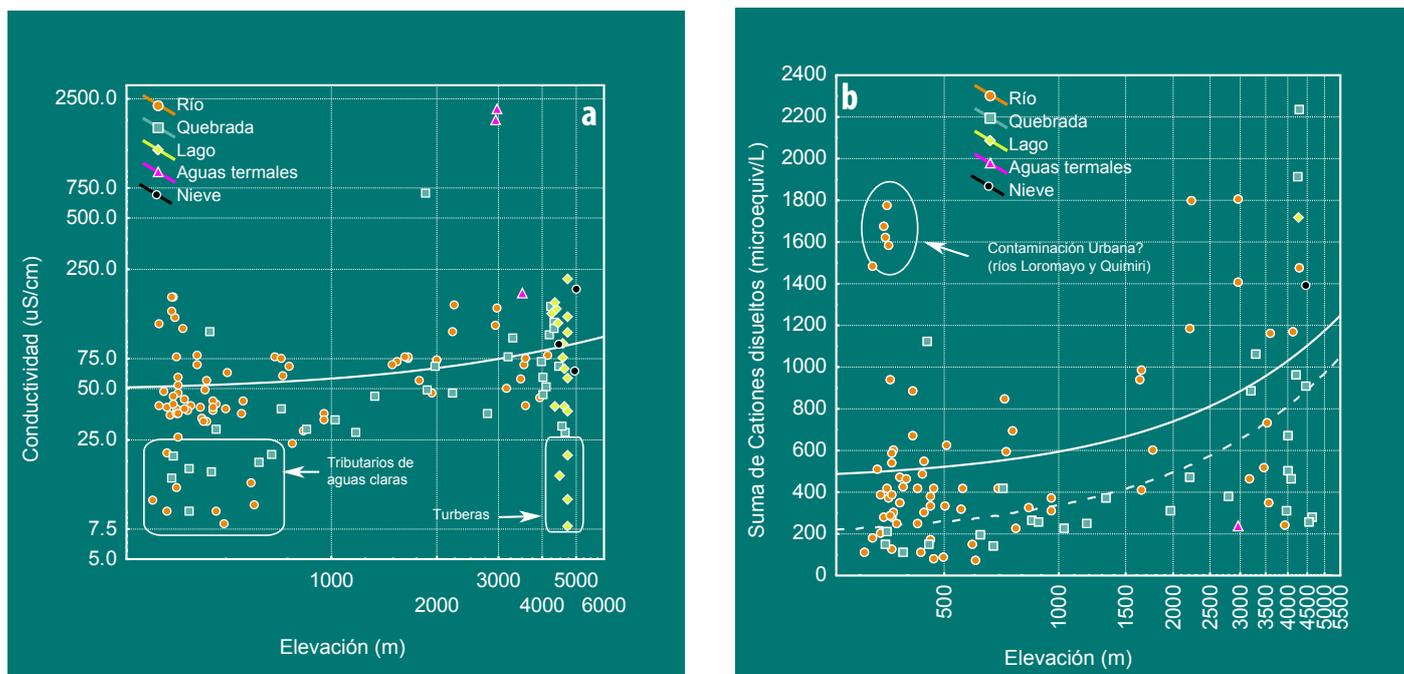


Figura 12. Variación de la a) conductividad, y b) la suma de los principales cationes disueltos (Na, K, Mg, Ca) con respecto a la elevación. Se encontraron valores bastante elevados en varios tributarios de las tierras bajas, principalmente los que estaban asociados a zonas urbanas.

Este patrón fue más evidente en las quebradas más pequeñas cuya área de drenaje representó mejor la variabilidad local de los suelos y la escorrentía. En términos generales la riqueza del suelo refleja la historia de erosión física y química del lugar. Los suelos más ricos tienden a ocurrir en ambientes alto andinos empinados donde la erosión mecánica expone continuamente sustratos ricos en iones, y los suelos menos ricos ocurren en ambientes de baja inclinación donde hay una constante deposición y constante erosión química durante largos períodos. Las tendencias observadas en la conductividad y el contenido de iones en los tributarios de la cuenca Inambari reflejan una disminución gradual de la riqueza del suelo y de la escorrentía, desde ambientes a mayores elevaciones con gran inclinación hasta zonas con menos pendiente y alta deposición de sedimentos a menores elevaciones. Se encontraron valores excepcionalmente altos de conductividad en las fuentes termales y en las pequeñas quebradas que estos afloramientos de agua formaban. También se encontraron niveles excepcionalmente altos de iones disueltos en varios tributarios de las tierras bajas asociados a zonas urbanas, lo cual reflejaría fuentes de contaminación antropogénica. Los niveles más bajos tanto de la conductividad como la suma de cationes fueron encontrados en pequeños tributarios de las tierras bajas y en lagos aislados en las turberas alto andinas.

La composición iónica de los ríos y quebradas de la cuenca Inambari varió como respuesta a las diferencias regionales geológicas de la superficie. Estos efectos pueden evaluarse mediante el análisis de la relación  $Mg/(Mg + Ca)$  con  $K/(Na + K-Cl)$  para los tributarios de río Inambari (Figura 13), ya que ambas relaciones varían sistemáticamente de acuerdo a la fuente de origen de los minerales (Stallard y Edmond 1983). Los números incluidos dentro de la figura 13 indican la composición iónica aproximada de los principales minerales encontrados en la región amazónica, donde 1=escudo promedio, 2=gabro, 3=basalto continental, 4=diorita, 5=andesita, 6=granodiorita, 7=granito sódico. Aparentemente en la cuenca Inambari existe una gama completa de fuente de estos minerales con una variación significativa en la composición entre subcuencas.

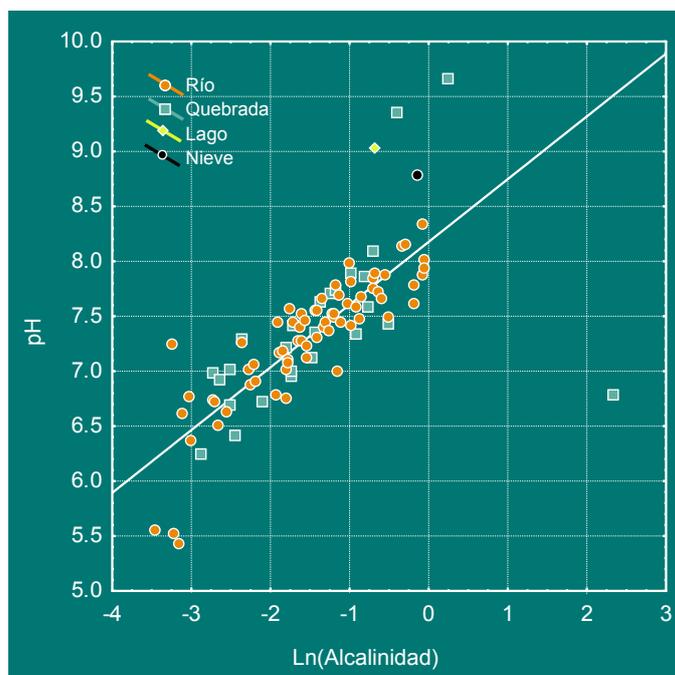


Figura 13. Relación entre  $Mg/(Mg + Ca)$  y  $K/(Na + K-Cl)$  en los tributarios del río Inambari. Los radios indican la fuente litológica de los diferentes iones disueltos. Los números indican proporciones promedio para 1=escudo promedio, 2=gabro, 3=basalto continental, 4=diorita, 5= andesita, 6=granodiorita, 7=granito sódico (Stallard y Edmond 1983).

Las concentraciones de sedimentos totales en suspensión (STS) variaron significativamente entre los tributarios y se observó una tendencia a la disminución de los valores con la elevación, principalmente en los tributarios más grandes (Figura 14a). Parte de este patrón de disminución de los STS podría atribuirse a la reducción de la velocidad con la elevación (Figura 6). En efecto, se encontró una relación positiva y significativa entre STS y la velocidad de los ríos y quebradas de la cuenca Inambari (Figura 14b).

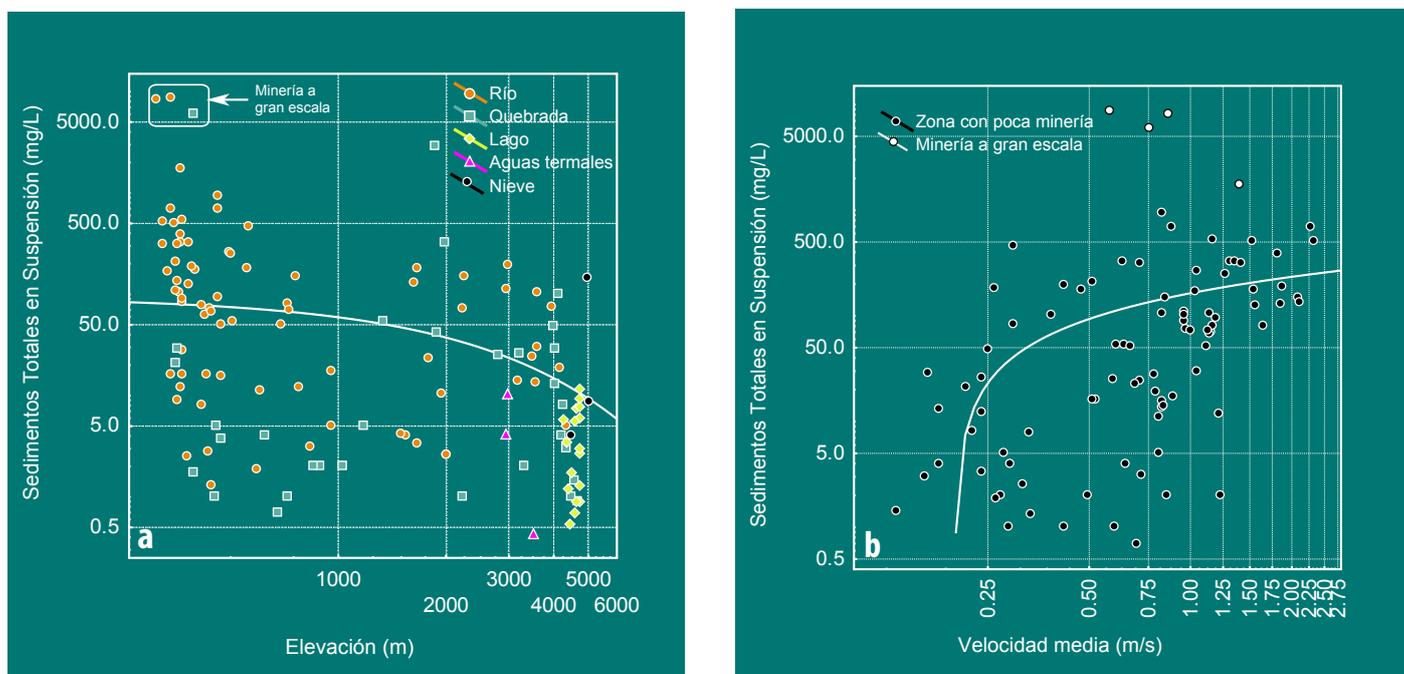


Figura 14. Variación en la concentración de sedimentos totales en suspensión con a) elevación y b) velocidad media en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari.

Sin embargo, también hay que considerar que los niveles elevados de STS encontrados en los tributarios mayores en las tierras bajas, como el río Inambari, se pueden deber a un mayor aporte de sedimentos que ocurre debido a la erosión asociada con la migración lateral del canal. Esta región se ubica aproximadamente entre 300 y 800 msnm y también corresponde a la zona donde se encontraron los niveles más elevados de STS (Figura 26a). Los niveles más bajos de STS se encontraron por lo general en afluentes pequeños de agua clara, los cuales ocurren a lo largo de todo el gradiente altitudinal, así como en lagos alto andinos. Se encontraron niveles de STS excepcionalmente altos en los tributarios donde existía minería a gran escala como en el río Caychihue. La erosión que ocurre en las llanuras de inundación y terrazas adyacentes de estas regiones generan un aporte masivo de sedimentos a los ríos y quebradas. La concentración de sedimentos en estos sistemas se incrementó en relación directa con la proporción de la cuenca que es utilizada para la minería (Figura 18). La intensa actividad minera, incrementada en los últimos años, que ocurre en zonas ubicadas aguas arriba de la propuesta represa Inambari podrían alterar significativamente la dinámica de sedimentos en la represa y deben ser monitoreadas desde el inicio de la construcción.

Las concentraciones totales de fósforo (TP) y nitrógeno (TN) mostraron escasa variación con respecto a la elevación (Figura 15 a y b). Un valor excepcionalmente alto de TN fue encontrado en los afloramientos termales. También se encontraron varias localidades con niveles excepcionalmente altos de TP en los ríos que drenan regiones con intensa actividad minera. Dado que en los sistemas fluviales el fósforo se asocia principalmente con los sedimentos y partículas, la influencia de la minería en la concentración de fosforo fue similar a la encontrada para el caso de STS (Figura 16). Un incremento de las actividades mineras en las partes más altas del propuesto reservorio Inambari podría alterar de manera muy significativa el balance de nutrientes y la dinámica de la productividad del reservorio. Las actividades mineras y la descarga de nutrientes deberían ser monitoreadas para evaluar sus efectos luego del represamiento.

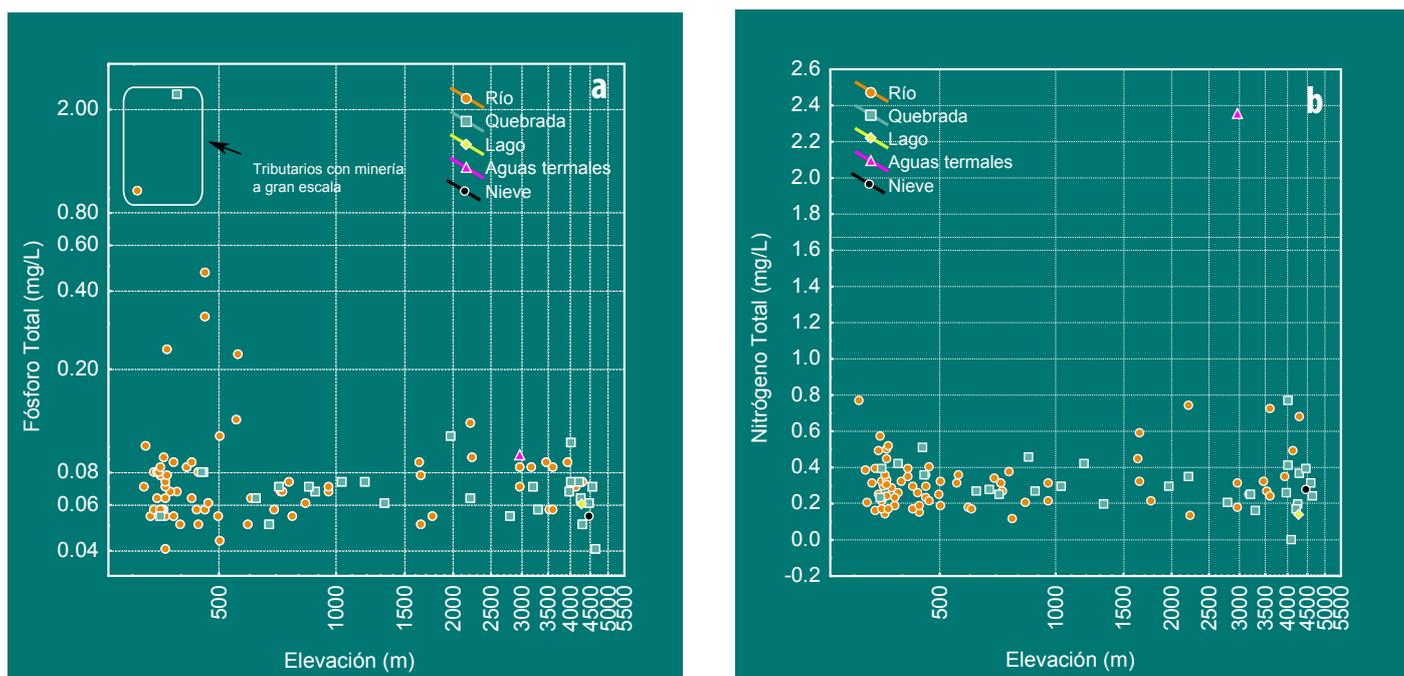


Figura 15. Variación en la concentración total de a) fósforo, y b) nitrógeno con la elevación en los cuerpos de agua de la cuenca Inambari.

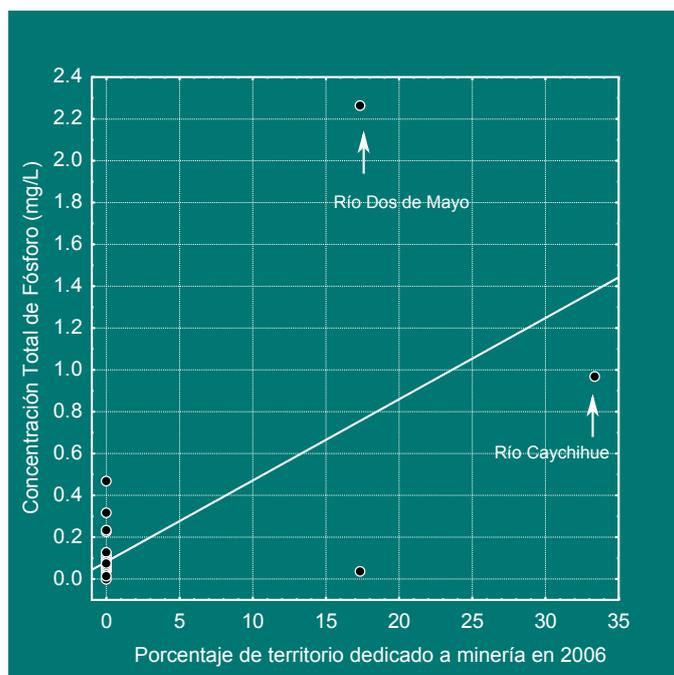


Figura 16. Relación entre el porcentaje del territorio de la cuenca dedicado a minería y la concentración total de fósforo en los tributarios del río Inambari.

Tanto la turbidez como la transparencia con el Disco Secchi (DS) variaron principalmente en función de la concentración de sedimentos (STS) (Figura 17 a y b). La mejor relación con los valores del Disco Secchi se obtuvo utilizando valores 1/DS (Figura 17a), la cual es consistente con las predicciones de la ley de Beer Lambert. Debido a la fuerte influencia positiva de STS tanto en 1/DS y en los valores de turbidez, la variación de estos parámetros con la elevación fue similar a la descrita para STS (Figura 14a), encontrando los valores más bajos de turbidez y los más altos de transparencia (los más bajos de 1/SD) en pequeñas quebradas de las tierras bajas y en los lagos andinos, y los máximos valores de turbidez y los mínimos de transparencias (altos 1/SD) en los grandes ríos. Nuevamente, los valores más altos de turbidez y los más bajos de transparencia fueron encontrados en los tributarios con intensa actividad minera.

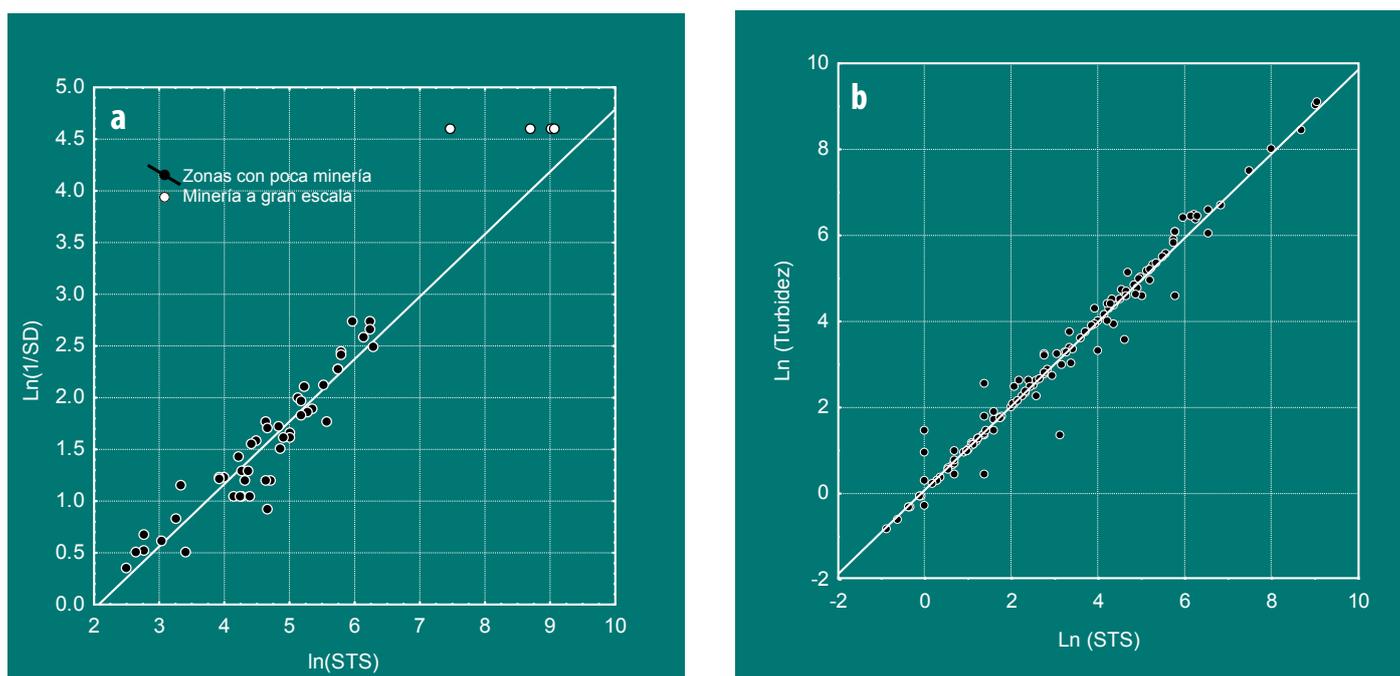


Figura 17. Influencia de la variación de la concentración de sedimentos totales en suspensión (mg/L) en a) valores inversos de transparencia con Disco Secchi, y b) turbidez (ntu).

Considerando la gran variabilidad de las características limnológicas que se encontraron en la cuenca Inambari y la susceptibilidad de muchos de estos parámetros a las actividades humanas, sugerimos que es determinante y de suma importancia que, una vez creado el reservorio, debe iniciarse un programa de monitoreo dirigido a registrar la calidad de agua de los principales tributarios que van a descargar directamente en este nuevo ambiente acuático. Estos datos serán necesarios para evaluar los impactos del reservorio en los sistemas fluviales aguas abajo de la represa, así como los impactos de los cambios de uso de tierra que ocurran aguas arriba de la represa.

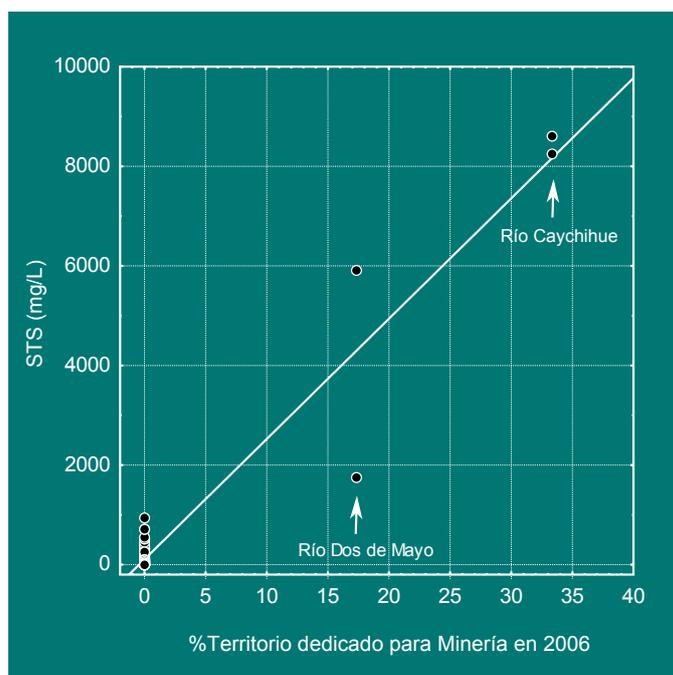


Figura 18. Influencia de las actividades mineras (% territorio dedicado a la minería en 2006) en las concentraciones totales de sedimentos en suspensión (STS) en los tributarios de la cuenca Inambari.

## LITERATURA CITADA

Leopold, L.B. and Maddock Jr, T. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. U.S.G.S. Professional Paper 252, 56p.

Stallard, R. E. and Edmond, J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon. 2. The influence of geology and weathering on the dissolved load. J. Geophys. Res. 88: 9671-9688.

Se sugiere citar:

Forsberg, B. 2013. "Procedimiento para la obtención del índice NCG (Nivel de Complejidad de Gestión) para la Cuenca Inambari" Documento de Trabajo # 18. Wildlife Conservation Society, Lima. Perú.