



Tasas de erosión y dinámica de los flujos de sedimentos en la cuenca del río Santa, Perú

Erosion rates and dynamics flow of sediments over the Santa River Basin in Peru

SERGIO MORERA^{1,*}, THOMAS CONDOM², ALAIN CRAVE³, PHILLIPE VOUCHEL⁴ & CARLOS GALVEZ⁵

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina

² IRD-LTHE-UMR 5564, Grenoble, Francia

³ Géosciences Rennes, Centre National de Recherche Scientifique, Francia

⁴ IRD-LMTG, Casilla 181209, Lima 18, Perú

⁵ Proyecto Especial Chavimochic

* sergiobaymorera@gmail.com

RESUMEN

Las tasas de erosión y la dinámica de los flujos sedimentarios en los Andes occidentales peruanos son aún desconocidas. El presente estudio se desarrolló dentro del marco del proyecto HIBAM en convenio con la Universidad Nacional Agraria La Molina y el proyecto especial Chavimochic, que monitorea la cuenca media y alta del río Santa (~10000 km²) y posee una base de datos hidrosedimentológica confiable (1999-2009). El área de estudio tiene una elevada concentración de Material en Suspensión (MES). Entender la dinámica de la producción de sedimentos conllevó un análisis de la variabilidad espacio-temporal (que es compleja debido al uso del agua: poblacional, hidroeléctrico, minas y agricultura) a lo largo del río Santa. Después de una exploración detallada de la base de datos que incluyó cuatro metodologías de completación de datos faltantes se obtuvo la disponibilidad de una base de datos consistenciada. Para la estación Condorcerro (479 msnm) se obtuvo una media anual de 15,1x10⁶ t de sedimentos (SY) y 4,16 km³ de caudal líquido (1978-2009) con ~85% del SY descargado en época de lluvias, ~13% durante la estación de transición y solo ~2% durante el estiaje. Estos valores cambian para los caudales líquidos en 60,3%, 26,2% y 13,5% respectivamente. La presencia de eventos ENOS no generan patrones característicos pero se resalta la alta variabilidad anual en la producción de sedimentos. El principal aportante de sedimentos es el río Tablachaca (~3130 km²) que aporta 58% SY y solo 20,6% del caudal líquido, mientras que la cuenca media y alta del cauce principal del río Santa aporta el resto de ambas cantidades. Se observa tasas altas de erosión en la cuenca del río Tablachaca expresadas en caudal sólido específico (SSY) con 2205 t.año⁻¹.km⁻² y para la cuenca media y alta del cauce principal de río Santa de 779 t.año⁻¹.km⁻². Finalmente la variabilidad espacial muestra un elevado contraste de erosión, influenciada por la litología (estrechamente relacionada con la actividad minera), altas pendientes y la cobertura vegetal escasa y estacional, además de la variabilidad de las precipitaciones.

Palabras claves: Tasas de erosión, flujos sedimentarios, caudal sólido específico, MES, Andes, río Santa, ENOS, descarga.

ABSTRACT

Erosion rates and sediment flux dynamics in rivers of the central western part of the Andean range are still unknown (Peru). The present study was developed within the framework of the HYBAM project in partnership with UNALM and the exceptional Chavimochic project, that monitor the middle and upper Santa river basin (~10000 km²) with a reliable hydro-sedimentology database (1999-2009). The surveyed area presents a high concentration of suspended sediments. Understanding the dynamics of sediment production includes an analysis of space-time variability which is complex due to a mountain landscape, climate and different use of water (drinking water supply, hydroelectricity, mining and agriculture) along the Santa River. With four different methods, we complete the missing data. Condorcerro station (479 masl) produced an average of 15.1x10⁶ t of sediment yield (SY) and 4.16 km³ of liquid flow (1978-2009), from the total SY, ~85% is discharged during the rainy season, ~13% during the transition season and only ~2% during the dry season. Concerning the liquid flow we found respectively 60.3%, 26.2% and 13.5%. The occurrence of ENSO events do not show characteristic patterns, but it is worth to highlight the high and complex annual variability in sediment production. The main river that contributes is the Tablachaca River (~3130 km²) with 58% of the SY and 20.6% of the liquid flow, while the middle and upper basin of the main channel of the Santa brings the remaining of both amounts. Specific suspended sediment yield (SSY) in Tablachaca Basin is 2205 t.year⁻¹.km⁻²; which is one of the highest rates of erosion in South America and the middle and upper Santa basin carries 779 t.year⁻¹.km⁻². Finally, the spatial variability shows a high contrast of erosion influenced by the lithology (which is closely related to mining activity), high slopes, low and seasonal vegetation coverage as well as rainfall variability.

Keywords: Erosion rate, sediment flux, specific suspended sediment yield, Andes, Santa River, ENSO, discharge.

INTRODUCCIÓN

El estudio de la producción de Materiales en suspensión (MES) en América del Sur (océano Pacífico) es poco desarrollado. El proyecto HYBAM (proyecto científico internacional que estudia la geodinámica, hidrología, biogeoquímica de la erosión/alteración de las transferencias de materiales en la cuenca amazónica y de la costa pacífica) viene haciendo denodados esfuerzos para ampliar el conocimiento de los eventos que ocurren en los Andes. Guyot et al. (2011) cuantificaron la producción de sedimentos en los Andes orientales de Bolivia con un promedio de 2581 t.km⁻².año⁻¹. El río andino de Carare, en Colombia, 2200 t.km⁻².año⁻¹ (Restrepo et al. 2006). Pepin et al. (2010) en los Andes chilenos en el río Maipo un máximo de 1780 t.km⁻².año⁻¹ y Laraque et al. (2004) para el río Napo, en los Andes de Ecuador, 900 t.km⁻².año⁻¹. Las altas tasas de erosión en los Andes bolivianos pueden ser comparadas con las del sureste de Asia (Degens et al. 1991); para el caso peruano cuyas cuencas involucran parte occidental de la Cordillera de los Andes no existen reportes.

El presente estudio de investigación se desarrolló dentro del marco del proyecto HYBAM, mediante un convenio múltiple entre la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el proyecto especial Chavimochic que monitorea las aguas del río Santa en las estaciones hidrosedimentológicas de Condorcerro, Tablachaca y Santa (Figura 1b); además posee una base de datos privilegiada con dos muestras por día (1999-2009). La cuenca del río Santa, ubicada al noroeste del Perú, se extiende altitudinalmente desde el nivel del mar hasta la línea de cumbres de la Cordillera Negra y Cordillera Blanca (Figura 1a), esta última es la más extensa cadena montañosa tropical con una extensión glaciaria de ~ 600 km², cuyo punto más alto corresponde al nevado Huascarán a 6768 msnm (Georges 2004). Johnson et al. (1998) agregan que las aguas del río Santa son vitales para la población de las montañas y tierras costeras, abasteciendo para el uso doméstico, campos agrícolas, minero, industrial y generación hidroeléctrica. También provee agua a los proyectos de usos múltiples como son Chavimochic y Chincas con un punto de captación a 420 y 210 msnm en el cauce del río, respectivamente, proyectos que en su recorrido abastecen a centrales hidroeléctricas y a cientos de hectáreas agrícolas cuya principal actividad es la agroexportación, además ésta es la fuente principal de agua potable para la ciudad de Trujillo, Chimbote, entre otras.

Dai et al. (2009) afirman que la actividad humana se ha convertido en un factor determinante en la producción de sedimentos fluviales. Según MINEM (1998) la cuenca del río Santa muestra evidencias de contaminación de sus aguas, producto de actividades industriales, desechos de residuos sólidos, malas prácticas agrícolas; la intensa actividad minera desarrollada con polimetálicos y algunos no metálicos dejan un pasivo ambiental muy disperso, éste varía con la actividad minera a micro y gran escala (Figura 2b). Dicha cuenca se caracteriza por su topografía agreste en la cuenca media y alta, pendientes que sobrepasan el 100%, cobertura vegetal estacional y escasa, con una litología (Figura 2c) que presenta suelos poco estables, ello sumado a las elevadas precipitaciones desde 100 a 1150 mm anuales para la zona de estudio (1998-2009) (Morera et al. 2010).

Rocha (1999) para el periodo de 1978-1986 en Condorcerro obtuvo una masa media de 21,7 millones de t.año⁻¹ y en años extraordinarios como los que corresponden al evento El Niño el caudal sólido fue de 61,7 millones de t.año⁻¹, es decir una erosión específica de 5713 t.km⁻².año⁻¹. Estas cargas altas de sedimentos resulta un problema mayor para el desarrollo de los recursos hídricos a través de la sedimentación de embalses, captación de agua, sistemas de riego, daños a las turbinas, así como aumenta el costo del tratamiento de agua extraída del río Santa (Walling 2009, Johnson et al. 1998). Tal problema genera la necesidad de predecir qué sucederá en este tipo de sistemas en el futuro (Condom et al. 2011); esto se traduce en el cálculo de los flujos de agua y producción de sedimentos, además de la vital importancia de conocer la dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa.

El presente artículo tiene como objetivo establecer la dinámica de la transferencia de material en suspensión desde los Andes centrales occidentales al océano Pacífico en la cuenca del río Santa. Mediante la evaluación de las condiciones físico-naturales del ámbito, con una recopilación y análisis de la calidad de los datos de caudal líquido y MES, luego completar y extender los datos hidrosedimentológicos en la cuenca del río Santa. Así podremos establecer las relaciones existentes

entre la cuenca y la producción de MES, finalmente estudiar el efecto de eventos ENOS sobre escurrimientos y la dinámica de la producción de sedimentos para dicha cuenca.

DATOS Y MÉTODOS

Descripción

La caracterización de la geomorfología, geomorfometría e hidrología está fuertemente relacionada al modelo digital de terreno (DEM), que se generó a partir de datos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission); el Modelo de Elevación Digital (DEM en inglés) tiene una resolución máxima, libremente disponible, 3 arcsec (~90x90m) (Figuras 1a y 1b).

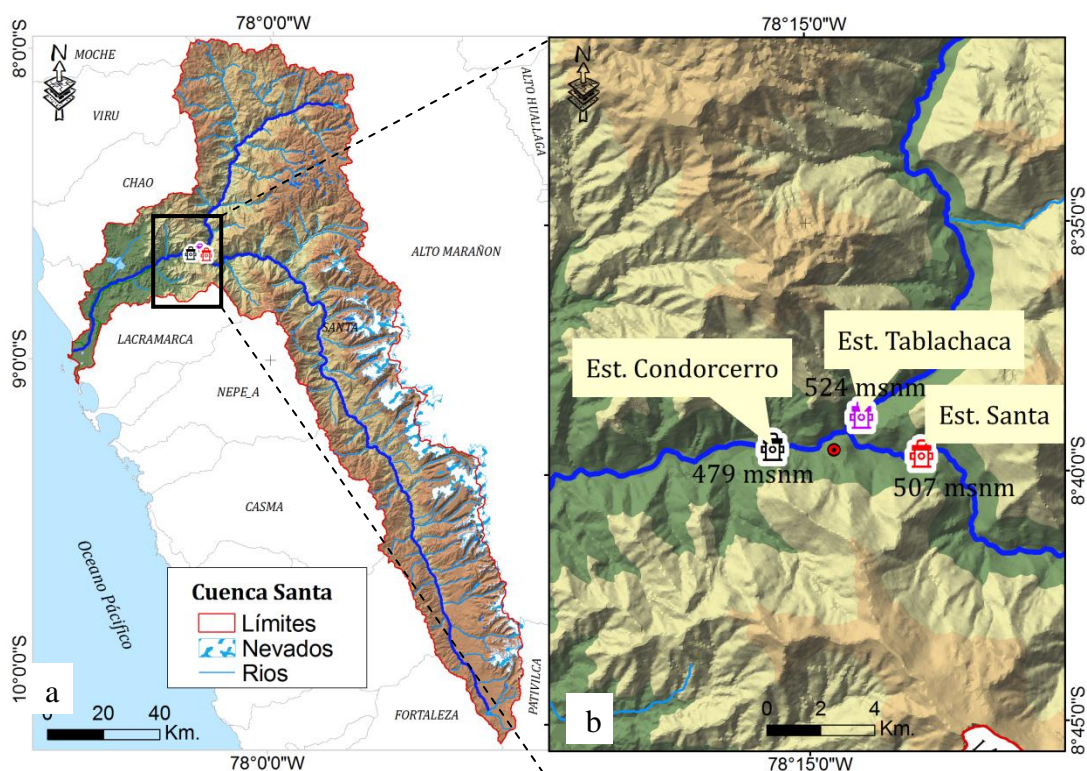


Fig. 1. a) Topografía (SRTM, 2010) de la zona de estudio en la cuenca del río Santa; b) Ubicación de las estaciones de monitoreo.

Datos climatológicos

El análisis temporal y espacial de las precipitaciones se hizo con la ayuda de sensores remotos, con datos especializados del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission 3B42 V6), con información mensual de lluvia de cada 3 horas 3B43 (1998-2009), con resolución espacial de 0,25 x 0,25 grados (~28 km). No se tuvo acceso a la información de estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca (Figura 2a).

Datos hidrológicos

El mayor obstáculo para hacer hidrología es la limitada información, además es necesario que ésta sea de calidad, entonces la crítica de los datos fue indispensable para tener una idea de la disponibilidad de éstos (Tabla 2).

Tratamiento de datos hidrológicos

Mediante este procedimiento se optimizó la información temporal y calidad de los datos disponibles.

- Resolución temporal de los datos

Para evaluar al detalle el número de concentraciones y caudales disponibles en las estaciones de monitoreo, se consideró como promedio una resolución temporal de dos muestras diarias por estación, después se calculó el porcentaje mensual de datos disponibles por estación, es decir para

el mes de enero (31 días) debe de existir 62 datos, lo que se consideró como un mes con el 100% de datos completos.

- Calidad de los datos

En un primer paso se ubicó y eliminó todas las lecturas repetidas consecutivas por más de dos días en la serie de caudales para el periodo de lluvias; ya que este acontecimiento solo podría ocurrir en estiaje. Para fines de cálculo se consideró que un caudal repetido es igual a un caudal vacío, bajo las condiciones antes mencionadas.

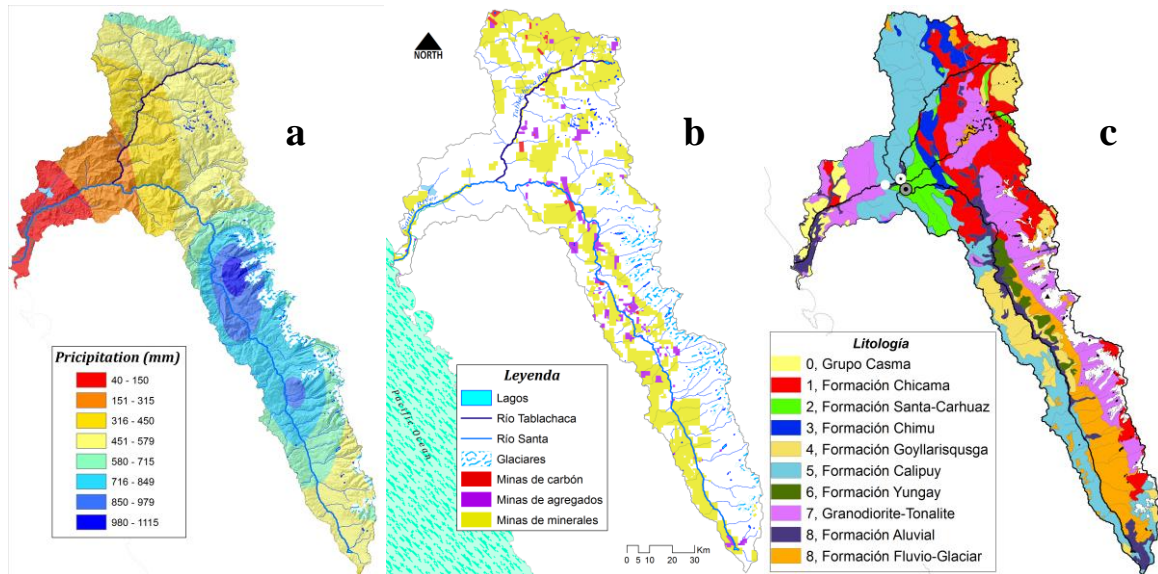


Fig. 2. a) Precipitación promedio anual 1998-2009 en la cuenca del río Santa (TRMM, 2010); b) Distribución de la actividad minera en la cuenca del Santa; c) Formaciones litológicas en la cuenca del río Santa. Precipitación promedio anual 1998-2009 en la cuenca del río Santa (TRMM, 2010).

a. Completación de datos mediante la suma y diferencia entre estaciones

Debido a la ubicación de las estaciones (Figura 1b) se puede realizar la suma o resta de dos estaciones para obtener la tercera, siempre y cuando dos de ellas tengan lecturas de caudales (Ecuación 1).

$$Q_{Est. Santa} = Q_{Est. Condorcero} - Q_{Est. Tablachaca} \quad (1)$$

donde: Q es el caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$) para cada estación. Esta ecuación la consideramos válida para caudales promedios diarios, debido a la variabilidad de caudales que presenta el río Santa, deducidos de la información obtenida de los limnógrafos instalados para los últimos años en la estación Condorcero y Tablachaca.

b. Completación de datos mediante interpolación de datos

Aplicado solo en el caso que el vacío de información se encuentre entre 0 a 48 horas como máximo.

c. Llenado mediante correlación lineal simple con la aplicación "Cormul" de Hydraccess (Vauchel 2009). Se emplearon datos de caudales diarios de la estación La Balsa ubicada en el Cañón del Pato, aguas arriba de la estación Santa. De esta primera correlación se observaron algunos puntos muy alejados de la línea de tendencia, para un mejor cálculo se eliminaron dichos puntos, así se obtuvo una correlación lineal con mayor ajuste (Matalas et al. 1967).

Datos de caudales sólidos en suspensión disponibles de Chavimochic

Se realizó un análisis de los datos similar al de los caudales líquidos descritos en la sección anterior. Parte de la cuantificación del material sólido en suspensión a partir de la multiplicación entre el caudal líquido y las concentraciones (Ecuación 2).

$$Q_s = \frac{Q * MES}{1000} \quad (2)$$

donde: Q_s es el caudal sólido ($t.s^{-1}$); Q caudal líquido ($m^3.s^{-1}$) y MES es el material en suspensión ($g.l^{-1}$).

Completación de los caudales sólidos (Q_s)

Debido a los vacíos en la base de datos fue necesario llenar éstos mediante otros métodos.

- Metodología 1 (Cálculo directo)

Se completaron los datos mediante suma y resta de caudales sólidos en suspensión en las estaciones Santa, Tablachaca y Condorcero (Ecuación 3).

$$Q_{s\ Est. Santa} = Q_{s\ Est. Condorcero} - Q_{s\ Est. Tablachaca} \quad (3)$$

donde: Q_s es el caudal sólido en suspensión ($t.s^{-1}$).

Luego se llenó los vacíos del caudal sólido a partir de los caudales líquidos aplicando modelos anuales (Ecuación 4) generados de la relación entre el caudal sólido y el caudal líquido instantáneos para cada año hidrológico y para cada estación; este procedimiento corresponde al método utilizado en otros estudios (Rubey 1933, Ferguson 1986).

$$Q_s = a \times Q^b \quad (4)$$

donde: Q_s es el caudal sólido en suspensión ($t.s^{-1}$), a y b los coeficientes y Q el caudal líquido ($m^3.s^{-1}$).

- Metodología 2 (Modelo anual)

Se aplicó el método 1(b), la diferencia con el método anterior, es que todos los vacíos fueron llenados a partir de la ecuación 4.

- Metodología 3 (Modelo Global)

Se generó un modelo a partir de una correlación potencial (Ecuación 4) pero a diferencia de la metodología 1 y 2 éste emplea toda la data histórica para cada estación en estudio, calculado a partir de caudales líquidos diarios, caudales sólidos en suspensión diarios.

- Metodología 4 (Cálculo directo e interpolando datos faltantes)

Se realizó con ayuda del programa Hydraccess (Vauchel 2009), el cual en el área de calidad hidrológica permite realizar una interpolación de los datos al paso horario y diario, es así que a partir de la base de datos analizada la base de datos fue purgada de los datos de mala calidad, luego se interpoló a paso de tiempo fijo o cada vez que faltaban datos.

RESULTADOS

Disponibilidad de los caudales líquidos y sólidos en la base de datos

Del análisis de la distribución temporal y calidad de los datos de caudales líquidos y concentraciones se logró una estimación general de la disponibilidad de datos confiables. En la Tabla 1 se resalta que no tenemos problemas en la serie histórica de los caudales líquidos diarios para la estación de Condorcero, además de más lecturas de caudal y de buena calidad en las lecturas de las concentraciones. La estación Tablachaca presentó algunos problemas en la calidad de los datos para los caudales líquidos, con 18% de datos repetidos, estos valores son aún más frecuentes en época de estiaje. La estación Santa presentó mayores problemas que las dos anteriores, debido a la falta de un limnígrafo y a la baja frecuencia para la toma de muestras, entonces se realizó una correlación entre las tres estaciones de estudio y la estación La Balsa (1954-2009) para llenar los vacíos de caudales en las estaciones de estudio; finalmente se pudo llenar los vacíos.

Estimación de caudales líquidos

Los vacíos en los periodos de datos de caudales líquidos fueron completados utilizando la aplicación Cormul, cuyas estadísticas para la estación Condorcero y La Balsa estimaron un $R^2 = 0,91$, D.E. residuos = $30,5 m^3.s^{-1}$ y Desvío Medio = $18,6 m^3.s^{-1}$; en cuanto a la calidad de los datos de concentración no se presentaron inconvenientes, el principal problema fue el porcentaje de espacios vacíos que fueron cuantificados por mes (Tabla 1).

Después del cálculo del caudal líquido mediante la aplicación de una metodología en las tres estaciones de estudio se obtuvo la Tabla 2.

Para tener un panorama mucho más claro del régimen del río Santa a la altura de la estación Condorcero se calculó la producción del caudal líquido en periodos de estiaje (julio-octubre),

transición (mayo-junio, noviembre-diciembre) y lluvias (enero-abril) (Figura 3), aplicadas por Wai et al. (1997) y Li et al. (2004).

Tabla 1. Disponibilidad de los caudales líquidos y sólidos en la base de datos Chavimochic.

Estación	Caudal Líquido	Frecuencia por día (%)	Caudal sólido	Frecuencia por día (%)	
Condorcerro	1977-2009	2	18,37	2	15,89
		1	61,95	1	82,99
		Repetidos	17,26	Repetidos	0,02
		Vacíos	2,42	Vacíos	1,01
Tablachaca	2002-2009	2	28,13	2	27,82
		1	42,72	1	58,02
		Repetidos	18,07	Repetidos	0,04
		Vacíos	11,08	Vacíos	14,2
Santa	2002-2009	2	7,00	2	5,69
		1	46,50	1	49,86
		Repetidos	30,20	Repetidos	0,05
		Vacíos	16,30	Vacíos	44,40

Tabla 2. Volumen en porcentaje de aporte de la cuenca del Tablachaca y cuenca media y alta del río Santa para el periodo de estudio.

Periodo	Santa %	Tablachaca %
2002-2003	78,7	21,2
2003-2004	83,4	17,1
2004-2005	79,1	20,5
2005-2006	77,2	22,5
2006-2007	78,8	20,9
2007-2008	79,5	19,8
2008-2009	77,6	22,4
Promedio	79,2	20,6

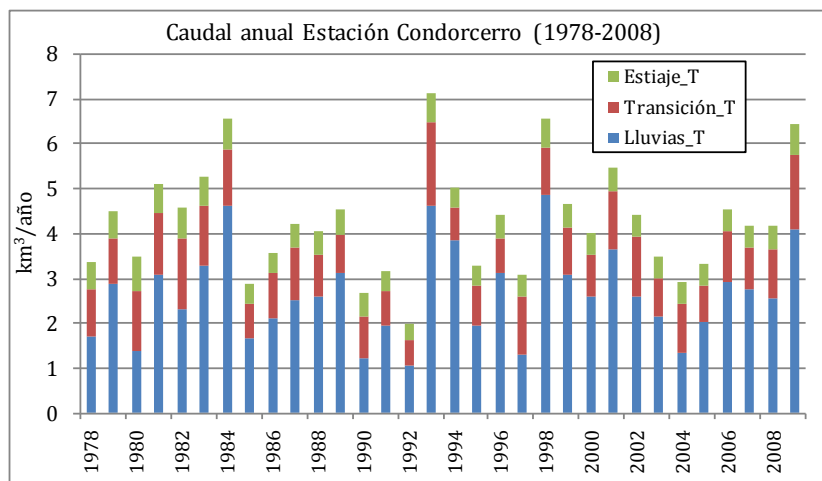


Fig. 3. Caracterización de flujos líquidos para la época de lluvia (enero-abril), transición (mayo-junio, noviembre-diciembre) y estiaje (julio-octubre).

Entonces se concluye que la dispersión de puntos que se observa en las figuras se debe al método de medición de sedimentos en el primer año de medición (2000) para los caudales altos. Sin los puntos de la época de lluvia del año 2000 mostró una mejor concordancia entre los caudales

sólidos y líquidos con buenos coeficientes de determinación (r^2) y dos tendencias por los caudales (menores a $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y mayores a $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Figuras 4 y 5).

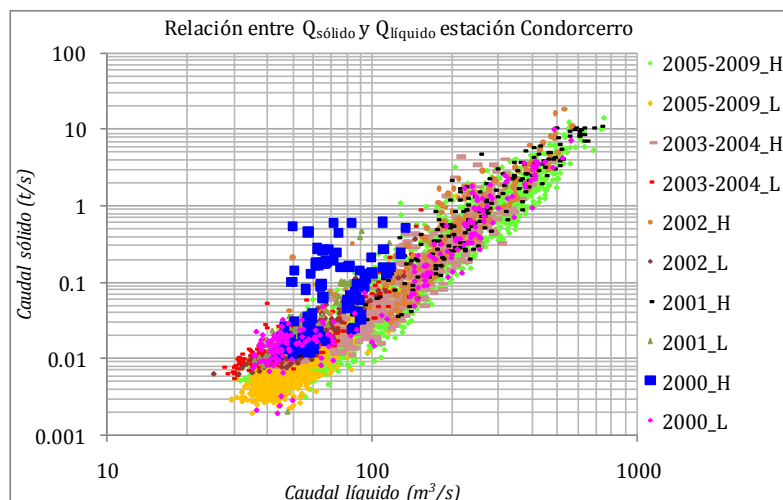


Fig. 4. Caudales sólidos clasificados por época de lluvias y estiaje.

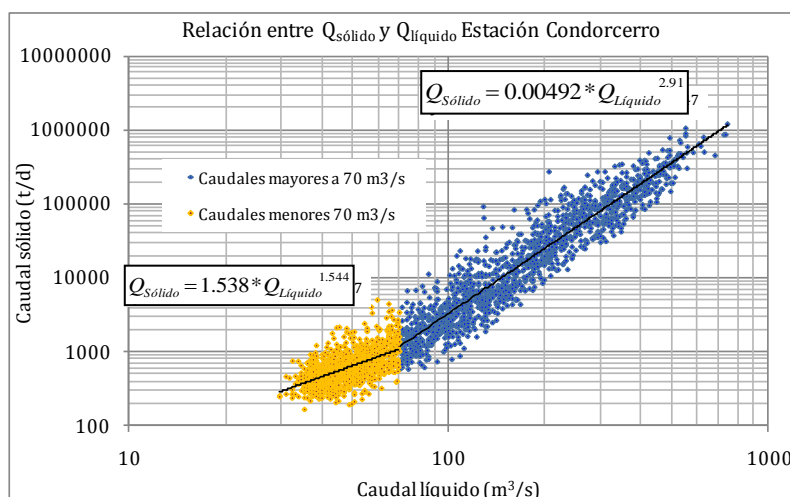


Fig. 5. Modelo hidrosedimentológico interanual para la estación de Condorcerro.

Estimación de la carga en suspensión instantánea y anual

Cálculo de los caudales sólidos anuales

De las metodologías planteadas para el cálculo del caudal sólido en suspensión, la 1 y 4 se aproximaron a los datos observados, ésta última estimó cifras con ceñido margen de error cuando existen pocos vacíos; la metodología 2 y 3 generaron caudales a partir de información disponible, la metodología 3 ayudó a completar pero subestimó o sobreestimó los caudales sólidos en suspensión para años extremos. La metodología 2 mostró una subestimación de 64% para el año 2001/2002, pero en este mismo periodo la metodología 3 subestimó en un 85%, un factor a considerar es que la información de los primeros años no es muy confiable; ésta metodología en el año 2008/2009 con alta frecuencia de caudales mayores a $70 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sobreestimó en un 38% (Figura 6).

Para el balance anual de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa se empleó el cálculo directo con llenado de datos faltantes (metodología 1) por ser la estimación que se aproxima más a la realidad. Se puede observar la alta variabilidad anual en la producción de sedimentos (Tabla 3).

La estación Tablachaca tuvo influencia de primer orden $\sim 57\%$ en la producción de MES global en la cuenca del río Santa (estación Condorcerro) a pesar que solo aporta un $\sim 20\%$ del volumen anual de agua. Por otro lado, la cuenca alta y media del río Santa aporta un 43% de SY

pero tiene un aporte significativo del ~79% del caudal líquido anual de agua para la estación de Condorcerro (Tablas 3 y 4).

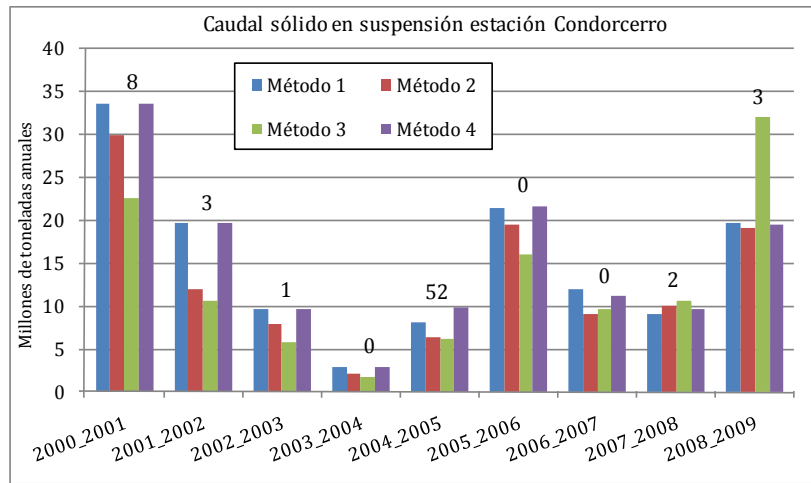


Fig. 6. Cálculo de caudales sólidos anuales con las cuatro metodologías planteadas; arriba de las barras número de caudales diarios sólidos vacíos por cada año hidrológico.

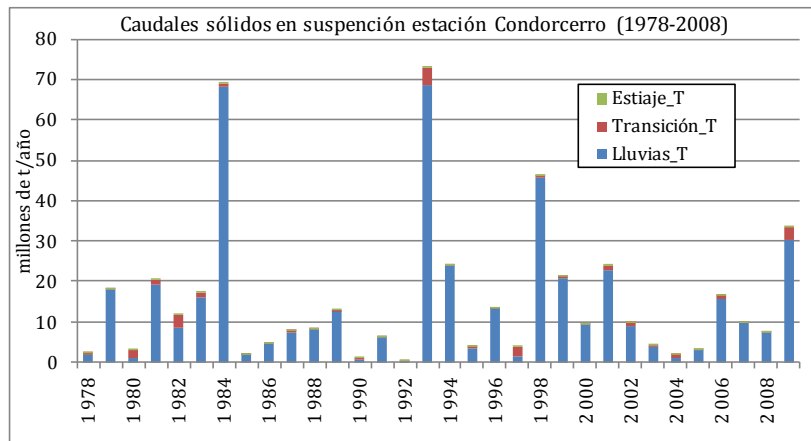


Fig. 7. Cálculo de la producción de flujos sedimentarios a partir de caudales líquidos diarios en la estación de Condorcerro.

Tabla 3. Cálculo de caudales sólidos en suspensión para las estaciones de Santa, Tablachaca y Condorcerro 2002-2009.

Periodo	Santa (%)	Tablachaca (%)
2002-2003	36,6%	63,3%
2003-2004	46,2%	53,7%
2004-2005	33,3%	66,6%
2005-2006	50,8%	49,2%
2006-2007	48,8%	51,1%
2007-2008	35,4%	64,5%
2008-2009	44,5%	55,4%
Promedio	42,3%	57,7%

Resultados de la SY para las estaciones de Condorcerro, Santa y Tablachaca (1978-2009)

A pesar de las subestimaciones encontradas por la prueba estadística de BIAS y los buenos valores de Nash-Sutcliffe generados en el proceso de calibración, la carga de sedimentos fue pronosticado a escala de tiempo diario; según la hidrología con una época de lluvias (enero-abril), dos de transición (mayo-junio, noviembre-diciembre) y una de estiaje (julio-octubre) (Figura 7). Entonces podemos decir que para la estación de Condorcerro en época de lluvias se produce ~85% del volumen anual de caudal sólido, ~13% en época de transición y ~2% en época de estiaje.

Después de la proyección de la SY se procedió a calcular la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa a nivel de las estaciones en estudio (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de la dinámica de la producción de sedimentos en suspensión para las estaciones en estudio periodo 2000-2009.

Cuenca	Estación	Monitoreo	Área (km ²)	Rango de elevación (m)	Q (km ³ .año ⁻¹)	Concentración (mg.l ⁻¹)	Sedimentos (t.año ⁻¹)	Qs (t.km ⁻² .año ⁻¹)
Santa	Condorcerro	2000-2009	9969	479-6867	4,21	1469	11 852	1188
Santa	Santa	2002-2009	6815	507-6867	3,32	557	5306	778
Tablachaca	Tablachaca	2002-2009	3132	524-4950	0,88	3182	6902	2204

DISCUSIÓN

Es necesario conocer si la serie de datos mejor conformada compromete caudales en tiempo de estiaje y de lluvias. Debido al importante impacto en la concentración de sedimentos que genera la presencia de la hidroeléctrica del Cañón del Pato, la cual regula y decanta un caudal de $\sim 76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para las horas de mayor demanda de energía, mayormente en la noche, y sabiendo que el caudal promedio en tiempo de estiaje para ese punto es de $25,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; entonces ésta es otra fuente de la dispersión en la curva de descarga para caudales menores a $76 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Por otra parte, en la serie de datos de los caudales y concentraciones se observa en muchos casos más de tres datos consecutivos iguales; la probabilidad de encontrar algo parecido para las tres estaciones de aforo es pequeña para ser realista, especialmente durante el periodo de crecida. Entonces el fundamento es que un caudal en el río Santa después de 12 horas no será el mismo debido a la variabilidad que presenta éste, siendo mayor la variabilidad en caudales de avenidas; ello se comprobó con las lecturas del limnógrafo desde el año 2002 hasta el 2009.

Estimación de caudales líquidos

Las tres estaciones hidrosedimentológicas de monitoreo estratégicamente ubicadas (Figura 1a), además de contar con muestreos simultáneos hicieron posible la aplicación de la ecuación 1 que está basada en la adición de estaciones. Por otra parte se facilita la interpolación de los caudales para periodos menores a 48 horas, pero para periodos mayores a éste se utilizó la extensión Cormul que facilita una correlación lineal simple entre la información instantánea de las estaciones de monitoreo, pero considerando el tiempo de desfase de las lecturas entre las estaciones; a través de este último paso se completó todos los vacíos de datos existentes en nuestra base de datos de caudales.

De la Tabla 2 se puede resaltar que no existe una alta variabilidad de caudales líquidos anuales entre la estación Santa y Tablachaca. Se recalca que el aporte de caudal líquido anual del río Tablachaca hacia el río Santa es de $\sim 20\%$ y cuya área es de 3131 km^2 . Para la estación de Condorcerro en época de lluvias se produce $\sim 60\%$ del volumen anual, $\sim 26\%$ en época de transición y $\sim 13\%$ en época de estiaje, estos últimos provenientes de los glaciares y aguas subterráneas de la cuenca media y alta del río Santa.

Sensibilidad de los caudales líquidos en eventos ENOS

Podemos hacer un pequeño análisis en cuanto a los eventos extremos de descarga (picos diarios de caudales) y en un volumen anual en relación a eventos El Niño, La Niña y años sin estos eventos. En la Figura 8 las elipses rojas muestran los caudales anuales para los periodos 1983/1984 (año normal) y 1997/1998 (evento fuerte de El Niño); asimismo, en ambos años se presentan eventos picos de descarga y producen casi el mismo volumen; así, seguimos comparando las elipses del mismo color donde apreciamos que una Niña de intensidad débil (1984/1985) produce el mismo volumen que en un Niño fuerte (1994/1995), luego en un evento Niña fuerte (1988/1989) se produce el doble de caudal que en un Niño fuerte (1991/1992), otra peculiaridad es que durante un evento Niña débil (1995/1996) se produce el doble de volumen que en un Niño de intensidad débil (2004/2005).

Entonces se observa que no hay un patrón característico de los caudales en un evento ENOS ya sea en caudales diarios o el volumen total anual para la cuenca del río Santa; similares

resultados fueron encontrados por Henderson et al. (1999) y Georges (2009) a la altura del nevado el Huascarán.

Metodologías para el llenado de los caudales sólidos

La dispersión muestra la alta variabilidad interanual para el periodo 2000-2009 (Figura 4) pero los tres primeros años se presenta una mayor dispersión de puntos debido al método de toma y extracción del MES en el laboratorio (Bagnold 1966). Dicho método consiste en la extracción del MES mediante el uso de la cápsula de porcelana, empleando muestras de 100 ml cuyos resultados se obtienen en g.l⁻¹; a ello se le suma un error técnico en la recolección de las muestras debido a la falta de capacitación del personal. A partir de mayo del 2005 hasta la actualidad se adoptó un protocolo de medición basado en normas internacionales (ASTM D3977-97, 2002) que emplea el método del vacío con el uso de bombas de succión o a gravedad utilizando muestras con MES de 1000 ml. Para los siguientes años se observa las tendencias con mayor claridad, con algunas dispersiones pero ésta debido a la dinámica que origina el afluente Tablachaca por las importantes aportaciones del MES a nivel de la estación Condorcerro (Tabla 3).

Finalmente podemos sintetizar las cuatro metodologías para la estimación de los caudales sólidos en suspensión en la Tabla 5.

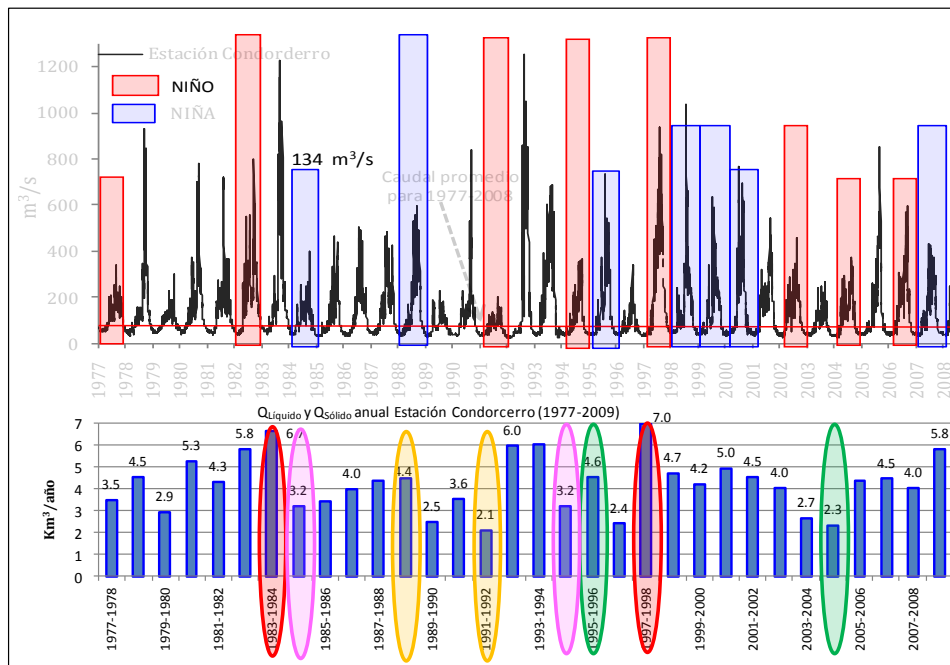


Fig. 8. Caudales diarios (m³.s⁻¹) en la estación Condorcerro y años en los que ocurrieron eventos El Niño y La Niña. La altitud de las barras (Niño y Niña) indica eventos de intensidad fuerte (barras grandes), moderada (barras medianas) e intensidad débil (barras pequeñas). Gráfica inferior barras azules indican la descarga líquida en volumen anual (km³.año⁻¹), elipses y del mismo color comparan años con diferentes eventos ENOS.

Análisis interanual de la carga en suspensión

La marcada diferencia en la producción de sedimentos entre los años 2000/2001 y 2003/2004 se atribuye a que durante el primer año hubo eventos excepcionales con altos picos de caudales líquidos a diferencia del segundo que no los hubo (Figura 6).

Se resalta la alta variabilidad interanual en la producción de sedimentos para la cuenca media-alta del río Santa y río Tablachaca (Tabla 3). En un balance anual, la estación Santa no se rige a un patrón que a mayor caudal mayor producción de sedimentos; el año 2005/2006 aporta el 51,7% y 70% del caudal sólido y líquido, respectivamente, en contraste a ello el año 2004/2005 aportó el 79% del caudal líquido, pero solo el 33% del caudal sólido.

Análisis de la producción de sedimentos en eventos ENOS

A pesar del corto periodo del monitoreo de la SY éste incluye un evento moderado de El Niño (2002/2003) que tuvo una SY similar a la que se produjo en una Niña de intensidad moderada (2007/2008) pero el año 2000/2001, clasificado como Niña de intensidad débil, se produjo +350% de lo que se produjo el año 2002/2003 catalogado por la NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>) como Niño de intensidad débil (Figuras 6 y 8).

Tabla 5. Metodologías planteadas para el cálculo anual de sólidos en suspensión.

Metodología	Virtudes	Limitaciones	Predictibilidad
1	Brinda las mejores estimaciones, cálculo directo (Ecuación 2); llena vacíos a partir de datos observados en las estaciones (Ecuación 3 y 4)	No se llena todos los vacíos, por ello es necesario emplear un modelo que genere caudales sólidos a partir de caudales líquidos.	No
2	Modelo generado con los datos de un año, refleja la dinámica de producción de sedimentos por ciclo hidrológico (Ecuación 4).	Es necesario tener caudales líquidos para poder generar a partir de éstos el caudal sólido.	No
3	Modelo interanual que se construyó a partir de toda la serie histórica de caudales y concentraciones (Ecuación 4).	En años extremos genera altos rangos de error en el cálculo anual de sedimentos.	Sí
4	Cálculo directo (Ecuación 2), cuando no hay información se deja en blanco para luego interpolar caudales sólidos.	No refleja la realidad mientras mayor sea el intervalo de tiempo.	No

Tasas de erosión y transporte de flujos sedimentarios

La tabla 4 muestra las altas cargas de MES promedio para la cuenca del río Tablachaca, además de la elevada erosión expresada mediante el caudal específico para la cuenca del río Tablachaca, su caudal sólido específico ($t.km^2.año^{-1}$) la ubican entre una de las cuencas más erosionadas del continente, después de las cuencas de los Andes orientales bolivianos (Guyot et al. 1996). De la cuenca media y alta del río Santa se puede resaltar que posee un abundante recurso hídrico (Figuras 3 y 8).

Importancia de la producción de sedimentos a nivel continental

La Figura 9 nos brinda un panorama del alto grado de erosión en los Andes; la cuenca del río Tablachaca se ubica entre las que tienen las tasas más altas de erodabilidad respecto a las cuencas que se originan en los Andes occidentales y desembocan en el océano Pacífico.

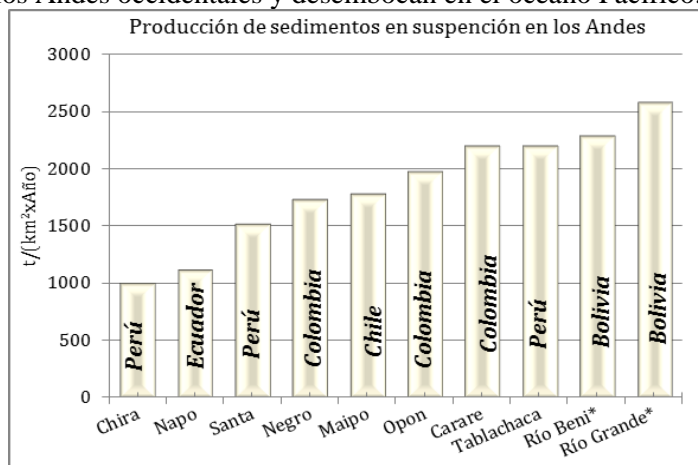


Fig. 9. Caudal sólido específico en la Cordillera de los Andes (Adaptado de Restrepo et al. 2006, Pepin et al. 2010, Laraque et al. 2004 & J.L. HYBAM 2011).

CONCLUSIONES

- Se caracterizó la hidrología en base a los caudales líquidos para el periodo 1977-2009 en la estación Condorcerro, cuya producción promedio anual es 4,16 km³ de las cuales el 60,3% es evacuado en época de lluvias (enero-abril), 26,2% en época de transición (mayo-junio, noviembre-diciembre) y 13,5% en estiaje (julio-octubre).
- La dinámica del transporte del MES al paso diario es muy compleja para la estación Condorcerro la cual aumenta de manera potencial al caudal líquido, no obstante existen eventos picos de descarga con diluciones, estos procedentes de la cuenca Tablachaca o la cuenca media-alta del río Santa que afectan la relación entre el caudal líquido y sólido.
- La producción promedio de la SY observada para la estación de Condorcerro (2000-2009) es de 15,1 millones de toneladas, de los cuales en época de lluvias se produce ~85%, ~13% en época de transición y ~2% en época de estiaje; dicha estación involucra un área de ~10 000 km² y se encuentra ubicada a 479 msnm en el cauce del río Santa.
- En la cuenca del río Santa el mayor aporte de la SY proviene de la cuenca Tablachaca con 58% y solo aporta 20,6% del caudal líquido; mientras la cuenca media y alta del río Santa (estación Santa) aporta el 42% de la SY y 71,4% del caudal líquido anual.
- La actividad acelerada de la microminería (dispersa en la cuenca), suelos altamente erosionables, pendientes muy accidentadas, escasa cobertura vegetal, el deterioro de la conservación de suelos y las precipitaciones generan un caudal específico de 1517 t año⁻¹ km⁻² proveniente de la cuenca media y alta del río Santa (~10 000 km²), pero la situación se agrava para la cuenca del río Tablachaca (~3200 km²) con 2205 t año⁻¹ km⁻².
- La sensibilidad de las SY a escala diaria e interanual en los eventos ENOS no presenta un patrón característico, no obstante solo en presencia de mega Niños (1982/83, 1997/98), éstos generan deslizamientos y altas descargas de caudal líquido y sólido, para el resto de años la cuenca es indiferente a este evento.

AGRADECIMIENTO

Al proyecto especial Chavimochic que proporcionaron información. El IRD que financió nuestro trabajo de investigación. La UNALM del Perú y a la familia HYBAM que laboran en “La Casita Verde” quienes colaboraron arduamente en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bagnold, R. (1966). Physiographic And Hydraulic Studies of Rivers. An approach to the sediment transport problem from general physics. *Geological survey professional paper*, 422:11-137.
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., Apaestegui, J., Zapata, M., Gomez, J. & Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Hydrology and Earth System Sciences, Discussion*, 8: 869-916.
- Dai, S., Yang, S. & Li, M. (2009). The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes. *Hydrological Sciences Journal*, 54(1): 135-145.
- Degens, E, Kempe, S & Richey, J. (1991). Biogeochemistry of Major World Rivers. Scientific Committee on Problems of the Environment, 42. 356 p.
- Ferguson, R. (1986). River Loads Underestimated by Rating Curves. *Water Resources Research*, 22:74-76.
- Georges, C. (2004). The 20th-Century Glacier Fluctuations in the Tropical Cordillera Blanca (Peru). *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 36(1): 100-107.
- Georges, C. (2009). Recent Glacier Fluctuations in the Tropical Cordillera Blanca and Aspects of the Climate Forcing. Doctor en Ciencias Naturales. University of Innsbruck. 169 p.
- Guyot, J.L., Filizola, N., Quintanilla, J. & Cortez, J. (1996). Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon. *Hydrological Sciences Journal*, 236: 55-63.
- Guyot, J.L., Armijos, E., Bonnet, M.P., Bourrel, L., Calmant, S., Cochonneau, G.I, Crave, A., De Oliveira, E., Espinoza, J.C., Espinoza, R., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., Lagane, C., Laraque, A., Lavado, W., Martinez, J.M., Moquet, J.S., Moreira-Turcq, P., Noriega, L., Pombosa, R., Ronchail, J., Seyler, F., Seyler, P., Sondag, F. & Vauchel, P. 2011. Hydrology and sediment transport in the Amazon basin, from the Andes to the ocean. International Conference on the Status and Future of the World's Large Rivers. 11-14 April 2011, Vienna.
- Henderson, K. A., Thompson, L. G., & Lin, P.N. (1999). Recording of El Niño in ice core δ18O records from Nevado Huascarán, Peru. *Journal of Geophysical Research*, 104:63-65.
- HYBAM (2011). IVth Scientific Meeting of the Environmental Research Observatory (ORE) HYBAM on the large Amazonian rivers. On line. <http://www.ore-hybam.org>. Lima. (Peru) 6-9 September 2011.
- Johnson, R., Bronsdon, R. & Collins, R. (1998). Initial design of a model for Himalayan river Sediments. Modelling Soil Erosion, Sediment Transport and Closely Related Hydrological Processes. *Hydrological Sciences Journal*, 249: 325-332.

- Laraque, A, Ceron, C, Armijos, E, Pombosa, R, Magat, P & Guyot J.L. (2004). Sediment yield and erosion rates in the Napo River basin: Ecuadorian Andean Amazon tributary. *Hydrological Sciences Journal*, 288: 220-225.
- Li, W. & Fu, R. (2004). Transition of the Large-Scale Atmospheric and Land Surface Conditions from the Dry to the Wet Season over Amazonia as Diagnosed by the ECMWF Re-Analysis. *American Meteorological Society*, 17:2637-2651.
- Matalas, N. & Jacobs, B. (1964). A correlation procedure for augmenting hydrologic data. Statistical studies in hydrology. *Geological Survey Professional Paper*, 434:E1-E7.
- MINEM (Ministerio de Energía y Minas, Perú). (1998). Estudio de evaluación ambiental territorial y de planeamiento para reducción o eliminación de la contaminación de origen minero en la cuenca del río Santa. Disponible en línea (<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/publicaciones/evats/santa/Santa.pdf>).
- Morera, S. (2010). Dinámica de la producción de sedimentos en la cuenca del río Santa. Tesis de Magister Scientiae en Recursos Hídricos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 98 p.
- Pepin, E., Carretier, S., Guyot, J. L. & Escobar, F. (2010). Specific suspended sediment yields of the Andean rivers of Chile and their relationship to climate, slope and vegetation. *Hydrological Sciences Journal*, 5(7): 1190-1205.
- Restrepo, J. D., Kjerfve, B., Hermelin, M. & Restrepo, J. C. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316: 213-232.
- Rocha A. (1999). "Control de material sólido en el sistema de aprovechamiento del Proyecto Especial CHAVIMOCHIC". Estudio ejecutivo para el proyecto Chavimochic. 20 pp.
- Rubey, W. (1933). Equilibrium conditions in debris-laden streams. *Transactions - American Geophysical Union*, 14:497-505.
- Vauchel, P. (2009). HYDRACCESS 4.5. Software para manejo y procesamiento de información hidrometeorológica. www.mpl.ird.fr/hybam/outils/hydraccess.
- Wai, M.M., Smith, E.A., Bessemoulin, P., Culf, A.D., Dolmand, A.J. & Lebel, T. (1997). Variability in boundary layer structure during HAPEX-Sahel wet-dry season transition. *Journal of Hydrology*, 188-189:965-997.
- Walling, D. (2009). The Impact of Global Change on Erosion and Sediment Transport by Rivers: Current Progress and Future Challenges. Water in a Changing World. UNESCO-IHP. Report 3. 26 p.